
Systemverständnis Nebelben

Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelben als
Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem
Tideelbe

ABSCHLUSSBERICHT

Systemverständnis Nebelben

Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelben als
Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem
Tideelbe

ABSCHLUSSBERICHT

BERICHTSZEITRAUM 04/2019 – 06/2023

Auftraggeber: **Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee**
Moorweidenstraße 14
20148 Hamburg

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Peter Fröhle
Dr.-Ing. Edgar Nehlsen

Projektbearbeitung: M.Sc. Diogo Mees Delfes Varela

Zitiervorschlag:

Nehlsen, E.; Varela, D.M.V; Hesse, R.; Fröhle, P. (2023): Systemverständnis Nebelben - Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelben als Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe. Abschlussbericht. Technische Universität Hamburg - Institut für Wasserbau. Hamburg.

Technische Universität Hamburg

Institut für Wasserbau

Denickestraße 22

D 21073 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Untersuchungsgebiet Nebelnelben	7
2.1	Hintergrund zur Entstehung der Nebelnelben	9
2.1.1	Entwicklung des Hochwasserschutzes	9
2.1.2	Entwicklung des Strombaus	10
2.2	Hahnöfer Nebelnelbe	14
2.2.1	Lage	14
2.2.2	Entstehung	14
2.2.3	Morphometrie	17
2.2.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	17
2.2.5	Morphologische Entwicklung	18
2.2.6	Unterhaltung	22
2.2.7	Ufersicherung	22
2.2.8	Naturschutzfachliche Bewertung	23
2.3	Lühesander Süderelbe	24
2.3.1	Lage	24
2.3.2	Entstehung	24
2.3.3	Morphometrie	25
2.3.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	25
2.3.5	Morphologische Entwicklung	26
2.3.6	Unterhaltung	29
2.3.7	Ufersicherung	29
2.3.8	Naturschutzfachliche Bewertung	30
2.4	Haseldorfer Binnenelbe	31
2.4.1	Lage	31
2.4.2	Entstehung	32
2.4.3	Morphometrie	34
2.4.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	34

2.4.5	Morphologische Entwicklung	34
2.4.6	Unterhaltung	38
2.4.7	Ufersicherung.....	38
2.4.8	Naturschutzfachliche Bewertung	38
2.5	Pagensander Nebeneibe.....	39
2.5.1	Lage.....	39
2.5.2	Entstehung.....	39
2.5.3	Morphometrie (Länge, Breite, Tiefe, Sohlsedimente)	45
2.5.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	45
2.5.5	Morphologische Entwicklung	46
2.5.6	Unterhaltung	51
2.5.7	Ufersicherung.....	51
2.5.8	Naturschutzfachliche Bewertung	52
2.6	Schwarztonnensander Nebeneibe.....	52
2.6.1	Lage.....	52
2.6.2	Entstehung.....	53
2.6.3	Morphometrie.....	54
2.6.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	55
2.6.5	Morphologische Entwicklung.....	55
2.6.6	Unterhaltung	59
2.6.7	Ufersicherung.....	59
2.6.8	Naturschutzfachliche Bewertung	60
2.7	Glückstädter Nebeneibe.....	60
2.7.1	Lage.....	60
2.7.2	Entstehung.....	61
2.7.3	Morphometrie.....	61
2.7.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	61
2.7.5	Morphologische Entwicklung.....	62
2.7.6	Unterhaltung	66
2.7.7	Ufersicherung.....	66

2.7.8	Naturschutzfachliche Bewertung	67
2.8	Wischhafener Nebenelbe / Wischhafener Fahrwasser	67
2.8.1	Lage	67
2.8.2	Entstehung	68
2.8.3	Morphometrie	69
2.8.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	69
2.8.5	Morphologische Entwicklung	70
2.8.6	Unterhaltung	74
2.9	Nebenarme in anderen Ästuaren	74
3	Aktueller morphologischer Zustand ausgewählter Nebenelben	78
3.1	Messkonzept zur Erhebung zusätzlicher Messdaten	78
3.1.1	Fächerecholotpeilungen	78
3.1.2	Laservermessung	80
3.1.3	Sedimentbeprobungen	83
3.1.4	Strömungsmessungen	86
3.2	Jahrestopographien	88
3.2.1	Hahnöfer Nebenelbe	90
3.2.2	Lühesander Süderelbe	92
3.2.3	Haseldorfer Binnenelbe	95
3.2.4	Pagensander Nebenelbe	97
3.2.5	Schwarztonnensander Nebenelbe	100
3.3	Morphologische Entwicklung	100
3.3.1	Hahnöfer Nebenelbe	102
3.3.2	Lühesander Süderelbe	116
3.3.3	Haseldorfer Binnenelbe	124
3.3.4	Pagensander Nebenelbe	131
3.3.5	Zusammenfassung	137
3.4	Unsicherheiten von digitalen Geländemodellen	141
4	Hydrodynamik im System Pagensander NE/Haseldorfer BE	148
4.1	Strömungsmessungen	148

4.2	Strömungsmodellierung	152
4.2.1	Übergeordnetes HN-Modell des Elbeästuars	152
4.2.2	Fokusgebietsmodell vom System Pagensander NE / Haseldorfer BE	157
4.3	Strömungsmuster Ist-Zustand	163
4.4	Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Strömung	178
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	185
6	Zusammenfassung.....	190
7	Schrifttum.....	193
A1	Literatur und Datenquellen.....	200
A2	Datenqualität	204
A3	Strömungsmessungen.....	238
A4	Steckbriefe Maßnahmen Nebelnelben.....	248

1 Einleitung

Das Institut für Wasserbau (IWB) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) führte im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee (WSA Elbe-Nordsee) im Zeitraum April 2019 bis Juni 2023 das Vorhaben „Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelnelben als Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe“ (kurz: Systemverständnis Nebelnelben) durch. Ziel des Vorhabens war es, die hydrodynamischen Prozesse und morphologischen Entwicklungen in den Nebelnelben-Systemen besser zu verstehen und damit einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses des Gesamtsystems Tideelbe zu leisten. Das im Vorhaben betrachtete Untersuchungsgebiet erstreckt sich von Elbe-Km 632 bis Elbe-km 683. Im Untersuchungsgebiet befinden sich die Hahnöfer Nebelnelbe, die Lühesander Süderelbe, die Haseldorfer Binnenelbe, die Pagensander Nebelnelbe, die Schwarztonnensander Nebelnelbe, die Glückstädter Nebelnelbe und das Wischhafener Fahrwasser (Abbildung 1).

Im Vorhaben wurden drei wesentliche Ziele verfolgt:

- 1 Verbesserte Einschätzung der Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelnelben auf der Grundlage von bestehenden Daten
- 2 Detaillierte Beschreibung der Morphologie sowie der morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelnelben auf der Grundlage von verfügbaren Daten sowie von im Zuge des Vorhabens neu aufgenommenen flächenhaften Daten
- 3 Numerische Modelluntersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses von hydrodynamischen und morphologischen Prozessen und deren Veränderungen infolge wasserbaulicher Maßnahmen in den Nebelnelben

Details zur Konzeption des Vorhabens, d.h. wie wurden diese Ziele erreicht, welche Anforderungen waren dabei zu erfüllen und welche Arbeitsschritte zur Erreichung des Ziels wurden konkret umgesetzt geben der erste (Nehlsen et al. 2020) bzw. der zweite Zwischenbericht (Nehlsen et al. 2021) zum Vorhaben. Bei der konkreten Ausgestaltung der Konzeption des Vorhabens wurden die vom WSA Elbe-Nordsee spezifizierten und im Forum Tideelbe diskutierten Anforderungen berücksichtigt, die im Kern auf dem Leitgedanken der Vereinbarkeit von Strombau und Naturschutz basieren.

Dieser Abschlussbericht umfasst neben der Einleitung in **Kapitel 1** und der Zusammenfassung in **Kapitel 6** vier wesentliche Kapitel:

In **Kapitel 2** wird das Untersuchungsgebiet eingehend beschrieben. Dabei wird die Historie der o.g. Nebelnelben anhand der verfügbaren Bestandsinformationen (Daten, Schrifttum) umfassend und im Detail beschrieben. Der derzeitige morphologische Zustand sowie aktuelle morphologische Entwicklungen der Hahnöfer NE, der Lühesander SE, der Haseldorfer BE sowie der Pagensander NE werden in **Kapitel 3** auf Grundlage aktueller räumlich und zeitlich hochaufgelöster Vermessungsdaten beschrieben, die im Rahmen des Vorhabens

erhoben wurden. Das **Kapitel 4** ist der detaillierten Beschreibung der Hydrodynamik im System Pagensander Nebeneibe – Haseldorfer Binneneibe gewidmet. Dazu werden sowohl Messdaten als auch die Ergebnisse von hydrodynamisch-numerischen Modelluntersuchungen ausgewertet. Ferner werden auch die Auswirkungen von Maßnahmen auf das hydrodynamische Geschehen im System analysiert und beschrieben. **Kapitel 5** umfasst die aus den Untersuchungsergebnissen abgeleiteten Schlussfolgerungen hinsichtlich der drei formulierten Ziele des Vorhabens und gibt Empfehlungen.

Der Anhang umfasst

- einen Überblick über die für die Bearbeitung von Kap. 2 verwendeten Unterlagen (A1),
- den Abschnitt Datenqualität (A2),
- einen Überblick über die im Vorhaben durchgeführten Strömungsmessungen (A3) sowie
- einen Überblick über die im Vorhaben er- und bearbeiteten Maßnahmen in Form von Steckbriefen

2 Untersuchungsgebiet Nebelben

Die Tideelbe verläuft zwischen dem Hamburger Hafen und der Nordsee in Form einer durchgehenden Hauptrinne. Von dieser zweigen abschnittsweise Nebenrinnen ab, die Inseln umströmen und als Nebelben (abgekürzt NE) bezeichnet werden. Die Nebelben sowie die Inseln sind in ihrer aktuellen Form stark geprägt durch die Maßnahmen zur Vertiefung und Regulierung des Stromes sowie des Hochwasserschutzes in der Vergangenheit.

Die Nebelben befinden sich im Abschnitt zwischen Elbe-km 632 und Elbe-km 683, weshalb dieser Raum als Untersuchungsraum festgelegt wurde (Abbildung 1) Hierin befinden sich die Hahnöfer NE, die Lühesander Süderelbe, die Haseldorfer Binnenelebe, die Pagensander NE, die Schwarztonnensander NE sowie die Glückstädter NE. Im Fall der Wischhafener Nebelbe bzw. des Wischhafener Fahrwassers handelt es sich gegenwärtig nicht um eine Nebelbe im eigentlichen Sinne, da die Nebenrinne durch eine Wattfläche und nicht durch eine Insel vom Hauptstrom getrennt wird. Aufgrund ihrer Historie wird sie jedoch im Rahmen der Untersuchungen mitbetrachtet.

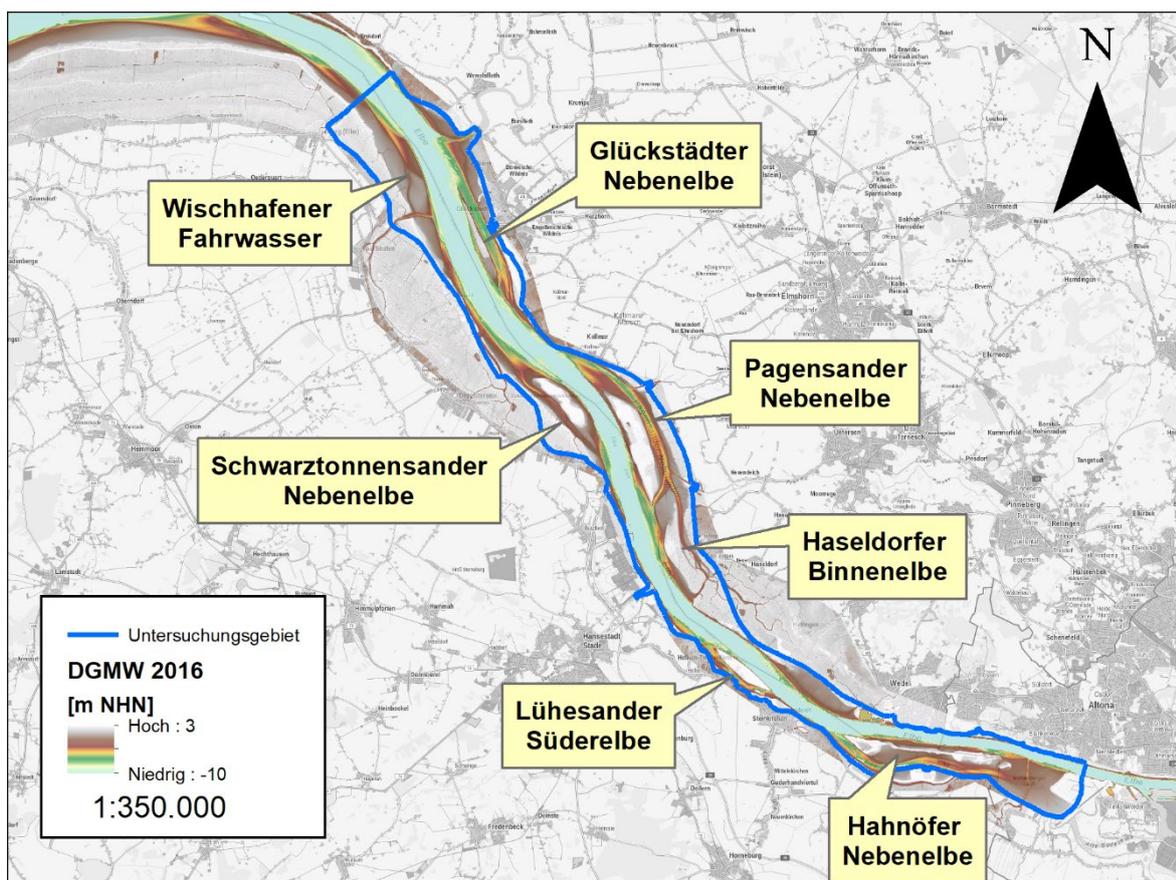


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet zwischen Elbe-Km 632 und 683 (Blau; entspricht in etwa MThw-Linie bzw. der Deichlinie)

Alle Nebeneiben weisen neben ihrer namensgebenden Eigenschaft (Nebenrinne durch eine Insel bzw. mehrere Inseln vom Hauptstrom getrennt) weitere Gemeinsamkeiten auf. Unter anderem ist der Fließquerschnitt der Nebenrinnen deutlich kleiner als der der Hauptrinne, was sowohl auf eine geringere Wassertiefe als auch eine geringere Breite zurückzuführen ist. Zudem sind die Nebenrinnen an zwei Stellen mit der Hauptrinne verbunden, wobei die Pagensander NE und die Haseldorfer BE als zusammenhängendes System eine Besonderheit darstellen (vgl. Kapitel 2.4 und 2.5).

Neben den Gemeinsamkeiten gibt es auch Unterschiede zwischen den Nebeneiben, z.B. in der Morphologie (Länge, Breite, Tiefenverteilung, Sohlstruktur) und der Sedimentologie (Korngrößen Sohlmaterial). Im Rahmen des Vorhabens werden alle NE betrachtet, wobei sich die vertiefenden Untersuchungen im Vorhaben auf ausgewählte NE konzentrieren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht zur Untersuchung ausgewählter Nebeneiben (NE) im Vorhaben

AP	Arbeiten	Betrachtete Nebeneiben
2	Allg. Beschreibung: Lage, Entstehung, Morphometrie, Hydrodynamik und Sedimenttransport, Hydrologie, Morphologie, Unterhaltung, Ufersicherung, naturschutzfachliche Bewertung auf Grundlage einer umfassenden Daten- und Schrifttumsanalyse	Alle NE im Untersuchungsgebiet (Abbildung 1)
2	Konzeption und Durchführung von Messungen zur Verbesserung der Datengrundlage: Fächerecholotpeilungen, Strömungsmessungen, Sedimentbeprobungen, Drohnenbefliegung Detaillierte Beschreibung der Morphologie und der aktuellen morphologischen Entwicklung	Hahnöfer NE Lühesander NE Pagensander NE und Haseldorfer BE
3 und 4	Detaillierte Analyse der Strömungsverhältnisse und Untersuchung von Maßnahmen zur Beeinflussung der Strömungsverhältnisse	Pagensander NE und Haseldorfer BE

2.1 Hintergrund zur Entstehung der Nebelben

Die heutige Gestalt der Tideelbe mit einer Hauptrinne und abschnittsweise abzweigenden Nebenrinnen ist in vor allem in Verbindung mit strombaulichen Maßnahmen in der Tideelbe, aber auch einhergehend mit Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes der Elbmarsch entstanden. Für einen besseren Überblick werden die jeweiligen Entwicklungen im Bereich der Tideelbe beschrieben, wobei der Fokus auf den Nebelben, beziehungsweise auf den Stromabschnitten, in denen die Nebelben entstanden sind, liegt.

2.1.1 Entwicklung des Hochwasserschutzes

Nach Kappenberg und Fanger (2007) gehen erste Deichbauten im Gebiet der Tideelbe auf das 11. Jahrhundert zurück. Im Laufe der Zeit wurde die Deichlinie entlang der Tideelbe und ihrer Nebenflüsse geschlossen, erhöht und verkürzt, stets mit dem Ziel, den Schutz der Elbmarschen vor Überflutungen zu verbessern und Schäden im Bereich der Landwirtschaft sowie an Siedlungen und Häfen zu vermeiden. Die Nebelben bzw. die Stromabschnitte, in denen die Nebelben entstanden sind, wurden durch diese Maßnahmen in mehrfacher Hinsicht beeinflusst. Direkte morphologische Änderungen wurden durch die Entnahme von Material für den Deichbau verursacht, wie z.B. im Bereich der Pagensander Nebelbe (s. Kapitel 2.5). Indirekt haben auch Maßnahmen wie die Verkürzung der Deichlinie und der Bau von Sturmflutsperrwerken die Hydrologie (Durchfluss, Strömungsgeschwindigkeiten) und in der Folge die Morphologie (Schwebstoffgehalt, Verlandung, Erosion) in der gesamten Tideelbe und damit auch in den Nebelben beeinflusst, indem durch die Maßnahmen vor allem Auenfläche bzw. Tidevolumen verloren ging (Abbildung 2). Das Ausmaß des Verlustes an Auenfläche entlang der Tideelbe, die im Sturmflutfall überschwemmt wird, wird von EICHWEBER (2005) zu 98% zwischen dem Jahr 1000 n. Chr. (ca. 2500 km²) und der Jahrtausendwende angegeben. Mit dem Deichbau nahm auch der Sedimenteintrag in die Aue von etwa 5 Mio. m³/a vor dem Deichbau auf 500.000 m³/a im Jahr 1955 und 100.000 m³/a im Jahr 2005 ab (ebd.). Beispiele für eine signifikante Beeinflussung von Nebelbensystemen durch Maßnahmen des Hochwasserschutzes sind die Hahnöfer Nebelbe, die durch den Bau des Este-Sperrwerks und die Abdämmung der Alten Süderelbe beeinflusst wurde, sowie das System Pagensander Nebelbe / Haseldorfer Binnelbe, das durch den Bau der Mündungssperrwerke an der Pinnau und der Krückau, die Abdämmung von Teilen der Haseldorfer Binnelbe und die Entnahme von Material für den Deichbau deutlich verändert wurde (Details siehe Kapitel 2.2, 2.4 und 2.5).

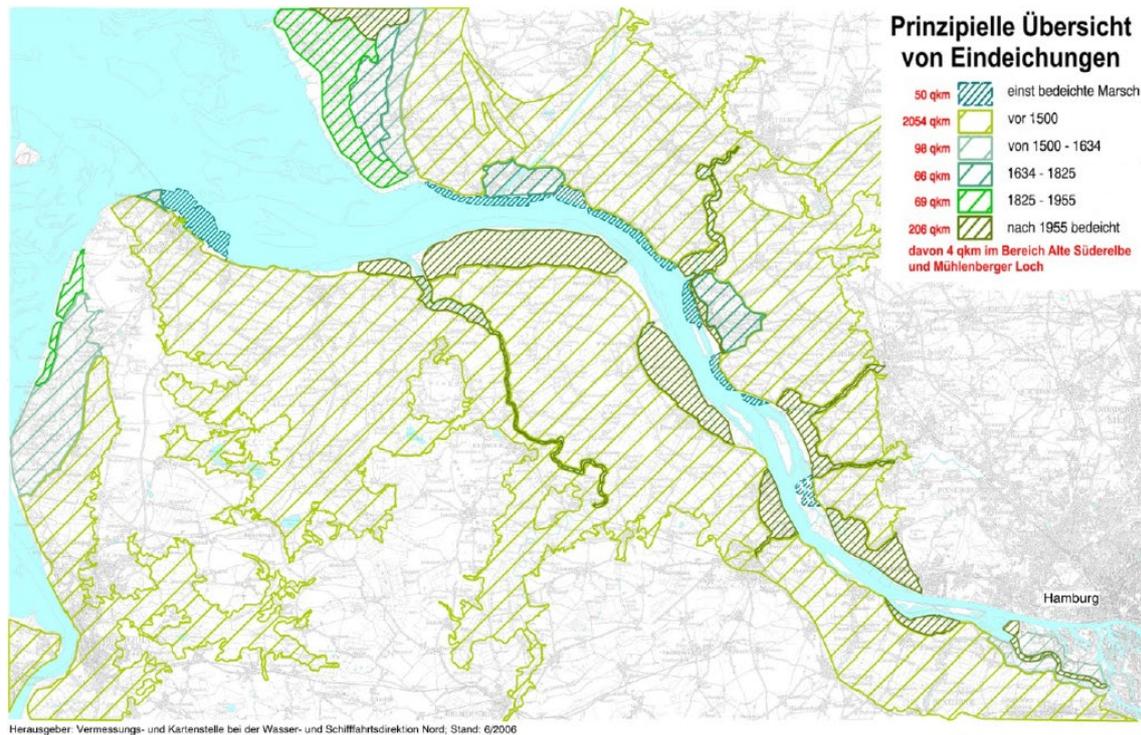


Abbildung 2: Verlust von Überschwemmungsflächen durch den Deichbau seit dem Jahr 1500 n. Chr. (Quelle: Boehlich und Strotmann (2019))

2.1.2 Entwicklung des Strombaus

Ein größerer Einfluss als aus den Maßnahmen zum Hochwasserschutz resultierte aus den Maßnahmen zur Vertiefung des Fahrwassers und insbesondere aus den Maßnahmen zur Stromregulierung, ohne die es die Nebelnelben in der heutigen Form nicht geben würde.

Mit dem Ziel, den Hauptstrom zu stärken und damit die Schiffbarkeit zu verbessern, wurden verschiedene Eingriffe vorgenommen, um Strömungen, Inselmorphologie und Wechselwirkungen zwischen dem Hauptarm der Elbe und ihren Seitenarmen zu steuern. Erste derartige Maßnahmen fanden im 15. Jahrhundert statt mit kleineren Inseldurchstichen und Stromregulierungsmaßnahmen, einschließlich der Abtrennung kleinerer Flussarme (Kapfenberg und Fanger 2007). Allerdings war das Ausmaß der Eingriffe bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts durch die – im Vergleich zur heutigen Technik kleinen – Maschinen äußerst begrenzt, so dass der morphologische Zustand der Tideelbe in dieser Zeit noch dem Zustand gegen Ende des 17. Jahrhunderts (Abbildung 3) entsprach.



Abbildung 3: Karte der Unterelbe aus dem Jahr 1695 (Quelle: Kappenberg und Fanger (2007))

Größere Eingriffe wurden durch den Einsatz von leistungsfähigen Dampfbaggern möglich. Der Einsatz dieser Geräte begann im Jahr 1834 mit der Tiefenunterhaltung bzw. der Vertiefung der Tideelbe im Bereich des Hamburger Hafens. Der Einsatzbereich der neuen Bagger wurde stetig ausgeweitet, so dass im Jahr 1897 für die Schifffahrt (Fahrrinnen- bzw. Fahrwasser- und Hafenbereiche) in der gesamten Unterelbe eine durchgehende Wassertiefe von 7,9 m unter MThw erreicht worden war, was die Grenze des technisch Machbaren zum damaligen Zeitpunkt darstellte. (vgl. Schätzler und Meisel 1937)

Basierend auf der Erkenntnis, dass zur dauerhaften Verbesserung der Schifffahrt Stromregulierungsarbeiten notwendig waren, begann die Stadt Hamburg gegen Ende des 19. Jahrhunderts damit, größere Eingriffe zur Stromregulierung zu planen und durchzuführen. Die rechtliche Grundlage hierfür bildeten Staatsverträge mit Preußen, die Hamburg dazu berechtigten zunächst im Abschnitt Altona (Elbe-km 624) bis Finkenwerder (Elbe-km 632,5) und anschließend im Abschnitt Neumühlen (Elbe-km 626) bis Brunshausen (Elbe-km 655) strombauliche Maßnahmen umzusetzen, mit dem Ziel einer Fahrwassertiefe von 10 m unter MTnw herzustellen. Auch stromab von Brunshausen war Hamburg berechtigt, dieselbe Tiefe auf einer (Fahrrinnen-)Breite von 400 m herzustellen. Die Staatsverträge mit Preußen waren erforderlich, da beide Elbufer seit dem Jahr 1866 unter preußischer Zuständigkeit fielen. (vgl. Schätzler und Meisel 1937)

Der Stromabschnitt zwischen Hamburg und Stadersand (bzw. Brunshausen) galt zu Beginn des 20. Jahrhunderts aufgrund seiner stark wechselnden Breiten und Verzweigungen als „verwildert“. Mit Bühnen und Längswerken sollten Flut- und Ebbestrom auf die Hauptrinne

konzentriert werden, um diesen mehr „Spülkraft“ zu verleihen. Das größte Bauwerk in diesem Abschnitt war das 8 km lange Längswerk, das durch die Verbindung der Inselketten Hanskalbsand und Neßsand entstanden war und fortan die Hahnöfer Nebelbe von der Hauptrinne trennte. In diesem Abschnitt wurde die Strömung im Hauptstrom spürbar gestärkt (vgl. Keil 1985).

Als die territoriale Zuständigkeit für die Elbe im Jahr 1921 auf Grund der Weimarer Verfassung in die Verwaltung der Reiches übergang, war des Ziel einer Fahrwassertiefe von 10 m zwischen Hamburg und der Nordsee mit zwei Ausnahmen im Wesentlichen erreicht (Schätzler und Meisel 1937). Die beiden Ausnahmen waren die Abschnitte Pagensand/Schwarztonnensand (Abschnitt Pinnaumündung - Krückaumündung) und Ostebank (Abschnitt Brunsbüttel - Ostemündung) (ebd.). Die erforderlichen Arbeiten zur Stromregulierung in diesen beiden Abschnitten wurden zwischen 1922 und 1938 durch die Reichwasserstraßenverwaltung durchgeführt (Keil 1985).

Mit der hergestellten Fahrwassertiefe von 10 m bei MTnw war es bis in die 1950er Jahre hinein nahezu jedem Schiff möglich, den Hamburger Hafen anzufahren. Mitte der 1950er Jahre setzte ein „stürmisches Anwachsen der Tankergrößen“ und nachfolgend eine „ähnliche Entwicklung bei den Erzschiffen“ ein. Diesen Entwicklungen wurde mit zwei Elbvertiefungen, dem 11m-Ausbau (1957 - 1962) und dem 12m-Ausbau (1964 - 1969) in Kombination mit dem Bau der Staustufe bei Geesthacht begegnet. Mit dem Aufkommen des neuen Stückguttransportsystems Container Mitte der 60er Jahre erwuchs zudem die Anforderung, dass Containerschiffe den Hamburger Hafen auch wieder beladen verlassen mussten. Die besondere Herausforderung bei der Fahrt in Richtung stromab war, dass die Schiffe nicht mit der Flutwelle fahren konnten. Stattdessen mussten sie im Verlauf der Fahrt ein Niedrigwassertal passieren. Aufgrund von Prognoserechnungen und wasserbaulichen Modellversuchen fiel die Entscheidung, das Hauptfahrwasser um 1,5 m auf 13,5 m unter MTnw zu vertiefen, wobei 40 Mio. m³ Material bewegt werden mussten. Zum Erhalt eines natürlichen Stromregimes und des Landschaftsbildes wurde entschieden, alle Nebelben offen zu halten, obwohl man sich durch deren Abdämmung eine Verbesserung der Strömungsverhältnisse im Hauptfahrwasser erwartete. (vgl. Keil 1985)

Es folgten zwei weitere Fahrrinnenanpassungen in den Jahren 1999/2000 auf 14,5 m unter MTnw (BfG 2006) und 2019 - 2021 (WSV 2020).

Mit den großen Mengen an Aushubmaterial, die im Rahmen der Fahrrinnenanpassungen anfielen, wurden u.a. Ufer und Wattflächen vor- bzw. aufgespült aber auch Sandbänke über das MThw hinaus zu Inseln aufgehöhht und bestehende Inseln vergrößert (Schätzler und Meisel 1937; Kappenberg und Fanger 2007). Somit waren die Nebelben direkt von den Maßnahmen zur Fahrrinnenanpassung betroffen bzw. waren sogar Bestandteil des Maßnahmenpaketes.

Hinsichtlich der Verbringung bildet die letzte Fahrrinnenanpassung von 2019 - 2021 eine Ausnahme, da das Aushubmaterial fast ausschließlich in einen Bereich verbracht wurde, der sich stromab der Nebelnelben befindet (WSV 2020). Gleichwohl ist z.B. die Schwarztonnensander NE Teil des gesamten Maßnahmenpaketes, indem die Rinne hinter Schwarztonnensand im Zuge einer aquatischen Ausgleichsmaßnahme vertieft wird (ebd.) (s.a. Kapitel 2.6).

Diese Ausgleichsmaßnahme steht beispielhaft für das grundlegende Umdenken im Strombau an der Tideelbe, dessen Leitbild sich von der Schaffung einer einzelnen gut durchströmten Hauptrinne hin zu einer vitalen Tideelbe, in der ein „ausgewogenes Verhältnis zwischen Ebbe und Flut“ (Forum Tideelbe 2020) vorherrscht, gewandelt hat. Ein Baustein zur Zielerreichung ist im Bereich der Nebelnelben verortet. Das im Strombau- und Sedimentmanagementkonzept formulierte Ziel „Schaffung aktiver Nebenrinnensysteme“ (HPA und WSA HH 2008), d.h. die Erhöhung des Durchflusses bzw. der Durchströmung der Nebenrinnen, wodurch gleichzeitig eine bremsende Wirkung im Bereich der Hauptströmung bewirkt wird, wurde auch im Forum Tideelbe aufgegriffen, weiter verfeinert und als eine von 6 Maßnahmen empfohlen (vgl. Forum Tideelbe 2020).

2.2 Hahnöfer Nebeneibe

2.2.1 Lage

Die Hahnöfer Nebeneibe erstreckt sich linksseitig der Hauptrinne zwischen Elbe-km 633 und Elbe-km 644 (Abbildung 4) und ist damit die am weitesten stromauf gelegene Nebeneibe. Die stromaufseitige Verbindung zur Hauptrinne der Elbe weitet sich stark auf und geht über in eine ausgedehnte Wattfläche, das Mühlenberger Loch. Diese Wattfläche wird durch das in Nord-Süd-Richtung verlaufende Este-Fahrwasser durchschnitten, das regelmäßig unterhalten wird.

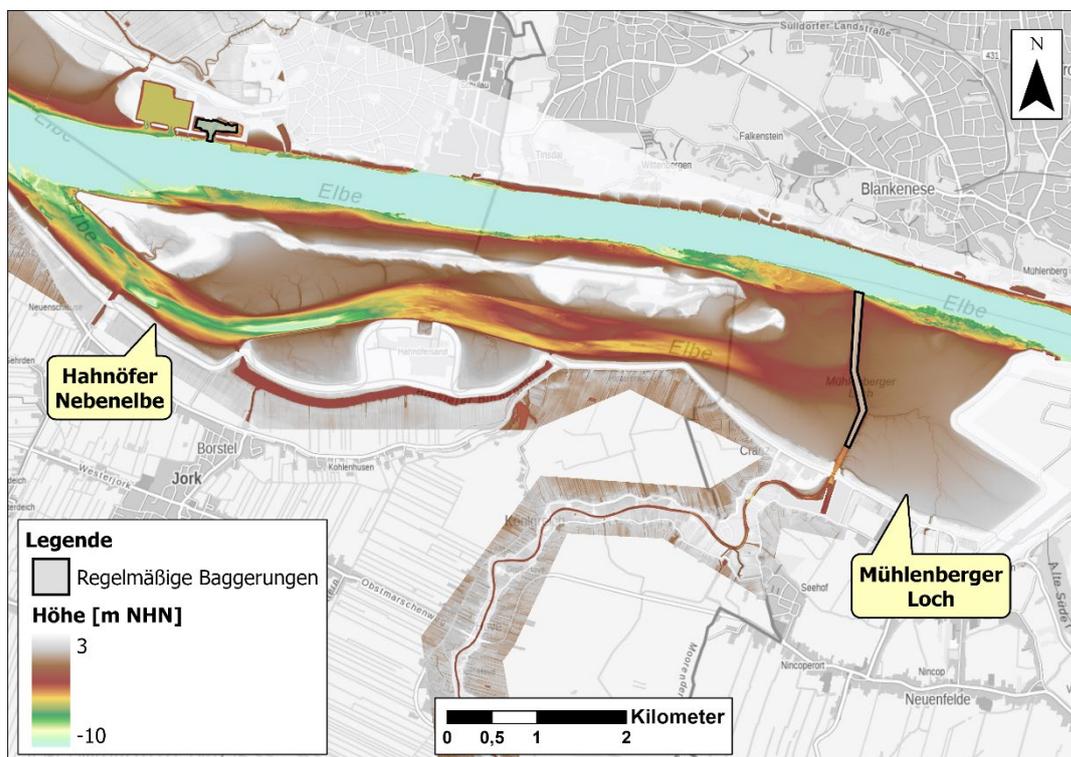


Abbildung 4: Bathymetrie der Hahnöfer Nebeneibe und des Mühlenberger Lochs und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Datenquelle: DGM-W 2016, WSA Elbe-Nordsee)

2.2.2 Entstehung

Die Inselkette, die heute die Hahnöfer Nebeneibe von der Fahrrinne trennt, entstand aus den ehemaligen Inseln Hanskalbsand, Schweinesand und Neßsand, von denen nur die beiden erstgenannten vor 1911 existierten. Den Inseln vorgelagert war eine kleine tiefere Rinne, die von vielen Sandbänken und Untiefen gesäumt wurde (Abbildung 5). Zwischen den Inseln und dem Hahnöfer Sand erstreckte sich ein weiträumiges Gebiet mit verzweigten flachen Rinnen. Eine ausführliche Beschreibung der Entstehung der Inselkette und der

Hahnöfer Nebelbe ist den Werken verschiedener Autoren zu entnehmen, u.a. (Marnitz 1995; BOEHLICH 2003; Boehlich und Strotmann 2019; Boehlich und Strotmann 2008).

Boehlich und Strotmann (2019) beschreiben die Entwicklung wie folgt:

„Durch den Bau eines 7,5 km langen Leitdamms zwischen Schweinsand und Hanskalbsand wurde die natürliche quer gerichtete Sanddrift in die Fahrrinne hinein verhindert. Die grundlegende Form der Inselgruppe wurde bereits 1911 geschaffen, als auf der Südseite des Leitdamms die Verklappung von Sand auf Tidemittelwasserniveau erfolgte. Im Zuge späterer Fahrriennausbauten erfolgte die Aufhöhung der Insel zu ihrer heutigen Höhe. Auf der westlichen Seite von Schweinsand entstand bis 1968 die neue Insel Neßsand. Während des Ausbaus der Fahrrinne im Jahr 1969 wurden die Inseln Hanskalbsand, Neßsand und Schweinsand miteinander verbunden. Heute bilden sie eine einzige zusammenhängende Insel zwischen der Hauptelbe und der Hahnöfer Nebelbe.“ (Boehlich und Strotmann 2019).

Im Ergebnis wurde die starke Querströmung erfolgreich reduziert, jedoch musste die Fahrrinne regelmäßig ausgebaggert werden, um die Wassertiefe zu erhalten (BOEHLICH 2003).

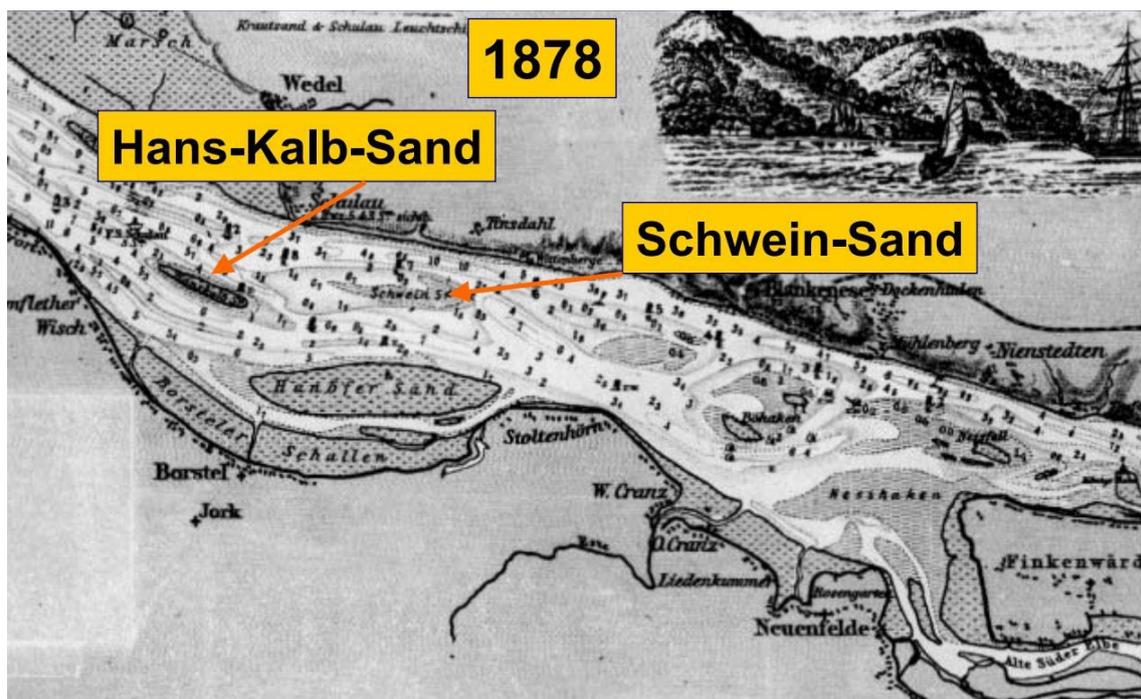


Abbildung 5: Abschnitt der Tideelbe im Bereich der heutigen Hahnöfer Nebelbe im Jahr 1878 (Quelle: BOEHLICH (2003))

Das Mühlenberger Loch am östlichen Ende der Hahnöfer Nebelbe wurde in den Jahren 1940/41 als Landebahn für Wasserflugzeuge angelegt. Es handelt sich um ein Süßwasserschwemmland, das im Norden durch die Fahrrinne begrenzt wird. Von Süden her wird es durch

die Außeneste gequert. Im Südosten mündete bis 1962 die Alte Süderelbe. Durch die Abdämmung der Alten Süderelbe im Jahr 1962 wurden die Strömungsverhältnisse in großen Teilen des Mühlenberger Lochs weiter beruhigt, so dass sich in der Folge vor allem in den ufernahen Bereichen große Mengen an Sediment ablagerten. (vgl. Marnitz 1995).

Ab 2001 fand eine Teilverfüllung des Mühlenberger Lochs statt, um eine Flugzeug-Landebahn auszubauen (IBP Arbeitsgruppe 2011b).

Als Ausgleichsmaßnahme für die Fahrrinnenanpassung (1999/2000) sowie für die Teilverfüllung des Mühlenberger Lochs wurde eine bis zu 2,5 m unter KN, 125 m breite und ca. 7 km lange Rinne im Bereich des Übergangs der Hahnöfer Nebelbe zum Mühlenberger Loch hergestellt. Diese Maßnahme sollte der Reduzierung der Sedimentation und der Stabilisierung der Flachwasserzonen (0-2 m unter MTnw) in Teilen der östlichen Hahnöfer Nebelbe und im Mühlenberger Loch dienen. (vgl. (BfG 2002a; WSA HH und HPA 2005; WSV 2008)).

Das angestrebte Kompensationsziel wurde jedoch nicht erreicht und die Rinne auch nicht mehr unterhalten (IBP Arbeitsgruppe 2011b), so dass diese verlandete (vgl. Kapitel 3.3.1). Im aktuellen Geländemodell (Abbildung 4) ist die beschriebene Rinnenstruktur nicht zu erkennen.

Die zahlreichen anthropogenen Eingriffe haben die Morphologie und die Morphodynamik der Hahnöfer Nebelbe (einschließlich Mühlenberger Loch) im Laufe der Zeit stark verändert (Marnitz 1995). Einen chronologischen Überblick über Baumaßnahmen im Bereich der Hahnöfer Nebelbe gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Ausgewählte Baumaßnahmen im Bereich der Hahnöfer Nebelbe (aus Marnitz (1995) modifiziert und erweitert um Informationen aus BfG (2002a) sowie WSA HH und HPA (2005))

Jahr	Maßnahme
1939	Großflächige Baggerung im Bereich des heutigen Mühlenberger Lochs
1959	Bau des (Inneren) Este-Sperrwerks (rd. 1,2 km oberhalb der Mündung)
1964 - 66	Bau des neuen Hauptdeiches vor Cranz Entnahme von 300000 m ³ Sand im westlichen Mühlenberger Loch vor Cranz
1967	Bau des (Äußeren) Este-Sperrwerks (an der Mündung)
1969 - 70	Bau des Neßleitdamms (Leitdamm, der zu Neßsand wurde)
1972 - 75	Aufspülungen im ehemaligen Neßhafen: rd. 1,5 Mio.m ³ Mischboden aus dem Hafen und dem Mühlenberger Loch.
1972 - 77	Aufspülung der „Sichel“ am Ostende des heutigen Neßsand
1973 - 74	Entnahme von 1,2 Mio. m ³ Material aus der Hahnöfer Nebelbe für den Deichbau auf Hahnöfersand
1974	Absperrung der Borsteler Binnenelbe bei Eindeichung des Hahnöfer Sandes

1974 - 78	Spülfeld Hanskalbsand (1974 – 78) Aufspülung Neßsand mit Querschnittseinengung (1977-78)
1976	Einbringen von 80.000 m ³ Schlack in das Mühlenberger Loch
1980	Ufer der Hahnöfer Nebelbe ca. 20 m breit vorgespült
2000 - 03	Bau einer 125 m breiten und 2,5 m tiefen Rinne im Übergangsbereich zwischen Hahnöfer Nebelbe und Mühlenberger Loch.
2001 - 03	Verfüllung von ca. 170 ha (1/5 der Gesamtfläche) im Nordosten des Mühlenberger Lochs

2.2.3 Morphometrie

Mit über 10 km Länge gehört die Hahnöfer Nebelbe zusammen mit der Pagensander Nebelbe zu den längsten Nebelben.

Die Breite im sublitoralen Bereich beträgt etwa 100 – 500 m. Die Hahnöfer Nebelbe ist gekennzeichnet durch Wattbereiche (Mühlenberger Loch, tiefe Rinnen (vor allem in der westlichen Hälfte) und flache Uferstrukturen. Die Rinnen weisen Wassertiefen zwischen 0,5 m und 4,5 m unter KN auf. Insgesamt nimmt die Tiefe von Westen nach Osten, also in Flutstromrichtung, ab. Am östlichen Ende weitet sich die Hahnöfer NE zum Mühlenberger Loch auf. Eine Barre am Übergang zum Mühlenberger Loch behindert das freie Ein- und Ausschwingen der Tidewelle. (vgl. BfG 2002b)

Die aus der Sohle der Hahnöfer Nebelbe entnommenen Sedimentproben weisen einen höheren Sandanteil im Sohl sediment auf als andere Nebelben, wie z.B. die Pagensander Nebelbe (BfG 2008).

2.2.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Vor allem aufgrund der unterschiedlichen Geometrien von Hauptrinne und Nebelbe kommt es in dem etwa 10 km langen Abschnitt zu Laufzeitdifferenzen, die insbesondere bei einsetzendem Flutstrom deutlich werden. Die in der Hauptrinne schneller fortschreitende Flutwelle trifft im stromaufgelegenen Übergangsbereich auf die in der Nebelbe langsamer fortschreitende Flutwelle (ENTELMANN 25.09.18). Die sich ausbildenden zeitweise beruhigten Strömungsverhältnisse begünstigen die Bildung einer Barre sowie Verlandungstendenzen (ebd.).

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Hahnöfer Nebelbe und Hauptelbe wurde anhand von Messdaten (überwiegend einzelne Tagesmessungen im Zeitraum 2000 - 2010) bestimmt zu 0,18 bei Flut und 0,17 bei Ebbe (ENTELMANN 12.02.19a).

Eine andere Auswertung der BfG (die vermutlich auf Teilen der zuvor genannten Datenreihe basiert) ergab ein Verhältnis von 0,15 – 0,2 bei Ebbe und bis zu 0,3 bei Flut. Mit den vergleichsweise großen Abflussanteilen bei Flut und Ebbe gehört die Hahnöfer Nebelbe zu den besser durchströmten Nebelben.

Der Vergleich der oberflächennahen Schwebstoffkonzentration (aus Hubschrauberlängsprofilen der ARGE ELBE) zwischen Hahnöfer Nebenelbe und Hauptelbe zeigt in beiden Abschnitten dieselbe Größenordnung, was auf einen gut durchmischten Wasserkörper und einen intensiven Wasser- und Materialaustausch zwischen Haupt- und Nebenrinne hindeutet. (vgl. BfG 2008)

Kerner (2007) hat in seiner Arbeit verfügbare Datensätze zu Strömungsgeschwindigkeiten ausgewertet (Kerner 2007). Dabei handelte es sich um punktuelle Kurzzeitmessungen (2-3 Tage) im Bereich der Hauptrinne sowie im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe und Lühesander Süderelbe für Zeiträume von und nach der Fahrrinnenanpassung 1999/2000. Im Ergebnis kommt der Autor für die Hahnöfer Nebenelbe zu dem Schluss, dass die Ebbestromgeschwindigkeit infolge der Anpassung um 25% abnahm, während die Flutstromgeschwindigkeit um 20% zunahm (ebd.). Letzteres begründet Kerner allerdings mit den Maßnahmen im Bereich des Mühlenberger Lochs aus dem Jahr 2002 (ebd.). In Anbetracht der eingeschränkten Repräsentanz von punktuellen Kurzzeitmessungen erscheint diese Aussage wenig fundiert (s.a. Erläuterungen in Kapitel 2.3.4).

2.2.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe (inklusive des Mühlenberger Lochs) über die Zeit werden in der Gegenüberstellung der morphologischen Einheiten deutlich (Abbildung 6), die für die Jahre 1900, 1950 und 1995 aus historischen Karten abgeleitet wurden. Die Klassifizierung in Tiefwasser-, Flachwasser-, Watt-, Vordeich und Nebenflussvordeichflächen erfolgte auf Grundlage von Höheninformationen aus digitalisierten Seekarten und Vermessungsdaten. Die Einteilung in die Klassen erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen Tidekennwerte (MThw und MTnw), die allerdings nicht im Detail angegeben und somit, genauso wie die Grenzen für die Zuordnung zu einzelnen Klassen, unbekannt sind. Da die Auswertung die gesamte Tideelbe umfasst, ist davon auszugehen, dass für den gesamten Bereich einheitliche Tidekennwerte verwendet wurden, ob diese über die unterschiedlichen Jahresscheiben variieren, ist unklar. Aus genannten Gründen ist von quantitativen Vergleichen sowie Analysen kleinräumiger Veränderungen abzusehen. Die Analysen von großräumigen Veränderungen und die Ableitung von Tendenzen sind hingegen möglich. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

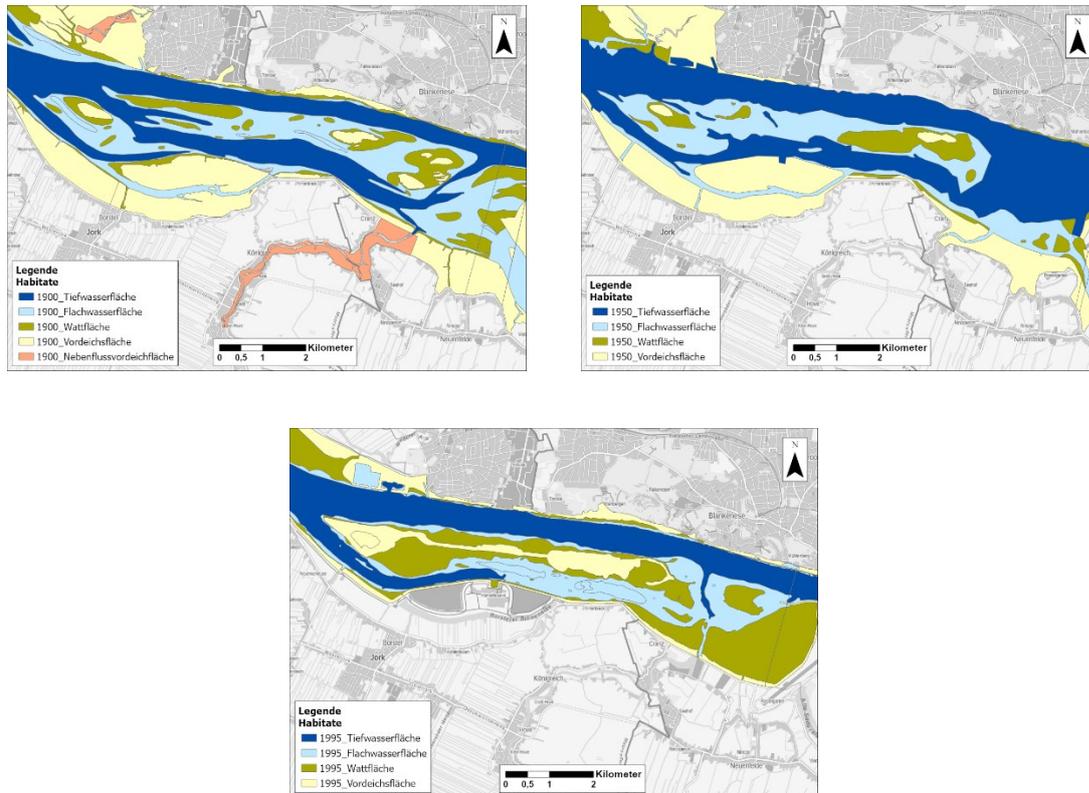


Abbildung 6: Morphologische Einheiten im Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe und des Mühlenberger Lochs im 20. Jahrhundert (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

Die Betrachtung der 3 Zeitscheiben 1900, 1950 und 1995 zeigt insbesondere zwischen 1950 und 1995 deutliche Änderungen. In diesem Zeitraum hat die Tiefwasserfläche in der Hahnöfer Nebelnelbe insgesamt deutlich abgenommen. In der Folge ist im Jahr 1995 keine durchgehende Tiefwasserfläche in der Nebenrinne mehr vorhanden. Diese endet von Unterstrom ausgehend etwa in der Mitte der Inselkette. Die östliche Hälfte ist nun als Flachwasserfläche und das sich anschließende Mühlenberger Loch als Wattfläche klassifiziert. Nur das Este-Fahrwasser, das regelmäßig unterhalten wird, ist noch als Tiefwasserfläche zu erkennen.

Entlang der Inselkette sind zwischen 1950 und 1995 sowohl strom- als auch landseitig ebenfalls Wattflächen entstanden. Zudem ist für das Jahr 1995 eine durchgehende Vordeichsfläche entlang der Inselkette zu erkennen, die in der Mitte des Jahrhunderts noch nicht vorhanden war. Auffällig ist zudem, dass in der Darstellung für 1950 keine durchgehende Verbindung zwischen den Inseln zu erkennen ist, obwohl laut mehrerer Quellen (u.a. Keil 1985) bereits 1911 ein 8 km langes Längswerk fertiggestellt worden war.

FRÄSDORF (1995) hat für verschiedene Zeitpunkte im Zeitraum 1956 - 1995 eine volumetrische Auswertung für den Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 7 dargestellt sind. Vor allem für den Zeitraum zwischen 1956 und 1975 ist eine

deutliche Verlandungstendenz auszumachen, die sich auch bis 1992 fortsetzt. Auch im letzten (kurzen) Zeitraum (1992 - 1995) ist tendenziell eine Verlandungstendenz erkennbar. Im Rahmen der Bewertung und Interpretation der Ergebnisse von FRÄßDORF (1995) ist allerdings die eingeschränkte quantitative Aussagekraft zu berücksichtigen. Grund hierfür ist die Qualität der damals verfügbaren Datengrundlage vor allem im Hinblick auf die räumliche Auflösung mit der die Daten erhoben wurden. Gleichwohl bestätigt die von FRÄßDORF (1995) identifizierte fortwährende Verlandungstendenz zwischen 1956 und 1992 die Erkenntnisse aus dem qualitativen Vergleich der morphologischen Einheiten.

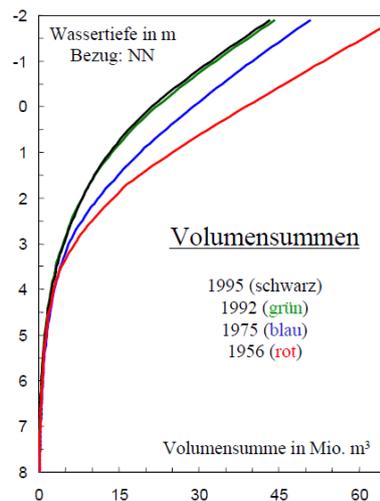


Abbildung 7: Volumenverteilung in der Hahnöfer Nebelnelbe und des Mühlenberger Lochs für die Jahre 1956, 1975, 1992 und 1995 (Quelle: FRÄßDORF (1995))

Zwischen 1995 und 2004 wurden in der Hahnöfer Nebelnelbe jährliche Schwankungen der Sohlhöhenlage beobachtet. Während in einigen Jahren großräumige Sedimentationstendenzen vorherrschten, kam es in anderen Jahren zu einer Eintiefung der Sohle. Eine ausbaubedingte (Ausbau 1999/2000) Zunahme der Sedimentationsraten und daraus folgende Verlandung dieser morphologisch relativ stabilen Nebelnelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten. (vgl. BfG 2006)

Zusätzlich zu den Längspeilungen wurden für die Hahnöfer Nebelnelbe auch jährliche Differenzmodelle auf Basis der Jahreshauptpeilungen erstellt. Aus diesen ging ebenfalls hervor, dass eine ausbaubedingte Verlandung der Hahnöfer Nebelnelbe zwischen 1999 und 2004 nicht stattgefunden hatte. Während in einigen kleinräumigen Randbereichen in diesem Zeitraum bis zu 0,8 m Sediment abgelagert wurden, überwogen in anderen Teilen der Hahnöfer Nebelnelbe Erosionstendenzen mit lokalen Eintiefungen bis zu 1,4 m. Östlich des Este-Fahrwassers im Bereich des Mühlenberger Loches wurde im betrachteten Zeitraum jedoch ein großräumiger Sedimentauftrag beobachtet. (vgl. BfG 2006)

Für die Jahre 2006, 2010 und 2016 existieren flächendeckende DGM-WS für die Elbe, die auf Grundlage von Vermessungsdaten generiert wurden. Abbildung 8 (oben) zeigt, analog

zu Abbildung 6, die morphologischen Einheiten für die Jahre 2010 und 2016, die auf Grundlage der DGM-Ws ermittelt wurden. Die Einteilung erfolgte auf Grundlage der von der IBP Arbeitsgruppe (2011c) definierten Klassen, die eine feinere Untergliederung der morphologischen Einheiten vorsehen als in den Karten für 1900, 1950 und 1995. Dies erschwert den direkten Vergleich der aus den DGM-Ws abgeleiteten Karten mit den Darstellungen für die historischen Zustände. Der direkte Vergleich der Jahre 2010 und 2016 untereinander ist hingegen möglich, zeigt allerdings nur geringfügige Änderungen der Flächengrößen und räumlichen Verteilung. Die flächige Verfügbarkeit von Daten lässt eine Analyse von lokalen Mustern zu, wobei zu beachten ist, dass das DGM-W im Bereich der Hahnöfer Nebelbebe Unsicherheiten im Dezimeterbereich beinhalten kann (ENTELMANN 25.09.18), was auf die Datengrundlage (Querprofile im Abstand von 100m), Mess- und Modellunsicherheiten zurückzuführen ist.

Unter Berücksichtigung eines Unsicherheitsmaßes von ± 30 cm geht aus der Differenzendarstellung (Abbildung 8, unten) hervor, dass zwischen 2010 und 2016 in der östlichen Hälfte der Hahnöfer Nebelbebe sowie im Mühlenberger Loch tendenziell eine Verlandung stattgefunden hat. In der westlichen Hälfte wechseln sich Flächen mit abnehmenden Höhen und Flächen mit zunehmenden Höhen in einem variablen Muster ab. Ein eindeutiger Trend ist hier nicht auszumachen. Bezogen auf die gesamte Hahnöfer Nebelbebe überwiegen jedoch die Flächen mit Verlandungstrend.

Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Hahnöfer Nebelbebe (inklusive dem Mühlenberger Loch) einen deutlichen Verlandungstrend zwischen 1950 und 1992, der sich im Zeitraum 1992 - 2016 in der östlichen Hälfte und im Mühlenberger Loch in abgeschwächter Form fortsetzt, während im Zeitraum 1992 - 2016 für die westliche Hälfte kein eindeutiger Trend auszumachen ist.

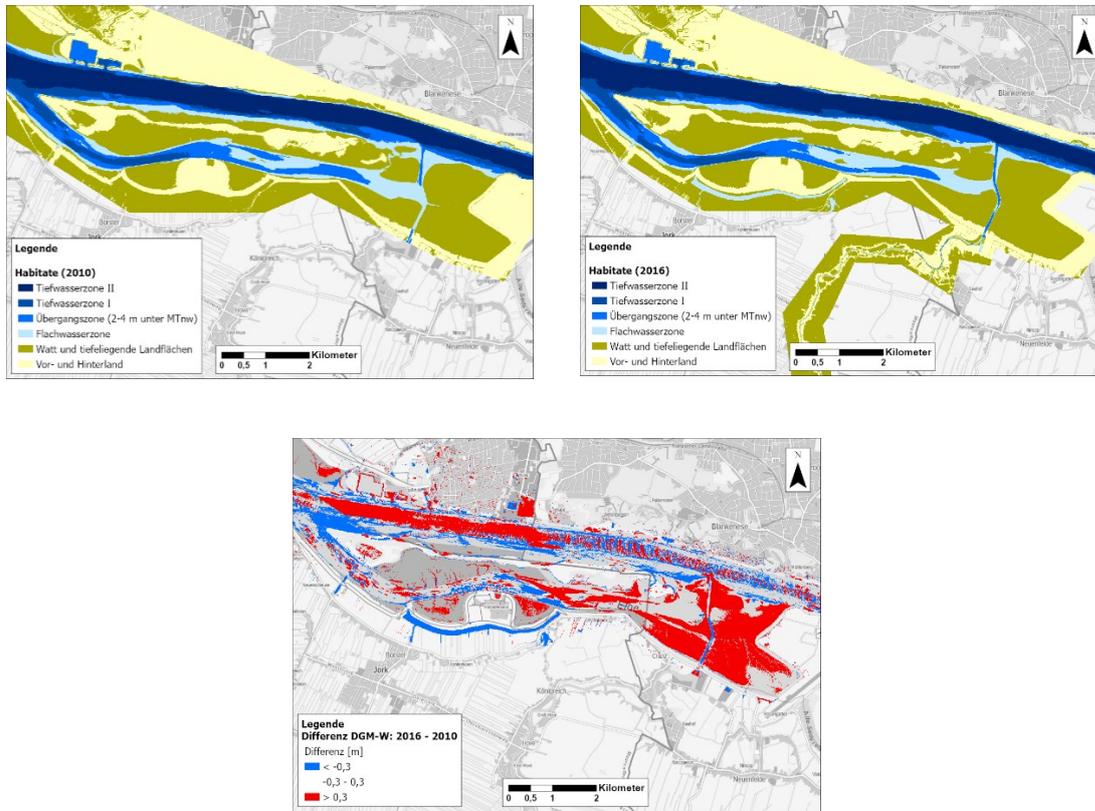


Abbildung 8: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGM-W 2010 und 2016 (oben) und Differenzdarstellung DGM-W 2016 – DGM-W 2010 (unten) im Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe und des Mühlenberger Lochs (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

2.2.6 Unterhaltung

Aktuell erfolgen in der Hahnöfer Nebelnelbe und dem Mühlenberger Loch keine Unterhaltungsarbeiten statt. Die einzige Ausnahme bildet, das Este-Fahrwasser, in dem regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen stattfinden (vgl. Abbildung 4).

2.2.7 Ufersicherung

Das stromabseitige (westliche) Ende der Inselkette (Hanskalbsand) ist wie ein Großteil des Festlandufers durch ein Deckwerk gesichert. Die übrigen Teile der Insel sowie Teile des südlichen Festlandufers sind unverbaut (Abbildung 9). Ein Priel-Durchbruch am westlichen Ende der Inselkette zu einem Binnensee wurde seitens des WSA Elbe-Nordsee in 2005f. in einem Pilotversuch alternativ zu einer klassischen Verbauung mittels technisch-biologischer Ufersicherung (tbU) befestigt (insb. Sicherung mit Weidenspreitlagen). Vergleichbare Maßnahmen werden seit 2018 auch am Nordufer, in Verlängerung des Leitdamms an der westlichen Inselspitze, erprobt.

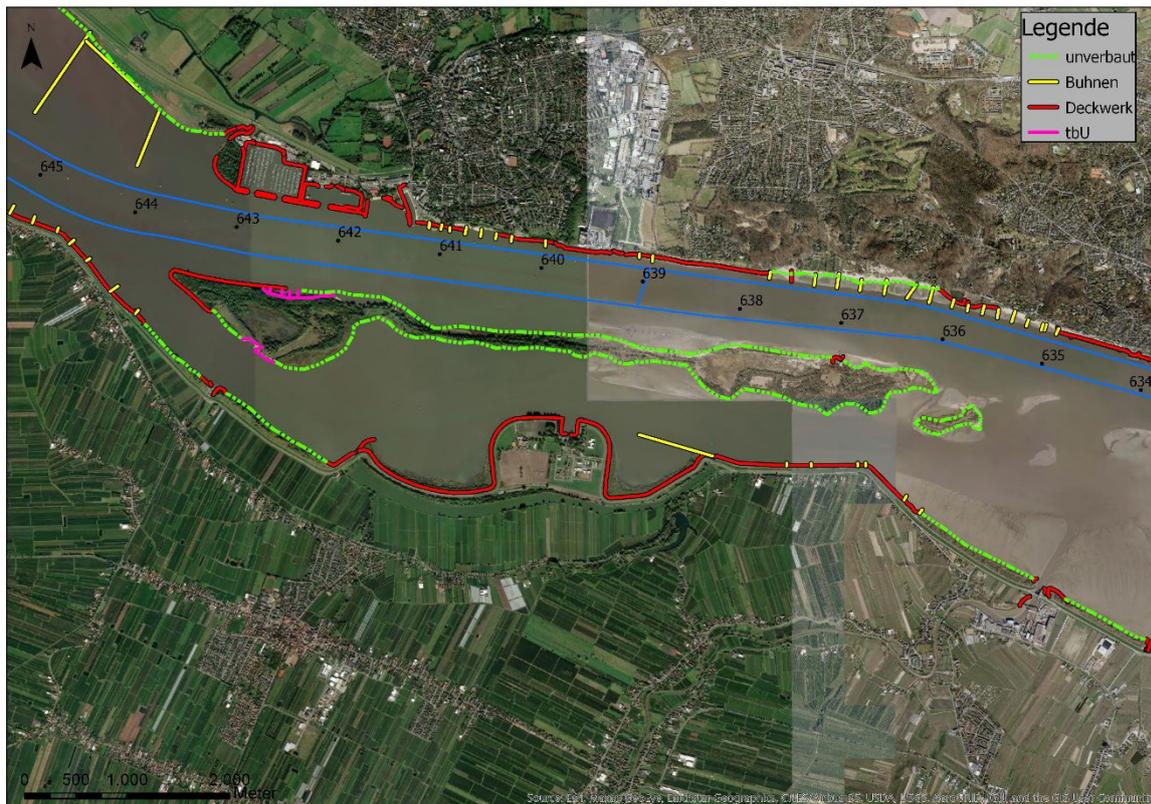


Abbildung 9: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee (2021))

2.2.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Hahnöfer Nebelnelbe wird trotz der zahlreichen Eingriffe als naturnah beschrieben. Sie ist wie die Lühesander Nebelnelbe dem Funktionsraum 3 zugeordnet. Die IBP Arbeitsgruppe (2011c) und ENTELMANN (25.09.18) schreiben hierzu:

Die Hahnöfer Nebelnelbe „weist ein vielfältiges Strömungsmuster und einen hohen Anteil an Flachwasserzonen auf. [...] Ausgedehnte Misch- und Schlickwatten [...] sind für Fischfauna und Finte von herausragender Bedeutung.“

Bezüglich des Untersuchungsbedarfs wird dem System eine „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 3 (B3 4.2.3) beigemessen: „Beobachtung der Entwicklung des hydrologischen und morphologischen Verhaltens der Stromelbe und der Nebelnelben“ sowie „Beobachtung der Entwicklung der Sauerstoffgehalte und Nährstoffgehalte [...]“ (IBP Arbeitsgruppe 2011c; ENTELMANN 25.09.18).

2.3 Lühesander Süderelbe

2.3.1 Lage

Die Lühesander Süderelbe erstreckt sich zwischen Elbe-km 647 und Elbe-km 652 linksseitig des Hauptstroms (vgl. Abbildung 10).

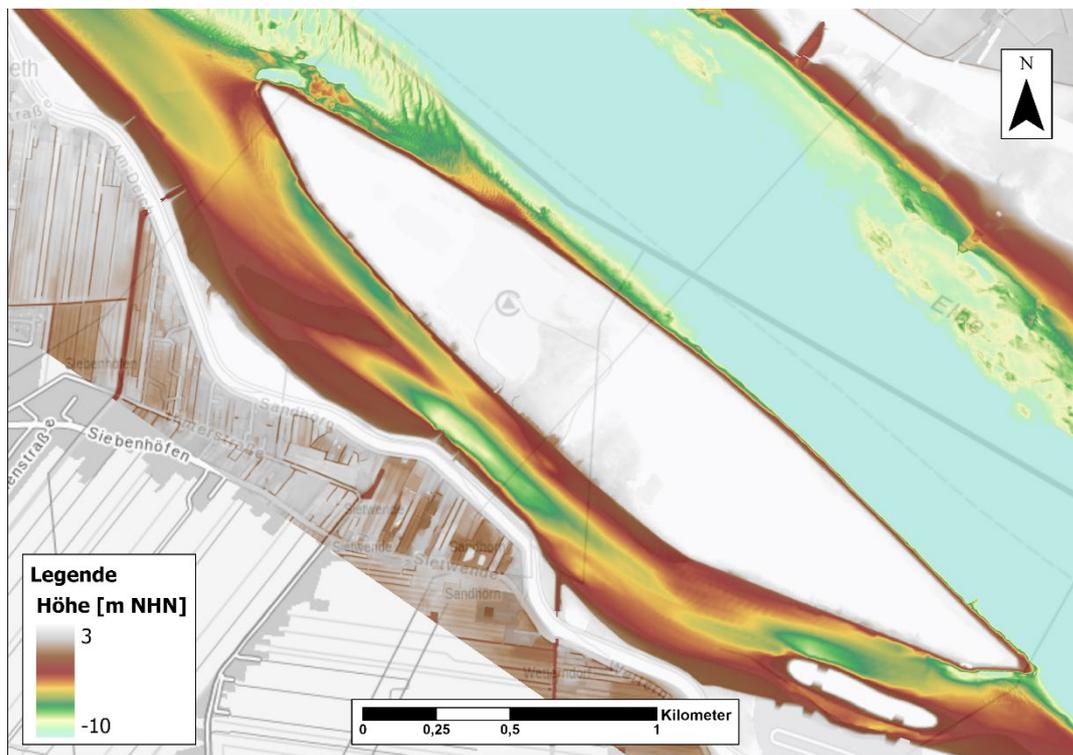


Abbildung 10: Bathymetrie in der Lühesander Süderelbe, derzeit keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGM-W 2016, WSA Elbe-Nordsee)

2.3.2 Entstehung

Die Insel, die die heutige Lühesander Süderelbe von der Fahrrinne trennt, entstand durch die Verbindung der Inseln Twielensand und Twielenflether Sand (BfG 2002b). Der Zeitraum der Entstehung wird von Kappenberg und Fanger (2007) auf 1914 - 1920 datiert. Ursprünglich gab es noch eine dritte Insel, Bajeckensand, die jedoch im Laufe der Zeit erodiert wurde (BfG 2002b). Zwischen den 1930er und 1950er Jahren wurde der Lühesand zur Leitinsel entwickelt, um die freie Bewegung der (früheren) Sandbank zu vermeiden und den Gezeitenströmungen wenig Widerstand zu bieten. Dies geschah vor allem durch die Aufspülung mit Baggergut und die Befestigung der Ufer mit Buhnen und Leitdämmen (Witte und Eichweber 2010). Am südlichen Ende von Lühesand befindet sich die sogenannte "Pionierinsel" (IBP Arbeitsgruppe 2011b), die zwischen 1970 und 1974 befestigt und aufgespült wurde (Kappenberg und Fanger 2007).

2.3.3 Morphometrie

Mit einer Länge von etwa 4 km gehört die Lühesander Süderelbe zu den kürzeren Nebelben. Die Breite im sublitoralen Bereich beträgt 200 – 400 m. Die Lühesander Süderelbe ist gekennzeichnet durch eine tiefe Rinnenstruktur mit Wassertiefen zwischen 0,5 m und 7 m unter KN sowie steile Uferböschungen (BfG 2002b). Die größten Tiefen befinden sich in der Mitte sowie am stromaufseitigen Ende. Das Ufer am Festland wie auch das Ufer im Bereich Lühesand weisen ein relativ steiles Gefälle auf, wodurch auch das Fehlen der eigentlich für Nebengewässer typischen Wattbereiche begründet ist (BfG 2002b).

Die aus der Sohle der Lühesander Süderelbe entnommenen Sedimentproben weisen einen höheren Sandanteil im Sohlsediment auf als andere Nebelben, wie z.B. die Pagensander Nebelbe (BfG 2008).

2.3.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Der Einfluss von einigen Baumaßnahmen auf die Strömungsverhältnisse im Bereich der Lühesander Süderelbe wurde zumindest teilweise mit Hilfe von Messungen in der Natur untersucht. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse von Fließgeschwindigkeitsmessungen im Bereich der Lühesander Süderelbe und anderen Nebelben vor und nach der Fahrrinnenvertiefung auf -13,5 m KN im Jahr 1984 sowie teilweise vor und nach dem Jahr 2004. Dargestellt sind die Schwankungsbreiten der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten, die innerhalb des jeweils beobachteten Spring-/Nipp-Zyklus auftraten. Für die Lühesander Süderelbe ist tendenziell eine deutliche Zunahme der Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten nach 1984 (im Vergleich zu vor 1984) erkennbar. Bei der Bewertung der Analysen ist zu berücksichtigen, dass die punktuell durchgeführten Messungen mit einer vergleichsweise kurzen Dauer von ca. 14 Tagen nicht zwangsläufig repräsentativ sein müssen (BfG 2008). Dies bezieht sich sowohl auf die räumliche Repräsentanz der Punktmessungen als auch die zeitliche Repräsentanz der Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit (u.a. Meteorologie, Oberwasserzufluss).

Dieselbe Einschränkung gilt laut BfG (2008) auch für die im Rahmen der Beweissicherung zur Fahrrinnenanpassung 1999/2000 in den Nebelben erhobenen Daten zur Strömungsgeschwindigkeit, die ebenfalls nur den zeitlichen Umfang eines Spring-/Nipp-Zyklus haben. Diese Daten wurden beispielhaft für die Pagensander Nebelbe und das Wischhafener Fahrwasser ausgewertet (Abbildung 11, Balken „>2004“ und „<2004“) mit dem Ergebnis, dass die Schwankungsbreiten innerhalb der Auswertungen der Vorjahre liegen (ebd.).

In einer weiteren Studie hat Kerner (2007) verfügbare Datensätze zu Strömungsgeschwindigkeiten ausgewertet. Dabei handelte es sich um punktuelle Kurzzeitmessungen (2-3 Tage) im Bereich der Hauptrinne und im Bereich der Hahnöfer Nebelbe und Lühesander Süderelbe für Zeiträume vor und nach der Fahrrinnenanpassung 1999/2000. Im Ergebnis kommt der Autor für die Lühesander Süderelbe zu dem Schluss, dass die Ebbestromgeschwindigkeit um 25% abnahm, während die Flutstromgeschwindigkeit unverändert blieb

(ebd.). In Anbetracht der zuvor erläuterten eingeschränkten Repräsentanz von punktuellen Kurzzeitmessungen erscheint diese Aussage jedoch wenig fundiert.

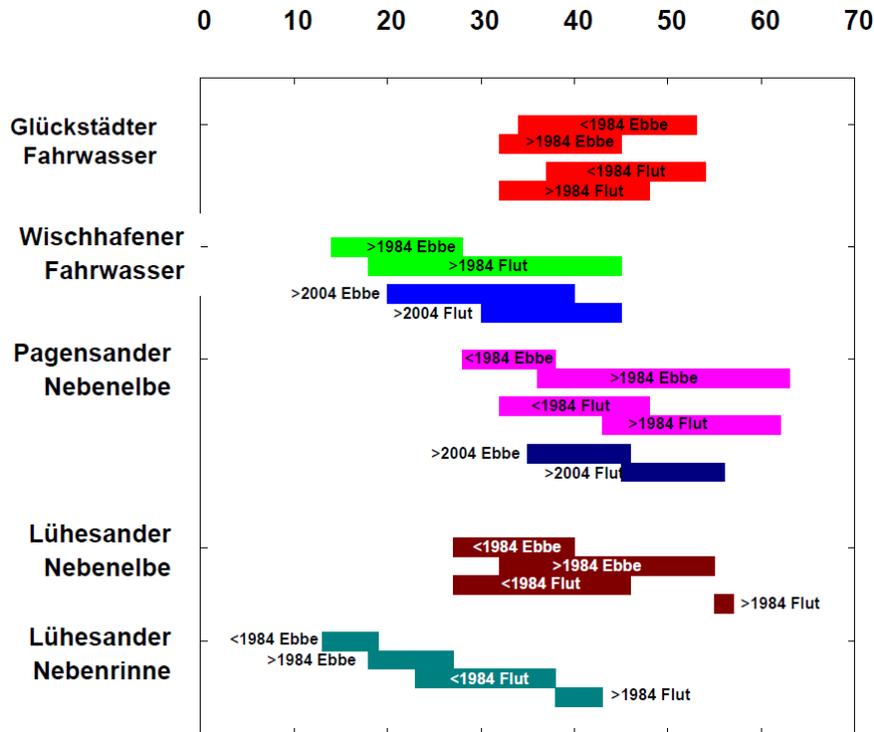


Abbildung 11: Strömungsgeschwindigkeiten in ausgewählten Nebeneiben vor und nach anthropogenen Eingriffen in der Elbfahrinne, (Quelle der Daten vor und nach 1984: Bund-Länder-Arbeitsgruppe Beweissicherung 1995), Quelle der Daten vor und nach 2004: WSA HH und HPA 2005)

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Lühesander Süderelbe und Hauptelbe wurde anhand von Messdaten (überwiegend einzelne Tagesmessungen im Zeitraum 2000 - 2010) bestimmt zu 0,06 bei Flut und bei Ebbe (ENTELMANN 12.02.19a). Eine andere Auswertung von BfG (2008), die vermutlich auf Teilen der genannten Datenreihe basiert, ergab ein Verhältnis von maximal 0,1 bei Ebbe und bei Flut.

An der Südspitze von Lühesand (stromauf) treten infolge der Eintrittszeitdifferenz insbesondere bei Ebbstromkenterung sehr lange Stauwasserdauern mit erhöhten Sedimentationen auf (BfG 2008).

2.3.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Lühesander Süderelbe über die Zeit werden in der Gegenüberstellung der morphologischen Einheiten deutlich (Abbildung 12), die für die Jahre 1900, 1950 und 1995 aus historischen Karten abgeleitet wurden. Die für die Erstellung der Karten verwendete Datengrundlage sowie die bei der Interpretation zu beachtenden Einschränkungen wurden bereits in Kapitel 2.2.5 erläutert. Der Vergleich der

Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt deutliche Veränderungen, u.a. der Übergang von Wattflächen zu Vordeichsflächen wodurch die Leitinsel entstanden ist. Die Rinne hinter der jetzigen Insel ist bereits in der Darstellung für das Jahr 1900 als langgestreckte Tiefwasserfläche vorhanden, die nur am stromaufseitigen Ende unterbrochen ist. Im Jahr 1950 ist auch das stromaufseitige Ende als Tiefwasserfläche klassifiziert. Es verbleibt lediglich eine kleine Unterbrechung der Rinne in der stromaufgelegenen Hälfte.

Zwischen 1950 und 1995 sind lokal Unterschiede zu erkennen, wie z.B. die Pionierinsel oder die Entstehung von Wattflächen am Festlandufer. Insgesamt erscheint die Morphologie im Bereich der Lühesander Süderelbe in diesem Zeitraum stabil.

Bei der Betrachtung über alle 3 Zustände gibt es eine Auffälligkeit in der stromabseitigen Hälfte der Rinne. Hier ist nahe dem Festlandufer im Jahr 1900 eine langgestreckte Wattfläche zu erkennen, die im Jahr 1950 verschwunden ist und im Jahr 1995 zumindest teilweise wieder vorhanden ist. Das im Vorhaben berücksichtigte Schrifttum liefert hierüber keine Informationen.

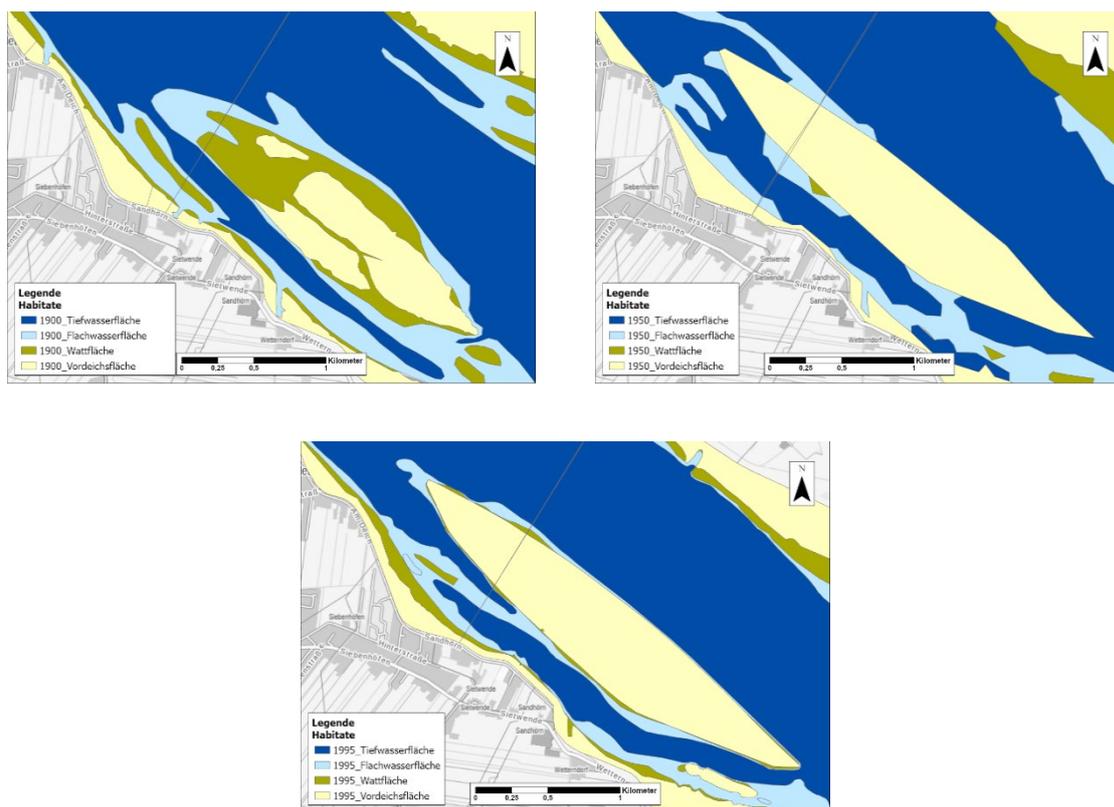


Abbildung 12: Morphologische Einheiten im Bereich der Lühesander Süderelbe im 20. Jahrhundert (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

Die in Abbildung 13 dargestellte volumetrische Auswertung von FRÄßDORF (1995) zeigt für den Zeitraum 1950-1991 eine weitgehend stabile Morphologie, was den Eindruck aus dem qualitativen Vergleich der morphologischen Einheiten bestätigt. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen bei der Bewertung und Interpretation der volumetrischen Auswertungen von Fräßdorf gelten auch hier.

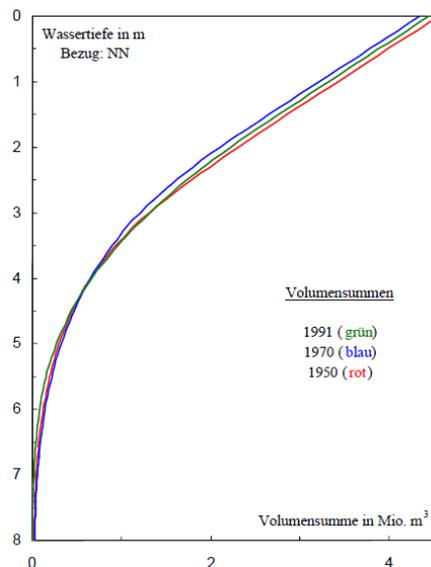


Abbildung 13: Volumenverteilung in der Lühesander Süderelbe für die Jahre 1950, 1970 und 1991 (Quelle: FRÄßDORF 1995)

Zwischen 1995 und 2004 wurden in der Lühesander Süderelbe jährliche Schwankungen der Sohlhöhenlage beobachtet. Während in einigen Jahren Sedimentationstendenzen vorherrschten, kam es in anderen Jahren zu einer Eintiefung der Sohle. Eine ausbaubedingte (Ausbau 1999/2000) Zunahme der Sedimentationsraten und daraus folgende Verlandung dieser morphologisch relativ stabilen Nebenelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten. (vgl. BfG (2006) und BfG (2008)).

Die morphologische Entwicklung der Lühesander Süderelbe in der jüngeren Vergangenheit ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Änderungen der Sohlhöhen (unten) fallen vergleichsweise gering aus, so dass sich auch die morphologischen Einheiten kaum ändern. In der Differenzendarstellung ist kein eindeutiger großräumiger Trend erkennbar. Es sind sowohl kleinere als auch größere Erosions- und Depositionsbereiche vorhanden. Visuell überwiegen die Depositionsbereiche leicht. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den morphologischen Einheiten in Abbildung 12 sowie der Unsicherheiten sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten.

Insgesamt deuten alle Auswertungen für die Lühesander Süderelbe auf eine weitgehend stabile Morphologie im Zeitraum 1950 - 2016 hin.

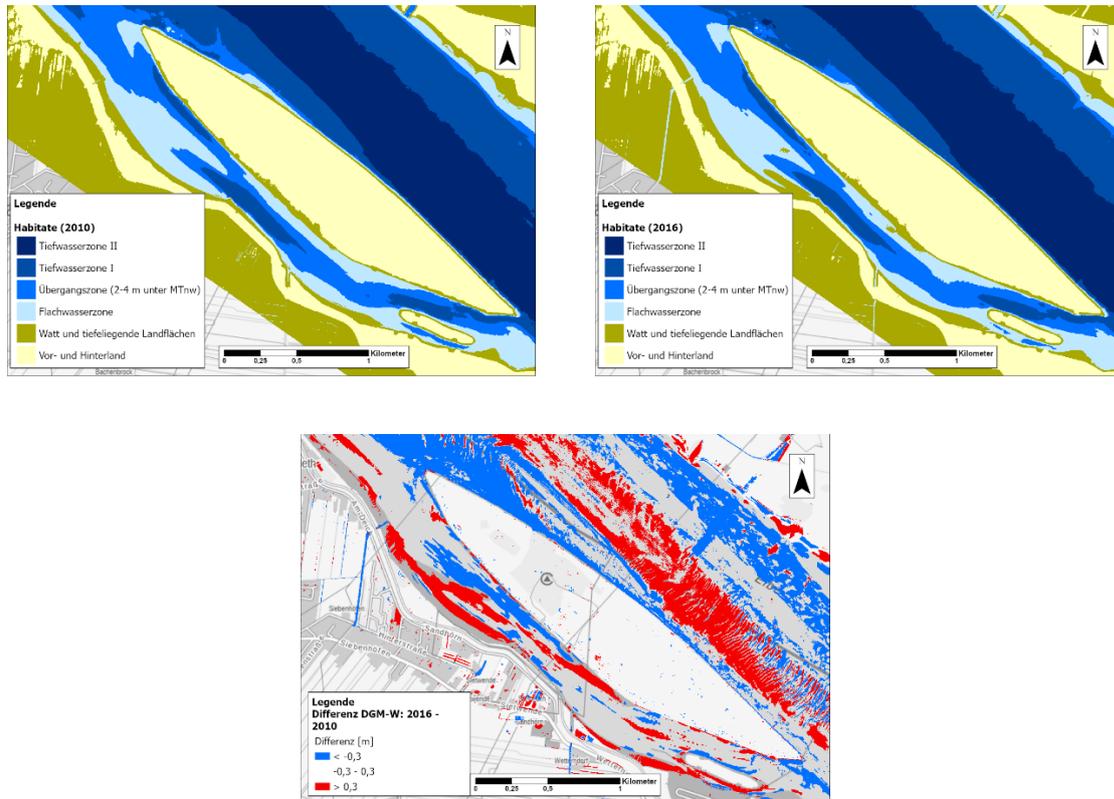


Abbildung 14: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGM-W 2010 und 2016 (oben) und Differenzdarstellung DGM-W 2016 – DGM-W 2010 (unten) im Bereich der Lühesander Süderelbe (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

2.3.6 Unterhaltung

Regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen finden in der Lühesander Süderelbe aktuell nicht statt.

2.3.7 Ufersicherung

Die Ufer der Insel Lühesand sind wie auch fast das gesamte südliche Festlandufer durch Deckwerke gesichert (Abbildung 15). In den vergangenen Jahren wurde die Erneuerung der Deiche sowie die Beseitigung von Ufersicherungen in weniger beanspruchten Bereichen der Insel Lühesand diskutiert (GÄTJE UND CORDES 2013; Schröder et al. 2010). Das Konfliktpotenzial wird als gering eingeschätzt (BfG 2002b). Im selben Gutachten wird weiter ausgeführt, dass zwar morphologische Auswirkungen in Form von Abflachungen der Ufer zu erwarten wären, Erosionsprozesse durch Strömungen und schiffsinduzierte Wellen sowie Ablagerungsmuster hingegen nicht (ebd.). Insgesamt wird erwartet, dass die Lühesander Süderelbe bei Umsetzung dieser Maßnahmen einen natürlicheren Zustand erreicht.



Abbildung 15: Aktueller Zustand der Ufer der Lühesander Süderelbe, einschließlich der Insel Lühesand und der Pionierinsel (Quelle: WSA Elbe-Nordsee (2021))

2.3.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Lühesander Nebenelbe ist wie die Hahnöfer Nebenelbe dem Funktionsraum 3 zugeordnet. Die IBP Arbeitsgruppe (2011c) und ENTELMANN (25.09.18) schreiben hierzu:

„Lühesand und die Lühesander Nebenelbe tragen zur Strukturvielfalt der Unterelbe bei. [...] Insgesamt wird jedoch nicht die Ausdehnung und der naturnahe Charakter des Abschnittes Neßsand / Hanskalbsand / Hahnöfer Nebenelbe erreicht“ (IBP Arbeitsgruppe 2011c; ENTELMANN 25.09.18).

Bezüglich des Untersuchungsbedarfs wird dem System eine „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 3 (B3 4.2.3) beigemessen: „Beobachtung der Entwicklung des hydrologischen und morphologischen Verhaltens der Stromelbe, der Nebenelben und der Seitenbuchten“ sowie „Beobachtung der Entwicklung der Sauerstoffgehalte und Nährstoffgehalte [...]“ (ebd.).

2.4 Haseldorfer Binnenelbe

2.4.1 Lage

Die Haseldorfer Binnenelbe erstreckt sich zwischen Elbe-km 653 und Elbe-km 660 rechtsseitig des Hauptstroms (Abbildung 16). Sie wird durch die Elbinseln Auberg Drommel (südl. Inselteil) und Bishorster Sand (nördl. Inselteil) vom Hauptstrom abgegrenzt. Das stromabseitige Ende (bei Elbe-km 660) schließt an die Pagensander Nebenelbe an, wodurch die Haseldorfer Binnenelbe mit dem stromaufgelegenen Dwarssloch nur eine Öffnung zum Hauptstrom (bei km 653) aufweist. Das Dwarssloch zweigt in etwa senkrecht zur Hauptströmungsrichtung der Elbe ab und verläuft zwischen dem Twielenflether Sand (stromauf) und der Elbinsel Drommel (stromab).

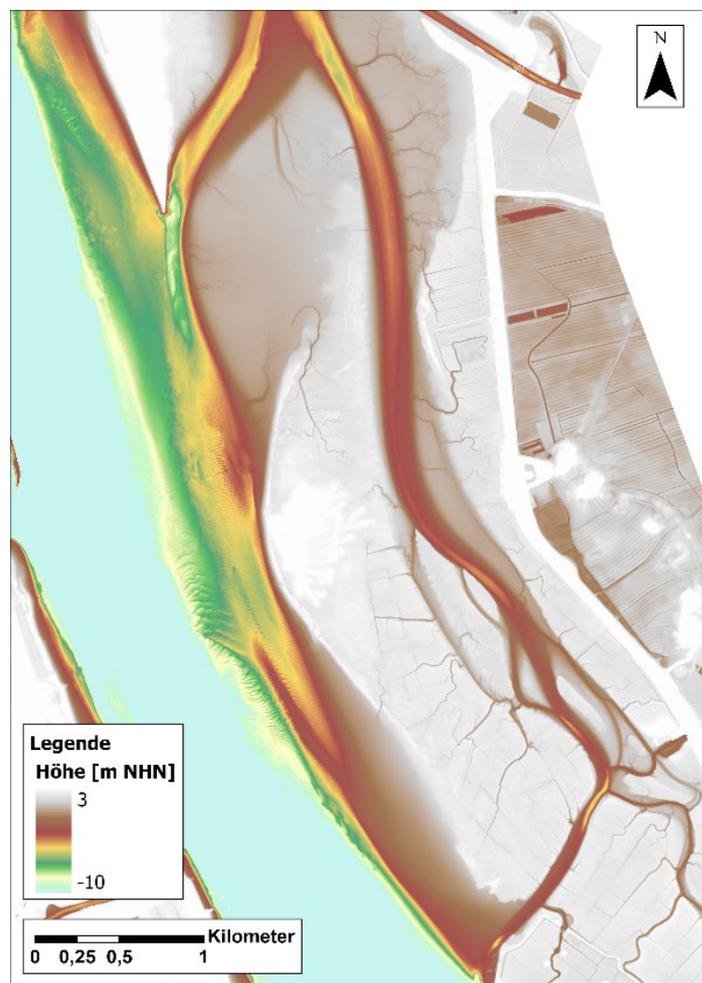


Abbildung 16: Bathymetrie der Haseldorfer Binnenelbe, keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGM-W 2016, WSA Elbe-Nordsee)

2.4.2 Entstehung

Die historische Entwicklung der Haseldorfer Binnenelbe wurde von Netz und Hartmann (2010) beschrieben. Da das Original-Schriftstück nicht zugänglich ist, werden im Folgenden die Ausführungen aus dem Bericht (BfG 2013) zusammengefasst, in dem Netz und Hartmann (2010) als Quelle genannt werden.

Es wird vermutet, dass die heutige Haseldorfer Binnenelbe bis in das Mittelalter hinein die Haupttrinne der Tideelbe bildete. Infolge einer Verlagerung der Hauptströmung nach Süden entstanden ausgehend von Wedel in Richtung stromab Inseln, wodurch sich der Querschnitt der Haseldorfer Binnenelbe verringerte. Heute wird die Haseldorfer Binnenelbe durch die Inseln Bishorster Sand sowie Auberg-Drommel von der Haupttrinne der Elbe getrennt. Die aus einer ehemaligen Inselgruppe entstandene Auberg-Drommel ist die jüngste der Inseln. Um 1880 war die Drommel bereits in einer Form erkennbar, die sich auch in den heutigen Strukturen wiederfindet. In der Folgezeit schritt die Landbildung offenbar sehr schnell voran, und 1924 waren viele weitere Inseln zu erkennen, wobei die Drommel nicht mehr durch eine Gezeitenrinne geteilt war. Östlich der Drommel hatte sich die sogenannte Teufelsinsel gebildet, die durch einen Damm mit der Drommel verbunden worden war. Nördlich der Drommel entstanden die Inseln Auberg, Bühnenberg und Bishorster Sand. Der Bishorster Sand lag zu dicht an der Wasserstraße und wurde deshalb der Erosion überlassen. Entlang der Ufer der weiteren Inseln fanden im Zeitraum 1949-1955 Maßnahmen zur Ufersicherung statt. Vor allem im Ostteil der Inselgruppe wurden kurze Bühnen gebaut, die heute größtenteils verschlammt sind. Die nächsten größeren Maßnahmen in diesem Bereich waren Sandaufspülungen in den 1950er Jahren. Ab 1951 wurde auf den Inseln Auberg und Bishorster Sand ein 50 m breiter Sandstreifen parallel zur Fahrrinne aufgeschüttet. Diese Maßnahmen wurden 1956 endgültig abgeschlossen. Diese Aufschüttung verband nun die Inseln Auberg und die Reste des Bishorster Sandes. Anschließend wurde das Wattgebiet zwischen Auberg, Bühnenberg und Bishorster Sand aufgespült. Mit dieser Sandaufspülung wurde die Form der Insel Auberg-Drommel bestimmt, die bis heute erhalten ist. (vgl. (Netz und Hartmann 2010) in (BfG 2013))

Bis in die 1970er Jahre hinein bildete die Haseldorfer Binnenelbe zusammen mit der Wedeler-Haseldorfer Marsch ein umfassendes tidebeeinflusstes Gewässersystem mit großen Überschwemmungsflächen. Durch die Verlegung der Deichlinie vor die Marsch und den damit verbundenen Hochwasserschutzmaßnahmen in den Jahren 1975-1978 wurden die Überschwemmungsflächen wie auch das Gewässersystem deutlich verkleinert. Die Haseldorfer Binnenelbe wurde auf 6 km verkürzt (BfG 2002b). Die Wedeler-Haseldorfer Marsch wird nicht mehr von den Gezeiten beeinflusst und ist zu einem Stillwassergebiet geworden (ebd.). Abbildung 17 veranschaulicht unterschiedliche Zustände der Haseldorfer Binnenelbe im Laufe der Zeit.

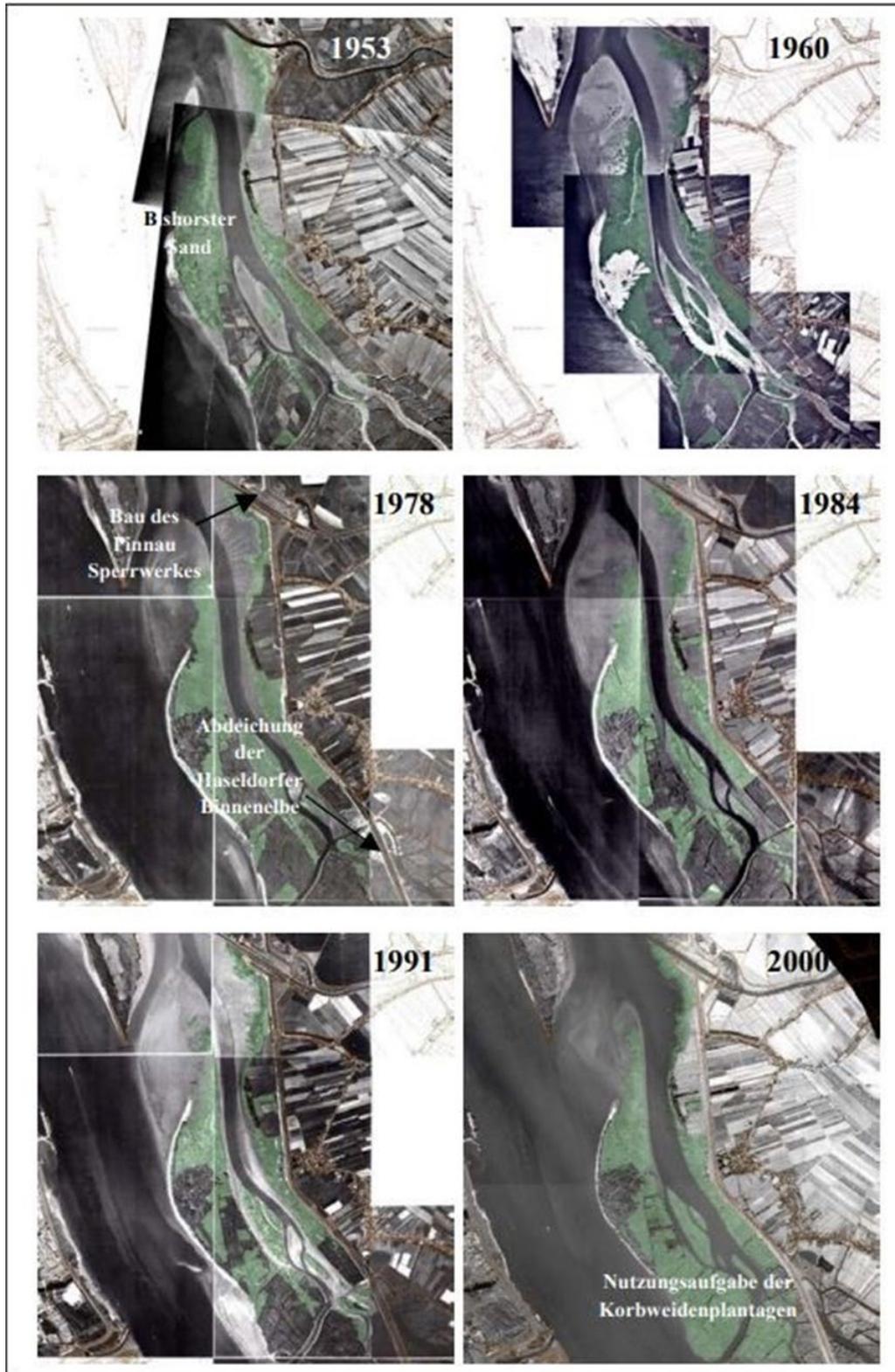


Abbildung 17: Orthofotos zur Beschreibung der Entwicklung der Haseldorfer Binnenelbe zwischen 1958-2000
(Quelle: BfG (2004))

2.4.3 Morphometrie

Die Haseldorfer Binnenelbe ist etwa 6 km lang. Mit einer Breite im sublitoralen Bereich zwischen 20 – 100 m ist die Haseldorfer Binnenelbe vergleichsweise schmal. Des Weiteren ist sie gekennzeichnet durch eine flache, teilweise verzweigte, Rinnenstruktur mit Wassertiefen zwischen 0,5 m und 4 m unter KN. Am nördlichen Ende sowie im Inneren befinden sich ausgedehnte Wattflächen.

2.4.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Der resultierende Stromauftransport aller Fraktionen im Bereich der Pagensander Nebanelbe sowie der Haseldorfer Binnenelbe ist in Bezug auf den Nettoschwebstofftransport flutstromdominant (BfG 2008).

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Haseldorfer Binnenelbe und Hauptelbe ist aufgrund fehlender Messdaten unbekannt.

2.4.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe über die Zeit werden in der Gegenüberstellung der morphologischen Einheiten deutlich (Abbildung 18), die für die Jahre 1900, 1950 und 1995 aus historischen Karten abgeleitet wurden. Die für die Erstellung der Karten verwendete Datengrundlage sowie die, bei der Interpretation zu beachtenden Einschränkungen, wurden bereits in Kapitel 2.2.5 erläutert. Der Vergleich der Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt deutliche Veränderungen. Während im Jahr 1900 noch zwei tiefere Rinnen von der Pagensander Nebanelbe ausgehen, ist es im Jahr 1950 nur noch eine. Die andere Rinne ist nicht mehr vorhanden, was auf die zahlreichen Baumaßnahmen zurückzuführen ist. Der Vergleich der Darstellungen für 1950 und 1995 zeigt eine weitere Abnahme der Tiefwasserfläche und eine deutliche Zunahme der Wattflächen im Norden der Inseln (Bishorster Sand), entlang des Festlandufers und im Süden der Inseln (strom- und landseitig).

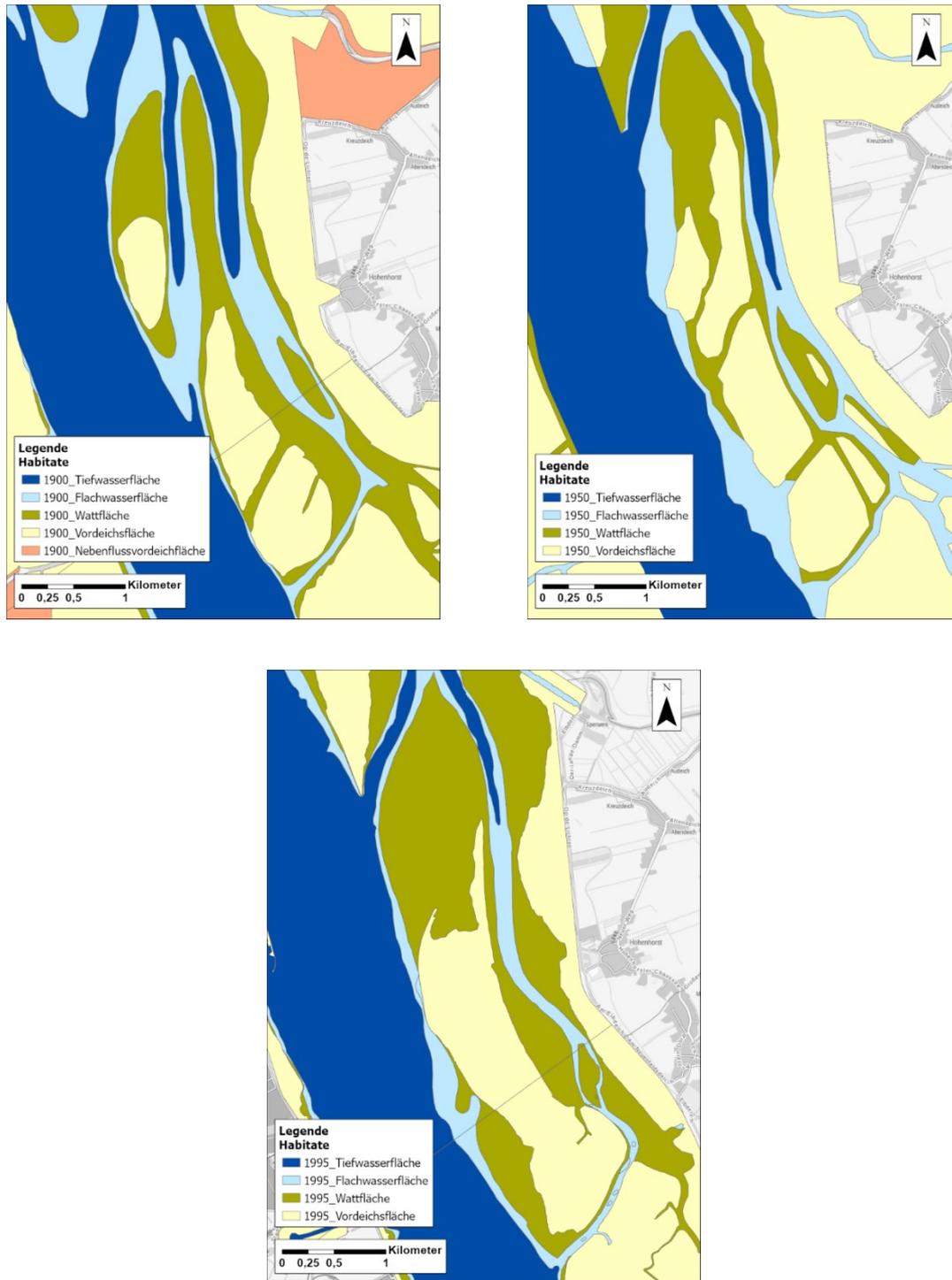


Abbildung 18: Morphologische Einheiten im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2019)

Die in Abbildung 19 dargestellte volumetrische Auswertung von FRÄßDORF (1995) zeigt für den Zeitraum 1946 - 1959 auf eine stabile Morphologie hin. Zwischen 1959 und 1973 ist eine Vertiefung, insbesondere von Flächen unterhalb von 2,5 m Wassertiefe, zu erkennen. Für den Zeitraum 1973 - 1992 ist hingegen eine deutliche Erhöhung auszumachen. Ein Grund für diese Trendumkehr ist möglicherweise die Abdämmung der Haseldorfer Binnenelbe. Bei der Bewertung und Interpretation gelten die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen.

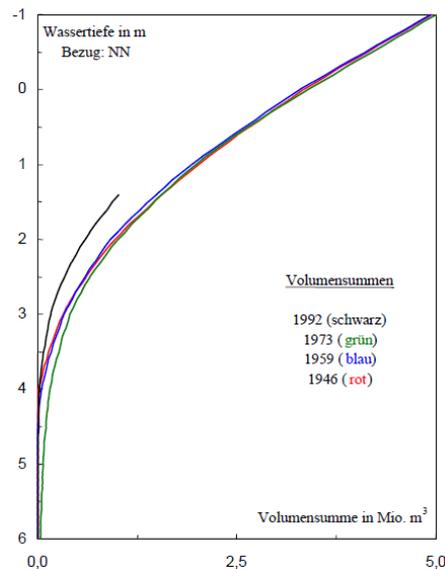


Abbildung 19: Volumenverteilung in der Haseldorfer Binnenelbe für die Jahre 1946, 1959, 1973 und 1992, (Quelle: FRÄßDORF (1995))

Die morphologische Entwicklung in der jüngeren Vergangenheit verdeutlicht Abbildung 20. Die Differenzendarstellung (unten) zeigt einen großräumigen Verlandungstrend in weiten Teilen der Haseldorfer Binnenelbe beginnend am Übergang zur Pagensander Nebeneibe und endend im Bereich Dwarsoch. Erosionstendenzen sind nur lokal zu erkennen. Der Verlandungstrend zeigt sich auch beim Vergleich der morphologischen Einheiten der Jahre 2010 und 2016 (oben). Die Tiefwasserfläche im Bereich der Rinne hat weiter abgenommen und im Bereich der Nordspitze der Insel sind Wattflächen in Vordeichsflächen übergegangen. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den morphologischen Einheiten (1900 - 1995) sowie der Unsicherheiten sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten.

Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Haseldorfer Binnenelbe im Zeitraum 1973 bis 2016 einen großräumigen Verlandungstrend, der insbesondere in den Jahren nach der Abdämmung der Haseldorfer Binnenelbe sehr ausgeprägt war, sich aber auch in Auswertungen für die jüngere Vergangenheit zeigt (BfG 2002b) wie auch in Abbildung 20.

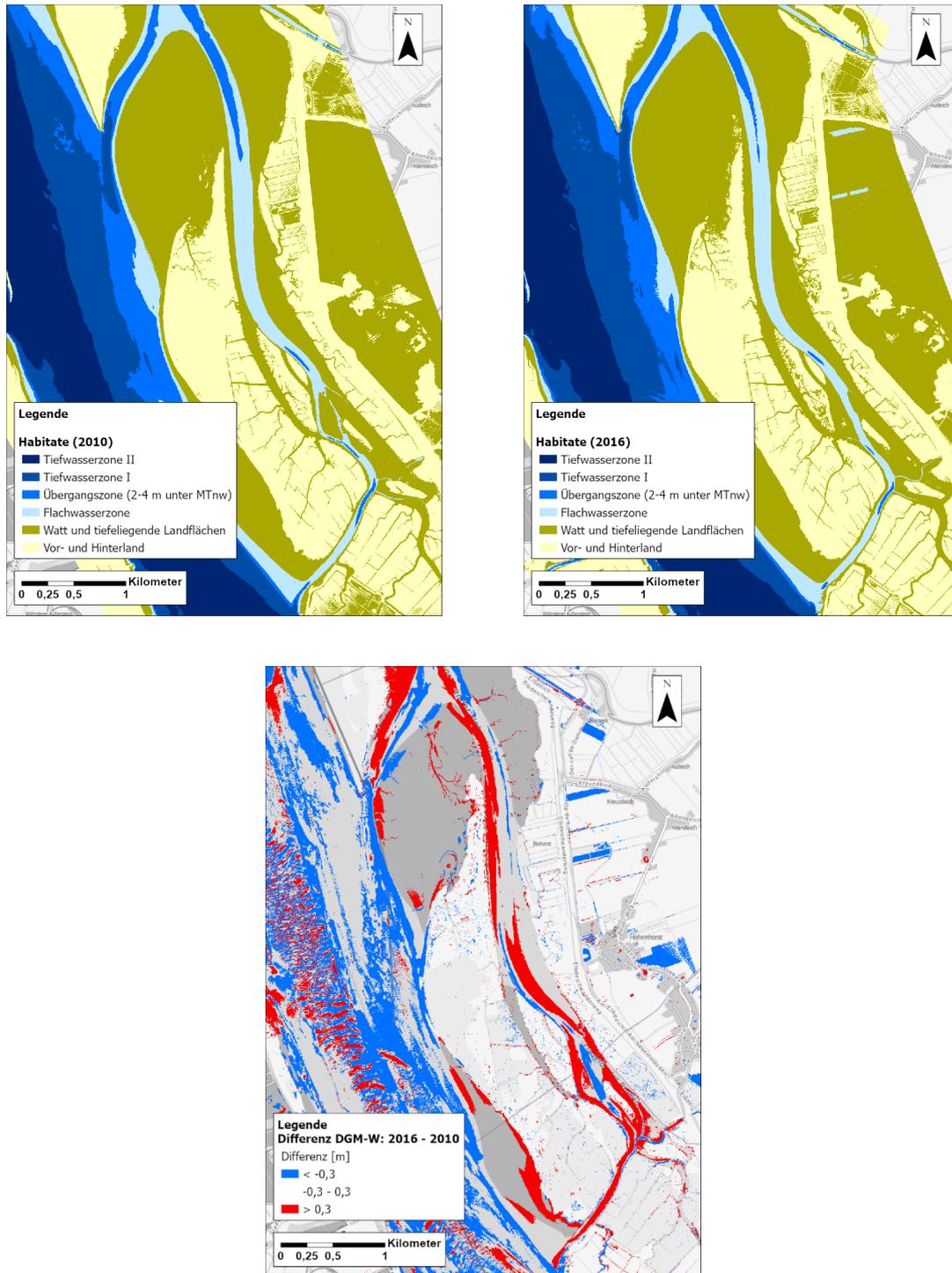


Abbildung 20: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGM-W 2010 und 2016 (oben) und Differenzdarstellung DGM-W 2016 – DGM-W 2010 (unten) im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

Bezüglich des Untersuchungsbedarfs wird dem System eine „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3) beigemessen: „Beobachtung der Entwicklung des hydrologischen und morphologischen Verhaltens der Stromelbe und der Nebenelben“ sowie „Beobachtung der Entwicklung der Sauerstoffgehalte und Nährstoffgehalte [...]“ (IBP Arbeitsgruppe 2011c; ENTELMANN 25.09.18).

2.5 Pagensander Nebenelbe

2.5.1 Lage

Die Pagensander Nebenelbe erstreckt sich rechtsseitig des Hauptstroms zwischen Elbe-km 657 und Elbe-km 668 (Abbildung 22). Gemeinsam mit der Haseldorfer Binnenelbe bildet sie das größte Nebenelben-System der Tideelbe. In die Pagensander Nebenelbe münden zudem die Nebenflüsse Krückau (nördlich) und Pinnau (südlich).

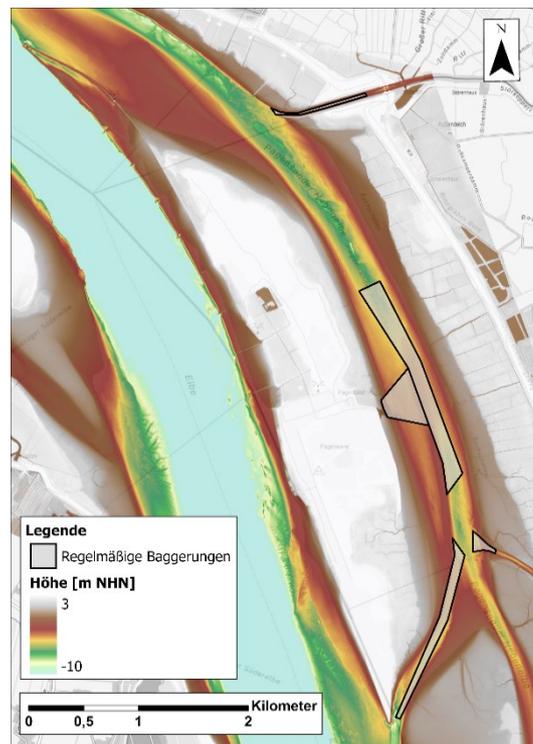


Abbildung 22: Bathymetrie der Pagensander Nebenelbe und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Datenquelle: DGM-W 2016, WSA Elbe-Nordsee)

2.5.2 Entstehung

Die Insel Pagensand ist eine ehemalige natürliche, bei Hochwasser überflutete Sandbank, die in den 1920er - 1940er Jahren durch Aufspülung um das 5-fache vergrößert wurde (BfG 2002b; Kappenberg und Fanger 2007). Wie aus Bohn (2005) hervorgeht, taucht die Insel Pagensand laut Aussage des 1937 amtierenden Baurats der Wasserstraßendirektion Hamburg, Konrad Meisel, erstmals auf einer Karte von 1721 (Abbildung 23) auf.

Konrad Meisel, beschreibt den Zustand im Jahr 1721 als

„nicht begrünt, vermutlich nicht hochwasserfreien Sand, der sich als solcher auf allen späteren Karten in wenig veränderter Form und Ausdehnung wiederfindet. Etwa zu Beginn des 19ten Jahrhunderts wird sich der mittlere Teil des Sandes über Hochwasser erhoben und begrünt haben. Der Elbstrom war damals durch Pagensand, Schwarztonnensand und den Asseler-Sand in vier Arme gespalten, in denen die Wassertiefen weniger als acht Meter betrug. Durch diese Stromspaltung änderten sich die Wassertiefen und Strömungen laufend, was zur Verwilderung des Strombettes führte. Zwischen Schwarztonnensand und Pagensand bildete sich eine Barre und elbabwärts, zwischen Kollmar und Bielenberg, am Nordufer, ein Kolk, der im Laufe der Zeit eine Tiefe von 20 Metern annahm. Durch die Räumungskraft von Ebbe und Flut und abgewinkelten Krümmungen des Stromes verschwand die Barre und die Wassertiefe pendelte sich auf acht Meter ein. Hierzu haben auch die Wirbelbildungen des Kolks und Eispressungen beigetragen. Die Rinne zwischen Schwarztonnensand und Pagensand entwickelte sich zum Hauptstrom. Durch die Krümmung beim nördlichen Pagensand, den Wellenschlägen bei vorherrschenden Westwinden und dem über dem Sand stattfindenden Wasserausgleich von der Nebeneibe zum Hauptstrom traten Uferabbrüche auf, die dann dazu führten, dass die Insel in drei Teile zerriss. So entstand südlich des höheren Inselteils der Hunrige Wolf. Die Sände südlich davon nannte man Sände am Hungrigen Wolf.“ (Baurat der Wasserstraßendirektion Hamburg Konrad Meisel aus (Bohn 2005)).

Die ersten größeren anthropogenen Eingriffe im Bereich Pagensand fanden im 19. Jahrhundert statt, als Bauern die Insel durch Landgewinnung befestigten und vergrößerten (Witte und Eichweber 2010). Die Insel Pagensand ist die einzige der heutigen Nebeneiben-Inseln, von der bekannt ist, dass zu dieser Zeit eine landwirtschaftliche Nutzung stattfand (Bohn 2005).

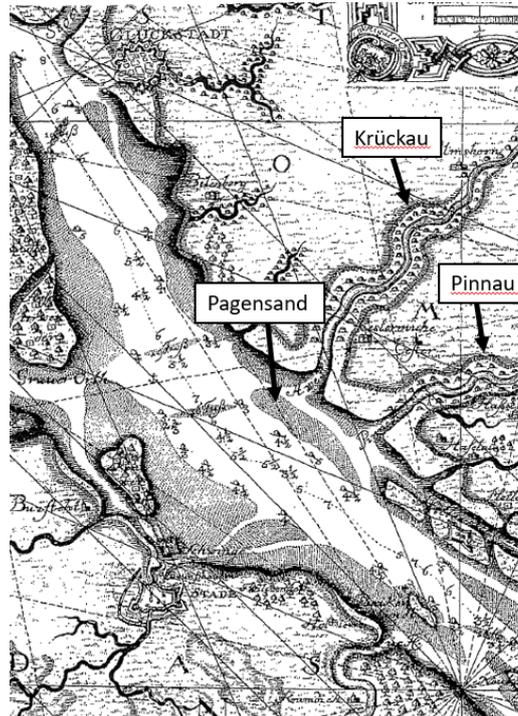


Abbildung 23 Unterelbe-Schnittkarte von 1721 (modifiziert von Bohn (2005) auf Grundlage einer Karte von Zimmermann/Hansebach, ohne Datum)

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war der Abschnitt der Elbe zwischen Pagensand und dem heutigen Schwarztonnensand (Abbildung 24) als sich permanent änderndes Stromspaltungsgebiet bekannt, in dem Querströmungen zu einer Verflachung und Verlagerung der Fahrrinne und damit einhergehend zu einer Verkleinerung des Krümmungsradius der Fahrrinne führten, woraus eine Gefährdung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs resultierte (Schätzler und Meisel 1937; Visscher und Wolf 1987).

Zu diesem Zeitpunkt hatte der Ebbestrom den Kollmar-Sand – ein Ausläufer am stromabgelegenen Ende von Pagensand – komplett erodiert (Abbildung 24). Eine 10m tiefe Rinne verlagerte sich mit der Zeit in Richtung des schleswig-holsteinischen Ufers. Hinzu kamen Auskolkungen mit Tiefen bis zu 14 m im Scheitel der Krümmung, die den Strom soweit schwächten, dass dieser ein Nachrücken des Schwarztonnensandes von Süden her nicht mehr verhindern konnte. Die „Teilnahme des Flutstromes an der Wasserbewegung im Ebbestrombett wurde dadurch mehr und mehr erschwert“. In der Folge wirkten Flut- und Ebbestrom nicht mehr im selben Gewässerbett. Es wurde erwartet, dass der Schwarztonnensand sowie der Hungrige Wolf weiter vorrücken und die Krümmung weiter verschärfen würden. Zudem wurde erwartet, dass das nördliche Nebenfahrwasser mehr an Wasserführung gewinnen und dass sich im Süden mindestens eine tiefere Rinne bilden würde, die den Schwarztonnensand teilt. Die Befürchtung war, dass sich das eigentliche Fahrwasser durch das entstehende Mehrrinnensystem verflachen würde und letztendlich keine der Rinnen die Anforderungen der Schifffahrt genüge leisten würde. (vgl. Schätzler und Meisel 1937).

Um der erwarteten nachteiligen Entwicklung entgegenzuwirken, wurde im Jahr 1900 damit begonnen, Baggerungen im Abschnitt Pagensand/Schwarztonnensand durchzuführen, die bis zum Jahr 1926 eine kumulierte Gesamtmenge von 10 Mio. m³ erreicht hatten und in den Folgejahren auf 1 Mio. m³ jährlich gesteigert wurden. Das gebaggerte Material wurde dazu verwendet, um Teile der Insel Pagensand sturmflutfrei aufzuhöhen. Diese Flächen wurden anschließend zur Verminderung des Sandfluges mit Klei bedeckt und mit genügsamen schnell wachsenden Bäumen bepflanzt. Im Jahr 1922 begannen zudem die Arbeiten zur Stromregulierung. Zwischen 1922 und 1926 wurde am stromabgelegenen Ende der Insel Pagensand eine Grundschwelle errichtet, die die Rinne hinter Pagensand auf etwa 6 m unter MTnw abdämmte. Im selben Zeitraum wurde am stromaufgelegenen Ende ein 1700 m langer Leitdamm gebaut, der das weitere Vordringen des Hungrigen Wolfes in die Fahrrinne unterbinden sollte. Die Länge wurde bewusst gewählt, um den Winkel zwischen dem Steinloch und der Hauptrinne möglichst spitz zu gestalten, damit die Strömung in der Hauptrinne möglichst wenig an das südliche Ufer gedrängt wird. Zwischen 1927 und 1936 wurde die Grundschwelle zu einem Leitdamm weiterentwickelt. Hinsichtlich der Breite der stromabseitigen Öffnung zur Nebelbebe wurde abgewogen zwischen den Anforderungen der damals nicht unerheblichen Schifffahrt auf den Nebenflüssen Krückau und Pinnau sowie deren Funktion als Vorfluter auf der einen und einer größtmöglichen Stärkung der Strömungsverhältnisse in der Hauptrinne auf der anderen Seite. Eine zunächst angedachte Variante war eine komplette Abdämmung der stromabgelegenen Öffnung, die allerdings zugunsten der Nebenflüsse verworfen wurde. Letztendlich wurde die Öffnungsbreite zu 800 m festgelegt, was in etwa der Breite der Öffnung am Ende des 19. Jahrhunderts entsprach als der Kollmar-Sand noch vorhanden war. (vgl. Schätzler und Meisel 1937)

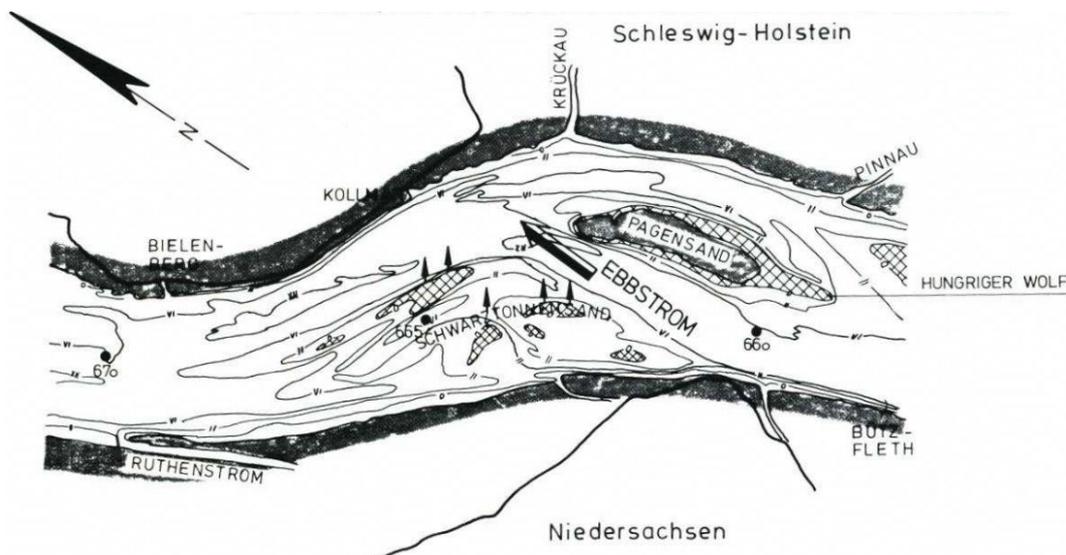


Abbildung 24: Abschnitt der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand, Zustand zu Beginn der 1920er Jahre, vor dem 10m Ausbau (Quelle: Visscher und Wolf 1987)

Durch die umgesetzten Maßnahmen wurde die ehemals natürliche Sandbank Pagensand festgelegt, um das Fünffache vergrößert und zu einem strombaulichen Regelbauwerk mit Nebengerinne (Pagensander Nebelbe) entwickelt, das seine Funktion bis heute erfüllt (Visscher und Wolf 1987; BfG 2002b). Auch wenn durch dieses Regelungsbauwerk eine deutliche Verbesserung der Strömungsverhältnisse und eine Stabilisierung der Morphodynamik erreicht wurde, blieb der Abschnitt weiterhin unterhaltungsintensiv, was vor allem auf die fehlenden Regulierungsmaßnahmen am südlichen Elbufer, den Bereich um Schwarztonnensand, zurückgeführt wurde (Visscher und Wolf 1987). Aus der Auswertung von hydrologischen Messdaten ging hervor, dass Querströmungen feines Material (schluffigen Feinsand) aus dem damals zerklüfteten Wattgebiet Schwarztonnensand in die Fahrerinne transportieren (Schätzler und Meisel 1937; Visscher und Wolf 1987).

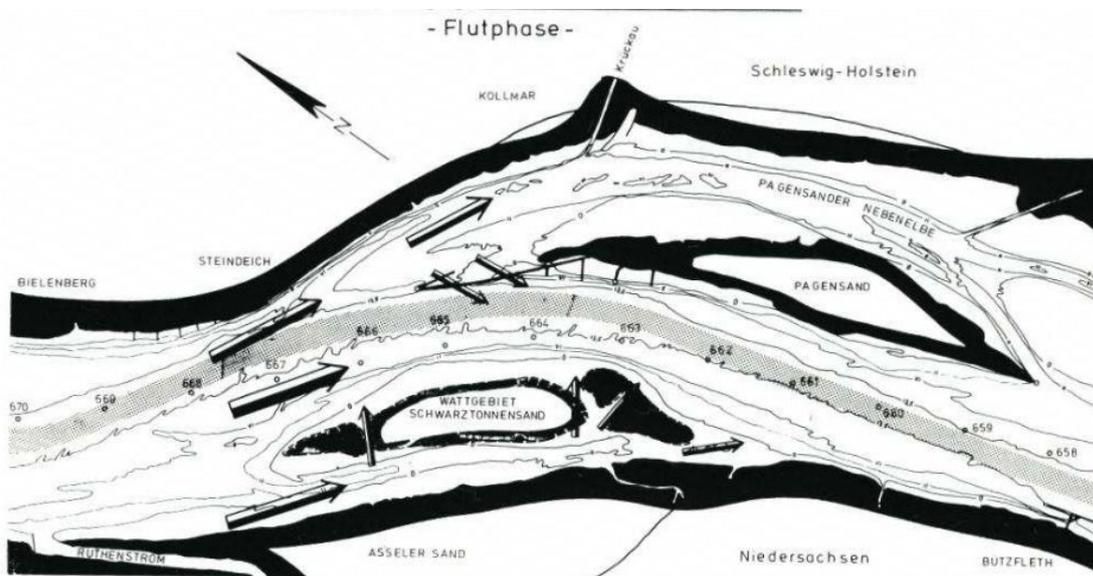


Abbildung 25: Abschnitt der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand, Zustand zu Beginn der 1970er Jahre nach dem 12m Ausbau (Quelle: Visscher und Wolf 1987)

In den 1960er und 1970er Jahren wurden mit dem Bau der Sturmflutsperrwerke Krückau und Pinnau sowie der Vordeichung im Bereich der Haseldorfer Marsch (vgl. Kap.2.1.1) auch umfassende Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes umgesetzt. Mit dem Bau der Sturmflutsperrwerke (1966 - 1969) gingen Veränderungen in den Mündungsbereichen von Pinnau und Krückau einher (BfG 2002b). Zudem fand regional eine Sandentnahme zum Bau des Deiches statt, die die Haseldorfer Binnenelbe abtrennt. Diese Entnahme hatte, wie auch die Sandeinträge aus der Sandvorspülung am nördlichen Ende von Pagensand und weitere Maßnahmen auf Pagensand, nachhaltige Auswirkungen auf die Morphologie der Nebelbe (BfG 2008).

Zwischen 1975 und 1980 fanden weitere Aufspülungen im mittleren und nördlichen Teil der Insel Pagensand statt. Nachdem am nördlichen Leitdamm stärkere Schäden aufgetreten

waren, die u.a. die Einbindung des Dammes in die Insel gefährdeten und zudem lokal starke Querströmungen verursachten, wurde dieser im Zeitraum 1987-1989 ertüchtigt und dabei erhöht (Visscher und Wolf 1987).

In den Jahren 1998 – 1999 wurde die Unterelbe im Bereich der Fahrrinne erneut vertieft auf -14,5 m SKN. Ein Teil des in diesem Zusammenhang anfallenden Baggerguts wurde auf die Insel Pagensand verbracht. Hierzu wurde im Mittelteil erneut ein Spülfeld angelegt (BfG 2002b).

Einen Überblick über wichtige Baumaßnahmen im Bereich der Pagensander Nebelbebe gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Ausgewählte Baumaßnahmen im Bereich Pagensander Nebelbebe, (Informationen aus: Schätzler und Meisel 1937; BfG 2002b, 2004)

Jahr	Maßnahme
1895 - 98	Ausbau Pagensand Nord
1900 - 36	Sturmflutfreie Aufspülung von Teilen der Insel Pagensand und Bepflanzung der Insel zur Vermeidung von Sandflugs
1922 - 26	Bau des Leitdamms Süd Errichtung einer Grundschwelle im Bereich Pagensand Nord
1927 - 36	Bau des Leitdamms Nord mit Flügeldamm
1927 - 36	Aufspülung des Südteils der Insel
1966 - 69	Bau der Sturmflutsperrwerke Pinnau und Krückau
1974 - 77	Zusätzliche Verbreiterung der Fahrrinnenkurve Pagensand Nord (im Zuge des -13,5 m SKN-Ausbaus)
1975 - 78	Vordeichung Haseldorfer Marsch Teilweise Abdämmung Haseldorfer Binnenelbe
1975, 1978 - 80	Aufspülung Insel Pagensand: Mittelteil 1975, Nordteil 1978 – 80
1987 - 89	Ertüchtigung und Erhöhung des Leitdamms Nord
1993	Verlegung der Fahrrinnenkurve Pagensand Nord
1999	Zusätzliche Verbreiterung der Fahrrinnenkurve Pagensand Nord (im Zuge des -14,5 m SKN-Ausbaus)
1999 - 00	Aufspülung im Mittelteil der Insel Pagensand Material überwiegend aus dem -14,5 m SKN-Ausbau von (1999 - 00)

2.5.3 Morphometrie (Länge, Breite, Tiefe, Sohlsedimente)

Mit über 10 km Länge gehört die Pagensander Nebelbe zusammen mit der Hahnöfer Nebelbe zu den längsten Nebelben. Die Breite im sublitoralen Bereich beträgt 200 – 400 m. Die Pagensander Nebelbe ist gekennzeichnet durch Wattbereiche, Rinnen und flache Uferstrukturen (BfG 2002b). Die Rinnen weisen Wassertiefen zwischen 0,5 m und 4,5 m unter KN auf. In den aus der Sohle entnommenen Sedimentproben überwiegen schluffige und tonige Anteile (BfG 2002b).

2.5.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Der Einfluss von einigen Baumaßnahmen auf die Strömungsverhältnisse im Bereich der Pagensander Nebelbe wurde zumindest teilweise mit Hilfe von Messungen in der Natur untersucht (Abbildung 11). Der Vergleich der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten für die Zeiträume vor und nach Abschluss der Fahrinnenvertiefung auf -13,5 m KN im Jahr 1984 zeigt, dass sowohl Ebbe als auch Flutstromgeschwindigkeiten nach 1984 (im Vergleich zu vor 1984) tendenziell zugenommen haben. Bei der Bewertung der Analysen ist zu berücksichtigen, dass die punktuell durchgeführten Messungen mit einer vergleichsweise kurzen Dauer von ca. 14 Tagen nicht zwangsläufig repräsentativ sein müssen (BfG 2008).

Vor allem aufgrund der unterschiedlichen Geometrien von Hauptrinne und Pagensander Nebelbe kommt es zu Laufzeitdifferenzen, die vor allem bei einsetzendem Flutstrom deutlich werden. Der einsetzende Flutstrom in der Hauptrinne trifft im Bereich Steinloch bzw. je nach Tideverhältnissen auch bis nördlich der Pinnaumündung auf den einsetzenden Flutstrom in der Nebelbe (ENTELMANN 25.09.18). In diesem Bereich sind Verhandlungstendenzen zu beobachten (ebd.).

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Pagensander Nebelbe und Hauptelbe wurde anhand von Messdaten (überwiegend einzelne Tagesmessungen im Zeitraum 2000 - 2010) bestimmt zu 0,18 bei Flut und 0,13 bei Ebbe (ENTELMANN 12.02.19a). Eine weitere Quelle gibt ein Maximum von 0,3 bei Flut an (BfG 2008). Mit den vergleichsweise großen Abflussanteilen bei Flut und Ebbe gehört die Pagensander Nebelbe zu den besser durchströmten Nebelben (BfG 2008). Der Vergleich der oberflächennahen Schwebstoffkonzentration (aus Hubschrauberlängsprofilen der ARGE ELBE) zwischen Nebelbe und Hauptelbe zeigt in beiden Bereichen die gleiche Größenordnung, was auf einen gut durchmischten Wasserkörper und einen intensiven Wasser- und Materialaustausch zwischen Haupt- und Nebenrinne hindeutet (ebd.).

Der resultierende Stromauftransport aller Fraktionen im Bereich der Pagensander Nebelbe sowie der Haseldorfer Binnenelbe ist in Bezug auf den Nettoschwebstofftransport flutstromdominant (BfG 2008).

2.5.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Pagensander Nebeneibe über die Zeit werden in der Gegenüberstellung der morphologischen Einheiten deutlich (Abbildung 26), die für die Jahre 1900, 1950 und 1995 aus historischen Karten abgeleitet wurden. Die für die Erstellung der Karten verwendete Datengrundlage sowie die bei der Interpretation zu beachtenden Einschränkungen wurden bereits in Kapitel 2.2.5 erläutert. Der Vergleich der Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt die deutliche Zunahme der Inselfläche von Pagensand sowie der Wattfläche um die Insel herum. Das Wachstum fand vor allem in Nord- und Südrichtung, also entlang der Leitdämme, statt. Gleichzeitig hat die Breite der Rinne hinter Pagensand zwischen 1900 und 1950 deutlich abgenommen. Zudem ist im Übergang zur Haseldorfer Binneneibe in 1950 nur noch eine tiefere Rinne anstatt zwei Rinnen (in 1900) vorhanden.

Zwischen 1950 und 1995 haben die Inselfläche und Wattfläche um die Insel herum weiter zugenommen. Auch am Festlandufer sind größere Veränderungen zu erkennen. Ganz besonders fällt die Zunahme der Vordeichflächen und der Wattfläche entlang des gesamten Festlandufers mit besonderer Ausprägung im südlichen Abschnitt auf. Entsprechend der Zunahmen der Vordeichs- und Wattflächen haben die Breiten der Rinnen hinter der Insel sowie die Übergänge zur Haseldorfer Binneneibe und der Hauptelbe (das Steinloch) weiter abgenommen.

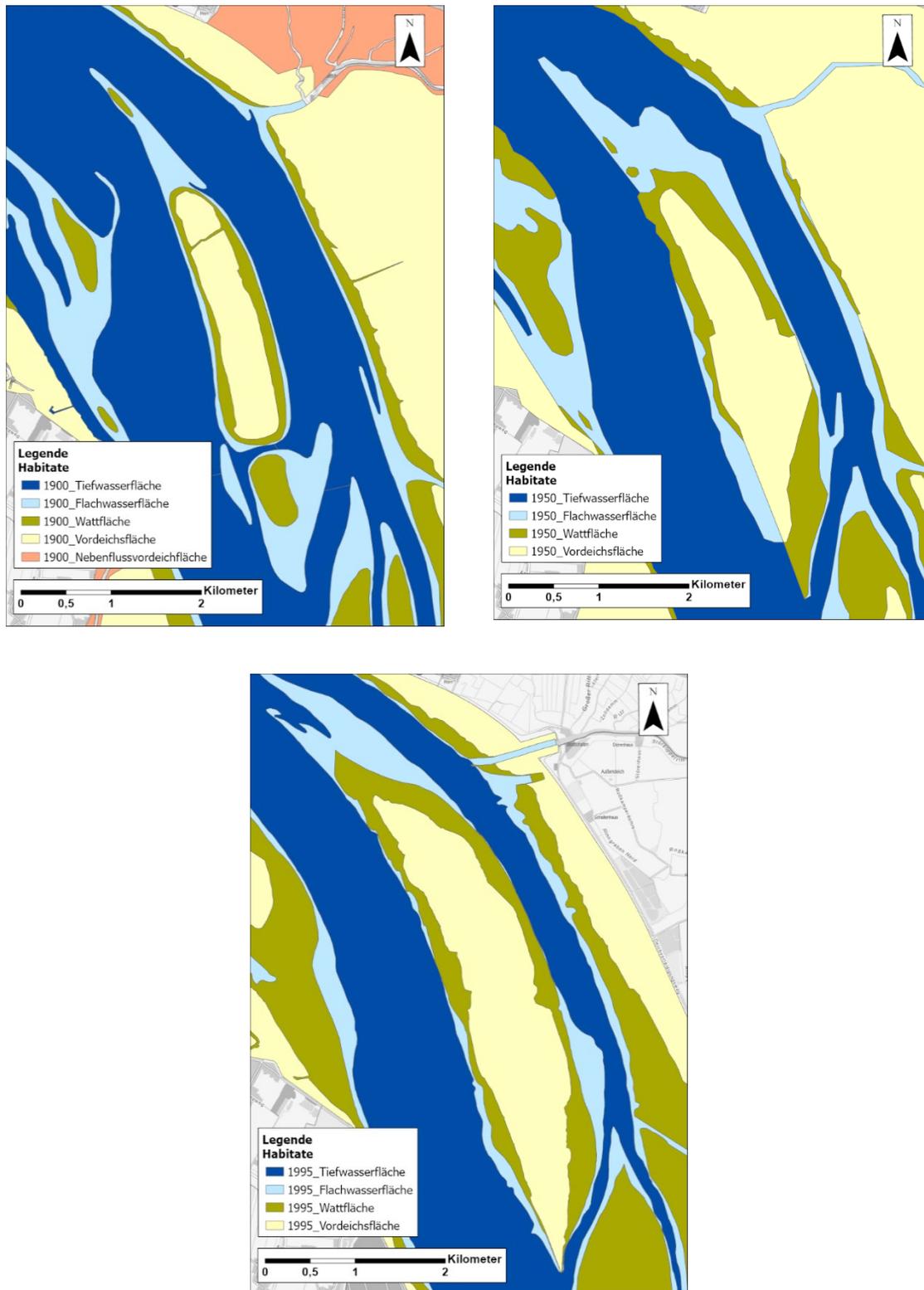


Abbildung 26: Morphologische Einheiten im Bereich der Pagensander Nebenelbe im 20. Jahrhundert, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

Die volumetrische Auswertung von FRÄßDORF (1995) zeigt für den Zeitraum zwischen 1950-1971 eine deutliche Zunahme des Volumens für Bereiche mit Wassertiefen größer als 3 m, während das Volumen in Bereichen mit Wassertiefen unterhalb von 3 m nahezu unverändert bleibt. Für den Zeitraum 1971 - 1992 ist hingegen eine deutliche Abnahme des Volumens für alle Wassertiefenbereiche erkennbar. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der quantitativen Aussagekraft der volumetrischen Auswertungen von Fräßdorf sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten.

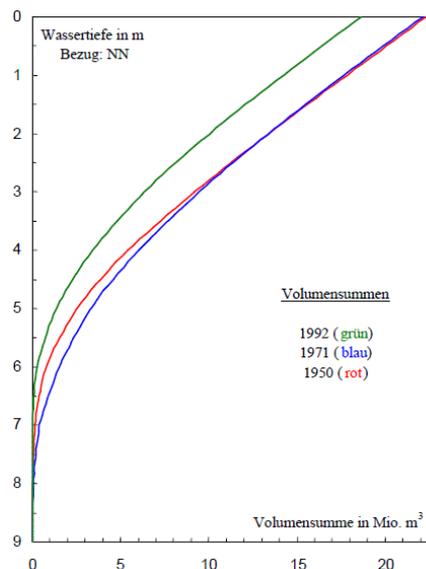


Abbildung 27: Volumenverteilung in der Pagensander Nebelbe für die Jahre 1950, 1971 und 1992 (Quelle: FRÄßDORF (1995))

Zwischen 1995 und 2004 waren in der Pagensander Nebelbe jährliche Schwankungen der Sohlhöhenlage zu beobachten. Während in einigen Jahren großräumige Sedimentationstendenzen vorherrschten, kam es in anderen Jahren zu einer Eintiefung der Sohle. Eine ausbaubedingte (Ausbau 1999/2000) Zunahme der Sedimentationsraten und daraus folgende Verlandung dieser morphologisch relativ stabilen Nebelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten (BfG 2006). In einigen Bereichen der Pagensander Nebelbe waren jedoch Verlandungstendenzen zu beobachten. Dazu zählen der mittlere und südliche Abschnitt mit dem Steinloch sowie der nördliche Bereich (Folge der Umgestaltung des Leitdamms Pagensand Nord 1987 - 1989) (BfG 2008). Ansonsten kann diese Nebelbe als morphologisch stabil bezeichnet werden (ebd.).

Die morphologische Entwicklung im Bereich der Pagensander Nebelbe in der jüngeren Vergangenheit ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Differenzendarstellung (unten) zeigt mehrere größere zusammenhängende Bereiche mit Verlandungstrend. Inselfeitig sind dies jeweils ein Bereich im Norden und im Süden. Hinzu kommen landseitig ein Bereich auf Höhe der Inselmitte und die südliche Verbindung zur Elbe, das Steinloch. Der ebenfalls verlandende Bereich am Übergang zur Haseldorfer Binnelbe wird in Kapitel 2.4.5 behandelt.

Der nördliche Teil der Pagensander Nebeneibe verlandet weniger stark als der südliche. Neben ausgedehnten Flächen in denen eine Verlandungstendenz vorherrscht, sind hier auch Flächen mit abnehmenden Sohlhöhen zu erkennen, wie z.B. nahe dem landseitigen Ufer. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den morphologischen Einheiten (1900 - 1995) sowie der Unsicherheiten sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten.

Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Pagensander Nebeneibe im Zeitraum 1971 bis 1992 einen deutlichen Verlandungstrend, der insbesondere in den Jahren nach der Abdämmung der Haseldorfer Binneneibe sehr ausgeprägt war. Im Zeitraum 1992 bis 2016 herrscht im südlichen Teil weiter ein leichter Verlandungstrend vor, während im nördlichen Teil kein eindeutiger Trend festzustellen ist, da sich hier sowohl Bereiche mit zunehmenden als auch mit abnehmenden Sohlhöhen zeigen.

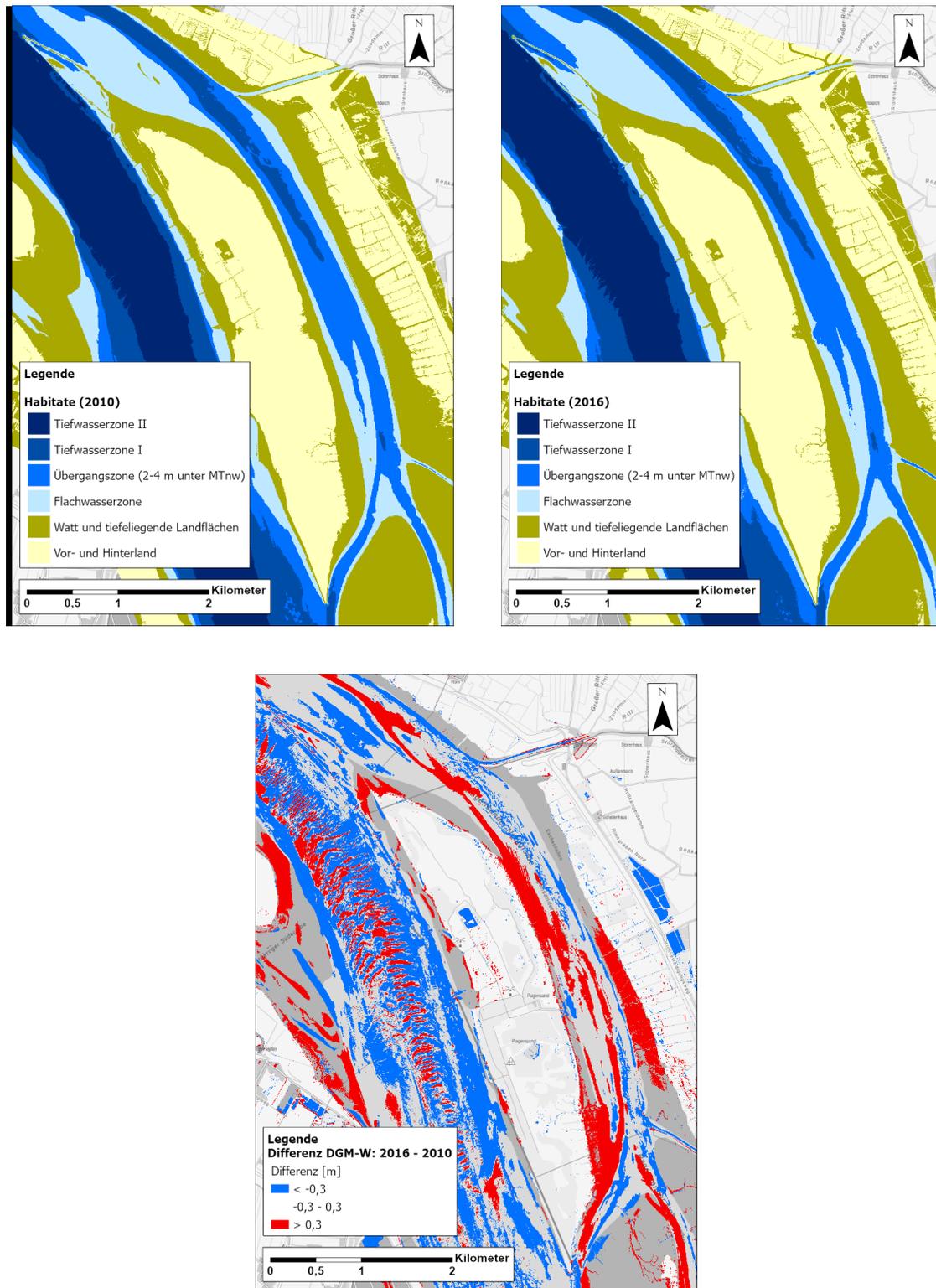


Abbildung 28: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGM-W 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGM-W 2016 – DGM-W 2010 (unten) im Bereich der Pagensander Nebelbe, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

2.5.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Pagensander Nebenelbe liegt wie die Haseldorfer Binnenelbe, die Schwarztonnensander Nebenelbe und die Glückstädter Nebenelbe im Funktionsraum 4. Die IBP Arbeitsgruppe (2011c) und ENTELMANN (25.09.18) schreiben hierzu:

Funktionsraum 4: „Die meisten Inseln gehen auf die Aufspülung von Sand [...] zurück. Sie sind die Voraussetzung für das Bestehen von Nebenelben. Diese Nebenarme [...] erfüllen für die Lebensgemeinschaft des Ästuars unverzichtbare Funktionen.“

Bezüglich des Untersuchungsbedarfs wird dem System eine „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3) beigemessen: „Beobachtung der Entwicklung des hydrologischen und morphologischen Verhaltens der Stromelbe und der Nebenelben“ sowie „Beobachtung der Entwicklung der Sauerstoffgehalte und Nährstoffgehalte [...]“ (IBP Arbeitsgruppe 2011c; ENTELMANN 25.09.18).

2.6 Schwarztonnensander Nebenelbe

2.6.1 Lage

Die Schwarztonnensander Nebenelbe erstreckt sich linksseitig des Hauptstroms zwischen Elbe-km 663 und Elbe-km 667. Die in Abbildung 30 dargestellte Bathymetrie zeigt die vergleichsweise flachen Nebenelbe vor Umsetzung des Fahrrinnenausbaus 2019 – 2021. Im Zuge des aktuellen Fahrrinnenausbaus wurde im Bereich der Nebenelben eine aquatische Ausgleichsmaßnahme umgesetzt.

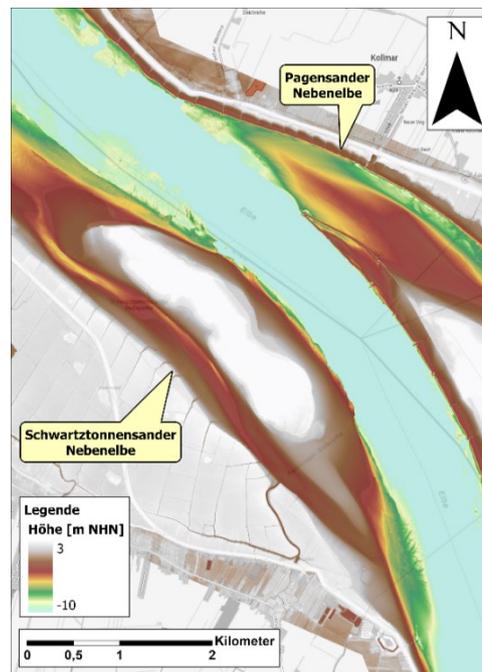


Abbildung 30: Bathymetrie der Schwarztonnensander Nebenelbe, derzeit keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGM-W 2016, WSA Elbe-Nordsee)

2.6.2 Entstehung

Die Entwicklung der Schwarztonnensander Nebelbe ist eng mit der Entwicklung der Pagensander Nebelbe verbunden. Wie bereits in Kapitel 2.5.2 beschrieben, war der Abschnitt der Elbe zwischen Pagensand und dem heutigen Schwarztonnensand zu Beginn des 20. Jahrhunderts als sich permanent änderndes Stromspaltungsgebiet bekannt, in dem Querströmungen zu einer Verflachung und Verlagerung der Fahrrinne und damit einhergehend zu einer Verkleinerung des Krümmungsradius der Fahrrinne führten (Abbildung 24), woraus eine Gefährdung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs resultierte (Schätzler und Meisel 1937; Visscher und Wolf 1987). Zur Verbesserung der beschriebenen Situation erfolgte der Ausbau der Insel Pagensand zum Leitwerk (s. Kapitel 2.5.2). Strömungsmessungen, die im Jahr 1936 nach dessen Fertigstellung durchgeführt wurden, ergaben weiterhin ein deutliches Quergefälle vom südlichen zum nördlichen Ufer, insbesondere von der südlichen Nebenrinne über den Schwarztonnensand hinweg (Schätzler und Meisel 1937). In der Folge wurde erwartet, dass weiterhin Sand von der Wattfläche in das Hauptfahrwasser eingetragen wird (ebd.).

Zeitgleich mit dem Bau des Norddamms an der Insel Pagensand zwischen 1928 und 1936 (vgl. Kapitel 2.5.5) wurden mehrere Baggerkampagnen im Bereich des Schwarztonnensander Ufers durchgeführt, um dessen Vorrücken in Richtung Fahrrinne zu verhindern und die Fahrinnenkurve abzuflachen, so dass die Flut- und Ebbeströmungen in die Fahrrinne gelenkt werden (Schätzler und Meisel 1937; BOEHLICH 2003; Boehlich und Strotmann 2019). Nach Abschluss der Baumaßnahmen stellten sich die erwünschten Strömungsverhältnisse zumindest teilweise ein, jedoch blieb der Abschnitt der Tideelbe im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbe und der Pagensander Nebelbe unterhaltungsintensiv, was vor allem auf die fehlenden Regulierungsmaßnahmen am südlichen Elbufer, den Bereich um Schwarztonnensand, zurückgeführt wurde (Visscher und Wolf 1987). Aus der Auswertung von hydrologischen Messdaten ging hervor, dass Querströmungen feines Material (schluffigen Feinsand) aus dem damals zerklüfteten Wattgebiet Schwarztonnensand in die Fahrrinne transportieren (ebd.).

In den Jahren 1968/1969 wurde das Wattgebiet Schwarztonnensand, das bis dahin nur bei Tideniedrigwasser sichtbar war, im Zuge der Fahrinnenvertiefung auf 13,5 m SKN "hochwasserfrei", d.h. über MThw, aufgespült. Es folgte die Herstellung einer Landverbindung zum Asseler Sand im Zeitraum 1969/70, die jedoch bereits im Jahr 1971 durch eine Sturmflut zerstört und in der Folge nicht wieder hergestellt wurde. (BfG 2002b)

In den Jahren 1970/71 wurde der stromabseitige Einlaufbereich durch Verklappung von Baggergut aus der Unterhaltung um durchschnittlich 1,5 m aufgehört (s. Abbildung 31). Parallel zu den Aufspülungen wurden zwischen 1970 und 1978 insgesamt 6 Mio. m³ Material am Rand zur Fahrrinne entnommen, um die durch die Aufspülung zur Insel verlorene Querschnittsfläche zu kompensieren (s. Abbildung 31). Zwischen 1972 und 1977 wurde Schwarztonnensand durch weitere Sandaufspülungen auf MThw+1,50 m erhöht, so dass die Insel seitdem nur im Sturmflutfall überflutet wird. Durch die umgesetzten Maßnahmen

wurde der vormals sehr ausgeprägte Flutstrom in der Rinne hinter Schwarztonnensand stark abgeschwächt, was auch zu einer Reduktion der Querströmungen in Richtung Hauptrinne führte. In der Hauptrinne stellte sich in Folge der Maßnahmen die gewünschte gleichmäßige Durchströmung sowohl bei Flut- als auch bei Ebbestrom ein. Im Ergebnis wurde eine Reduktion der jährlichen Unterhaltungsbaggermengen im Bereich der Hauptrinne zwischen Elbe-km 659 und 662 um 600.000 m³ registriert. (vgl. Visscher und Wolf 1987)

In der Rinne hinter Schwarztonnensand setzte hingegen eine starke Verlandungstendenz ein, die noch heute zu beobachten ist (BfG 2002b; ENTELMANN 25.09.18).

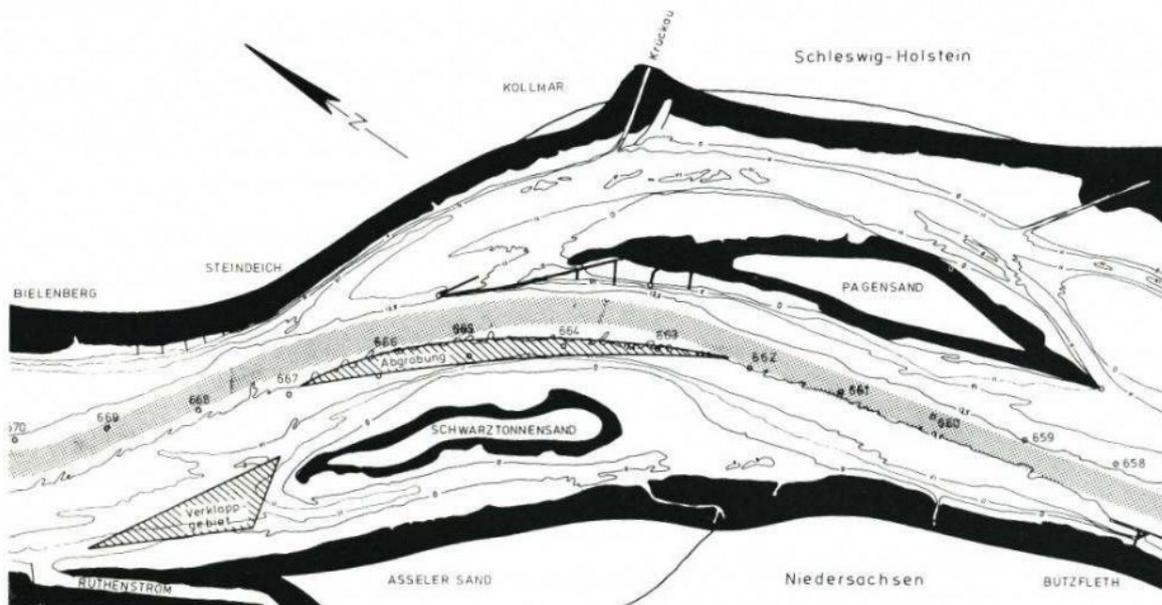


Abbildung 31: Abschnitt der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand, Zustand zu Beginn der 1970er Jahre nach dem 12m Ausbau, die schraffierten Flächen zeigen die durchgeführten Maßnahmen, (Quelle: Visscher und Wolf (1987))

2.6.3 Morphometrie

Mit einer Länge von etwa 4 km gehört die Schwarztonnensander Nebelnelbe zu den kürzeren Nebelnelben. Die Breite im sublitoralen Bereich betrug 2016 etwa 200 m und nahm in Richtung stromauf deutlich ab. Oberwasserseitig (d.h. am stromaufseitigen Ende) bestand bei MTnw kein Anschluss mehr an die Hauptrinne. Im Zuge der aktuellen Fahrrinnenanpassung (aquatische Ausgleichsmaßnahme) wurde die Rinne hinter dem Schwarztonnensand auf eine Solltiefe von NHN -3m (bzw. in den Randbereichen NHN -2,50 m bzw. NHN -1,60m) vertieft und stromauf wieder an das Hauptgerinne der Elbe angeschlossen (vgl. Kapitel 3.2.5).

Größere Wattbereiche sind der stromaufseitigen und stromabseitigen Inselspitze sowie dem Festlandufer vorgelagert. Sedimentproben aus der Gewässersohle der Schwarztonnensander Nebelnelbe weisen laut BfG (2008) einen schluffigen Anteil von über 80% auf.

2.6.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Schwarztonnensander Nebelbebe und Hauptelbe wurde anhand von Messdaten (überwiegend einzelne Tagesmessungen im Zeitraum 2000 - 2010) bestimmt zu 0,03 bei Flut und 0,02 bei Ebbe (ENTELMANN 12.02.19a). Eine andere Auswertung der BfG ergibt ein Verhältnis von weniger als 0,05 bei Ebbe und bei Flut (BfG 2008). Beide Angaben verdeutlichen die untergeordnete Anbindung der Rinne hinter Schwarztonnensand an das Durchflussgeschehen im Gesamtquerschnitt. Zudem ist die Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung in der Schwarztonnensander Nebelbebe im Vergleich zur Stauwasserdauer in der Hauptrinne deutlich verlängert; sie beträgt bis zu 2,5 h, was von BfG (2008) auf die geringen Wassertiefen zurückgeführt wird.

2.6.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbebe über die Zeit werden in der Gegenüberstellung der morphologischen Einheiten deutlich (Abbildung 32), die für die Jahre 1900, 1950 und 1995 aus historischen Karten abgeleitet wurden. Die für die Erstellung der Karten verwendete Datengrundlage sowie die, bei der Interpretation zu beachtenden Einschränkungen, wurden bereits in Kapitel 2.2.5 erläutert. Der Vergleich der Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt eine deutliche Zunahme der Wattfläche, die in mehrere Teile untergliedert ist, sowie dem Rückgang der Tiefwasserfläche hinter den Wattflächen, was die Degeneration der Rinne verdeutlicht.

In der Darstellung für 1995 ist die durch Aufspülungen entstandene Insel deutlich erkennbar (Wattfläche wurde durch Aufhöhung zu Vordeichsfläche). Die Wattfläche um die Insel sowie am landseitigen Festlandufer ist zwischen 1950 und 1995 ebenfalls angewachsen, während die Rinne hinter der Insel deutlich verflacht ist. Am stromaufseitigen Übergang zur Hauptrinne befindet sich im Jahr 1995 keine Rinne mehr, sondern eine Wattfläche. Das bedeutet, dass an diesem Ende um das mittlere Tideniedrigwasser herum keine hydraulische Anbindung mehr gegeben war. Aktuell ist hier - wie bereits beschrieben - wieder ein Anschluss an das Hauptgerinne der Elbe erfolgt (hergestellte Rinne bis 2m unter MTnw).

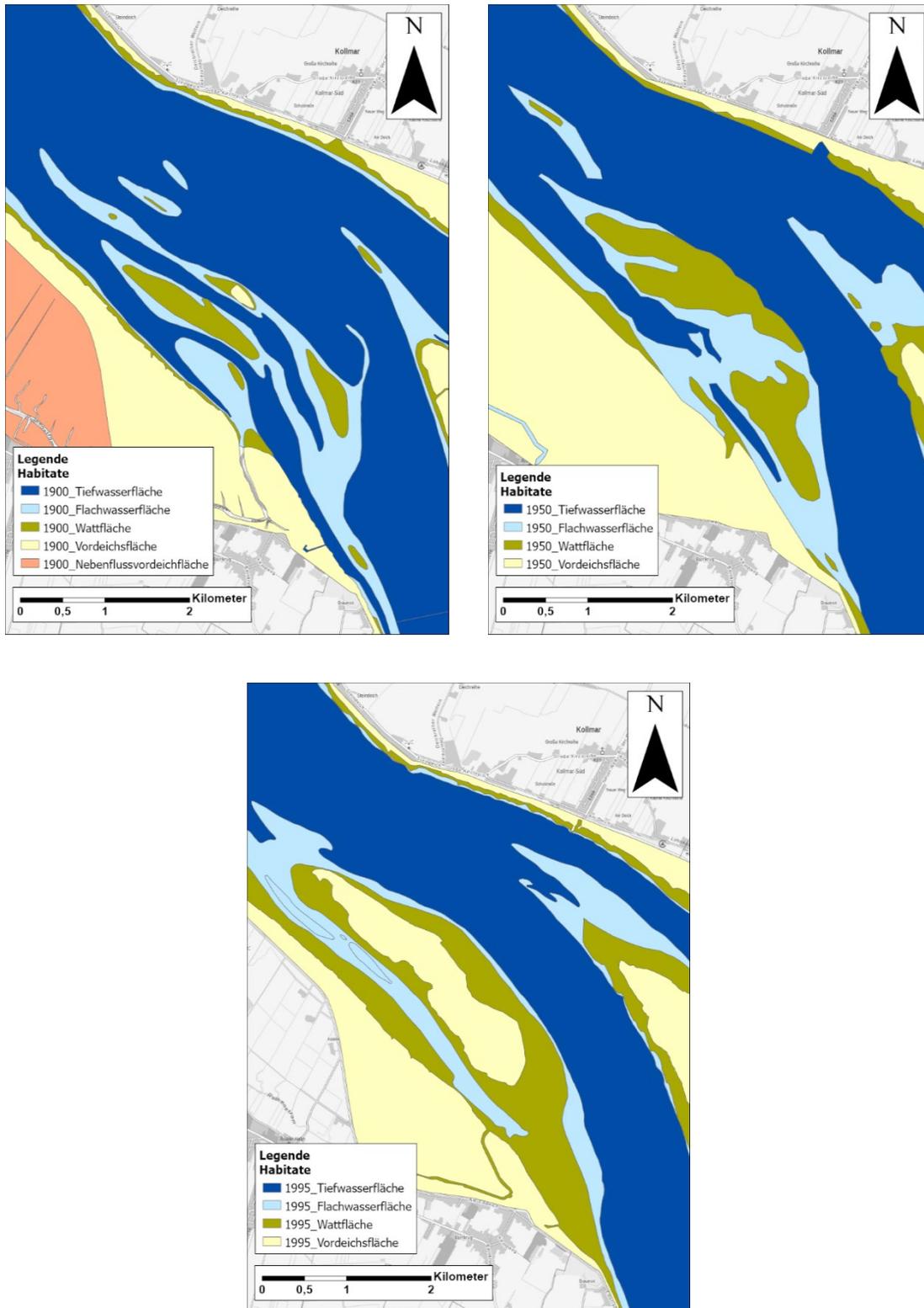


Abbildung 32: Morphologische Einheiten im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbeben im 20. Jahrhundert (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

Die in Abbildung 33 dargestellte volumetrische Auswertung von FRÄßDORF (1995) zeigt für den Zeitraum 1950-1970 eine deutliche Abnahme des Volumens, die sich auch zwischen 1970 und 1983 in abgeschwächter Form fortsetzt. Für den Zeitraum 1983 - 1995 ist hingegen tendenziell eine leichte Volumenzunahme auszumachen. Bei der Bewertung der Analysen sind die eingeschränkte Datenqualität und –verfügbarkeit zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.2.5).

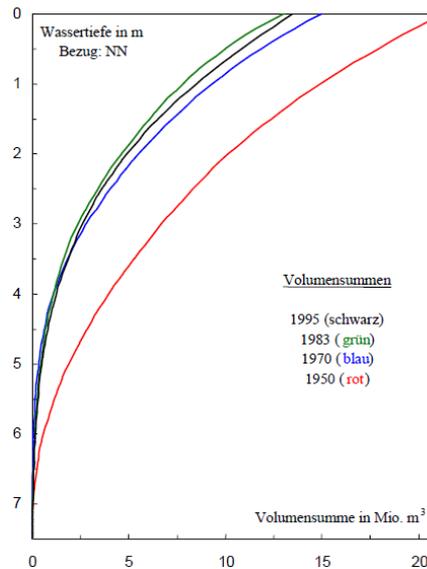


Abbildung 33: Volumenverteilung in der Schwarztonnensander Nebelbe für die Jahre 1950, 1970, 1983 und 1995, (Quelle: FRÄßDORF 1995)

Eine Auswertung für den Zeitraum 1995 - 2004 durch BfG (2006) hat jährliche Schwankungen der Sohlhöhenlage ergeben. Während in einigen Jahren Sedimentationstendenzen vorherrschten, kam es in anderen Jahren zu einer Eintiefung der Sohle. Eine ausbaubedingte (Ausbau 1999/2000) Zunahme der Sedimentationsraten und daraus folgende Verlandung dieser morphologisch relativ stabilen Nebelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten. (BfG 2006)

Die morphologische Entwicklung im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbe bis 2016 ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Differenzendarstellung (unten) zeigt im Bereich der Rinne hinter der Insel eine durchgehende langgestreckte Fläche mit Verlandungstrend. Parallel zu dieser Fläche sowie um die Nordspitze herum erstrecken sich abschnittsweise kleinere langgestreckte Flächen mit Erosionstendenz. Dem wasserseitigen Ufer der Insel vorgelagert ist eine größere Fläche mit Verlandungstrend zu erkennen. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den morphologischen Einheiten (1900-1995) sowie der Unsicherheiten sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten. Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Schwarztonnensander Nebelbe im Zeitraum 1950 bis 1995 eine deutlichen Volumenabnahme, die insbesondere in den Jahren nach der den Vorspülungen (1970 ff) sehr ausgeprägt war. Für den

Zeitraum 1995 bis 2004 wurde kein großflächiger eindeutiger Trend identifiziert. Zwischen 2010 und 2016 überwiegen in der Rinne hinter der Insel sowie dem fahrrinnenseitig vorgelegerten Ufer die Bereiche mit Verlandungstendenz, wobei lokal auch Bereiche mit Erosionstendenz vorhanden sind.

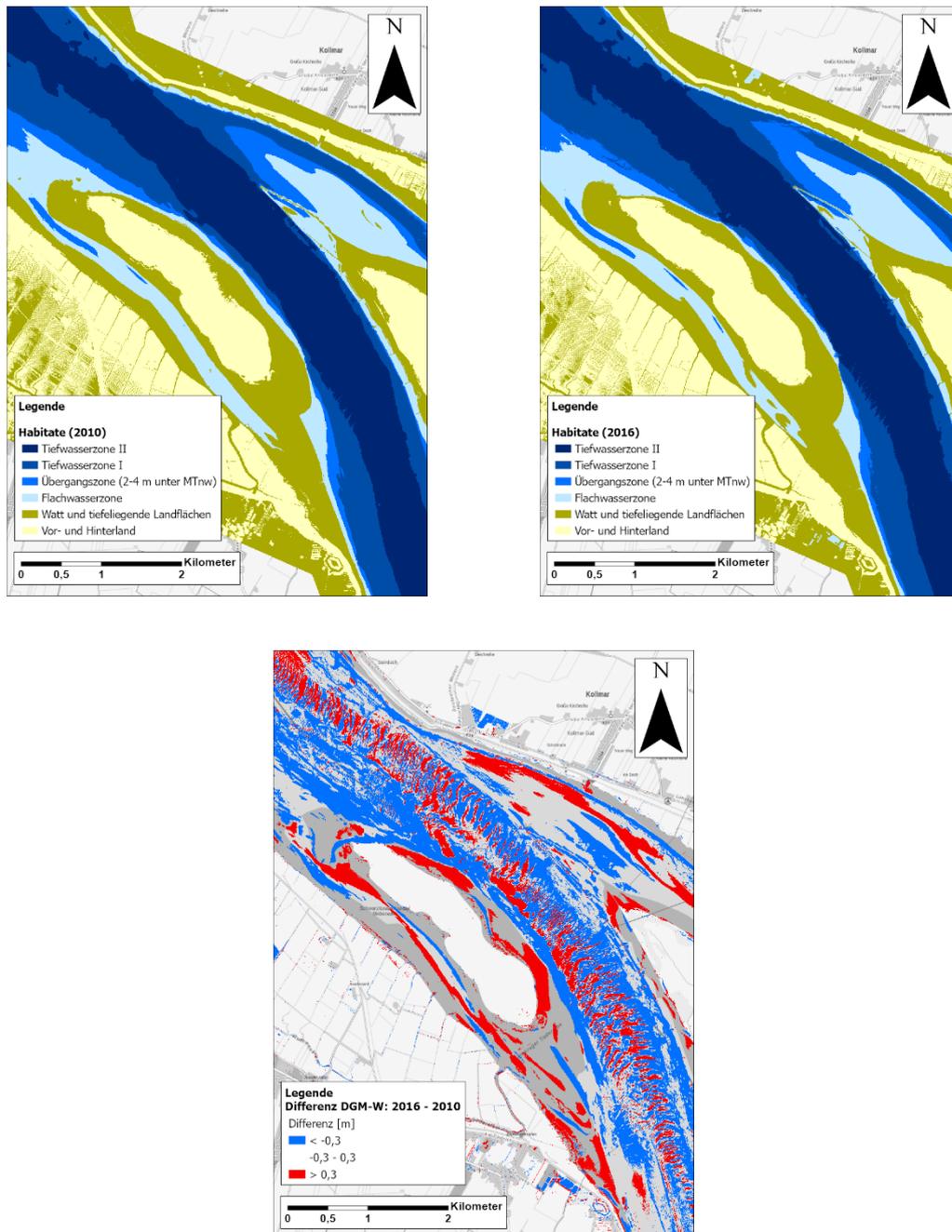


Abbildung 34 : Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGM-W 2010 und 2016 (oben) und Differenzdarstellung DGM-W 2016 – DGM-W 2010 (unten) im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbe, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

2.6.6 Unterhaltung

In der Schwarztonnensander Nebelbe fanden bis 2019 keine regelmäßigen Baggerungen statt.

Im Rahmen der aktuellen Fahrrinnenanpassung wurde, wie bereits erwähnt, im Zuge einer aquatischen Ausgleichsmaßnahme eine Rinne mit einer durchgehenden Sohltiefe von NHN -3,0 m hergestellt, um die Nebelbe besser an den Hauptstrom anzubinden (Anmerkung: Diese Rinne ist in Abbildung 34 noch nicht dargestellt). Durch die Maßnahme sollen bisher trocken fallende Bereich am stromaufseitigen Ende wieder während des gesamten Tidezyklus überflutet werden (WSV 2020). In diesem Zusammenhang sind zukünftig auch Pflegebaggerungen in mehrjährigem Abstand vorgesehen.

2.6.7 Ufersicherung

Die Ufer der Insel Schwarztonnensand sind wie auch das gesamte südliche Festlandufer unverbaut (Abbildung 35). Letzte Deckwerksabschnitte sowie Buhnenbereiche wurden im Zuge der (Kapitel 2.6.6) Ausgleichsmaßnahme zurückgebaut.



Abbildung 35: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee (2021))

2.6.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Schwarztonnensander Nebenelbe liegt wie die Pagensander Nebenelbe, die Haseldorfer Binnenelbe und die Glückstädter Nebenelbe im Funktionsraum 4. Die IBP Arbeitsgruppe (2011c) und ENTELMANN (25.09.18) schreiben hierzu:

Funktionsraum 4: „Die meisten Inseln gehen auf die Aufspülung von Sand [...] zurück. Sie sind die Voraussetzung für das Bestehen von Nebenelben. Diese Nebenarme [...] erfüllen für die Lebensgemeinschaft des Ästuars unverzichtbare Funktionen.“

Bezüglich des Untersuchungsbedarfs wird dem System eine „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3) beigemessen: „Beobachtung der Entwicklung des hydrologischen und morphologischen Verhaltens der Stromelbe und der Nebenelben“ sowie „Beobachtung der Entwicklung der Sauerstoffgehalte und Nährstoffgehalte [...]“ (IBP Arbeitsgruppe 2011c; ENTELMANN 25.09.18).

2.7 Glückstädter Nebenelbe

2.7.1 Lage

Die Glückstädter Nebenelbe erstreckt sich rechtsseitig des Hauptstroms zwischen Elbe-km 670 und Elbe-km 680. Abbildung 36 zeigt die Bathymetrie der sehr geradlinig zur Hauptrinne verlaufenden Nebenelbe. Die Glückstädter Nebenelbe wird durch die Rhinplate von der Hauptrinne der Tideelbe getrennt. Etwa auf halber Höhe der Insel ist festlandseitig die Zufahrt zum Glückstädter Hafen zu erkennen.

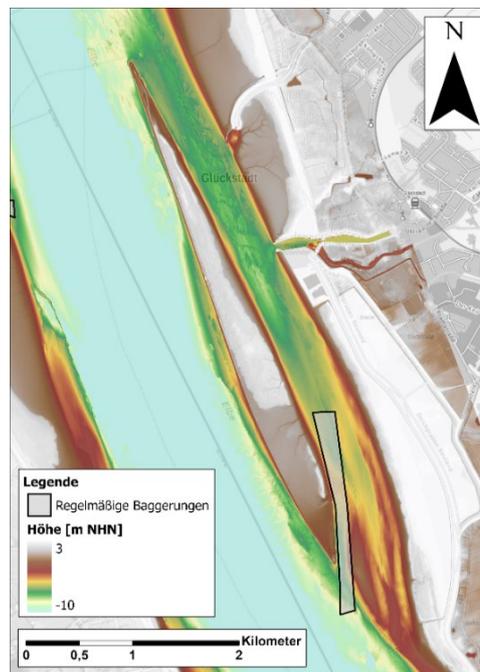


Abbildung 36: Bathymetrie der Glückstädter Nebenelbe und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden, (Datenquelle: DGM-W 2016, WSA Elbe-Nordsee)

2.7.2 Entstehung

Die Rhinplate war einst eine Sandbank vor Glückstadt, die zwischen 1953 und 1959 im Nachgang des Ausbaus der Tideelbe auf 10,0 m SKN aufgespült wurde (Kappenberg und Fanger 2007). Hierzu wurden sandiges Material verwendet (BfG 1997). Im Zeitraum 1983-1985 wurden im Bereich der Rhinplate Flügeldämme errichtet, um die Bewegung der Sandbank einzudämmen und die Strömung auf die Fahrrinne zu konzentrieren (ebd.).

Kappenberg und Fanger (2007) weisen unter Verwendung der Daten von Rolinski und Eichweber (2000) darauf hin, dass am stromaufwärts gelegenen Ende der Rhinplate (Elbekm 670) ein Knotenpunkt der höherharmonischen M10-Partialtide liegt. Dies macht das Gebiet nach Aussage von Rolinski und Eichweber (2000) zu einer Senke für Sedimente. Die Autoren führen als Beleg dafür an, dass sich im Zeitraum vor der Veröffentlichung der Schrift ein Baggerschwerpunkt in diesem Gebiet befand (Rolinski und Eichweber 2000). Nach der Vertiefung der Fahrrinne im Jahr 1999 gingen die Baggermengen in diesem Bereich jedoch deutlich zurück (Kappenberg und Fanger 2007), was die These wieder entkräftet.

Ein wesentlicher Grund für den Rückgang der Baggermengen in der Fahrrinne ist nach Kappenberg und Fanger (2007) die erfolgreiche Verstärkung der Strömung durch die Einengung des Fließquerschnitts. Die Einengung ist Resultat von Baggergutablagerungen (Herstellung einer „Baggergutablagerungsfläche“ inkl. Randeinfassungen) im Bereich Krautsand (ebd.). Die Errichtung des entsprechenden Strombauwerkes erfolgte im Zuge der Fahrinnenvertiefung 1999. Mit der Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten in der Hauptfahrinne um bis zu 15 cm/s stieg die Transportkapazität um bis zu 25% (Boehlich 2003).

2.7.3 Morphometrie

Mit etwa 5 km Länge gehört die Glückstädter Nebenelbe zu den kürzeren Nebenelben. Die Breite im sublitoralen Bereich beträgt im stromabgelegenen Teil bis zu 500 m. Am stromaufseitigen Ende ist die sublitorale Breite mit 50 – 200 m deutlich geringer. Die Sohlhöhen nehmen von Nord nach Süd, d.h. in Flutstromrichtung, deutlich ab.

Das Sohlmaterial in der Glückstädter Nebenelbe besteht in weiten Bereichen aus festen bindigen Böden, deren hoher Erosionswiderstand eine Strömungserosion weitgehend unterbindet (BAW 1996). Im stromabgelegenen Teil der Glückstädter Nebenelbe sind ausschließlich Schlicke mit einem Schluffanteil von mehr als 80% zu finden (BfG 2008).

2.7.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Der Einfluss von einigen Baumaßnahmen auf die Strömungsverhältnisse im Bereich der Glückstädter Nebenelbe wurde zumindest teilweise mit Hilfe von Messungen in der Natur untersucht. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse von Fließgeschwindigkeitsmessungen im Bereich der Glückstädter Nebenelbe (hier als Glückstädter Fahrwasser bezeichnet) und anderen Nebenelben vor und nach der Fahrinnenvertiefung auf -13,5 m KN im Jahr 1984

sowie teilweise vor und nach dem Jahr 2004. Dargestellt sind die Schwankungsbreiten der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten, die innerhalb des jeweils beobachteten Spring-/Nipp-Zyklus auftraten. Die Auswertungen für die Glückstädter Nebeneibe zeigen, dass sich sowohl Ebbe als auch Flutstromgeschwindigkeiten nach 1984 nur wenig gegenüber dem Zeitraum vor 1984 geändert haben. Tendenziell ist sogar eine leichte Abnahme nach 1984 zu erkennen. Insgesamt sind bei der Bewertung dieser Analysen die in Kapitel 2.3.4 genannten Einschränkungen zu berücksichtigen.

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Glückstädter Nebeneibe und Hauptelbe wurde anhand von Messdaten (überwiegend einzelne Tagesmessungen im Zeitraum 2000 - 2010) bestimmt zu 0,16 bei Flut und 0,12 bei Ebbe (ENTELMANN 12.02.19a). Eine Auswertung von BfG (2008) ergibt ebenfalls ein Verhältnis von 0,16 bei Flut. Mit den vergleichsweise großen Abflussanteilen bei Flut und Ebbe gehört die Glückstädter Nebeneibe zu den besser durchströmten Nebeneiben (ebd.). Der Vergleich der oberflächennahen Schwebstoffkonzentration (aus Hubschrauberlängsprofilen der ARGE ELBE) zwischen Glückstädter Nebeneibe und Hauptelbe zeigt in beiden Bereichen die gleiche Größenordnung, was auf einen gut durchmischten Wasserkörper und einen intensiven Wasser- und Materialaustausch zwischen Haupt- und Nebenrinne hindeutet (ebd.).

Bei einsetzendem Flutstrom in der Hauptelbe kommt es am stromaufseitigen Ende der Glückstädter Nebeneibe zu erhöhten Stauwasserdauern und günstigen Sedimentationsbedingungen (ENTELMANN 25.09.18).

2.7.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Glückstädter Nebeneibe über die Zeit werden in der Gegenüberstellung der morphologischen Einheiten deutlich (Abbildung 37), die für die Jahre 1900, 1950 und 1995 aus historischen Karten abgeleitet wurden. Die für die Erstellung der Karten verwendete Datengrundlage sowie die bei der Interpretation zu beachtenden Einschränkungen wurden bereits in Kapitel 2.2.5 erläutert.

Der Vergleich der Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt für die Rhinplate tendenziell ein Rückgang der Watt- und Vordeichsflächen zugunsten von Flachwasser- und Tiefwasserflächen. Die Verbindung zur Hauptrinne am stromaufseitigen Ende besteht in 1900 noch aus zwei Rinnen und in 1950 nur noch aus einer Rinne. Im Bereich des Festlandufers sind zwischen 1900 und 1950 Vordeichsflächen zu Wattflächen geworden.

In der Darstellung für 1995 ist die durch Aufspülungen entstandene Insel deutlich erkennbar. Fast die gesamte Wattfläche ist durch Aufhöhung zu Vordeichsfläche geworden. Lediglich im Bereich der Nord- und der Südspitze sind noch Wattflächen vorzufinden. Ansonsten ist die Insel umringt von Tiefwasserfläche, was auf vergleichsweise steile Böschungen hindeutet. Im nördlichen Teil (nördlich der Zufahrt Glückstadt) des landseitigen Festlandufers ist aus Vordeichsfläche Wattfläche geworden.

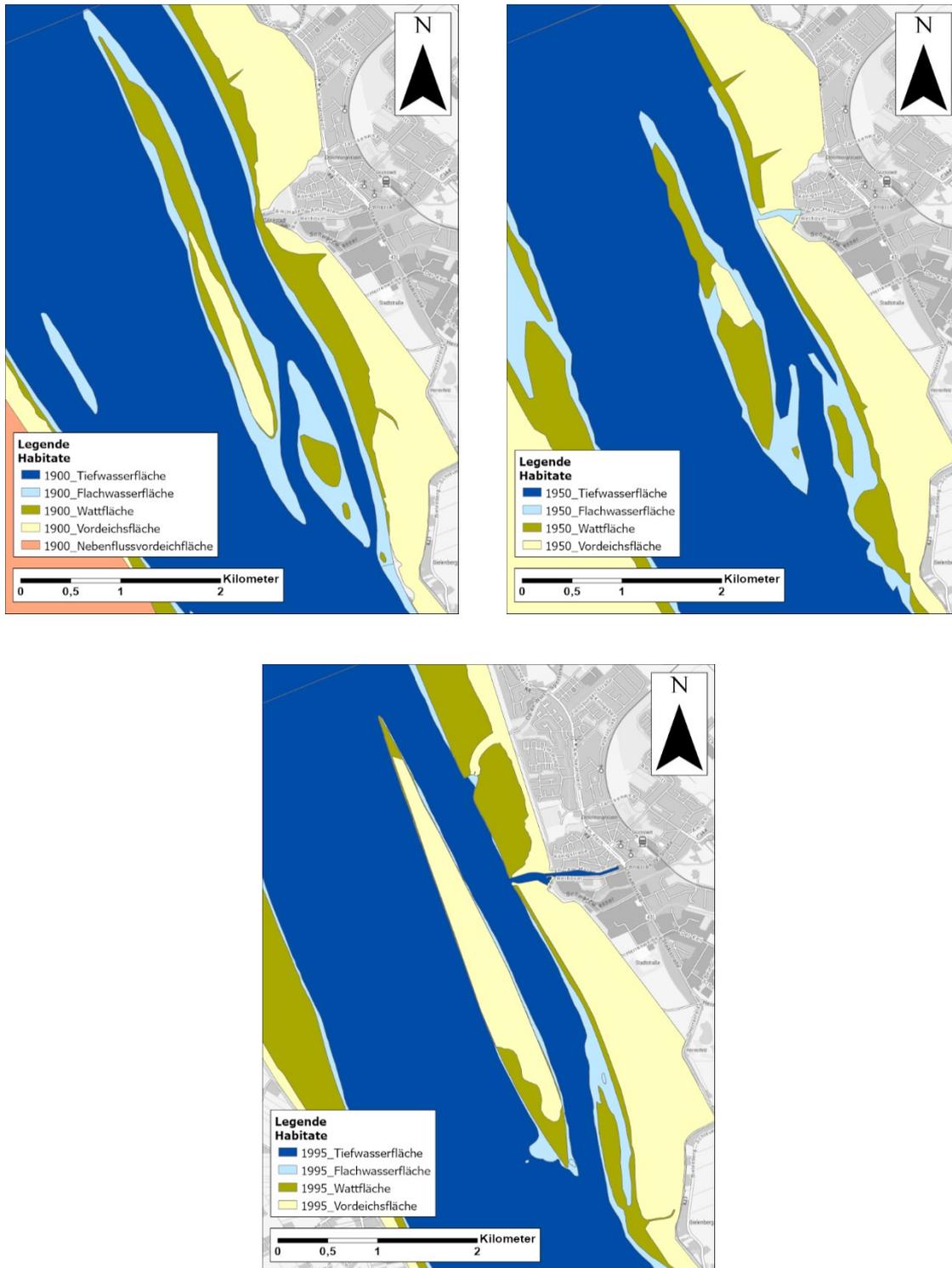


Abbildung 37: Morphologische Einheiten im Bereich der Glückstädter Nebelnelbe im 20. Jahrhundert, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

Die in Abbildung 38 dargestellte volumetrische Auswertung von FRÄßDORF (1995) zeigt für den Zeitraum 1950 - 1961 eine Verlandungstendenz, die im Vergleich zu anderen Nebelnelben (Pagensander Nebelnelbe, Hahnöfer Nebelnelbe oder Schwarztonnensander Nebelnelbe) jedoch deutlich geringer ausfällt. Diese kommt zwischen 1961-1973 zum Stillstand und kehrt sich zwischen 1973 - 1992 schließlich um in eine leichte Erosionstendenz. Bei der Bewertung der Analysen sind die eingeschränkte Datenqualität und –verfügbarkeit zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.2.5).

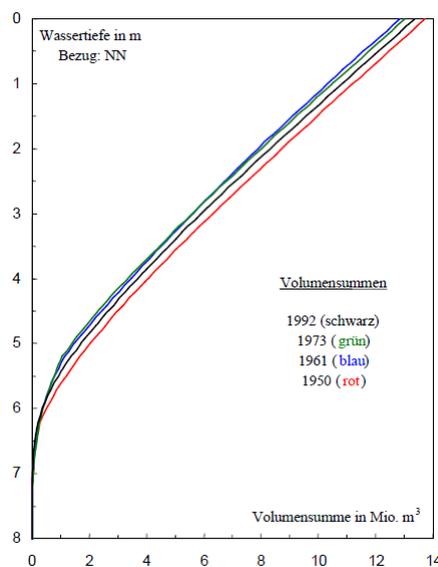


Abbildung 38: Volumenverteilung des Glückstädter Nebelnelbe für die Jahre 1950, 1961, 1973 und 1992, (Quelle: FRÄßDORF (1995))

Eine Auswertung für den Zeitraum 1995 - 2004 in BfG (2006) zeigt jährliche Schwankungen der Sohlhöhenlage. Während in einigen Jahren Sedimentationstendenzen vorherrschten, kam es in anderen Jahren zu einer Eintiefung der Sohle. Eine ausbaubedingte (Ausbau 1999/2000) Zunahme der Sedimentationsraten und daraus folgende Verlandung dieser morphologisch relativ stabilen Nebelnelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten. (BfG 2006)

Im Rahmen späterer Analysen wurde bis auf eine geringfügige Aufhöhung an der stromaufgelegenen Spitze der Rhinplate eine indifferente Sohlentwicklung festgestellt (BfG 2008).

Die morphologische Entwicklung im Bereich der Glückstädter Nebelnelbe in der jüngeren Vergangenheit ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Differenzendarstellung (unten) zeigt keinen eindeutigen großräumigen Trend. Am stromaufseitigen Ende sind zwei größere Flächen mit Erosionstendenz und eine größere Fläche mit Verlandungstendenz zu erkennen. Visuell überwiegen die Bereiche mit Erosionstendenz leicht. Die in Kapitel 2.2.5 beschrie-

benen Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den morphologischen Einheiten (1900-1995) sowie der Unsicherheiten sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten. Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Glückstädter Nebelbe im Zeitraum 1950 bis 1973 eine Volumenabnahme. Für den Zeitraum 1973 bis 2016 wurde kein eindeutiger Trend identifiziert, was auf eine stabile Morphologie hindeutet.

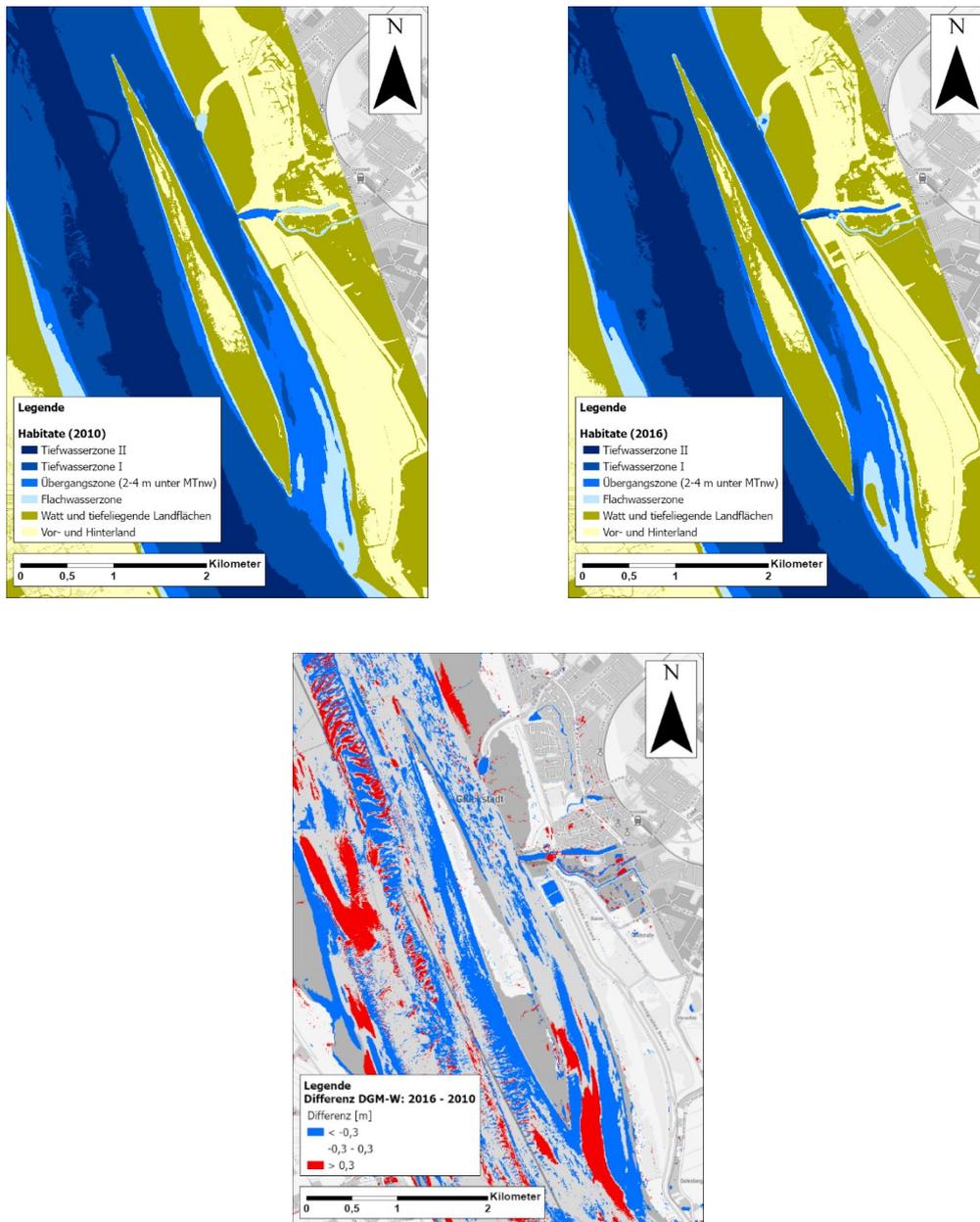


Abbildung 39: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGM-W 2010 und 2016 (oben) und Differenzdarstellung DGM-W 2016 – DGM-W 2010 (unten) im Bereich der Glückstädter Nebelbe, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

2.7.6 Unterhaltung

Am stromaufseitigen Ende der Glückstädter Nebelbeben finden laut ENTELMANN (25.09.18) regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen „aus nautischen Erwägungen heraus“ statt, wenngleich sich aktuell jedoch keine signifikante Verlandungstendenz feststellen lässt.

2.7.7 Ufersicherung

Die Ufer an Nord- und Südspitze sind durch Leitdämme, das Ufer zur Haupttrinne ist durch ein Deckwerk gesichert. Das landseitige Ufer der Insel ist hingegen unverbaut. Das Festlandufer im Bereich der Glückstädter Nebelbeben ist mit Ausnahme des Dammes zum Fähranleger sowie des Hafensbereichs Glückstadt unverbaut (Abbildung 40).

Im zur Haupttrinne gelegenen Uferbereich wurden seitens des WSA Elbe-Nordsee in 2015/2016 fünf Deckwerksabsenkungen hergestellt mit dem Ziel, die Uferstruktur ökologisch aufzuwerten (vgl. in Abbildung 40 violett dargestellten Streckenabschnitt). Die Maßnahme wurde finanziert durch Mittel der Stiftung Lebensraum Elbe.

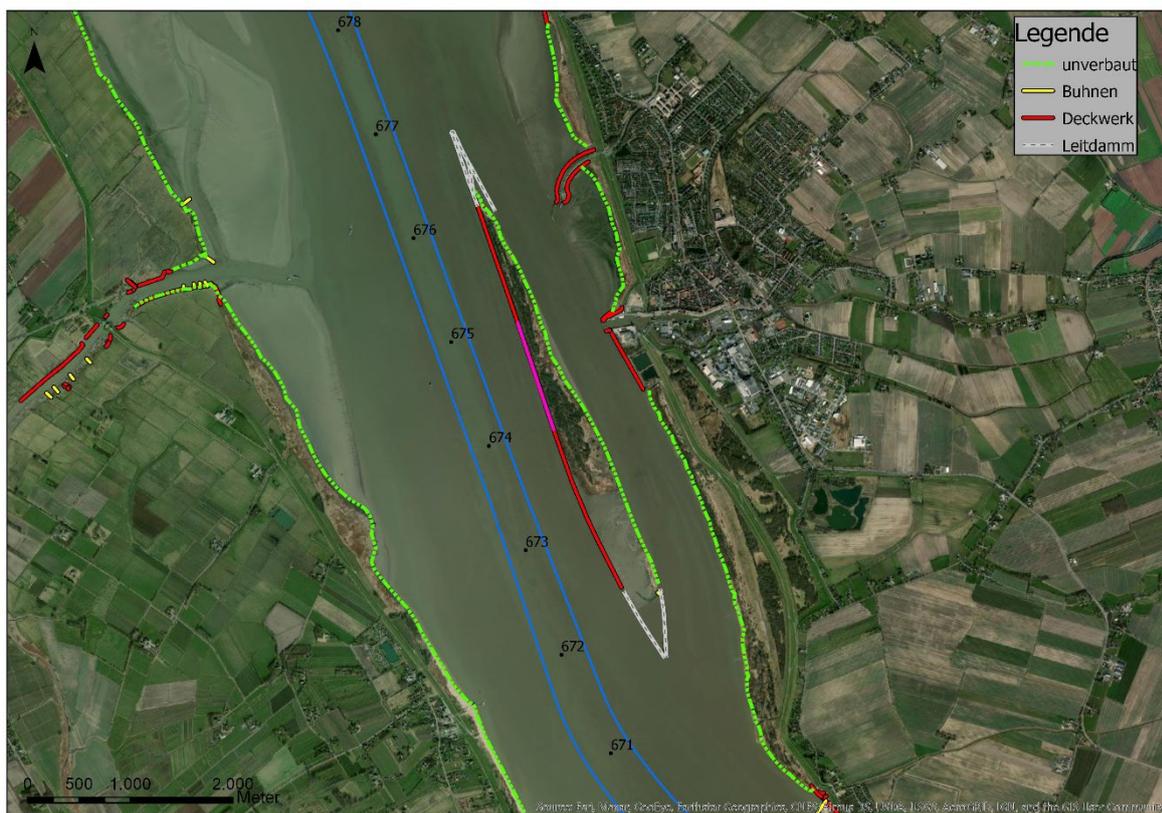


Abbildung 40: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Glückstädter Nebelbeben, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee (2021))

2.7.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Glückstädter Nebelbe liegt wie die Pagensander Nebelbe, die Haseldorfer Binnenelbe und die Schwarztonnensander Nebelbe im Funktionsraum 4. Die IBP Arbeitsgruppe (2011c) und ENTELMANN (25.09.18) schreiben hierzu:

Funktionsraum 4: „Die meisten Inseln gehen auf die Aufspülung von Sand [...] zurück. Sie sind die Voraussetzung für das Bestehen von Nebelben. Diese Nebenarme [...] erfüllen für die Lebensgemeinschaft des Ästuars unverzichtbare Funktionen.“

Bezüglich des Untersuchungsbedarfs wird dem System eine „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3) beigemessen: „Beobachtung der Entwicklung des hydrologischen und morphologischen Verhaltens der Stromelbe und der Nebelben“ sowie „Beobachtung der Entwicklung der Sauerstoffgehalte und Nährstoffgehalte [...]“ (IBP Arbeitsgruppe 2011c; ENTELMANN 25.09.18).

2.8 Wischhafener Nebelbe / Wischhafener Fahrwasser

2.8.1 Lage

Das System Wischhafener Nebelbe / Wischhafener Fahrwasser liegt bei Elbe-km 676 linksseitig des Hauptstroms (Abbildung 41). Seit schätzungsweise Anfang des 20. Jahrhunderts mündet die Wischhafener Süderelbe nicht mehr direkt in das Hauptfahrwasser der Tideelbe (vgl. im Kontext auch Abbildung 43 oben rechts), sondern läuft in das sogenannte Wischhafener Fahrwasser. Die an dieses Fahrwasser angrenzenden Sande Brammer Bank (nördlich) und Krautsander Watt (südlich) sind über die vergangenen Jahrzehnte aufgewachsen, wobei sich der Verlauf des Wischhafener Fahrwassers mehrfach verlagert hat. Zeitweise existierte ein 2-Rinnen-System „Wischhafener Fahrwasser / Wischhafener Nebelbe“ (vgl. Abbildung 42). Die ehemalige Wischhafener Nebelbe ist allerdings zunehmend verlandet und seit Mitte der 1990er Jahre schließlich nicht mehr existent. 1991 wurde der sogenannte „Durchstich Wischhafen“ hergestellt, der seitdem zwischen nördlich angrenzender Brammer Bank und südlich angrenzendem Krautsander Watt verläuft. Das frühere „eigentliche“ Wischhafener Fahrwasser ist seitdem sukzessive verlandet. Der Durchstich wird kontinuierlich durch Unterhaltungsbaggerungen auf Breite und Tiefe gehalten, da hier die Fährverbindung Glückstadt – Wischhafen verläuft.

Da es sich zum einen beim Krautsander Watt und der Brammer Bank um Wattflächen und keine Inseln handelt und zum anderen die Rinne des Wischhafener Fahrwassers (bzw. des ehemaligen Systems „Wischhafener Nebelbe / Wischhafener Fahrwasser“) stark verlandet sind, erfüllt das System nicht mehr die Kriterien einer Nebelbe.

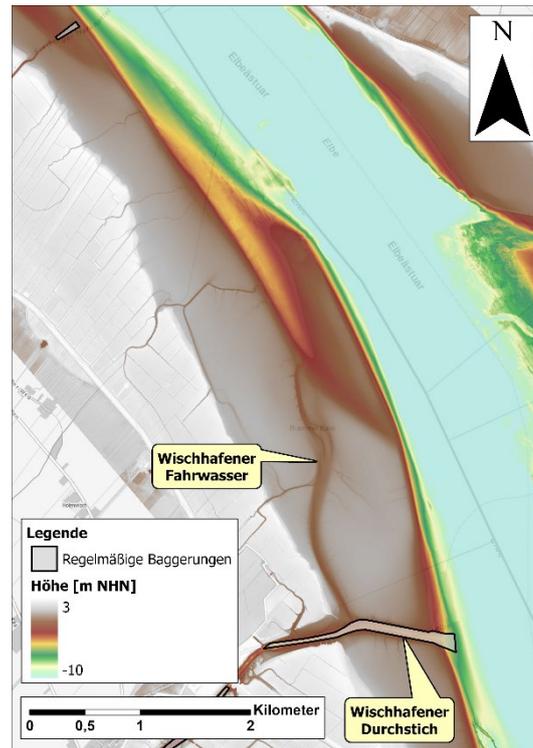


Abbildung 41: Bathymetrie im Bereich des Wischhafener Fahrwassers und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden, (Datenquelle: DGM-W 2016, WSA Elbe-Nordsee)

2.8.2 Entstehung

Die Wattflächen Brammer Bank und Krautsander Watt sind in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch Materialanlagerung nahe dem niedersächsischen Ufer entstanden. Die Entstehung in genau diesem Abschnitt wird von Samu (1987) mit dem breiten Querschnitt begründet. Dabei bezieht sich der Autor sich auf die Aussagen von Hensen (1939), der die Bildung von Sandbänken in breiten Querschnitten von Tideflüssen auf die Rechtsablenkung der Strömung infolge der Corioliskraft zurückführt. Aufspülungen der Sände, vergleichbar zum Vorgehen in den vorbeschriebenen Nebelnelben, erfolgten nicht, vielmehr handelt es sich um einen langfristigen natürlichen Verlandungsprozess.

Die Brammer Bank gehört zu den letzten frei beweglichen Sandbänken in der mittleren Tideelbe und beeinflusst in ihrer Funktion als unregelmäßiges Ansammlungsgebiet von feinerem Material den Sedimenttransport in der Tideelbe. Auch innerhalb des Systems wurden deutliche morphologische Änderungen beobachtet. Das Wischhafener Fahrwasser hat sich zwischen 1945 und 1987 um 1500 m in Richtung Unterstrom verlagert, wobei die Breite und Tiefe der Rinne stark abgenommen haben. Hierzu hat auch die Ausdehnung des Krautsander Watts in Richtung Unterstrom beigetragen. Die Wischhafener Nebelnelbe war bis zum Ende der 1980er Jahre ebenfalls stark verflacht und lief von Unterstrom kommend in einer Wattfläche aus. (vgl. Samu 1987)

Im Jahr 1991 wurde das System weiter verändert, indem zur Erleichterung des Fährverkehrs zwischen Glückstadt und Wischhafen oben genannter Durchstich durch das Krautsander Watt hergestellt wurde, der die Wischhafener Süderelbe mit der Hauptrinne der Tideelbe verbindet (BAW 1996; ENTELMANN 25.09.18). Das ehemalige System „Wischhafener Nebenelbe / Wischhafener Fahrwasser“ wird seitdem i.A. vereinfacht als „Wischhafener Fahrwasser“ (vgl. Abbildung 41) bezeichnet, es wird/wurde insbesondere von Seglern genutzt. Der Bereich, durch den der Fährverkehr läuft, wird zumeist „Durchstich Wischhafen“ genannt

Im Jahr 2016 ist der Nebenarm hinter der Wattfläche Brammer Bank kaum noch zu erkennen (Abbildung 41). Lediglich der im Jahr 1991 hergestellte Wischhafener Durchstich ist noch sichtbar.

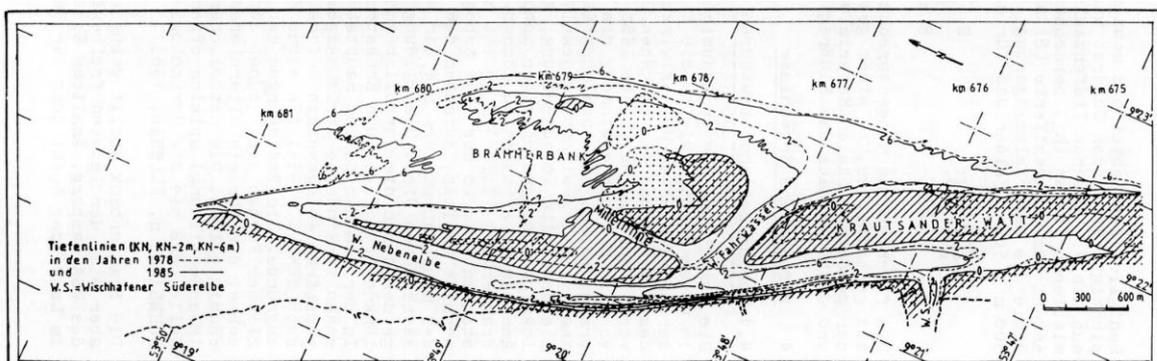


Abbildung 42: System Wischhafener Nebenelbe / Wischhafener Fahrwasser, Zustand 1978 und 1985, die Linien (gestrichelt 1978, durchgezogen 1985) zeigen die Tiefenlinien der Jahre an (Quelle: Samu (1987))

2.8.3 Morphometrie

Wie zuvor beschrieben, ist das ehemalige Rinnensystem nahezu vollständig verlandet. Verblieben ist lediglich der (regelmäßig unterhaltene) Durchstich Wischhafen.

Das Sohlmaterial im Bereich Wischhafener Fahrwasser ist überwiegend durch gemischte Watt- und Sandböden in der Mitte des Gerinnes gekennzeichnet. Die Böden im Vorland weisen eine feinkörnigere Klassifizierung auf, die von schluffig-tonig bis sandig-schluffig reicht (BfG 2002b).

2.8.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen dem Wischhafener Fahrwasser und Hauptelbe wurde anhand von Messdaten (überwiegend einzelne Tagesmessungen im Zeitraum 2000 - 2010) bestimmt zu 0,01 bei Flut und 0,01 bei Ebbe (ENTELMANN 12.02.19a). Das System Wischhafener Süderelbe/Fahrwasser ist gekennzeichnet durch geringe Strömungsgeschwindigkeiten und sehr starke Sedimentationen. Im Zuge der Verlandung hat

sich der Stauwasserbereich im Wischhafener Durchstich in Richtung Sperrwerk verschoben, da die über das Wischhafener Fahrwassers einlaufende Flutströmung zunehmend abgeschwächt wurde (ENTELMANN 25.09.18).

In Abbildung 11 sind gemessene Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Wischhafener Fahrwassers für den Zeitraum nach 1984 und nach 2004 dargestellt. Hier wird deutlich, dass sowohl Ebbe als auch Flutstromgeschwindigkeiten nach 2004 im Vergleich zum Zeitraum 1984-2004 tendenziell zugenommen haben, wobei die Bandbreite nach 2004, insbesondere bei der Flutstromgeschwindigkeit, deutlich kleiner ist. Bei der Bewertung dieser Analysen sind zum einen die in Kapitel 2.3.4 genannten Einschränkungen und zum anderen die starken morphologischen Veränderungen (siehe Kapitel 2.8.5) zu berücksichtigen. Aufgrund der massiven Verlandungen, die bis zum Jahr 2016 stattgefunden haben, ist die Aussagekraft der Messungen im Hinblick auf den heutigen Zustand als gering einzustufen.

2.8.5 Morphologische Entwicklung

Die Entstehung der Wattgebiete Brammer Bank und Krautsander Watt mit einer dahinterliegenden Rinne, die anschließend stark verflacht, werden bei Betrachtung der morphologischen Einheiten für die für die Jahre 1900, 1950 und 1995 deutlich (Abbildung 43). Die für die Erstellung der Karten verwendete Datengrundlage sowie die, bei der Interpretation zu beachtenden Einschränkungen, wurden bereits in Kapitel 2.2.5 erläutert.

Der Vergleich der Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt die Entstehung von Flachwasser und Wattflächen. Im Jahr 1950 ist hinter diesen Flächen noch eine tiefe Rinne vorhanden. Bis zum Jahr 1995 hat sich die Wattfläche stark ausgedehnt, während die Rinne deutlich schmaler und flacher geworden ist.

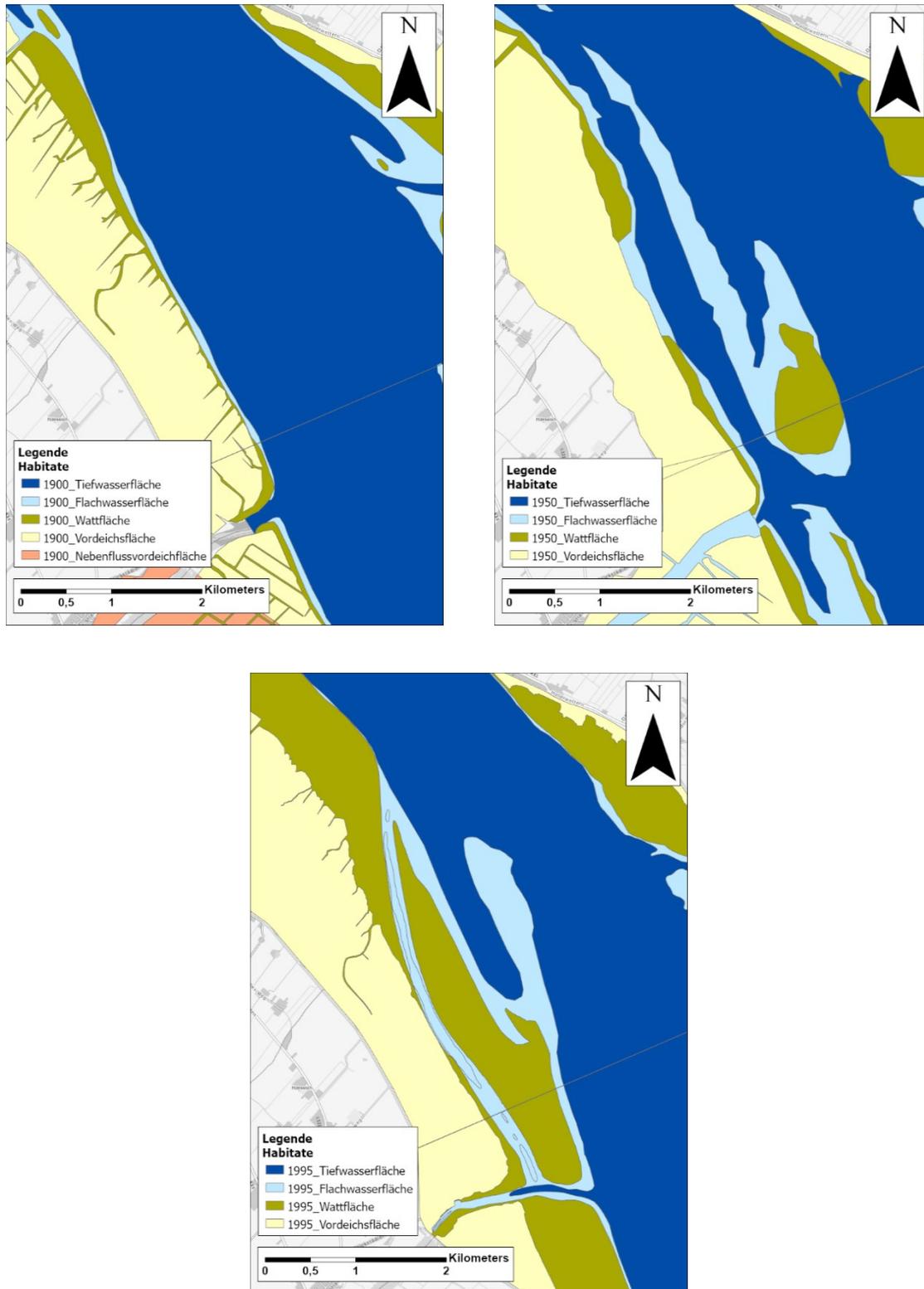


Abbildung 43: Morphologische Einheiten im Bereich des Wischhafener Fahrwassers im 20. Jahrhundert, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

Die in Abbildung 44 dargestellte volumetrische Auswertung von FRÄßDORF (1995) zeigt für den Zeitraum 1950 - 1968 eine leichte Verlandungstendenz vor allem für Bereiche mit Wassertiefen von 2 m und geringer. Für den Zeitraum 1968 - 1987 ist eine sehr starke Verlandungstendenz für alle Tiefenbereiche zu erkennen. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der quantitativen Aussagekraft der volumetrischen Auswertungen von Fräßdorf sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten.

Die starke Verlandungstendenz wird mit der die Zunahme des Röhrichtbewuchses, der Schließung des Sandlochs durch den Landschutzdeich (1976 - 1978) sowie der Herstellung des Durchstichs in Verbindung gebracht (BfG 2004). Auch heutzutage herrscht in diesem Bereich eine Verlandungstendenz vor (BAW 1996; BfG 2002b; ENTELMANN 2019).

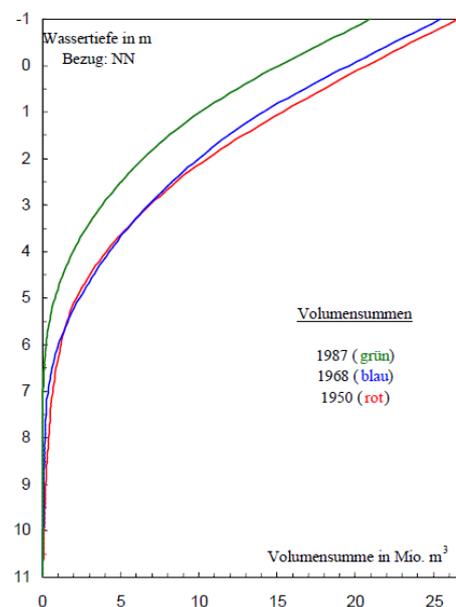


Abbildung 44: Volumenverteilung des Wischhafener Fahrwassers für die Jahre 1950, 1968 und 1987, (Quelle: FRÄßDORF (1995))

Die morphologische Entwicklung in der jüngeren Vergangenheit ist in Abbildung 45 dargestellt. Hier ist insbesondere die starke Verlandung der Rinne hinter der Brammer Bank zwischen 2010 und 2016 zu erkennen. In der Differenzendarstellung überwiegen die Bereiche mit Verlandungstrend deutlich. Die in Kapitel 2.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den morphologischen Einheiten (1900 - 1995) sowie der Unsicherheiten sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten.

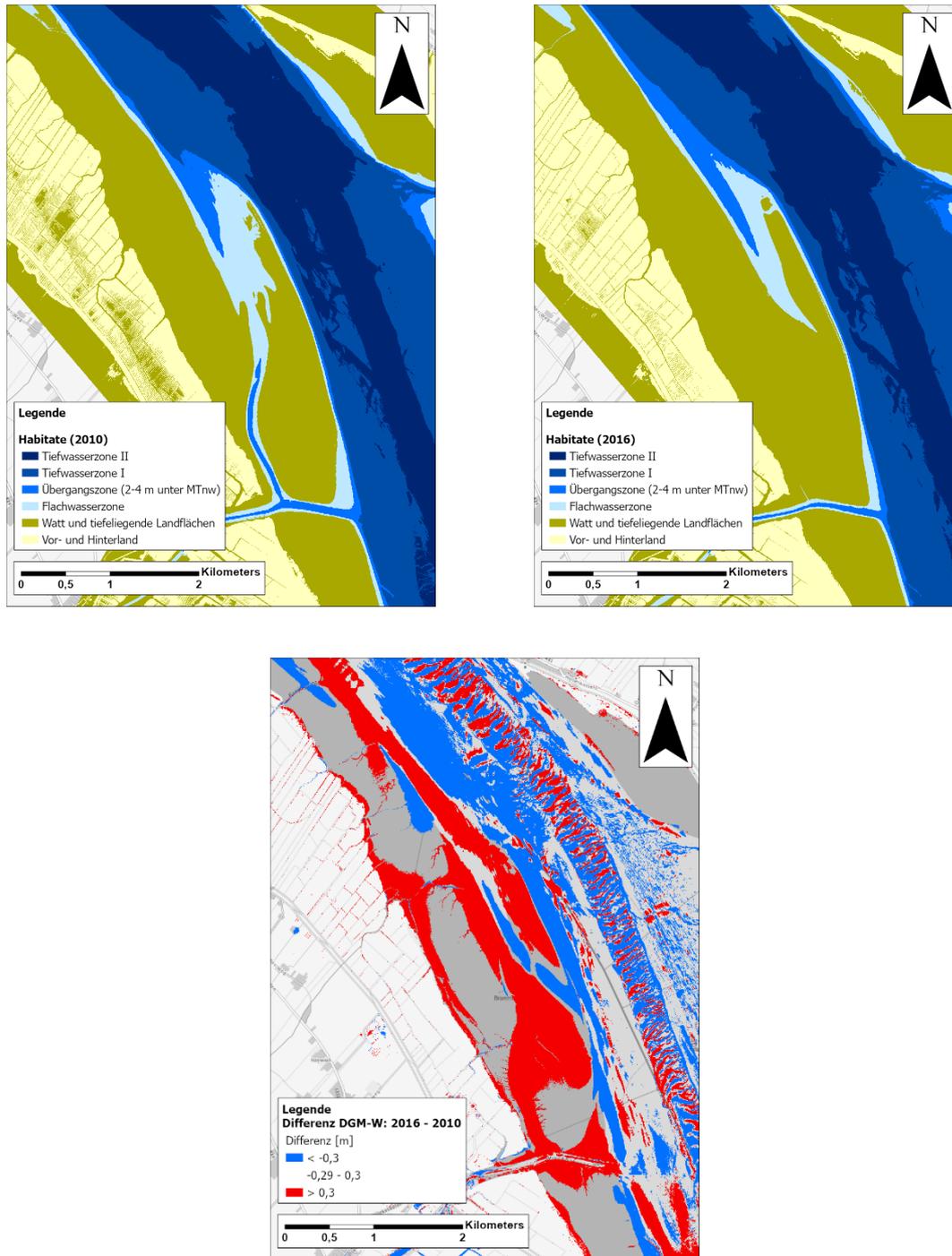


Abbildung 45: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGM-W 2010 und 2016 (oben) und Differenzdarstellung DGM-W 2016 – DGM-W 2010 (unten) im Bereich des Wischhafener Fahrwassers, (Datenquelle: WSA Elbe-Nordsee, 2019)

2.8.6 Unterhaltung

Im Bereich „Wischhafener Durchstich“ werden WSV-seitig umfangreiche Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt, um die Fährverbindung zu gewährleisten (Abbildung 41). Durch die Verschiebung des Stauwasserbereiches im Wischhafener Durchstich in Richtung Sperrwerk und aufgrund hoher Schwebstoffgehalte seit 2013 hat sich der Aufwand für die Unterhaltungsbaggerungen zuletzt deutlich erhöht. (vgl. ENTELMANN 25.09.18)

2.9 Nebenarme in anderen Ästuaren

Die Nebenarme der Tideelbe stellen im Hinblick auf Anzahl, Größe und die stark anthropogen beeinflusste Entstehung eine Besonderheit dar, was auch durch die Bezeichnung „Nebenelben“ zum Ausdruck kommt. Dennoch kommen auch in anderen Ästuaren zumindest einzelne Nebenarme vor. Dabei ist das Vorhandensein von Nebenarmen nicht an eine bestimmte dominierende Einflussgröße (Tide, Seegang, Fluss) gebunden (Nienhuis et al. 2020). In Tabelle 4 sind einige Beispiele von Ästuaren mit Nebenarmen aufgeführt. Studien, die sich mit Nebenarmen in Ästuaren beschäftigen, wurden nur selten in internationalen Wissenschaftsjournalen veröffentlicht, so dass es schwierig ist, die verfügbaren Informationen zu recherchieren. Neben der stark eingeschränkten Auffindbarkeit ist oft die (Landes-) Sprache, in der Informationen vorliegen, ein Hindernis.

Tabelle 4: Ästuare mit Nebenarmen

Fluss	Land	Deltamorphologie
Elbe	Deutschland	Tide-dominiert
Weser	Deutschland	Tide-dominiert
Humber	England	Tide-dominiert
Eel	USA	Seegangs-dominiert
Doce	Brasilien	Seegangs-dominiert
Congo	Republik Kongo / Angola	Fluss-dominiert

Aufgrund der Gemeinsamkeiten hinsichtlich der natürlichen (Tide-dominiert) und anthropogenen Rahmenbedingungen (deutliche Einflussnahme), wird im Folgenden vertieft auf die Nordseeästuare Weser und Humber (England) eingegangen.

Das Humber-Ästuar hatte einst ebenfalls mehrere Arme, von denen einige schiffbar waren (KuR und NLWKN 2012). Infolge von Landgewinnungsmaßnahmen, die bis in das 18. Jahrhundert zurückreichen, ist das Ästuar heutzutage deutlich schmaler und zudem vollständig durch Küstenschutzanlagen eingeengt (ebd.). Heute sind lediglich noch zwei Inseln im Ästuar zu finden, Read's Island und Whitton Sand. Verglichen mit den Inseln, die die Nebeneiben vom Hauptstrom trennen, sind die Inseln im Humber größtmäßig mit Schwarztonnensand oder Lühesand vergleichbar, also den kleineren Elbinseln. Ein weiterer Unterschied ist die Vegetation. Zwar sind die Inseln im Humber zumindest teilweise begrünt, aber nicht in dem Maße von Großbewuchs geprägt wie die Elbinseln. Eine Uferbefestigung ist im Luftbild augenscheinlich nicht erkennbar.

Die Nebenarme der Weser sind aufgrund ihrer Form, ihrer Lage und ihrer ähnlichen Geschichte in Bezug auf bauliche Eingriffe den Nebeneiben deutlich ähnlicher. Wie das Elbeästuar bestand auch das Weserästuar einst aus vielen Sandbänken und kleinen beweglichen Inseln, die inzwischen infolge Strombaumaßnahmen zur Anpassung an die wachsenden Schiffsgröße befestigt oder abgetragen wurden (KuR und NLWKN 2012).

Ludwig Franzius, der damalige Oberbaudirektor der Hansestadt Bremen, schreibt in seinem Werk zur Korrektur der Unterweser aus dem Jahr 1888:

„Es sind möglichst alle scharfen Krümmungen und Unregelmäßigkeiten in der Bettform zu beseitigen, weil sie in allen Fällen der Bewegung des Wassers hinderlich sind. Namentlich sind Stromspaltungen nachteilig, weil sie besonders eine geringe Wassertiefe und eine Unbeständigkeit bewirken; es muss also vor allen Dingen ein einheitlicher Flussschlauch hergestellt werden. [...] Je ungehinderter sich die Flutwelle an jedem Punkte entwickeln kann, eine desto größere Wassermenge strömt bei Flut nach oben und vergrößert sowohl bei dieser als auch rückströmend bei der tiefer abfallenden Ebbe die Stromkraft.“ (Franzius 1888)

Heute existieren zwischen Bremerhaven und Bremen noch zwei Inseln, die Strohauser Plate (Weser km 45 - 51) und der Harrier Sand (Weser km 33 - 44). Der Harrier Sand wird vom Rechten Nebenarm der Weser umströmt, die Strohauser Plate von der Schweiburg. Die geringen Breiten der Nebenarme (Rechter Nebenarm: ca. 300 m am stromaufseitigen Ende und ca. 20 m am stromabseitigen Ende, Schweiburg: ca. 50 m am stromaufseitigen Ende und ca. 20 m am stromabseitigen Ende), insbesondere am stromabseitigen Ende, lassen auf eine geringe Durchströmung schließen. Die morphologische Entwicklung der beiden Nebenarme zwischen den Jahren 1887 und 2000 zeigt Abbildung 46. Aus der Darstellung für das Jahr 1887 gehen deutlich tiefere und breitere Nebenarme hervor als im Jahr 1972. Auch zwischen 1972 und 2000 ist eine Abnahme der Tiefen im Bereich der Nebenarme erkennbar. Dieser Verlandungstrend wird auch im Sedimentmanagementkonzept Tideweser beschrieben (BfG 2014c). Heute fallen große Bereiche des Rechten Nebenarms bei Niedrigwasser trocken (BfG 2014a; WSV 2018).

Im Jahr 2016 entstand das Projekt "Nebenarm Unterweser" mit dem Ziel, eine konstante Wasserführung und Durchgängigkeit des Rechten Nebenarms zu ermöglichen sowie dessen Sauerstoffversorgung zu verbessern (Modellprojekt "Nebenarm Unterweser" 2022). Mehr als 40 Wasserinjektionsbaggerungen haben zu einer Verbesserung der Durchströmung geführt, die jedoch nicht dazu führt, den Nebenarm von weiteren Sedimentablagerungen freizuhalten. Hierzu müssten die Strömungsgeschwindigkeiten noch weiter erhöht werden, um das Ziel eines konstanten Wasserflusses in diesem Seitenkanal zu erreichen (WSV 2018). Die morphologischen Zustände des Rechten Nebenarms und der Schweiburg für das Jahr 2012 sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 dargestellt.

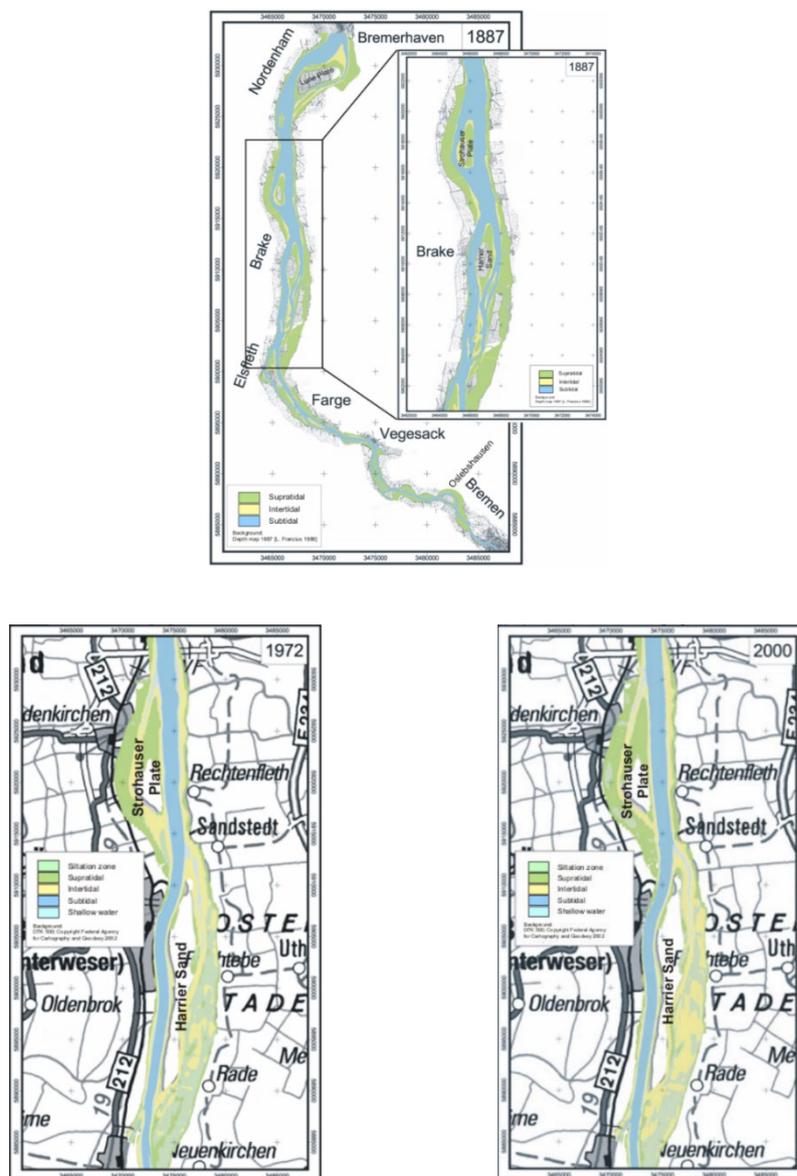


Abbildung 46: Morphologische Entwicklung der Nebenarme der Weser. Quelle: Elsebach et al. (2007)

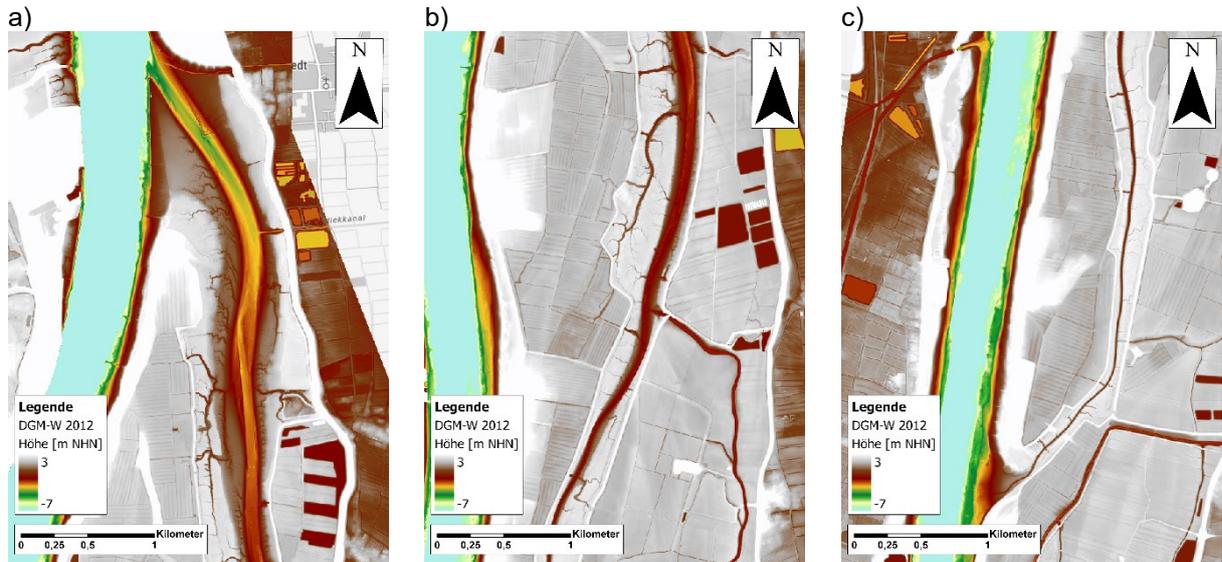


Abbildung 47: Morphologischer Zustand des Rechten Nebenarms im Jahr 2012, Datenquelle: WSV (www.kuestendaten.de)

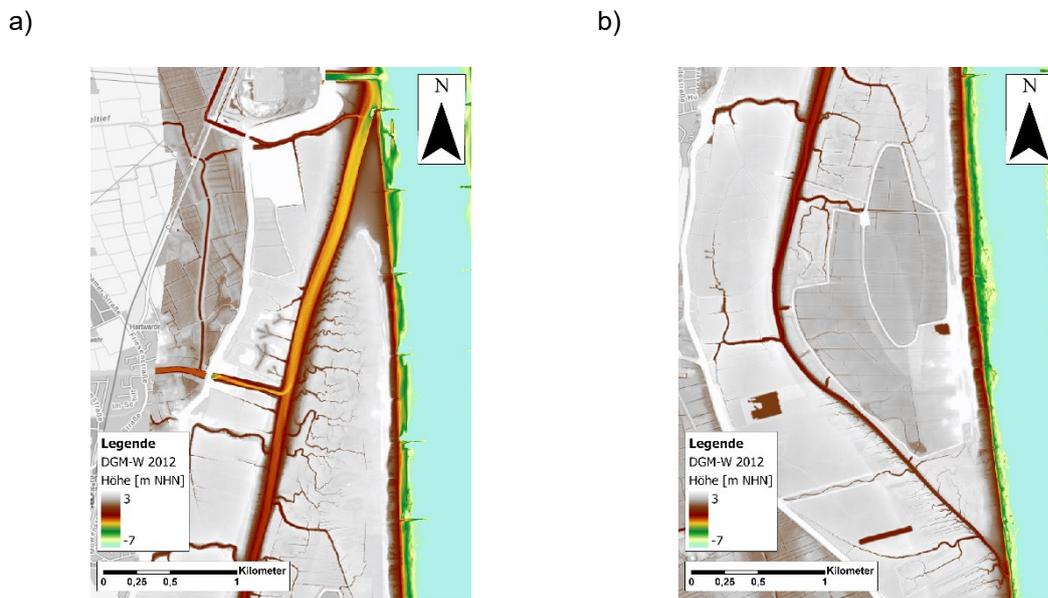


Abbildung 48: Morphologischer Zustand der Schweiburg im Jahr 2012, Quelle: WSV (www.kuestendaten.de)

3 Aktueller morphologischer Zustand ausgewählter Nebelben

3.1 Messkonzept zur Erhebung zusätzlicher Messdaten

Um den aktuellen morphologischen Zustand der Nebelben und deren morphologische Entwicklung eingehend beschreiben zu können, sind hochaufgelöste Bathymetriedaten von essentieller Bedeutung. Darüber hinaus sind für ein besseres Verständnis von Sedimentations- und Erosionsprozessen auch Informationen zum Sedimentinventar und zu den Strömungsverhältnissen förderlich. Die Analyse der bestehenden Daten und Informationen ergab einen zusätzlichen Bedarf an hochaufgelösten Bathymetriedaten, Sedimentbeprobungen und Strömungsmessungen. Zur Erhebung dieser Daten wurde ein Messkonzept erstellt, das neben den zu messenden Parametern auch Angaben zu Messverfahren, Standorten sowie Zeiträumen bzw. Häufigkeiten der Messungen im Projektverlauf und Vorgehen enthält. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die durchzuführenden Messungen. Detaillierte Informationen zu den Messungen sind den folgenden Kapiteln zu entnehmen.

Tabelle 5: Messverfahren und zu erhebende Parameter

Messverfahren	Parameter und Standorte	Häufigkeit/Vorgehen
Fächerlotpeilungen (Messboot Nekton, IWB)	Sohlhöhen in der Pagensander Nebelbe, Haseldorfer Binnenelbe, Hahnöfer Nebelbe, Lühesander Süderelbe	Jährlich
Laservermessung (Drohne, WSA)	Sohlhöhen Bishoster Sand	Abschnittsweises Scannen der Topografie (einmalig)
Sedimentbeprobungen (WSA)	Korngrößenverteilung in der Pagensander Nebelbe und Hahnöfer Nebelbe	Punktuelle Beprobungen ergänzend zum Sedimentkataster Tideelbe des WSA-EN (einmalig)
Strömungsmessungen (punktuelle Messungen WSA, Querprofilmessungen Messboot Nekton, IWB)	Fließgeschwindigkeiten im Übergangsbereich Pagensander Nebelbe, Haseldorfer Binnenelbe sowie im Steinloch	Querprofile im Bereich der punktuellen Messungen über eine Tide sowie punktuelle Messungen über mehrere Tiden (einmalig)

3.1.1 Fächerecholotpeilungen

Gemeinsam mit dem WSA Elbe-Nordsee wurde abgestimmt, dass in den vier Projektjahren folgende Nebelben vermessen werden:

- Hahnöfer Nebelbe
- Lühesander Süderelbe
- Pagensander Nebelbe
- Haseldorfer Binnenelbe

Die nachfolgende Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die in den Jahren 2019 – 2022 durchgeführten Messkampagnen. Die Messungen fanden wie geplant im Frühjahr bzw. Sommer statt. Pandemiebedingt konnte nicht immer ein Abstand von genau 12 Monaten zwischen den Messungen eingehalten werden.

Tabelle 6: Übersicht zu durchgeführten Fächerlotpeilungen im Bereich der Nebelben

Nebelbe	Zeitraum	Messtage	Beschreibung
Pagensander	16.04.2019 – 26.04.2019	7	Fächerlotpeilung
	17.06.2020 – 03.07.2020	8	
	20.05.2021 – 04.06.2021	7	
	13.05.2022 – 23.06.2022	9	
Hahnöfer	13.05.2019 – 16.05.2019	4	Fächerlotpeilung
	25.08.2020 – 09.09.2020	6	
	15.06.2021 – 23.06.2021	6	
	08.07.2022 – 20.07.2022	6	
Haseldorfer	25.06.2019 – 26.06.2019	2	Fächerlotpeilung
	15.06.2020 – 16.06.2020	2	
	18.05.2021 – 19.05.2021	2	
	10.05.2022 – 12.05.2022	3	
Lühesander	24.06.2019	1	Fächerlotpeilung
	28.08.2020	1	
	07.08.2021 – 08.08.2021	2	
	06.07.2022 – 07.07.2022	2	

Die erhobenen Peildaten wurden im Anschluss an die Messungen aufbereitet und plausibilisiert. Die Aufbereitung umfasst zwei wesentliche Schritte. Im ersten Schritt werden die Rohdaten der Vermessung gesichtet, die für die Korrektur der Messdaten ermittelten Parameter geprüft und, sofern erforderlich, korrigiert oder um Ausreißer bereinigt. Die Korrekturwerte werden von unterschiedlichen Komponenten des Messsystems erfasst:

- Schallgeschwindigkeitsprofile über eine Salinitätssonde
- Bootsbewegungen heave, roll, pitch und heading über einen Kreiselkompass bzw. GNSS-basiertes Inertial-System
- Lage- und Höhenkorrekturen aus RTK-Korrekturdaten des Positionierungsdienstes SAPOS

Nach der Prüfung der Korrekturparameter werden diese auf die Rohdaten der Vermessung angewendet. Anschließend werden die korrigierten Daten, die nun Punkte im Raum über die Lage (x, y) und Höhe (z) beschreiben, einer Filterung unterzogen. Im Rahmen der Fil-

terung werden offensichtliche Ausreißer, die aus Messfehlern resultieren, entfernt. Ursachen für Messfehler sind u.a. Störungen durch Luftbläschen oder im Wasser schwebende Gegenstände bzw. Partikel, Nebenkeulen oder Mehrfachreflexionen. Die Filterung erfolgt in einem ersten Schritt profilweise (im Querprofil) anhand bestimmter Kriterien, wie z.B. die Qualität der Lage- und Höhengenaugigkeit, minimale und maximale Tiefe, maximale und minimale Abstrahlungswinkel an den Schwingerplatten oder Beam-Intensität und andererseits flächenhaft (in definierten Rasterzellen) über statistische Algorithmen, z.B. 2- oder 4-Sigma Limit. Darüber hinaus werden offensichtliche Ausreißer, die nicht über Filter erfasst werden, manuell entfernt. Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Arbeitsschritte der Datenaufbereitung bzw. -filterung. Die konkret verwendeten Einstellungen für die statistischen Filter sind in den Metadaten der einzelnen Datensätze dokumentiert.

Tabelle 7: Übersicht über erfolgte Arbeitsschritte der Datenfilterung und Aufbereitung (Verwendete Software: Hypack 2021; Werkzeug MBmax)

Arbeitsschritt	Beschreibung
Sichtung Rohdaten und Prüfen der Korrekturdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Profilweise, manuelle Sichtung der Rohdaten • Korrektur bzw. Entfernen unplausibler Werte in den Korrekturdaten
Profilweise Filterung	<ul style="list-style-type: none"> • Einschränkung des Fächerwinkels (max. 75° je Schiffseite um 5 – 15°, da die äußersten Beams, u.a. aufgrund des längeren Wegs und des flacheren Aufprallwinkels, tendenziell ungenauer sind) • Manuelle Entfernung offensichtlicher Ausreißer
Statistische flächenhafte Filterung	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung des 2-Sigma Filters (Entfernung der Werte außerhalb der doppelten Standardabweichung) für die Zellgröße 1x1m

3.1.2 Laservermessung

Neben der Fächerecholotpeilung wurden als weiteres potentielles Messverfahren die laserbasierte Vermessung von Wattflächen getestet. Diese Flächen können im Rahmen der Peilung aufgrund zu geringer Wassertiefen nur anteilig vermessen werden. Von einer regelmäßigen Erfassung größerer Wattbereiche (über die standardmäßige durch das WSA beauftragte Laserscan-Befliegung im Turnus von etwa 5 bis 6 Jahren hinaus) wird eine weitere Verbesserung der Aussagekraft, speziell für diese Flächen erwartet. Zudem kann die Qualität der Messergebnisse der beiden Verfahren für Bereiche, die doppelt erfasst wurden (i.d.R. Wasserwechselzone), durch Validierung gegeneinander bewertet werden. Genau dieser Übergangsbereich wurde im Rahmen des Projektes als kritisch für die Erstellung von konsistenten Geländemodellen identifiziert. Demgemäß wird einer zusätzlichen und zudem redundanten Vermessung dieses Bereiches insbesondere mit zwei Messverfahren eine große Bedeutung beigemessen.

3.1.2.1 Bootsgestützt

Zunächst wurde eine bootsgestützte Variante der Vermessung per Laser getestet. Abbildung 49 skizziert die Konzeption der Laservermessung per Boot. Im ersten Projektjahr wurden mehrere Fachgespräche mit Herstellern von Lasermessverfahren und anderen Forschungsinstituten durchgeführt, um den potentiellen Einsatz und die Durchführbarkeit dieser Vermessung zu diskutieren. Zudem wurden verschiedene Tests im Feld durchgeführt (vgl. Tabelle 8). Folgende Firmen und Institutionen waren am fachlichen Austausch beteiligt:

- Triple-IN GmbH (Hersteller Lasertechnik, HH)
- Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM (Freiburg), Prof. Reiterer
- Hafencity Universität HCU
 - Hydrographie und Geodäsie, Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg
 - Photogrammetrie & Laserscanning, Prof. Dr.-Ing. Thomas P. Kersten
- HYPACK / Xylem Inc (Software Herstellung für hydrographische Anwendung)

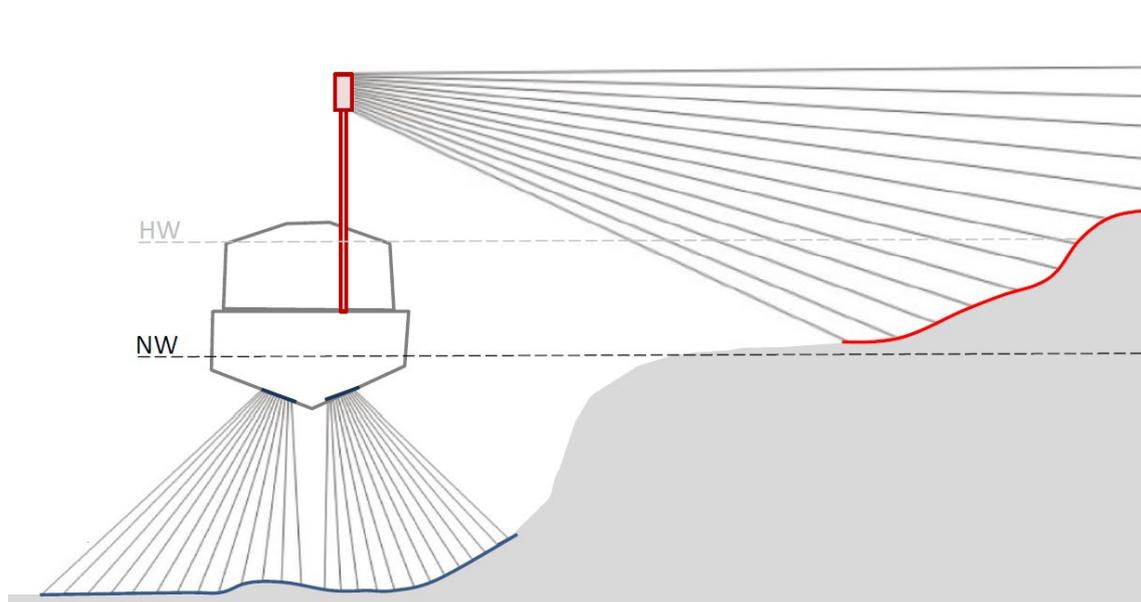


Abbildung 49: Skizze zur kombinierten Vermessung. Klassische Fächerecholotvermessung (blau) sowie zusätzliche, neu konzipierte Laservermessung der flachen, trockengefallenen Seitenbereiche (rot) vom Bootsmast

Für die praktische Durchführung wurde die Installation eines Lasermesssystems an einem Mast, der am Messboot befestigt ist, als sinnvolle Umsetzung identifiziert. Folgende Tests

wurden mit Unterstützung der Triple-IN GmbH (Bereitstellung Laserscanner¹) und der HCU, Institut für Hydrographie und Geodäsie, Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg (Beratung sowie Beschleunigungsmessungen) durchgeführt (Tabelle 8):

Tabelle 8: Übersicht zu Durchgeführten Feldtests für Laservermessung

Datum	Beteiligte Institution	Beschreibung
26.09.2019	Triple In GmbH (Bereitstellung Laserscanner) HCU (Begleitung Test)	Test Laserscanner (ohne Lage- und Bewegungskorrektur) in Pagensander NE für erste Auswertung des Lasersignals.
24.10.2019	HCU (Durchführung Messung)	Bewegungs- und Beschleunigungsmessung am Mast auf der Krückau und Pagensander NE für Einschätzung erforderliche Kompensation bzw. Anforderung an eine inertielle Messeinheit.

Die Tests haben die grundsätzliche Machbarkeit der kombinierten Vermessung gezeigt. Allerdings würde der Aufbau eines eigenständigen Lasermesssystems im Rahmen des Projektes sehr zeit- und vor allem kostenaufwändig, so dass der Ansatz nicht weiter erfolgt wurde.

¹Triple In, 2D Pulse Laser Scanner :<https://www.triple-in.de/en/products/2d-scanner-sensors/2d-scanner-with-90-scan-angle/>

3.1.2.2 Luftgestützt

Als weitere Methode wurde eine laserbasierte Vermessung per Flugdrohne getestet. Hierzu kam ein im Jahr 2021 neu beschafftes System des WSA Elbe-Nordsee zum Einsatz. Als Pilotgebiet wurde das Wattgebiet nördlich des Bishoster Sandes ausgewählt. Dieses Gebiet ist umgeben vom Steinloch und der Haseldorfer Binnenelbe. Die lokale Hydrodynamik im Bereich der Rinnen und auf den Wattflächen ist von großer Bedeutung für das Verständnis des Systems Pagensander Nebeneibe/Haseldorfer Binnenelbe. Aus diesem Grund wurden hier auch Strömungsmessungen durchgeführt (s. Kapitel 4.1). Die drohnengestützte Vermessung wurde am 08.11.2021 durch das WSA Elbe-Nordsee durchgeführt. Die ursprünglich geplanten fünf Messabschnitte, die das Zielgebiet fast vollständig abdecken, sind in Abbildung 50 dargestellt. Aufgrund der schwierigen Wetterbedingungen an diesem Tag konnten jedoch nur die beiden nördlichen Abschnitte vollständig beflogen werden. Insgesamt hat sich das Messprinzip im Bereich von Wattflächen aber bewährt. Die Ergebnisse dieser Vermessung sind in Kapitel 3.3.3 dargestellt.



Abbildung 50: Für die Lidar-Messungen geplante Abschnitte des Wattgebietes vor dem Bishoster Sand (aufgrund der schwierigen Wetterbedingungen wurden am 08.11.2021 nur die beiden nördlichsten Abschnitte beflogen)

3.1.3 Sedimentbeprobungen

Im Sedimentkataster Tideelbe des WSA Elbe-Nordsee sind die Ergebnisse von bodenmechanischen (u.a. Korngrößenverteilung, Glühverlust), chemischen (u.a. Schwermetalle) und ökotoxikologischen Analysen von Sedimentproben aus der Sohle als punktuelle Informationen erfasst. Auch für einige Bereiche in den Nebeneiben liegen Informationen vor, die

die Grundlage zur Beschreibung der flächigen Sedimentverteilung bilden. Zur präziseren Beschreibung der Sedimentverteilung (Verdichtung der Informationen) sowie zur Beurteilung einer möglichen zeitlichen Veränderung der Korngrößenzusammensetzung wurden im Rahmen des Vorhabens in ausgewählten Nebeneiben weitere Sedimentbeprobungen durchgeführt. Für das System Pagensander NE/Haseldorfer BE sowie für die Hahnöfer NE wurden jeweils 30 Entnahmeorte bestimmt, die entweder in Bereichen mit auffälligen Sohl- oder Strömungsmerkmalen liegen oder sich genau am selben Standort einer früheren Beprobung befinden. Die ausgewählten Standorte zeigen Abbildung 51 und Abbildung 52. Die Beprobung wurde am 13.09. und 14.09.2021 durch das WSA Elbe-Nordsee mit Hilfe eines Van-Veen-Greifers durchgeführt. Die Ergebnisse der bodenmechanischen Analysen wurden in das Sedimentkataster des WSA Elbe-Nordsee aufgenommen und werden im Rahmen der weiteren Auswertungen in diesem Kapitel nachfolgend berücksichtigt.

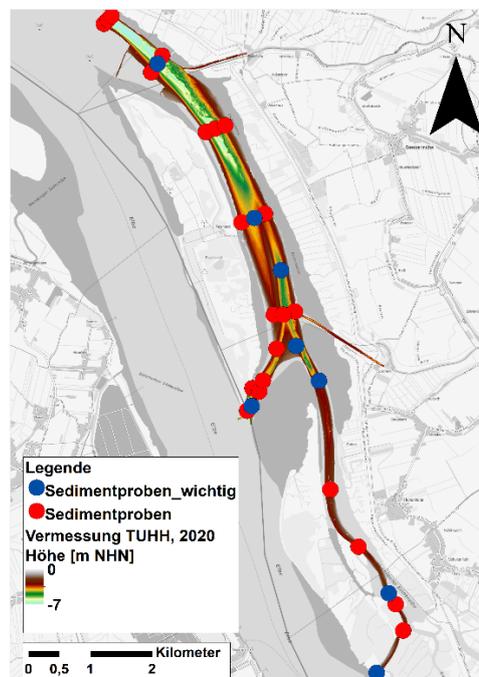
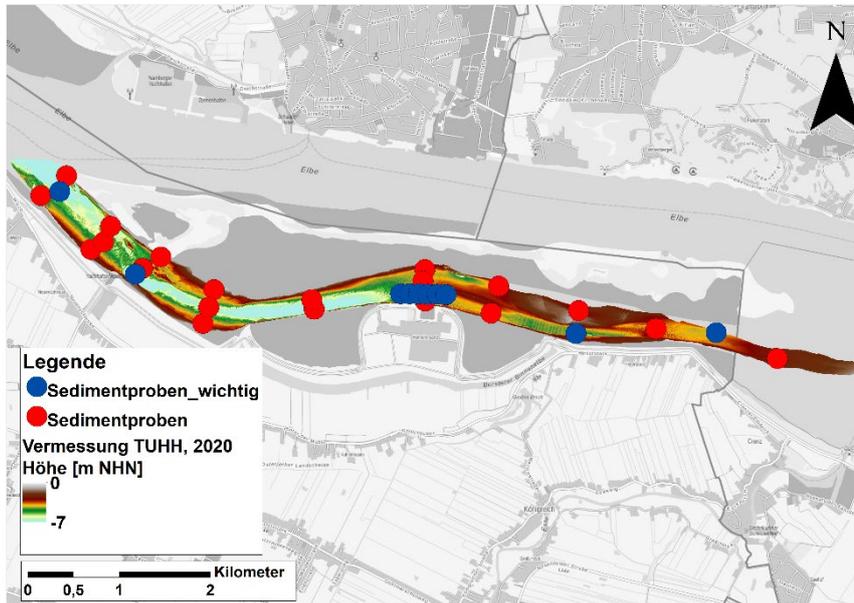


Abbildung 51: Standorte der vom IWB vorgeschlagenen Sedimentproben für Pagensander Nebeneibe + Haseldorfer Binnenelbe

a)



b)

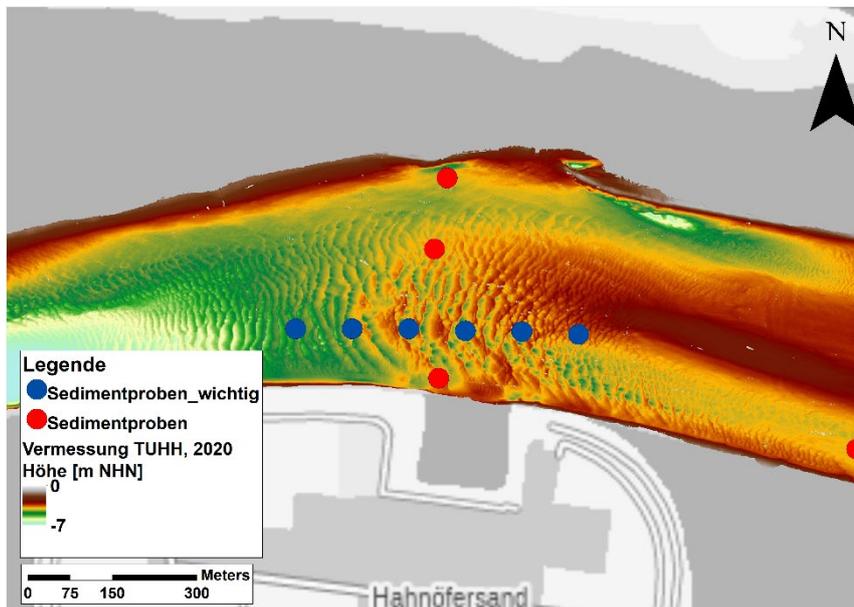


Abbildung 52: Standorte der Sedimentbeprobungen a) in der gesamten Hahnöfer Nebelnelbe und b) im zentralen Dünenfeld mit 100 m Punktabstand

3.1.4 Strömungsmessungen

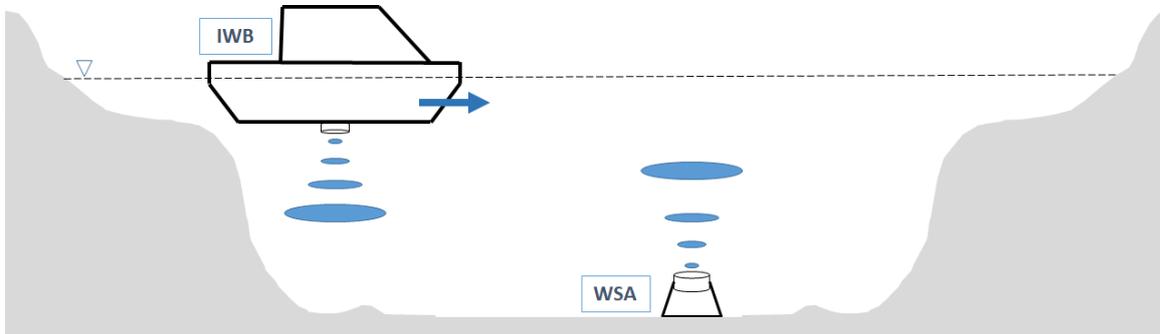
Zur verbesserten Beschreibung der Strömungsverhältnisse bzw. der Abflussaufteilung im System Pagensander NE/Haseldorfer BE sowie zur Validierung des numerischen Modells (Kapitel 4.2.2) wurden Strömungsmessungen durchgeführt. Als Standorte für die Messungen wurden der südliche Anschluss der Pagensander NE an den Hauptstrom (Bereich Steinloch) und der Übergang der Pagensander NE an die Haseldorfer BE gewählt (Abbildung 53 b). Für den genauen Standort der Messungen wurden nicht nur messtechnische Aspekte (geeignetes Messprofil), sondern auch nautische Aspekte (Verkehrssicherheit) berücksichtigt.

Es wurden kombinierte Messungen durchgeführt, zum einen wurde punktuell die Strömung über mehrere Tiden erfasst, zum anderen wurden an den Messstellen mehrere Querprofilmessungen über den Zeitraum von einer Tide durchgeführt. Abbildung 53 a) verdeutlicht das Prinzip der kombinierten Messungen. Über die Verschneidung der Ergebnisse kann von der punktuellen Messung auf die Abflussverhältnisse im Querprofil geschlossen werden. Die Messungen wurden in Kooperation zwischen dem WSA Elbe-Nordsee (punktuelle Strömungsmessungen) und dem IWB (bootsgestützte ADCP-Querprofilmessungen) durchgeführt. Aus logistischen und nautischen Gründen wurden die Messungen in einer Woche durchgeführt, in der das Tideniedrigwasser von Montag bis Donnerstag vormittags eintrat.

Die punktuellen Messungen erfolgten im Zeitraum 06.09 - 09.09.2021. Die genauen Messzeiträume und Positionen sind Tabelle 9 zu entnehmen. Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden in diesem Zeitraum kontinuierlich in einem Abstand von ca. 2,1 m über der Sohle erfasst.

Die Querschnittsmessungen wurden am 06.09 - und 08.09.2021 durchgeführt und umfassen eine ganze Tide (Tabelle 10). Beide Querschnitte wurden an den Tagen abwechselnd vermessen. In jedem Messzyklus wurde zunächst das Querprofil im Bereich der Verbindung Pagensander NE – Haseldorfer BE gemessen, anschließend dann das Profil im Steinloch und zwar doppelt in einem Abstand weniger Minuten. Dem Profil im Steinloch wurde im Vorfeld der Messung aufgrund der zu erwartenden komplexeren Strömungsverhältnisse eine größere Bedeutung beigemessen, so dass hier etwa doppelt so viele Messungen durchgeführt wurden wie im Querprofil im Übergang von der Pagensander NE in die Haseldorfer BE. Die Ergebnisse der Messungen sind in Kapitel 4.1 dargestellt.

a)



b)

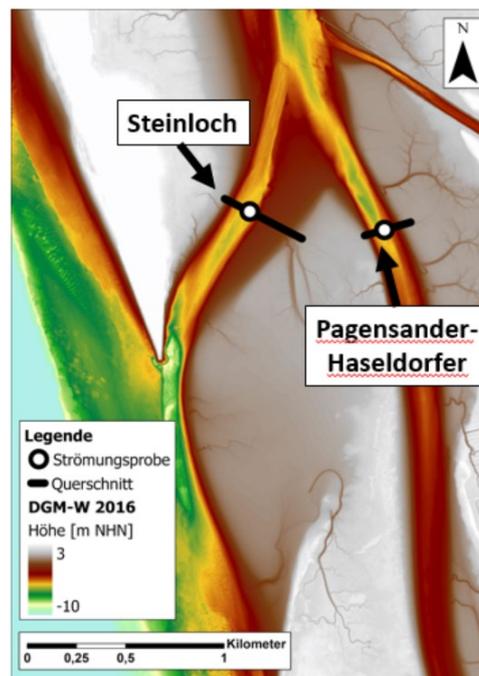


Abbildung 53: a) Prinzip der kombinierten Strömungsmessungen b) vorgesehene Messbereiche Steinloch und der Verbindung Pagensander NE - Haseldorfer BE

Tabelle 9: Zeitraum und Ort der punktuellen Strömungsmessungen im Steinloch und im Übergangsbereich von der Pagensander NE – Haseldorfer BE

Gebiet	Zeitraum	Messpunkt (UTM)
Steinloch	Ab: 06.09.2021 08:11 Bis: 09.09.2021 09:50	Nord: 32535236,555 Ost: 5946971,879
Pagensander-Haseldorfer	Ab: 06.09.2021 08:27 Bis: 09.09.2021 10:05	Nord: 32535921,543 Ost: 5946878,330

Tabelle 10: Zeiträume der Querprofilmessungen

Datum	Zeitraum
06.09.2021	14:40 – 18:50
08.09.2021	09:00 – 15:45

3.2 Jahrestopographien

Auf Grundlage der im Vorhaben jahresweise erhobenen Peildaten wurden digitale Geländemodelle in Form von Rastern mit der Auflösung 1x1m erstellt. Die Raster-Stützpunkte befinden sich in Analogie zu den DGM-W auf den ganzzahligen UTM-Koordinaten. Bei der Interpolation auf das Raster wurde der Mittelwert aller sich in der Rasterzelle befindlichen Einzelwerte als Zellwert übernommen. Die digitalen Geländemodelle erlauben eine detaillierte Beschreibung der Bathymetrie und der Sohleigenschaften der betrachteten Nebelben. Durch Differenzenbildung können Veränderungen detektiert und morphologische Parameter, wie z.B. die morphologische Aktivität oder Sohlstrukturen bestimmt werden. Dabei ist das einheitliche Vorgehen zur Sicherung der Datenqualität hervorzuheben. Die Vermessung wird stets mit demselben Messsystem durchgeführt und die Datenaufbereitung wie die Datenauswertung erfolgt nach derselben Methodik, wodurch Fehler minimiert werden.

Eine Übersicht über die erstellten digitalen Geländemodelle (hier: für das Jahr 2020) für die vier vermessenen Nebelben ist in Abbildung 54 gegeben. Abbildung 55 ff zeigen die Ergebnisse für die einzelnen Nebelben für die Messjahre 2019, 2020, 2021 und 2022. Ergänzend zu den vier im Vorhaben vermessenen Nebelben wird in Kapitel 3.2.5 die Jahrestopographie 2022 der Schwarztonnensander Nebelbe dargestellt, die auf Vermessungsdaten des WSA Elbe-Nordsee aus dem Jahr 2022 basiert.

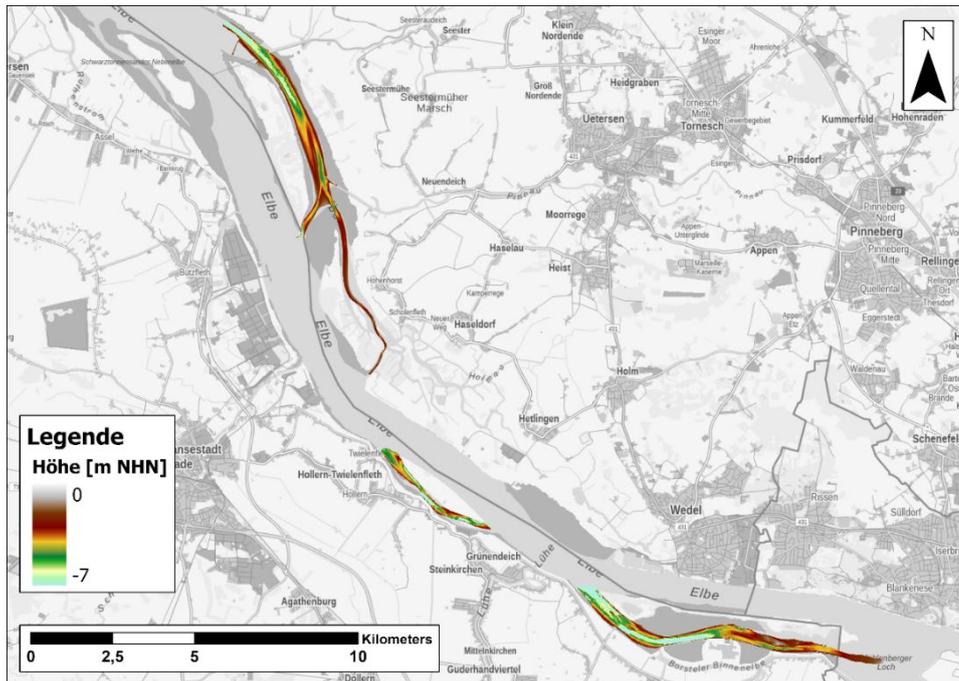


Abbildung 54 Übersicht über gesamte Fächerecholotpeilungen für 2020

Die digitalen Geländemodelle enthalten Sohlhöhen von NHN+0 m und darunter. Die obere Begrenzung ergibt sich aus der Mindestwassertiefe bei der Vermessung von etwa 2 m, die einerseits technisch bedingt ist und andererseits aus Gründen der nautischen Sicherheit einzuhalten ist.

Die IBP Arbeitsgruppe (2011a) definiert folgende Tiefenbereiche:

- Watten → MTnw bis MThw
- Flachwasser → MTnw - 2 m bis MTnw
- Tiefwasser2 → von MTnw - 10 m bis MTnw - 2 m
- Tiefwasser1 → tiefer als MTnw - 10m

Entsprechend dieser Definition sind die Zonen Tiefwasser1 und Tiefwasser2 sowie der Übergang vom Tiefwasser2 zum Flachwasser (gestrichelte Linie in Abbildung 55ff) in den erzeugten digitalen Geländemodellen enthalten. Der obere Bereich des Flachwassers sowie die Watten sind nur teilweise erfasst. Bei der Vermessung wurde jedoch darauf geachtet, dass wichtige Flachwasser- und Wattbereiche, z.B. am stromaufseitigen Übergang der Nebenelbe zur Hauptrinne, erfasst werden. Bei genauer Betrachtung fällt vor allem für die Pagensander NE und Haseldorfer BE auf, dass die generierten DGM 2019 teilweise lückenhafter sind als die Modelle der Folgejahre. Dieser Umstand ist vor allem auf äußerst ungünstige Tide- und Witterungsbedingungen während der Messkampagnen zurückzuführen. Die schlechten Bedingungen führten nicht nur zu einer Verzögerung des Ablaufs der Mes-

sung, sondern auch zu deutlich schlechterer Qualität der Messwerte. Durch die erforderliche Entfernung dieser Ausreißer, die vor allem im Bereich der äußeren Beams 60-75° zu finden waren, fallen die Lücken noch größer aus. Die Erkenntnisse sind in die Optimierung der Messungen in den Folgejahren eingeflossen. Durch Verbesserungen im Messablauf wurde die Datendichte und –qualität gegenüber 2019 verbessert, wodurch die digitalen Geländemodelle deutlich weniger Lücken aufweisen und in einigen Fällen (v.a. Lühesander SE) größere Bereiche abdecken.

3.2.1 Hahnöfer Nebelnelbe

Anhand der vier digitalen Geländemodelle (Abbildung 55f) der Hahnöfer NE ist zu erkennen, dass diese Nebelnelbe in der stromabseitigen Hälfte deutlich größere Tiefen (NHN - 6 m und tiefer) aufweist als in der stromaufseitigen Hälfte (NHN – 5 m und höher). Eine tiefere Rinne erstreckt sich zwischen Neuenschleuse und der Halbinsel Hahnöfersand (hellblau in Abbildung 55). Die größten Tiefen (NHN – 12 m) sind östlich des Hafens Neuenschleuse zu finden. In der stromabseitigen Hälfte der Hahnöfer NE befinden sich zudem mehrere Dünenfelder (s.a. Kapitel 3.3.1). In der stromaufseitigen Hälfte nehmen die Tiefen bis zum Mühlenberger Loch auf etwa NHN - 2,5 m ab. Ausgedehnte Flachwasser-/Wattbereiche sind an den Ufern zum Festland und zu den Inseln Hanskalbsand und Neßsand zu finden. Eine auffällige Sohlstruktur befindet sich in der stromaufseitigen Hälfte der Hahnöfer NE. In der Nähe von Neßsand, nordöstlich von Hahnöfersand, befindet sich ein sehr flacher Bereich mit konkaven Strukturen, die wie größere Dünen wirken, die von kleineren Bettformen überlagert werden.

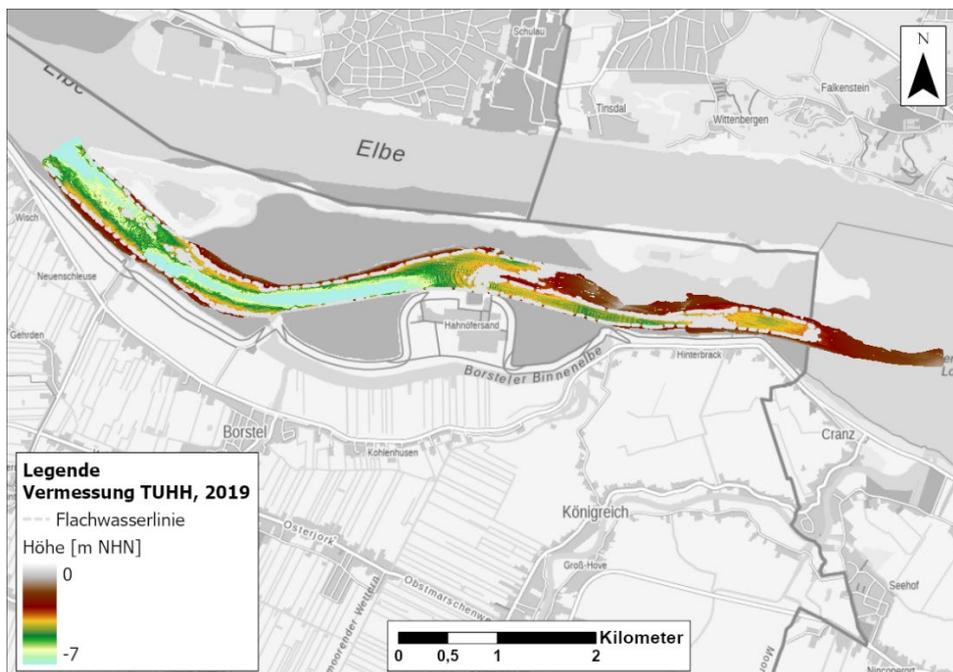


Abbildung 55: Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebelnelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 13.05.-16.05.2019

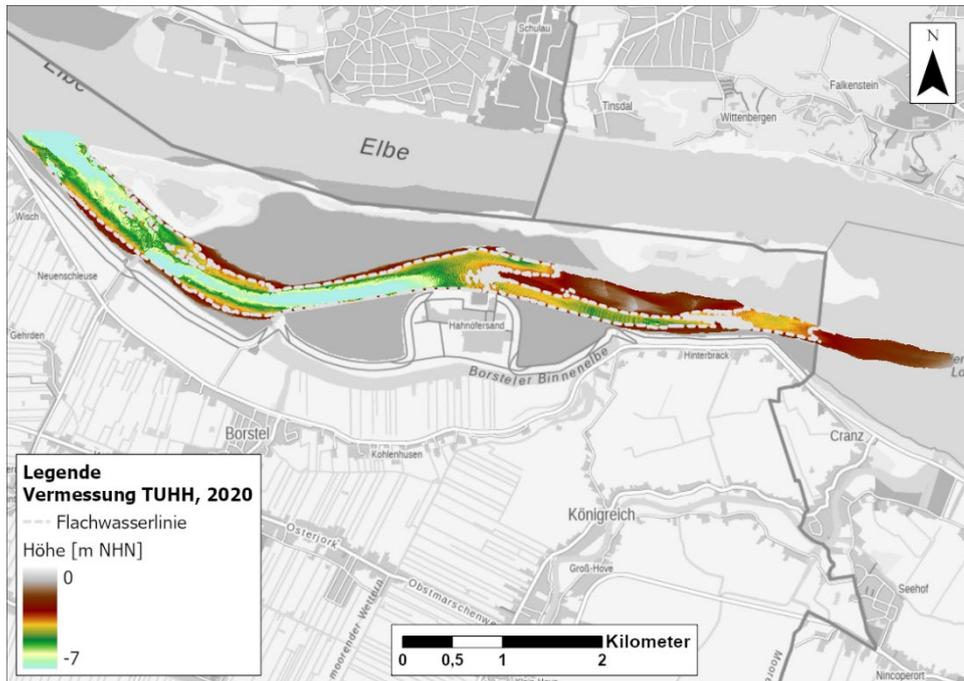


Abbildung 56: Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebeneibe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 25.08.-09.09.2020

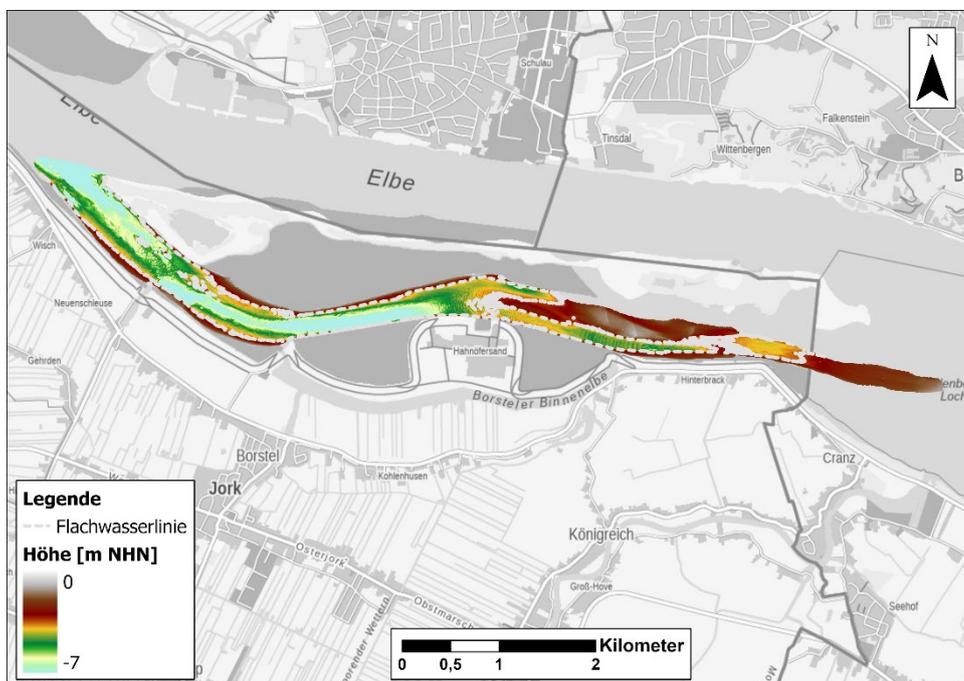


Abbildung 57: Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebeneibe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 15.06. - 23.06.2021.

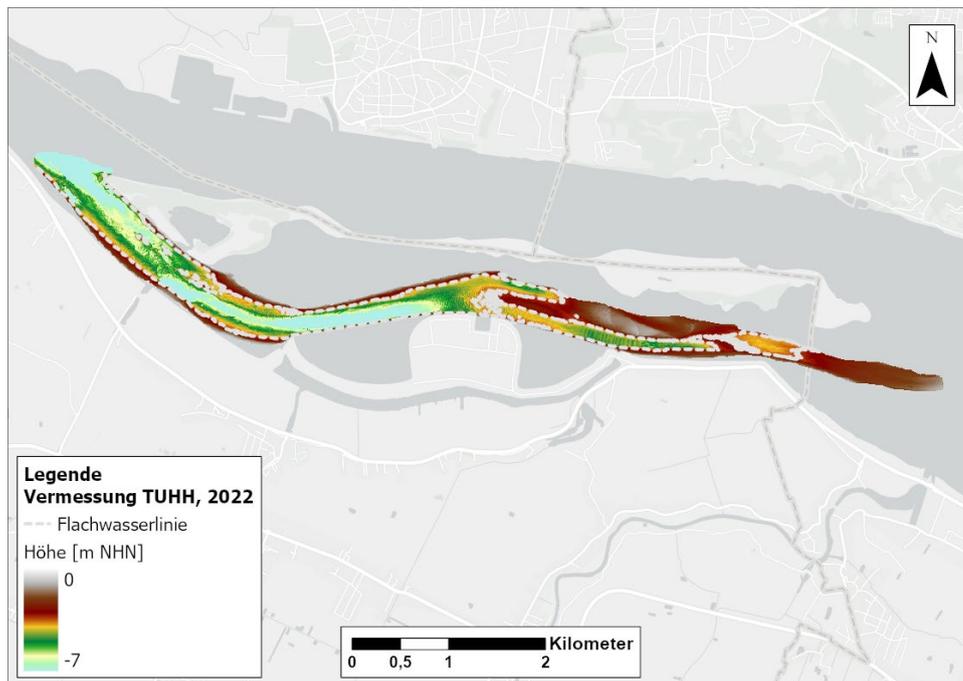


Abbildung 58 Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 08.07. - 20.07.2022.

3.2.2 Lühesander Süderelbe

Die Lühesander Süderelbe ist eine der kürzeren Nebenelben. In den vier digitalen Geländemodellen (Abbildung 59f) ist keine deutliche Zweiteilung in eine tiefere stromabseitige und eine flachere stromaufseitige Hälfte erkennbar. An ihrer tiefsten Stelle - etwa auf Höhe des Zentrums der Insel Lühesand (gleichzeitig die engste Stelle) - weist die Rinne eine Tiefe von etwa NHN – 8 m auf. Ausgedehnte Flachwasser-/ Wattbereiche sind vor allem im Bereich des Ufers zum Festland zu finden.

Die Jahrestopographien 2020, 2021 und 2022 der Lühesander Süderelbe weisen eine deutlich bessere Abdeckung als 2019 (Abbildung 59) auf, wodurch die morphologischen Merkmale deutlicher zu erkennen sind. Diese digitalen Geländemodelle decken den Tiefenbereich zwischen NHN - 0,8 m und NHN - 12 m ab. Die Bathymetrie weist viele Abschnitte mit stark variierenden Sohlgradienten auf. Sanddünen sind in weiten Teilen der Lühesander Nebenelbe zu finden, jedoch verstärkt im mittleren Drittel.

Im stromaufwärts gelegenen Drittel der Lühesander NE sind die größten Tiefen zu finden. An der Pionierinsel vor dem Hafen befindet sich ein Bereich mit großen Tiefen, der aber sowohl in Richtung stromauf als auch Richtung stromab flach ausläuft. Im mittleren Drittel befinden sich sowohl ein tieferer Bereich mit Sohlhöhen bis NHN – 7 m als auch ein sehr

flacher Bereich nahe dem Festlandufer. Das stromab gelegene Drittel der Lühesander Süderelbe ist mit maximalen Tiefen um NHN – 5 m in der Nähe der Elbfahrrinne flacher als die anderen beiden Drittel.

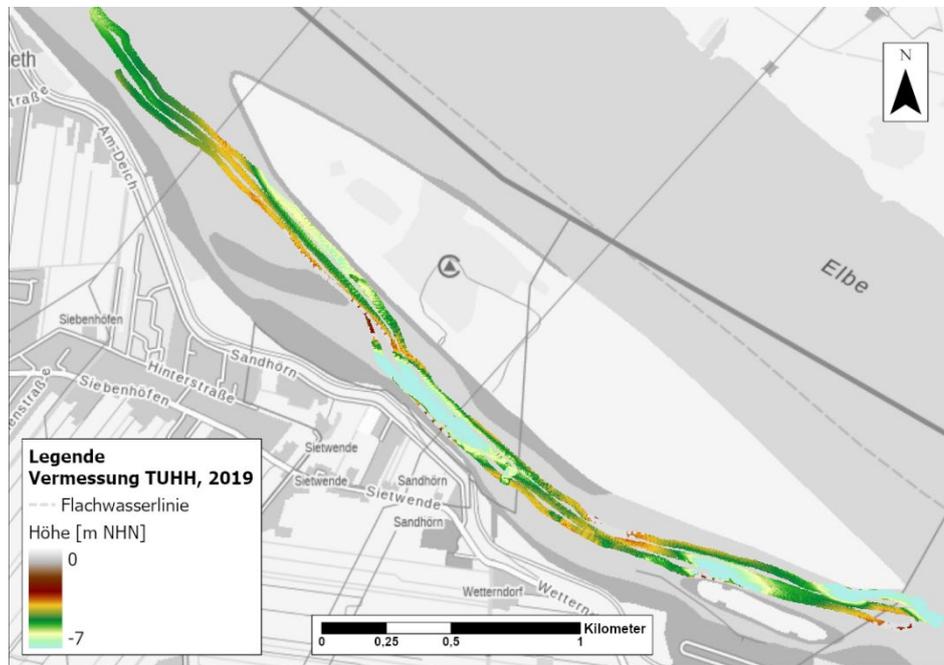


Abbildung 59: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 24.06.2019

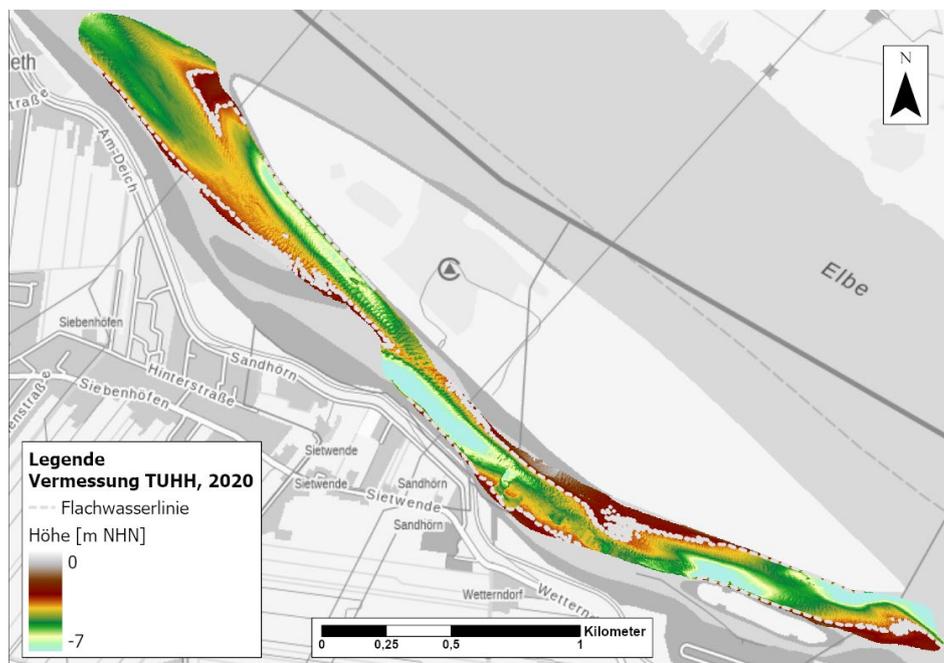


Abbildung 60: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 28.08.2020

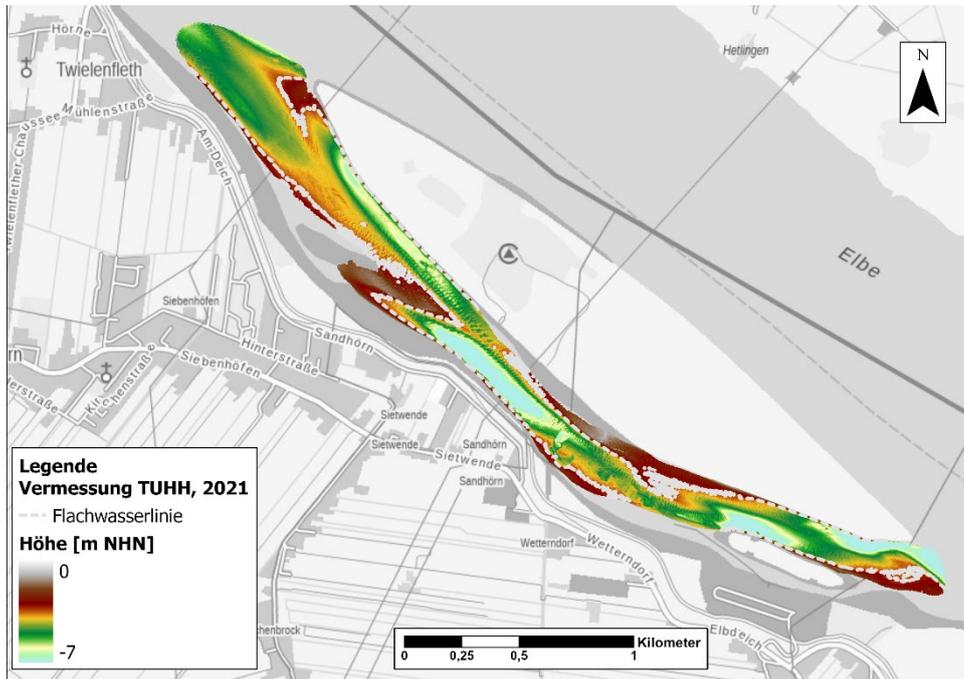


Abbildung 61: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 07.08 – 08.08.2021

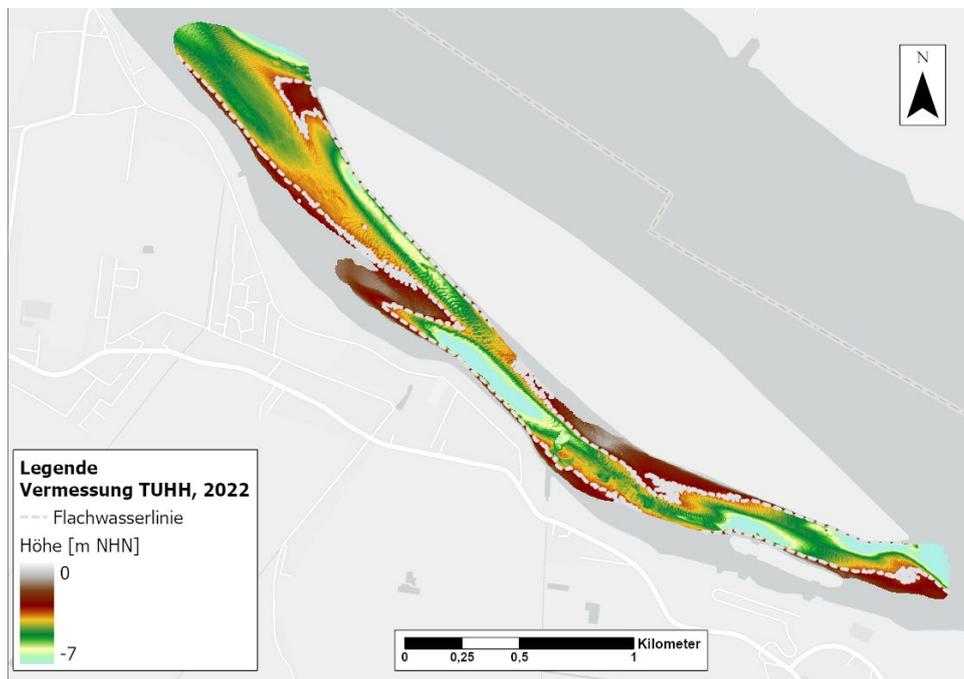


Abbildung 62: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 06.07 – 07.07.2022

3.2.3 Haseldorfer Binnenelbe

Die Haseldorfer Binnenelbe schließt stromaufseitig an die Pagensander Nebenelbe an und ist insgesamt sehr flach (Abbildung 63f). Im Übergangsbereich zur Pagensander NE befindet sich eine Rinne mit Tiefen von ca. NHN – 4 m bis NHN – 5 m, die in Richtung stromauf relativ schnell flacher wird und ausläuft. Ab hier beträgt die maximale Tiefe etwa NHN - 3,5 m. Die abzweigenden Nebenrinnen liegen größtenteils oberhalb von NHN + 0 m und sind damit nicht über die Fächerlotung zu erfassen. Nahe der kleinen Insel (westlich des Hafens Haseldorf) befindet sich ein kleineres Dünenfeld. Am stromaufseitigen Ende befindet sich eine schmale Verbindung zur Elbe (Dwarssloch), die mit einer Ausnahme am Übergang zum Bauernloch (bis NHN – 5 m) in etwa eine Tiefe von NHN – 2 m bis NHN – 3 m aufweist.

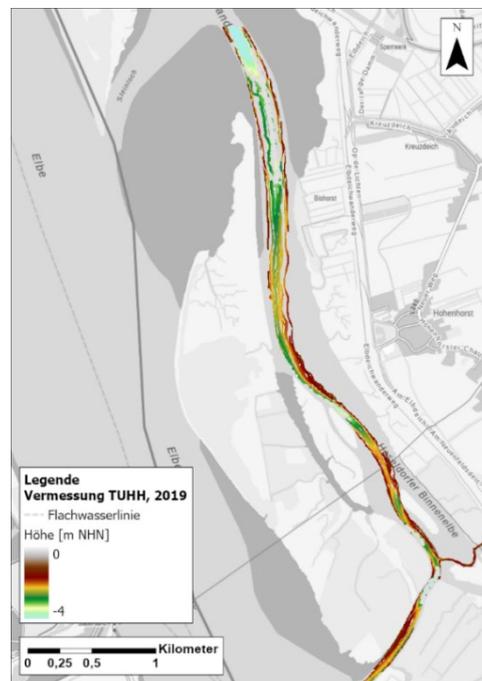


Abbildung 63: Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 24.06. – 30.06.2019

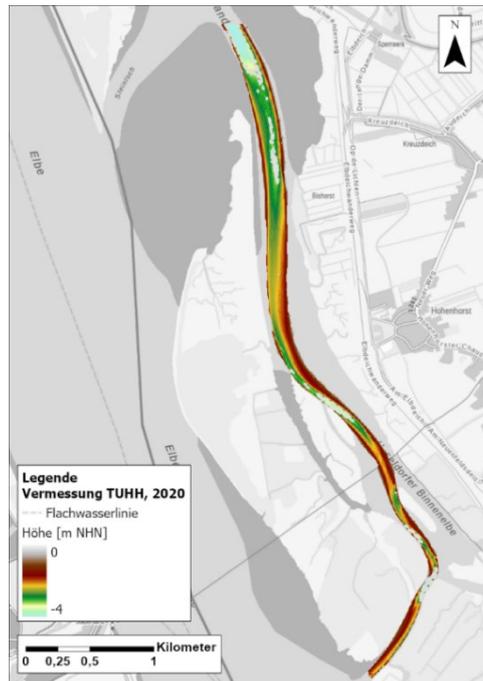


Abbildung 64: Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 15.06.-16.06.2020

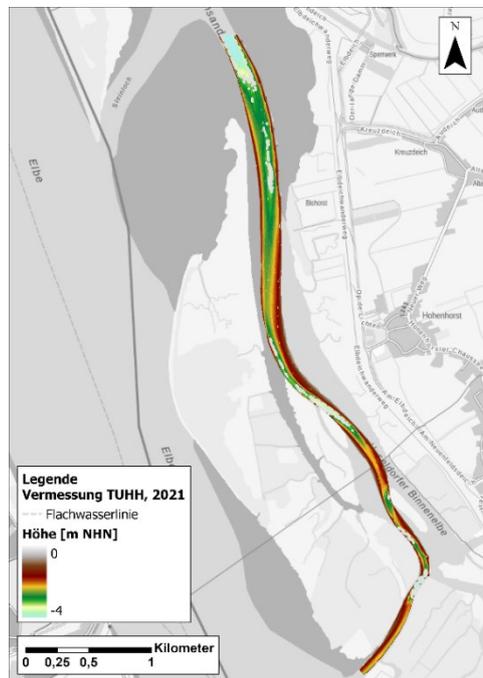


Abbildung 65: Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 18.05.-19.05.2021

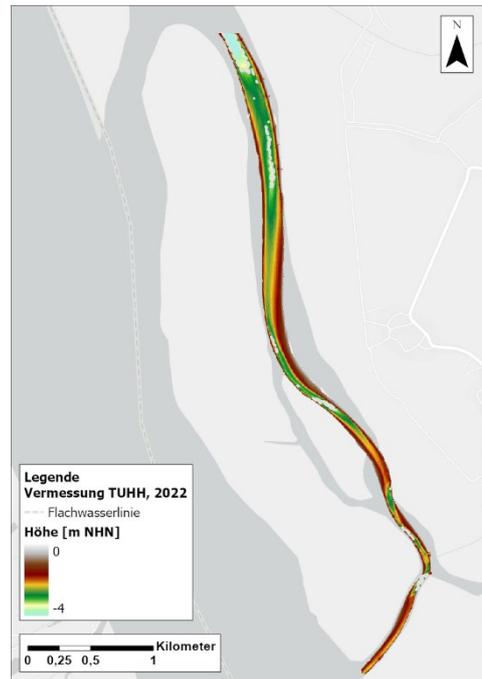


Abbildung 66 Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 10.05.-12.05.2022

3.2.4 Pagensander Nebeneibe

Die Pagensander NE weist, wie die Hahnöfer NE, in der stromabseitigen Hälfte deutlich größere Tiefen auf als in der stromaufseitigen Hälfte (Abbildung 67f). Im Vergleich zur Hahnöfer NE sind die Sohlhöhen in der stromabseitigen Hälfte mit NHN – 7 m und darüber jedoch etwas höher. In der stromaufseitigen Hälfte befindet sich der Übergang zur Haseldorfer Binnenelbe und zum Steinloch, über das eine Verbindung zur Elbe besteht. Hier sind zwei ausgeprägte Rinnenstrukturen mit Tiefen zwischen NHN – 4 m und NHN – 5 m zu erkennen. Ausgedehnte Flachwasser-/Wattbereiche befinden sich an den Ufern zum Festland, zur Insel Pagensand und zum Bishorster Sand. Größere zusammenhängende Dünenfelder sind nicht vorhanden. In die Pagensander NE münden die Elbenebenflüsse Krückau (im Norden) und Pinnau (im Süden). Im Mündungsbereich der beiden Flüsse sind im DGM kleine Rinnen mit Tiefen bis zu NHN – 3 m vorhanden.

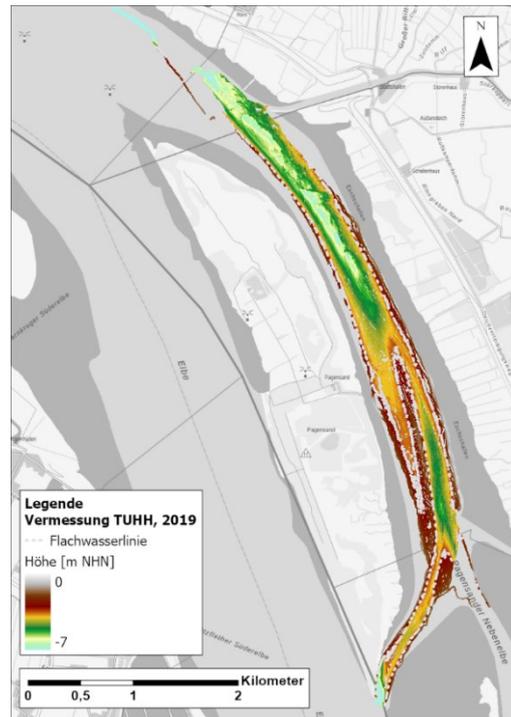


Abbildung 67: Digitales Geländemodell der Pagensander Nebelbeben, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 16.04. - 26.04.2019

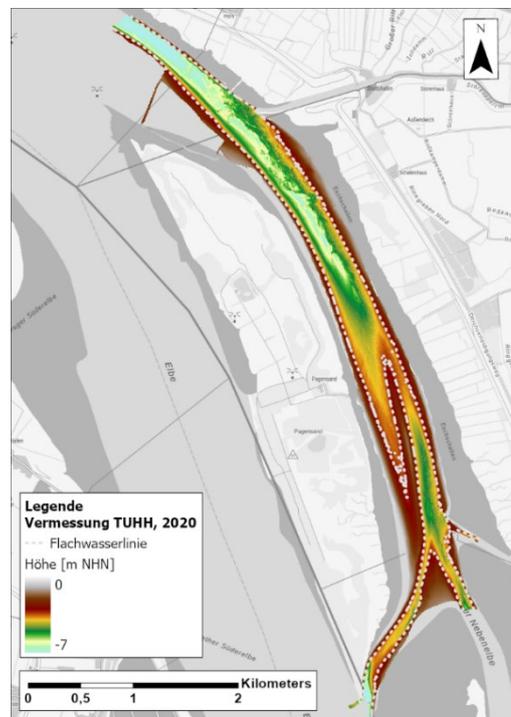


Abbildung 68: Digitales Geländemodell der Pagensander Nebelbeben, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 17.06.-03.07.2020

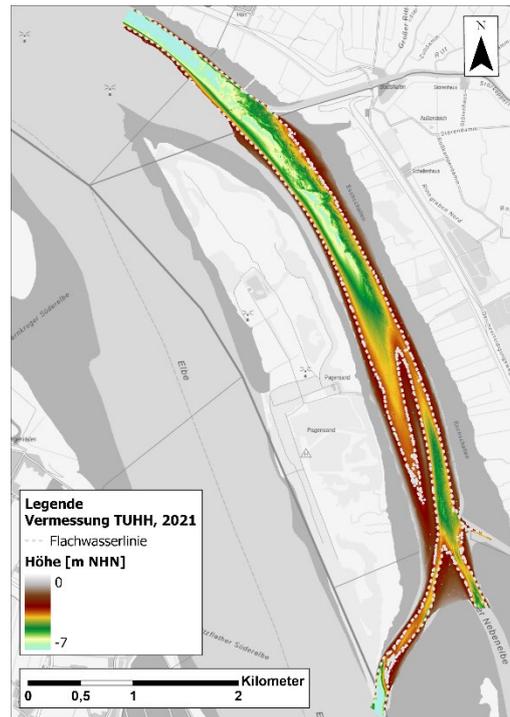


Abbildung 69: Digitales Geländemodell der Pagensander Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 20.05.-04.06.2021



Abbildung 70 Digitales Geländemodell der Pagensander Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 13.05.-23.06.2022

3.2.5 Schwarztonnensander Nebelnelbe

Im Unterschied zu den anderen in diesem Abschnitt beschriebenen Nebelnelben wurde die Schwarztonnensander Nebelnelbe nicht vom Institut für Wasserbau der TUHH, sondern vom WSA Elbe-Nordsee vermessen. Die Fächerecholotmessungen wurden zwischen dem 11. und 28. April 2022 durchgeführt. Die Schwarztonnensander NE ist im Vergleich zu den meisten anderen Nebelnelben sehr flach (vgl. Abbildung 71). Die größten Tiefen sind mit NHN - 5 m am stromabseitigen Ende zu erkennen. Nahezu die gesamte Rinne hinter dem Schwarztonnensand weist Tiefen von NHN - 3 m und flacher auf, wobei die geringsten Tiefen am stromaufseitigen Ende vorzufinden sind. Im stromabseitigen sowie im gesamten mittleren Teil sind Dünenfelder zu erkennen. Der flachere stromaufseitige Teil weist nahezu keine Bettformen auf.

Es existiert ein Wattengebiet (in Abbildung 71 nicht dargestellt), das sich vom Süden der Insel Schwarztonnensand bis zum südlichen Ende des Messbereiches erstreckt. Ein weiteres Wattgebiet (ebenfalls in Abbildung 71 nicht dargestellt) befindet sich landseitig etwa auf Höhe der Mitte der Nebelnelbe.

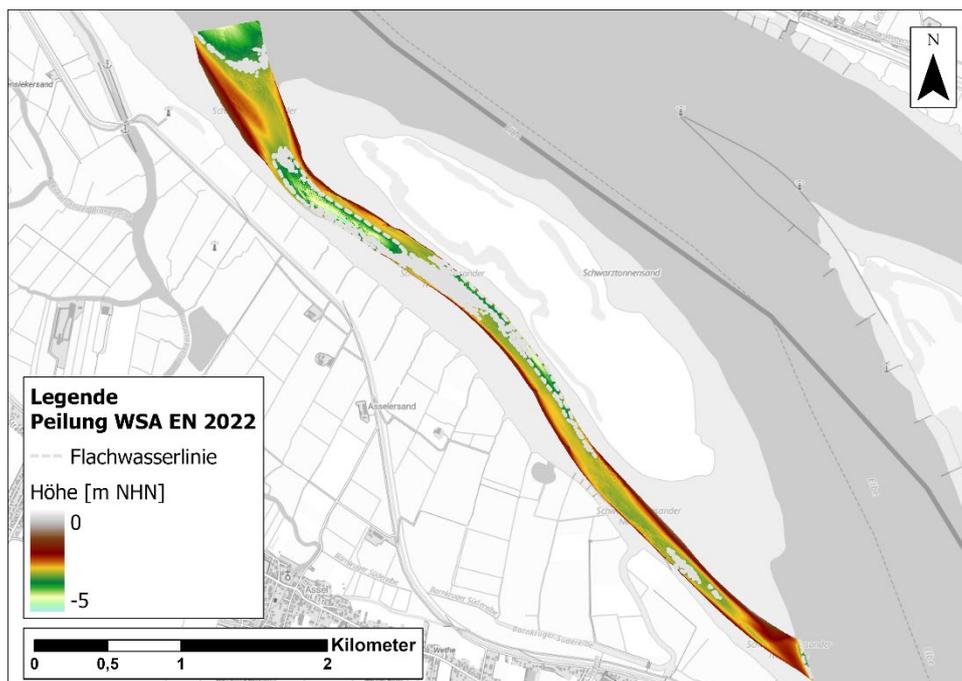


Abbildung 71 Digitales Geländemodell der Schwarztonnensander Nebelnelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung der WSA Elbe-Nordsee vom 11.04.-28.04.2022

3.3 Morphologische Entwicklung

Anhand der im Vorhaben erzeugten digitalen Geländemodelle der Jahre 2019 - 2022 sowie anhand des DGM-W 2016 ist es möglich, die Morphologie sowie die rezente morphologische Entwicklung der Nebelnelben zu analysieren. Hierzu wurden sowohl räumliche als auch statistische Analysemethoden eingesetzt mit denen bathymetrische Veränderungen,

Erosions- und Depositionsbereiche sowie die Entwicklung von Sohlformen identifiziert und deskriptiv sowie quantitativ beschrieben werden.

Eine einfache räumliche Analyse basiert auf der Differenzenbildung zwischen zwei Datensätzen unter Verwendung des analytischen Ausdrucks

$$t_{diff} = t_{neu} - t_{alt}$$

wobei t_{neu} dem neueren Datensatz, t_{alt} dem älteren Datensatz und t_{diff} der berechneten resultierenden Tiefendifferenz entspricht. Die für jede Rasterzelle bestimmte Differenz wird farblich abgestuft visualisiert. Rote Farben stehen für Deposition, blaue Farben für Erosion. Ist der Betrag der berechneten Differenz kleiner als 0,1 m wird keine Farbe zugeordnet, um Fehlinterpretationen durch Unsicherheiten in den Daten zu minimieren. Aus der flächigen Darstellung der Differenzen werden Schnitte (Profildigramme) erzeugt, um Details wie z.B. Sohlformen näher zu analysieren.

Um die Gesamtentwicklung in einem Nebelbensystem zu analysieren, ohne dabei den Fokus auf einzelne Sohlformen oder Erosions- bzw. Depositionsbereiche zu setzen, werden die Einzelwerte der Tiefen als Histogramm aufgetragen. Dabei werden die in Kapitel 3.1 definierten Tiefenbereiche nach IBP Arbeitsgruppe (2011a) berücksichtigt. Es werden zwei Arten von Histogrammen erzeugt, eine kumulative Verteilungsfunktion (CDF) und eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (PDF). Die kumulative Verteilungsfunktion zeigt die Summenkurve der Tiefen über die Fläche. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zeigt die Häufigkeit der Tiefenwerte im Datensatz. Um die Ergebnisse für die Jahrestopographien untereinander vergleichen zu können, werden nur die Rasterzellen berücksichtigt, für die in jedem Datensatz Werte vorhanden sind. Da die Messungen von 2020 bis 2022 im Allgemeinen größere Bereiche abdecken als die Messungen von 2019, wird die Analyse im Wesentlichen auf dem Raster von 2019 durchgeführt.

Neben der Entwicklung der Tiefen wird auch die Entwicklung der Sedimentverteilung in den Nebelben bzw. der Korngrößenverteilung an unterschiedlichen Standorten zur Analyse herangezogen. Hier liefert das um die Sedimentbeprobungen des Jahres 2020 (vgl. 3.1.3) erweiterte Sedimentkataster der Tideelbe Informationen. Die Daten wurden für die einzelnen Nebelben ausgewertet und sowohl als Karten mit den Standorten der Sedimentproben mit der vorherrschenden Sedimentklasse und dem Entnahmejahr dargestellt, als auch als Histogramme mit der Anzahl der Proben jeder Klasse in jedem Entnahmejahr. Hieraus ergeben sich neben einer grundsätzlichen Charakterisierung auch Hinweise auf eine mögliche Änderung der vorherrschenden Sedimentklassen, wobei natürlich zu berücksichtigen ist, dass sowohl die Probenanzahl je Jahr als auch die Entnahmeorte unterschiedlich sind. Die Bodengruppen mit ihren jeweiligen Korngrößen wurden entsprechend der Metadaten des Sedimentkatasters Tideelbe definiert zu;

Schluffkorn → < 0,063 mm

Feinsand → 0,063 – 0,2 mm

Mittelsand → 0,2 – 0,63 mm

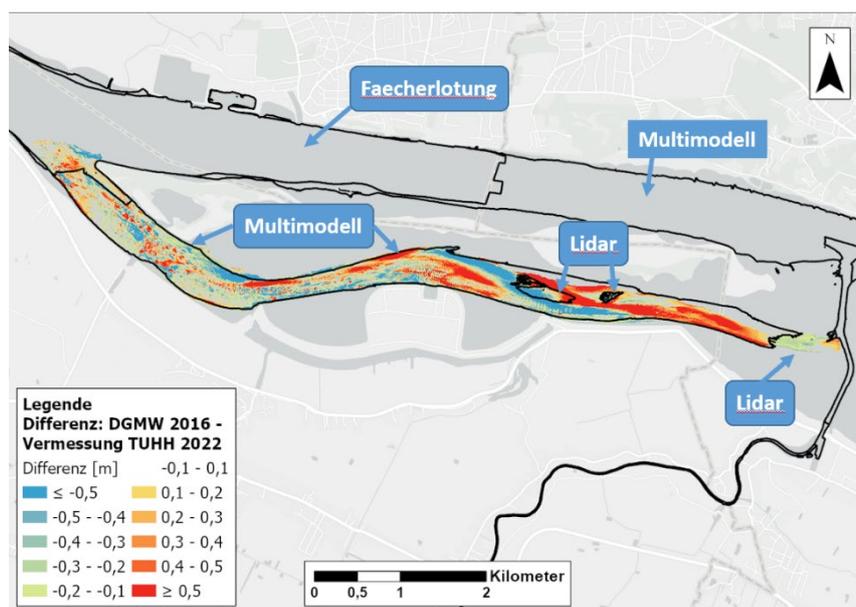
Grobsand → 0,63 – 2 mm

Kies → 2 – 63 mm.

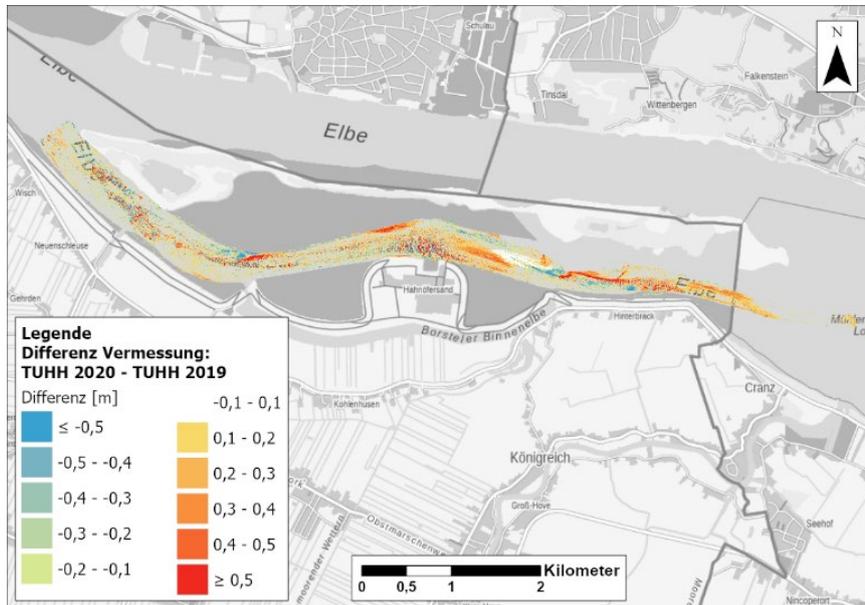
3.3.1 Hahnöfer Nebeneibe

Die morphologische Entwicklung der Hahnöfer NE im Zeitraum 2016 bis 2022 zeigt Abbildung 72. Die obere Darstellung a) zeigt die Differenz aus dem im Vorhaben erzeugten DGM 2022 und dem DGM-W 2016. In der stromauf gelegenen Hälfte fallen drei größere zusammenhängende Bereiche mit eindeutigen Tendenzen in der Sohlentwicklung (Änderungen bis $\pm 0,5$ m) auf. Vom Mühlenberger Loch ausgehend erstreckt sich ein langgezogener Depositionsbereich in Richtung stromab. Auf diesen folgt, schräg von Südost nach Nordwest verlaufend, ein Erosionsbereich auf welchen wiederum in Depositionsbereich folgt. Etwa mittig der Halbinsel Hahnöfersand gehen diese großräumigen Muster in ein kleinräumig variierendes Muster mit Clustern aus Erosion und Verlandung über, welche sich über die gesamte stromabgelegene Hälfte der Hahnöfer Nebeneibe erstrecken. Diese deuten auf das Vorhandensein von Transportkörpern hin. Bei der Interpretation der Differenzen ist allerdings zu berücksichtigen, dass das DGM 2022 der TUHH ausschließlich auf Fächerlotpeilungen beruht während das DGM-W 2016 aus verschiedenen Datensätzen zusammengesetzt ist, die mit unterschiedlichen Messverfahren (Linienlotung, Laserscanning aber keine flächenhafte Unterwasservermessung im Bereich der Hahnöfer NE) erhoben wurden (vgl. Abbildung 72 a). Daher können die Unterschiede in Differenzenplots auf Grundlage des DGM-W 2016 auch auf unterschiedliche Messverfahren zurückzuführen sein.

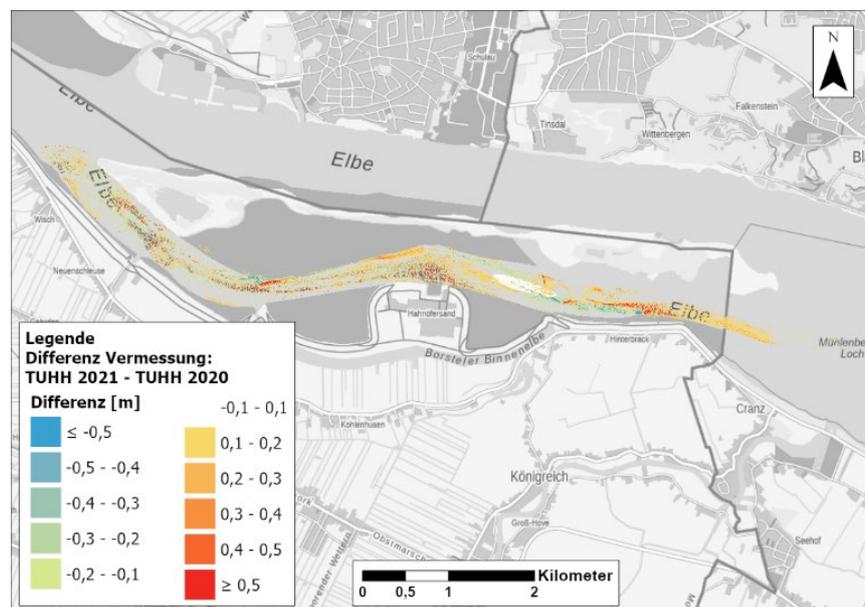
a)



b)



c)



d)

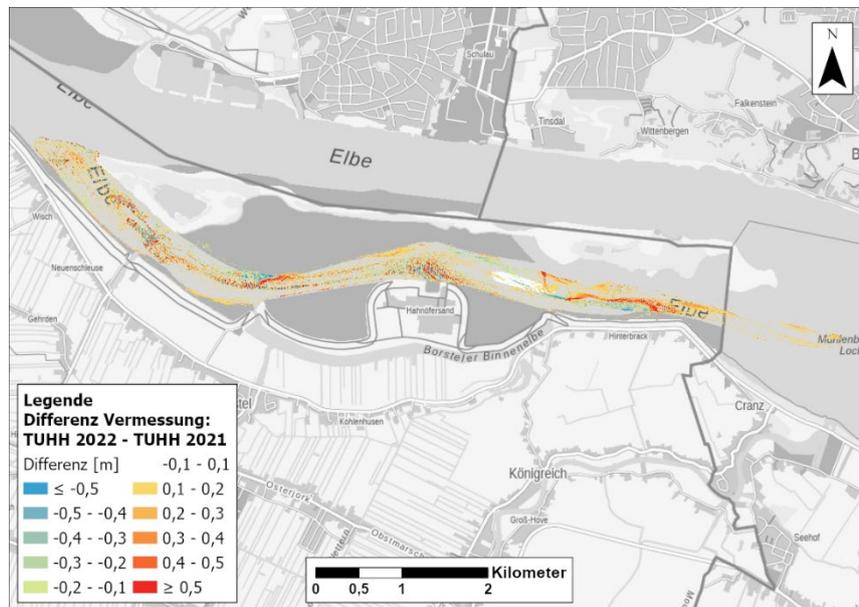


Abbildung 72: Differenzen zwischen a) dem DGM-W 2016 und dem DGM 2022 der TUHH, b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH, c) dem DGM 2020 und dem DGM 2021 der TUHH und d) dem DGM 2021 und dem DGM 2022 der TUHH im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGM-W 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an.

Exakte morphologische Änderungen können nur anhand des Vergleiches von DGMs mit gleicher Grundlage (Messverfahren, Aufbereitung) bestimmt werden. Aus diesem Grund sind die im Vorhaben erzeugten reinen Fächerlotdatensätze der Jahre 2019, 2020, 2021 und 2022 einander gegenübergestellt (Abbildung 72 b, c und d).

Alle zeigen dem Grunde nach dem zuvor beschriebenen Muster, jedoch in deutlich abgeschwächerter Ausprägung und weitaus höherem Detaillierungsgrad. Der Vergleich der Darstellungen untereinander zeigt, dass die morphologischen Änderungen (in beide Richtungen) zwischen den Vermessungen 2019 und 2020 insgesamt größer waren als zwischen den Vermessungen 2020 und 2021 sowie 2021 und 2022. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwischen den Messungen 2019 und 2020 15 Monate vergangen sind, während zwischen den Messungen 2020 und 2021 10 Monate und zwischen den Messungen 2021 und 2022 13 Monate liegen.

In allen Darstellungen sind die kleinräumigen Muster auf Höhe der Halbinsel Hahnöfersand und in der stromabgelegenen Hälfte gut zu erkennen. Tatsächlich handelt es sich hierbei um Transportkörper, die in den hochauflösenden Datensätzen deutlich erkennbar sind, im DGM-W 2016 hingegen nicht (vgl. Abbildung 74).

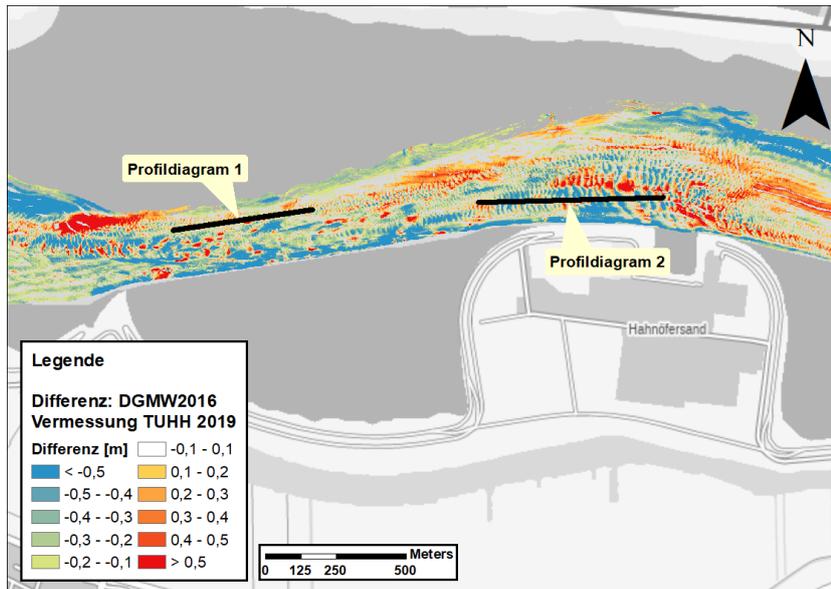


Abbildung 73: Differenzen zwischen dem DGM-W 2016 und dem DGM 2019 der TUHH im Zentrum der Hahnöfer NE und Lage der Längsschnitte (Profildiagramme)

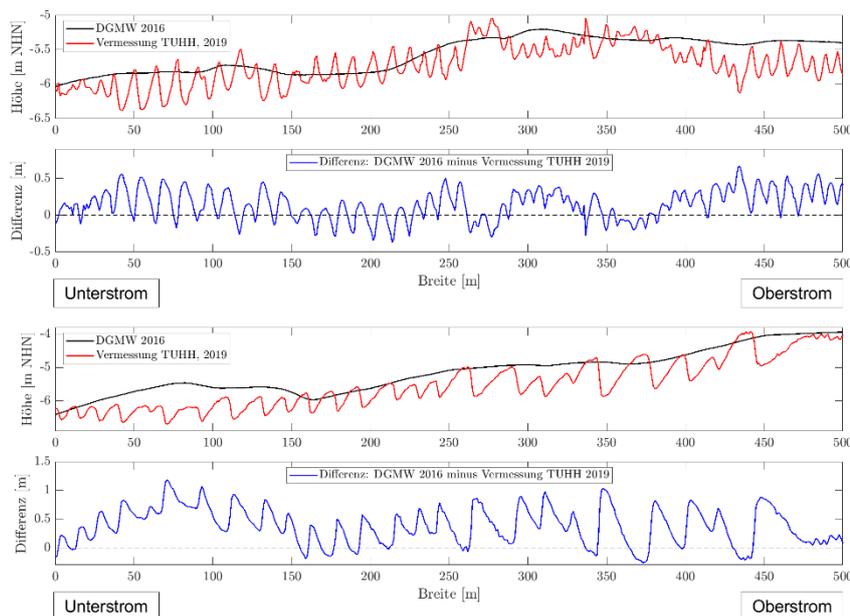
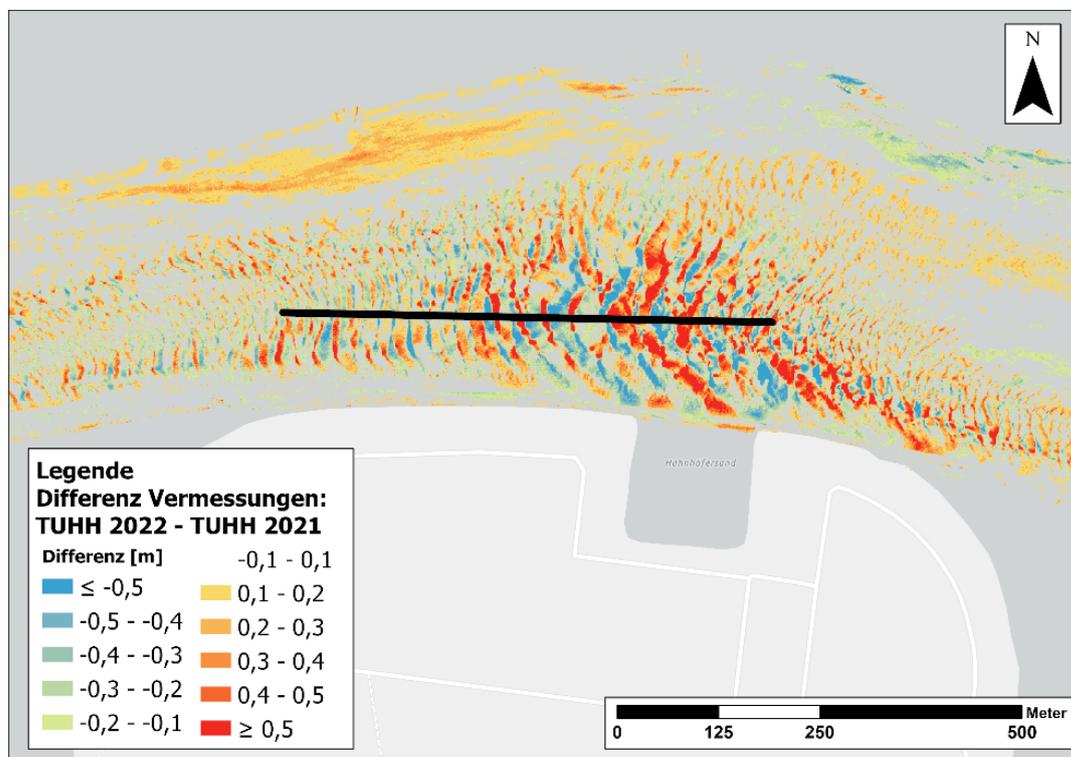


Abbildung 74: Längsschnitte (Profildiagramme) im Zentrum der Hahnöfer NE, oben: Profildiagramm 1, unten Profildiagramm 2

Der Vergleich zwischen den hochauflösenden Datensätzen aus 2019, 2020, 2021 und 2022 ermöglicht eine detailliertere Betrachtung der Dünenfelder. Die Höhe der Transportkörper (Dünen) beträgt in den betrachteten Abschnitten einige Dezimeter bis zu einem Meter bei einer Wellenlänge von 10 bis 40 m. Abbildung 75 zeigt die Entwicklung der Dünen vor

Hahnöfersand. Es ist zu erkennen (Abbildung 75 b), dass die Dünen in allen Jahren vergleichbare Höhen, Formen und Wellenlängen aufweisen. In den 15 Monaten zwischen den beiden Messungen von 2019 und 2020 sind die Dünen im betrachteten Abschnitt in etwa 15 m in Richtung stromauf gewandert. Diese Wandergeschwindigkeit von etwa 1 Meter pro Monat ist auch in den zehn Monaten zwischen den Messungen von 2020 und 2021 zu erkennen. In den 11 Monaten zwischen den Messungen von 2021 und 2022 ist die Wandergeschwindigkeit etwa halb so hoch wie in den vorangegangenen Zeiträumen und sinkt auf etwa 0,5 m pro Monat. Die Bewegung (oder präziser der residuelle Geschiebetransport) in Richtung Oberstrom lässt für den betrachteten Zeitraum auf einen dominierenden Flutstrom in diesem Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe schließen.

a)



b)

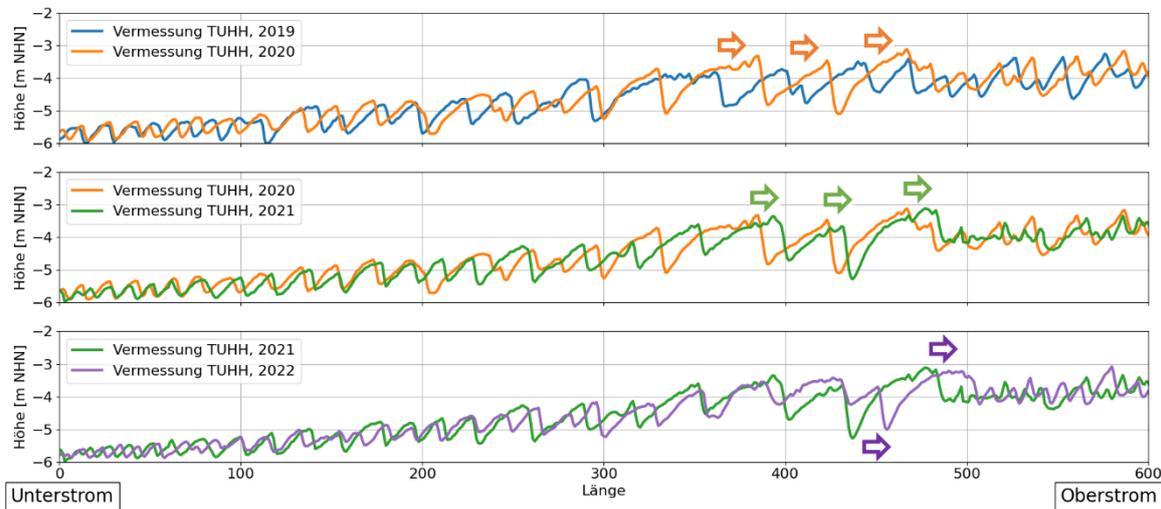


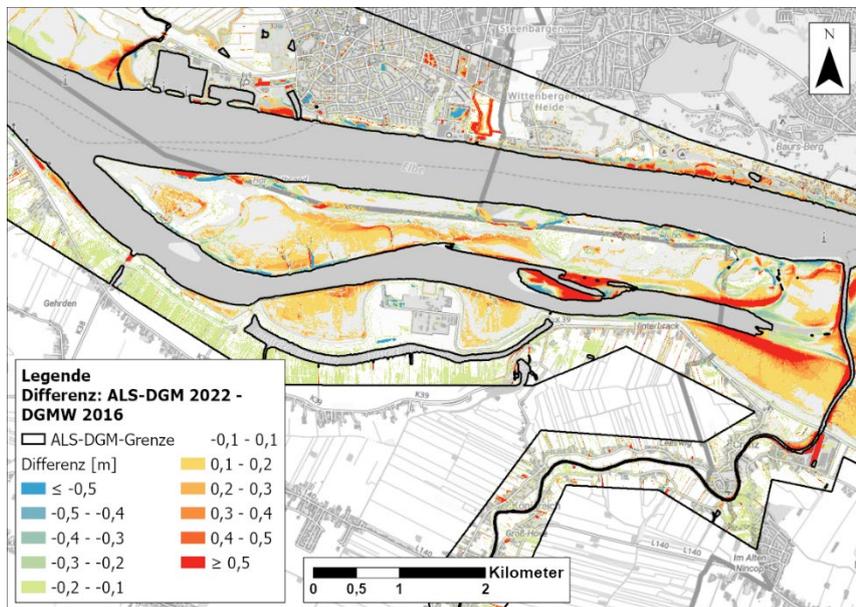
Abbildung 75: a) Differenzen zwischen dem DGM 2021 und dem DGM 2022 der TUHH im Zentrum der Hahnöfer NE und Lage der Längsschnitte (Profildiagramme); b) Beispielhafte Längsschnitte im Bereich der Hahnöfer NE für die vier Messjahre, Lage des Längsschnitts wie in a) markiert.

Das angekündigte DGM-W 2022 wurde leider nicht mehr während der Projektlaufzeit fertig. Allerdings konnte zumindest ein Ausschnitt aus den ALS Befliegungsdaten des Jahres 2022, die in das DGM-W 2022 einfließen werden, für Analysen genutzt werden. Dieser Datensatz umfasst nur Bereiche oberhalb des Wasserspiegels, z.B. Wattzonen.

Das für die Hahnöfer NE zur Verfügung gestellten Höhenraster aus den Befliegungsdaten ALS-DGM-2022 wurde mit dem DGM-W 2016 und dem DGM 2019 der TUHH im Jahr 2019 verglichen. Abbildung 76 zeigt die beiden Differenzenplots, die in den Bereichen mit Werten versehen sind, in denen beide zu Grunde liegenden Raster ebenfalls Werte haben. Das sind im Wesentlichen die Wattflächen.

Der Vergleich zwischen 2016 und 2022 (Abbildung 76 a) zeigt für die östliche Hälfte der Nebelnelbe, insbesondere für den Bereich Mühlenberger Loch eine Verlandungstendenz, die sich sowohl auf der Insel- als auch auf der Landseite durch rötliche Farben auszeichnet. Nahe der Mitte der Nebelnelbe gibt es einen Erosionsbereich, der sich unmittelbar an einen Verlandungsbereich anschließt. Dies deutet auf die Bewegung der sich in diesem Bereich befindlichen Barre in Richtung Osten (stromauf) hin. In der westlichen Hälfte der Nebelnelbe sind auf beiden Uferseiten Erosions- und Verlandungstreifen erkennbar. Allerdings ist die Höhenlage der genannten Flächen nur knapp oberhalb bzw. im Bereich des MTnw, so dass die Erkenntnisse aufgrund der größeren Unsicherheiten im Bereich der Land-Wasser Grenze nur eingeschränkte Aussagekraft haben.

a)



b)

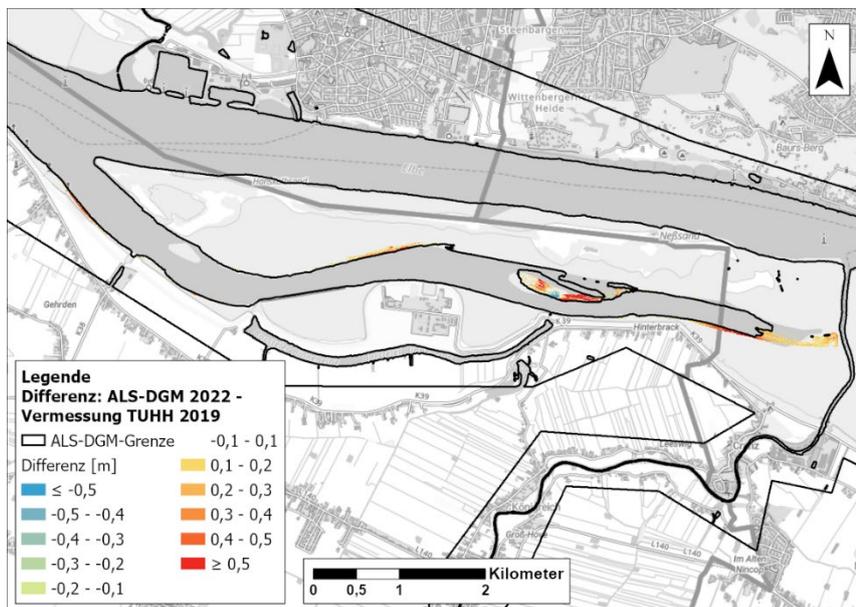


Abbildung 76: Differenz zwischen der Befliegung des DGM-W2022 und a) DGM-W2016 und b) DGM2019 der TUHH im Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe

Neben der räumlich differenzierten Betrachtung erfolgte auch eine integrale Betrachtung für den gesamten vermessenen Bereich der Hahnöfer NE. Abbildung 77 zeigt die Tiefenwerte der Jahrestopographien als Histogramme. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen vier Geländemodellen

Werte vorliegen. Für die Darstellungen c) (Summenkurve) und d) (Dichtefunktion) wurde das am dünnsten besetzte DGM 2019 bei der Auswertung weggelassen. Aus dem Vergleich der Summenkurven (a und c) und der Dichtefunktionen (b und d) geht hervor, dass die reduzierte Anzahl an Rasterzellen im DGM 2019 keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse und Trends hat. Daher beziehen sich die folgenden Interpretationen auf die Summenkurve a) sowie die Dichtefunktion b).

Der Vergleich der jahresweisen Summenkurven untereinander zeigt geringe Abweichungen, was auf ein konstantes Gesamtvolumen der vermessenen Flächen im betrachteten Zeitraum hindeutet. Aus dem Vergleich der Dichtefunktionen untereinander geht hervor, dass Rasterzellen mit Höhen um NHN – 4 m am häufigsten auftreten, wobei deren Anzahl im DGM-W 2016 größer ist als in den übrigen DGM. Ob hierfür tatsächlich morphologische Änderungen verantwortlich sind oder die Abweichungen auf die Interpolationsmethoden des DGM-W zurückzuführen sind, ist nicht abschließend zu klären. Falls ein morphologischer Trend vorliegen sollte, setzt sich dieser zwischen 2019 und 2022 nicht fort.

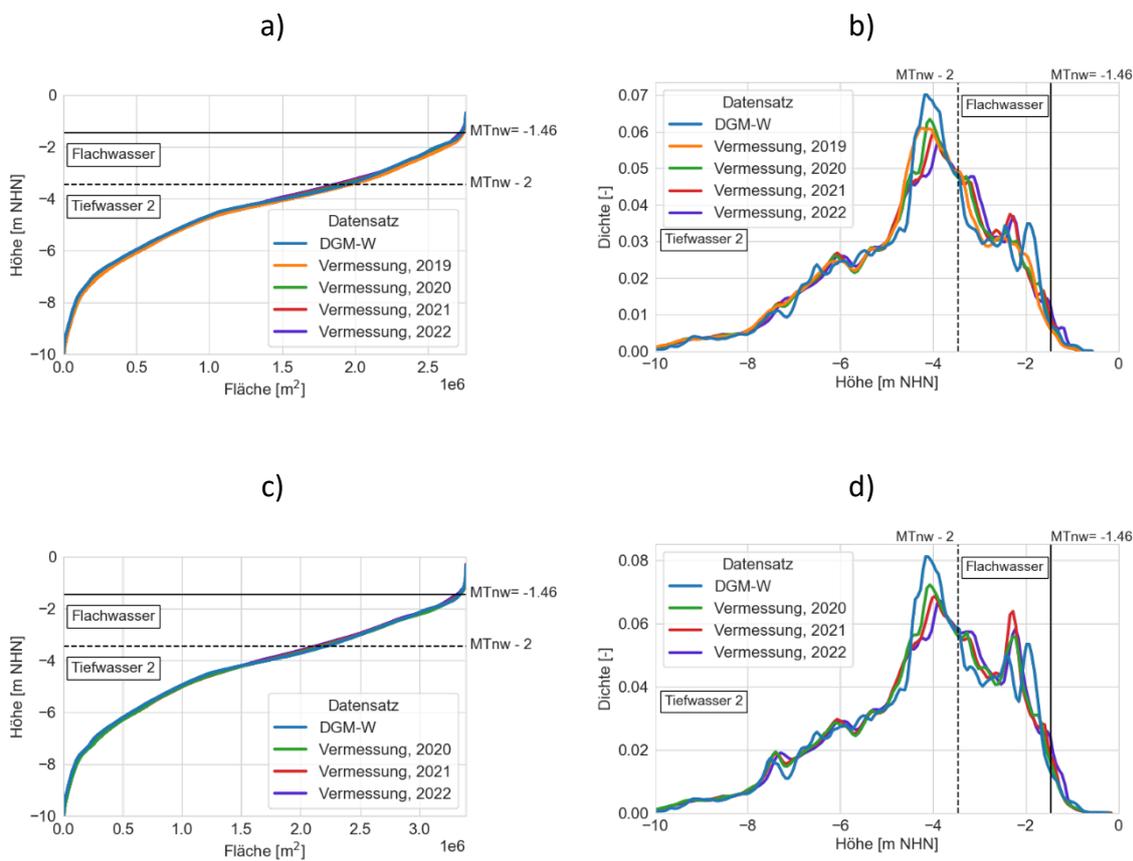


Abbildung 77: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Hahnöfer NE a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie

c) und d) auf den Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Schulau für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet.

Tabelle 11 zeigt die relativen Änderungen für die Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Zeitraum 2016 - 2022. Es fällt auf, dass die Flächen im Bereich Tiefwasser2 zwischen 2016 und 2019 leichtzunehmen (+1,6%, ca. +0,5% pro Jahr), während die Flächen der Flachwasserzone leicht abnehmen (-2,5%, ca. -0,75% pro Jahr). Für die nachfolgenden Zeiträume 2019 – 2020, 2020 – 2021 und 2021 – 2022 zeigt sich hingegen ein entgegengesetzter Trend mit einer leichten Abnahme der Tiefwasser2-Fläche (-2,6% bzw. -1,3% und -1,7%) und einer leichten Zunahme der Flachwasserfläche (+5,9% bzw. +2,8% und 2,5%).

Bei der Interpretation und der Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Auswertung nur für die Flächen erfolgt ist, in denen in allen Datensätzen Werte vorliegen. Die im Vorhaben erzeugten DGM decken vor allem die Zonen Tiefwasser1 und 2 sowie den Übergang vom Tiefwasser2 zum Flachwasser ab. Der obere Bereich des Flachwassers sowie die Watten sind hingegen nur teilweise enthalten. Wird der etwas dünner besetzte Datensatz von 2019 vernachlässigt, vergrößert sich die betrachtete Fläche. Die Tendenz (Tabelle 12) bleibt allerdings sehr ähnlich.

Tabelle 11: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Hahnöfer NE, bestimmt auf Grundlage des Rasters DGM 2019 TUHH

Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2019	1,6%	- 2,5%
2019 – 2020	- 2,6%	5,9%
2020 – 2021	-1,3%	2,8%
2021 – 2022	-1,7%	2,5%

Tabelle 12: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Hahnöfer NE, bestimmt auf Grundlage der Raster DGM 2020, 2021 und 2022 der TUHH.

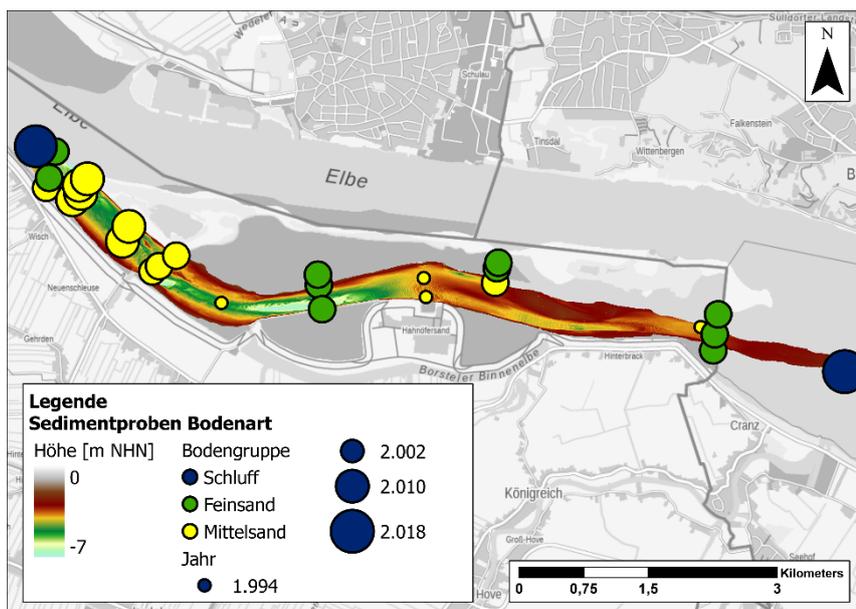
Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2020	- 1,2%	2,8%
2020 – 2021	-1,2%	1,8%

Neben der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Sohlhöhen wird auch die Entwicklung der Sedimentzusammensetzung betrachtet. Hierfür wurden die Proben des Sedimentkasters ausgewertet. In der überwiegenden Anzahl der Proben dominieren entweder der Mittelsand- oder der Feinsandanteil (Abbildung 78b).

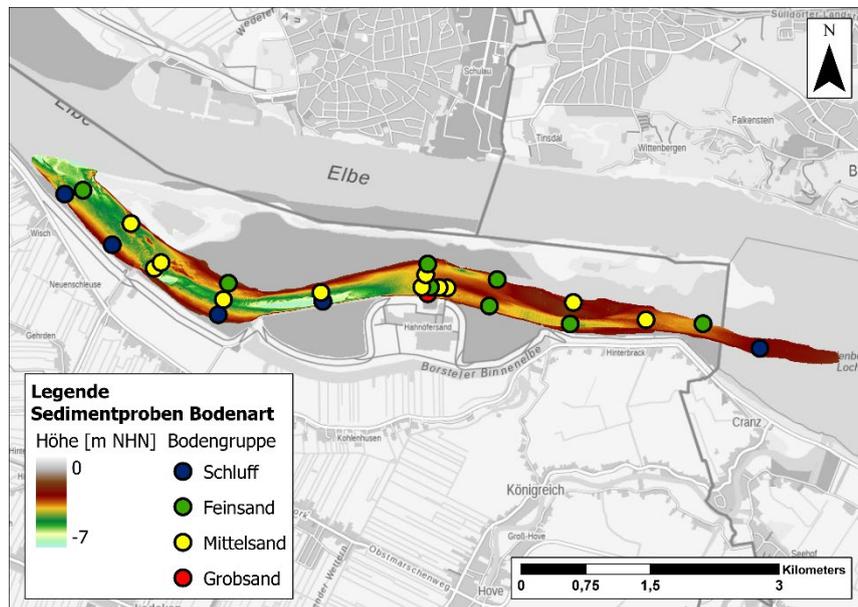
Die räumliche Auswertung der Daten des Sedimentkatasters für die Hahnöfer NE (Abbildung 78a) zeigt, dass in den Bereichen in denen Transportkörper vorzufinden sind (stromabgelegenes Drittel und auf Höhe der Halbinsel Hahnöfersand) die entnommenen Bodenproben einen dominierenden Mittelsandanteil aufweisen. In den übrigen Bereichen weisen die Bodenproben unterschiedliche dominierende Fein- bzw. Mittelsandanteile auf, wobei die Proben mit dominierendem Feinsandanteil meist aus flacheren Bereichen stammen. An den äußersten Enden der Hahnöfer NE wurden in einzelnen Proben auch dominierende schluffige Anteile festgestellt.

Aussagen hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Zusammensetzung der Sohlsedimente sind aufgrund der Datengrundlage bisher nur äußerst begrenzt möglich. Im stromaufgelegenen Drittel wurde in einer älteren Probe ein dominierender Mittelsandanteil bestimmt, während für eine jüngere Probe, die ganz aus der Nähe stammt, ein dominierender Feinsandanteil ermittelt wurde. Die im Jahr 2021 in dem Gebiet entnommenen Proben zeigen das Vorhandensein dieser beiden Bodengruppen.

a)



b)



c)

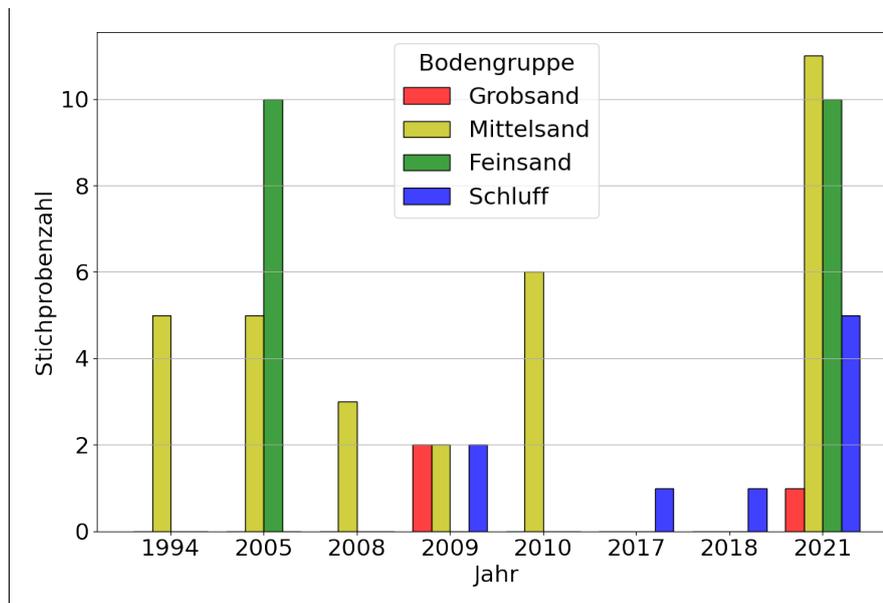


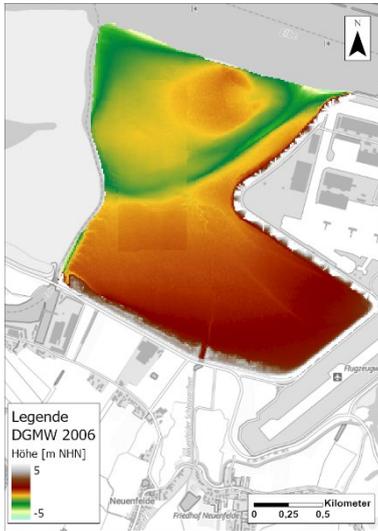
Abbildung 78: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Hahnefelder Nebeneibe (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe); b) Sedimentproben, die im Rahmen des Projekts Nebeneiben im Jahr 2021 entnommen werden und c) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee; Sedimentprobe Projekt Nebeneiben 2021.).

3.3.1.1 Mühlenberger Loch

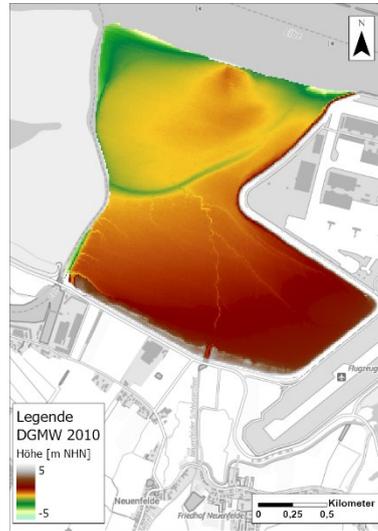
Östlich der Hahnöfer Nebelnelbe und durch die Este-Fahrwasser getrennt, befindet sich das Mühlenberger Loch. Es handelt sich um eine sehr große Wattfläche, die im Laufe der Zeit durch hafenorientierte Baumaßnahmen und die Erweiterung des Airbus-Geländes verändert wurde (Details siehe Kap. 2.2.2). Aufgrund der Nähe und des Zusammenhangs mit der Hahnöfer Nebelnelbe bei Flut wird die aktuelle morphologische Entwicklung dieses Wattbereichs in ähnlicher Weise analysiert wie die der Nebelnelbe, wobei für diesen Bereich ein längerer Zeitraum von 2006 bis 2022 verwendet wird. Abbildung 79 zeigt die Morphologie des Mühlenberger Lochs von 2006 bis 2022 anhand der DGM-W 2006, 2010, 2016 und des ALS DGM-W 2022. Im angegebenen Zeitraum ist ein deutlicher Verlandungstrend zu erkennen, der das Watt in Richtung der Fahrrinne der Elbe ausdehnt. Die Rinne, die als Ausgleichsmaßnahme für die Fahrinnenvertiefung 1999/2000 angelegt wurde, und die Hahnöfer NE mit der Hauptrinne der Elbe verbindet ist in der Darstellung für das Jahr 2006 noch deutlich zu erkennen (Abbildung 79 a). Vier Jahre später ist die Rinne bereits deutlich verlandet (Abbildung 79 b). Im DGM-W 2016 ist die Rinne nicht mehr erkennbar (Abbildung 79 c).

Die beschriebene Entwicklung zeigt sich auch in den Differenzenplots (Abbildung 80). Die roten Farben zeigen die Ablagerungstrends im Gebiet. Zwischen 2006 und 2010 konzentrierte sich das abgelagerte Material auf die gebaute Rinne. Im Zeitraum von 2010 bis 2016 traten Ablagerungen im gesamten Gebiet auf, aber besonders stark im Bereich der Rinne, in der Nähe der Este-Fahrwassers sowie im Bereich der Fahrrinne der Elbe. Zwischen 2016 und 2022 lässt der Ablagerungstrend zwar etwas nach, ist aber immer noch vorherrschend.

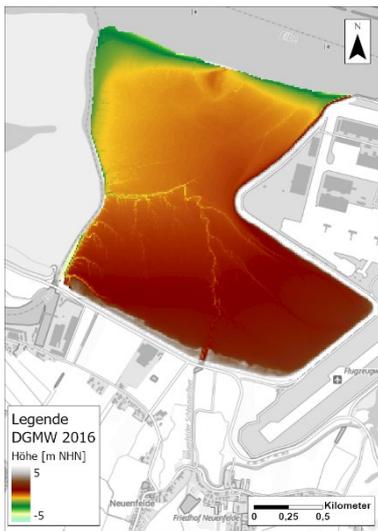
a)



b)



c)



d)

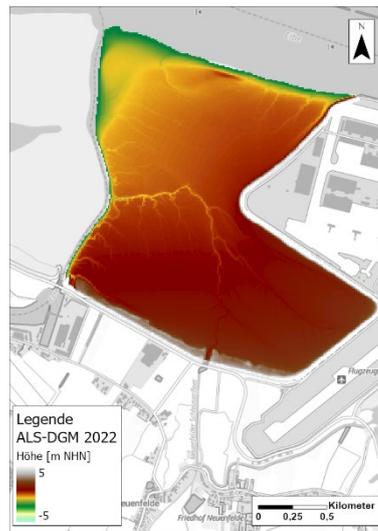


Abbildung 79: DGM-W Mühlener Loch a) 2006, b) 2010, c) 2016 und d) 2022 (ALS DGM-2022)

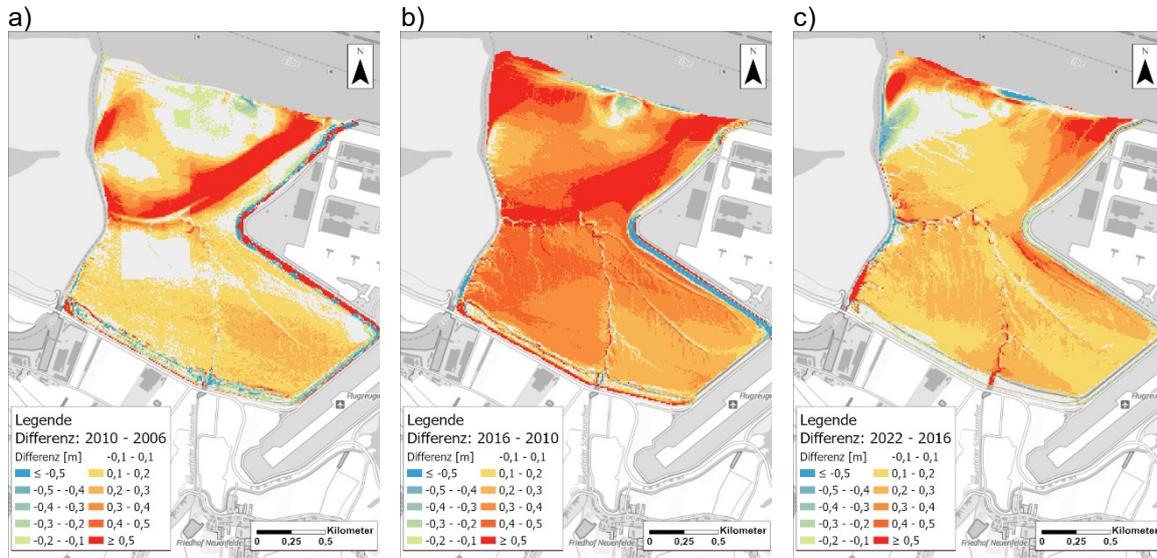


Abbildung 80: Differenzdarstellungen der DGM-W a) 2006 - 2010, b) 2010 - 2016 and c) 2016 - 2022 (ALS DGM-W)

Die beschriebenen Verlandungstrends sind auch in Abbildung 81 ersichtlich. Die deutliche Abnahme der Flächen im Bereich des Flachwassers zwischen 2006 und 2016 resultiert aus der verlandenden Ausgleichsrinne. Insgesamt zeigt sich zwischen 2006 und 2022 ein kontinuierlicher Verlandungstrend, der zwischen 2010 und 2016 am deutlichsten ausgeprägt ist und sich zwischen 2016 und 2022 wieder abschwächt.

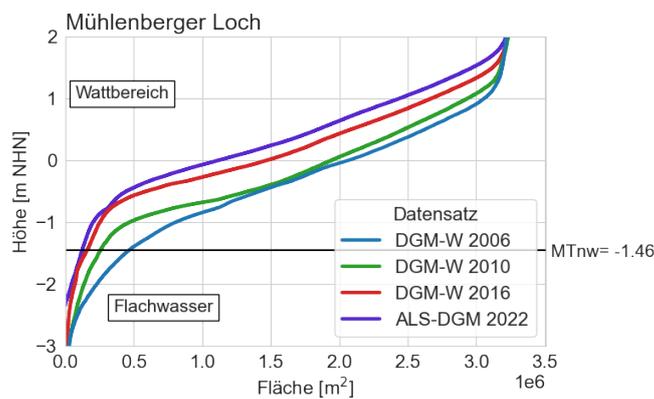


Abbildung 81 Histogramme (kumulative Summenfunktion) der Sohlhöhen der Mühlenberger Loch Raster des DGM-W 2006, 2010, 2016 und ALS DGM-W 2022, das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldata Schulau für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

Die Ergebnisse zeigen, dass das Mühlenberger Loch aktuell eine Senke für Schwebstoffe ist. Obwohl die aktuellen Sedimentationsraten niedriger sind als in früheren Perioden sind, besteht der Trend nach wie vor. Es ist anhand der vorliegenden Daten schwierig zu quantifizieren, wie genau das Gebiet die morphologische Entwicklung der Hahnöfer Nebelnelbe

beeinflusst. Aufgrund der räumlichen Nähe zwischen beiden Gebieten ist es jedoch wahrscheinlich, dass der Sedimentationsraum Mühlenberger Loch die sehr niedrigen Verlandungsraten der benachbarten Nebelbe begünstigt. Ein weiteres Anwachsen der Flächen im Mühlenberger Lochs könnte in Zukunft zu einer erhöhten Sedimentation in der Hahnöfer Nebelbe führen. Das Phänomen der Rückströmung bei Flut, welches aktuell bereits im Steinloch (Pagensander NE, vgl. Kapitel 4.3) auftritt, könnte auch am stromaufseitigen Ende der Hahnöfer NE an Bedeutung gewinnen und so die Sedimentation im Bereich der Hahnöfer NE begünstigen. Aktuell ist die Nebelbe jedoch in einem vergleichsweise stabilen Zustand.

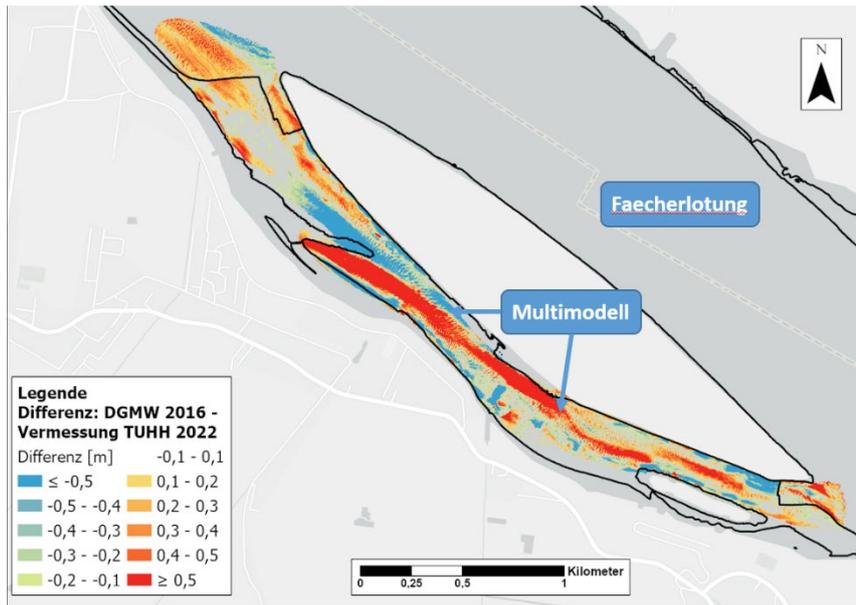
3.3.2 Lühesander Süderelbe

Die für die Lühesander Süderelbe berechneten räumlichen Differenzen für den Zeitraum 2016 bis 2022 sind in Abbildung 82 dargestellt. Die obere Darstellung a) zeigt die Differenz aus dem im Vorhaben erzeugten DGM 2022 und dem DGM-W 2016. Deutlich zu erkennen sind ausgeprägte Erosions- sowie Depositionsmuster mit eindeutigen Tendenzen in der Sohlentwicklung (Änderungen bis $\pm 0,5$ m). Zwischen dem stromaufgelegenen Ende und dem zentralen Bereich der Lühesander Süderelbe erstreckt sich ein langgezogener Depositionsbereich, an den sich seitlich (Ufer Lühesand und Ufer Pionierinsel) zum Teil Erosionsbereiche anschließen. Im stromabgelegenen Drittel ist tendenziell eine leichte Verlandungstendenz zu erkennen.

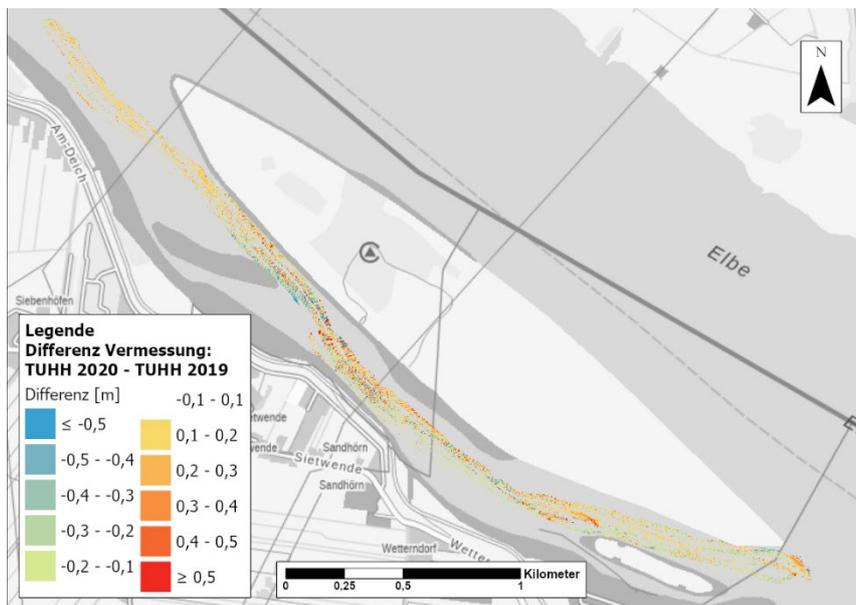
Bei der Interpretation und Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Höhen im DGM-W 2016 im Bereich der Lühesander Süderelbe fast vollständig aus dem Multimodell (keine Fächerlotdaten) stammen. Nur die Anschlussbereiche an die Hauptrinne wurden im DGM-W per Fächerlotung erfasst. Der Übergang zwischen Multimodell und Fächerlotung zeichnet sich insbesondere am stromaufseitigen Ende in der Differenzendarstellung (Abbildung 82 a) deutlich ab. Ein geschlossener blauer Bereich (Multimodell) geht abrupt über in einen gelblichen Bereich (Fächerlotung), was auf Differenzen infolge des Messverfahrens hindeutet. Die Bathymetrie in diesem Bereich weist lokal Tiefen größer als 7 m mit steilen Gradienten auf und wird vom Multimodell vermutlich nicht ausreichend genau approximiert.

Exakte morphologische Änderungen können nur anhand des Vergleiches von DGMs mit gleicher Grundlage (Messverfahren, Aufbereitung) bestimmt werden. Aus diesem Grund werden auch die reinen Fächerlotdatensätze der Jahre 2019, 2020, 2021 und 2022 einander gegenübergestellt (Abbildung 82 b, c und d) Die Differenzendarstellungen zeigen zumindest im zentralen Drittel der Lühesander Süderelbe vom Trend her ein ähnliches Muster wie Abbildung 82 a, auch der Verlandungstrend ist hier erkennbar, wenngleich in abgeschwächter Ausprägung. Die zuvor beschriebenen Muster im stromauf- und stromabgelegenen Drittel sind in den Differenzendarstellungen (2020 - 2019, 2021 - 2020 und 2022 - 2021) ebenfalls ersichtlich. Insgesamt sind in weiten Teilen der Lühesander Süderelbe Transportkörper vorzufinden, was an den kleinräumigen regelmäßig wechselnden Tendenzen der Sohlentwicklung zu erkennen ist.

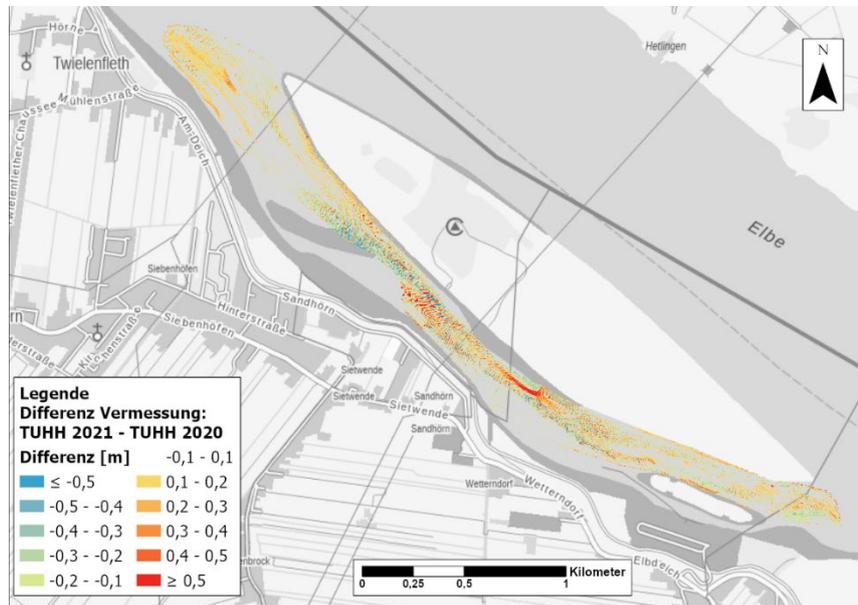
a)



b)



c)



d)

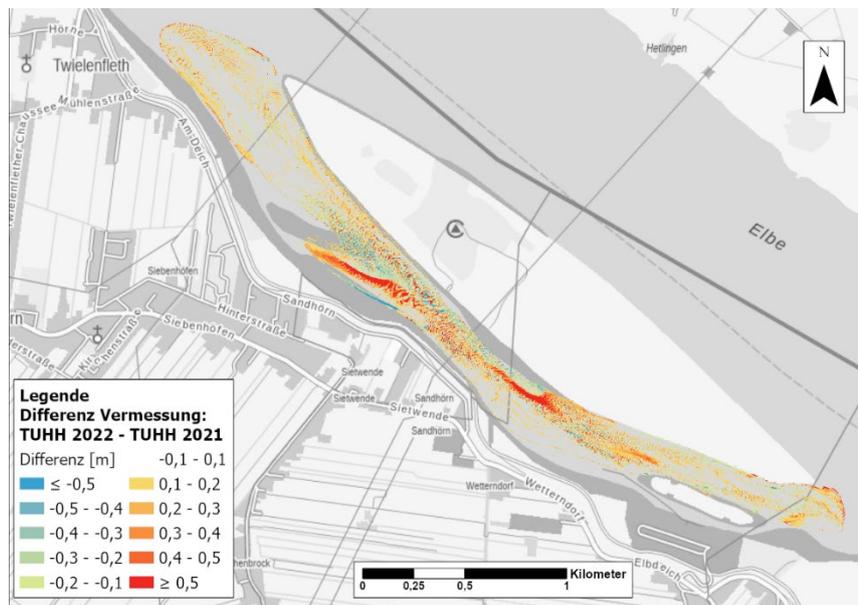
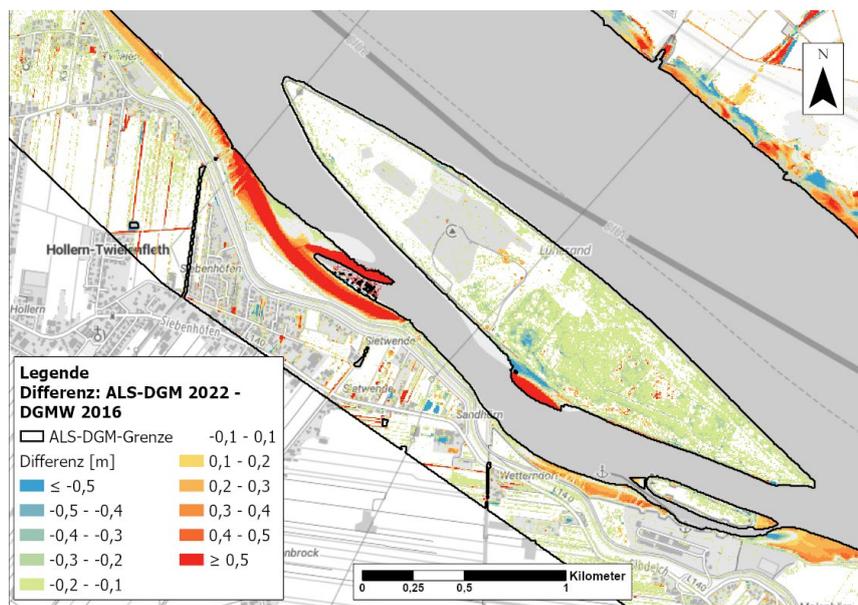


Abbildung 82 Differenzen zwischen a) dem DGM-W 2016 und dem DGM 2020 der TUHH, b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH, c) dem DGM 2020 und dem DGM 2021 und d) dem DGM 2021 und dem DGM 2022 der TUHH im Bereich der Lühesander Süderelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGM-W 2016 an).

Abbildung 83 zeigt den Vergleich zwischen den Befliegungsdaten ALS-DGM-2022, dem DGM-W2016 und den Messungen der TUHH. Für diese Analyse wird die Messung der Lühesander Süderelbe aus dem Jahr 2020 verwendet, anstatt die Messung der anderen Nebelbebe, da diese die größte Fläche aufweist und somit zuverlässigere Ergebnisse liefert. In beiden Vergleichen zeigt sich im mittleren Teil der Nebelbebe nahe der Inselseite ein Verlandungsbereich. Obwohl dünne Verlandungstreifen (rot) an der Inseluferseite zu erkennen sind, müssen sie mit Vorsicht betrachtet werden, da die Insel durch Buhnen geschützt ist. In Buhnenbereichen ist die Standardabweichung von DGMs (und damit die Unsicherheit) in der Regel größer. Sollten im Bereich der Inselufer tatsächlich Änderungen aufgetreten sein, so sind diese eher auf technische Eingriffe als auf eine morphologische Entwicklung der Nebelbebe zurückzuführen.

An der Landseite der Lühesander Süderelbe sind große Verlandungsbereiche zu erkennen, die in der nordwestlichen Hälfte besonders ausgeprägt sind. Diese Verlandungsbereiche sind in den Messungen der TUHH nicht enthalten, da sie aufgrund der sehr geringen Wassertiefen nicht erfasst wurden.

a)



b)

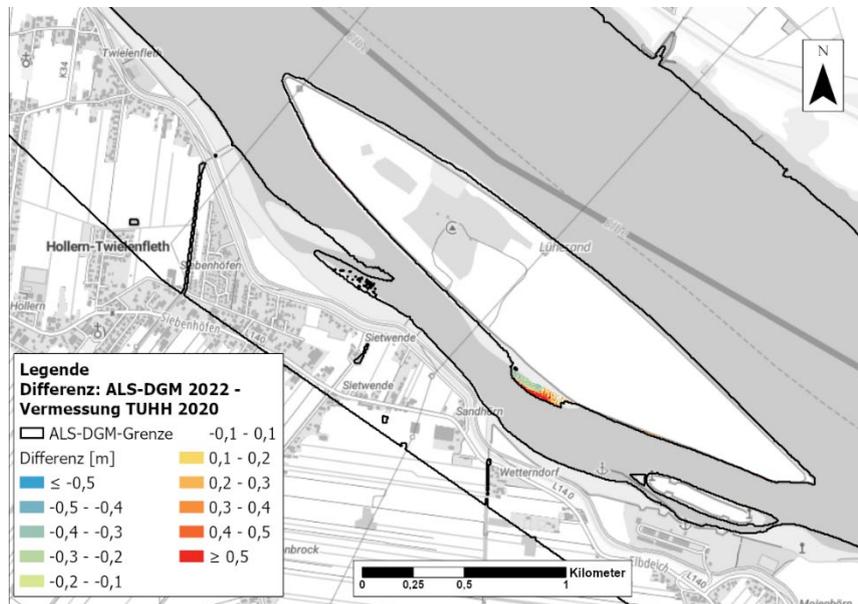


Abbildung 83 Differenz zwischen der Befliegung des DGM-W2022 und a) DGM-W2016 und b) DGM2020 der TUHH im Bereich der Lühesander Süderelbe

Neben der räumlich differenzierten Betrachtung erfolgt auch eine integrale Betrachtung auf Grundlage des gesamten vermessenen Bereiches. In Abbildung 84 sind die Sohlhöhen der Jahrestopographien als Histogramme aufgetragen. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen 4 Geländemodellen Werte vorliegen. Die Darstellung c) (Summenkurve) und d) (Dichtefunktion) basieren auf den Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 der TUHH. Der Vergleich der jahresweisen Summenkurven untereinander (Darstellungen a) und c)) zeigt geringe Abweichungen, was auf ein konstantes Gesamtvolumen hindeutet.

Der Vergleich der Dichtefunktionen zeigt sowohl auf dem weniger dichten Raster des DGM 2019 (Abbildung 84 b) als auch auf den dichteren Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 einen sehr ähnlichen Verlauf. Allerdings ist der Anteil der Flachwasserbereiche im Raster für 2019 deutlich geringer, was bei der Betrachtung der relativen Änderungen (Tabelle 13) deutlich wird. Auf dem Raster des DGM 2019 wird für den Zeitraum 2016-2020 eine Abnahme des Flachwassers um 34,5 %, für den Zeitraum 2020-2021 eine Abnahme um 5 % und für den Zeitraum 2021-2022 eine Zunahme um 32% berechnet, während auf den dichteren Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 (Tabelle 13) eine Abnahme von nur 7,4 % für den Zeitraum 2016-2020, eine Zunahme um 0,7 % für den Zeitraum 2020-2021 und eine Zunahme um 4,7 % für den Zeitraum 2020-2021 berechnet wurde. Diese großen Unterschiede sind begründet durch die von den Vermessungsdaten abgedeckte Fläche, die im DGM 2020 und 2021 deutlich größer ist als im DGM 2019. Aus diesem Grunde basieren

die folgenden Aussagen hinsichtlich der Lühesander Süderelbe auf den Auswertungen für das Raster der DGM 2020, 2021 und 2022.

Die Flächen im Bereich des Tiefwasser2 nehmen zwischen 2016 und 2020 geringfügig (+1,3 % insgesamt, ca. +0,3 % pro Jahr) zu. Dieser Trend setzt sich auch zwischen 2020 und 2021 fort (+0,2 % pro Jahr), dreht sich aber zwischen 2021 und 2022 um (-1,1 % pro Jahr). Die Flächen im Bereich des Flachwassers nehmen zwischen 2016 und 2020 ab (-7,4 % insgesamt, ca. -1,85 % pro Jahr). Für die anschließenden Zeiträume 2020 - 2021 und 2021 - 2022 zeigt sich mit +0,7 % bzw. +4,7 % ein entgegengesetzter Trend.

Auch hier ist bei der Interpretation und der Bewertung zu berücksichtigen, dass die im Vorhaben erzeugten DGM vor allem die Zonen Tiefwasser1 und 2 sowie den Übergang vom Tiefwasser2 zum Flachwasser abdecken. Der obere Bereich des Flachwassers sowie die Watten sind hingegen nur teilweise enthalten.

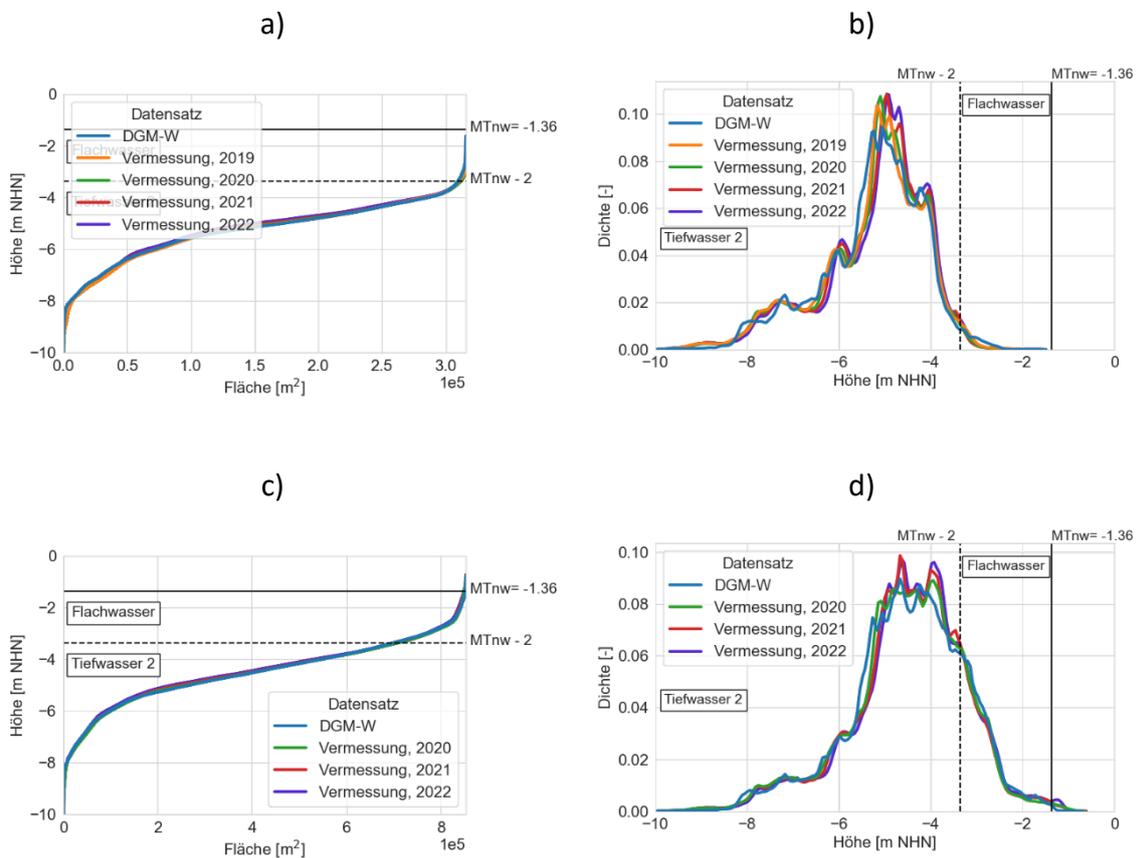


Abbildung 84: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Lühesander Süderelbe a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie c) und d) auf den Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldata Hetlingen für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

Tabelle 13: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Bereich der Lühesander Süderelbe, bestimmt auf Grundlage des Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020 und 2021)

Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2019	0,3 %	-15 %
2016 – 2020	0,7 %	-34,5 %
2019 – 2020	0,4 %	-24,6 %
2020 – 2021	0,1 %	-5 %
2021 – 2022	-0,4 %	32 %

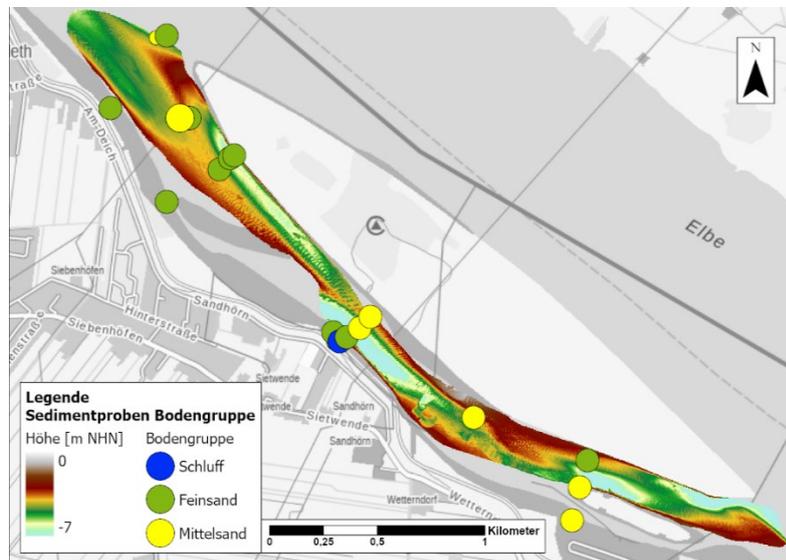
Tabelle 14: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Bereich der Lühesander Süderelbe, bestimmt auf Grundlage der Raster des DGM 2020 und 2021 TUHH

Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2020	1,3 %	-7,4 %
2020 – 2021	0,2 %	0,7 %
2021 – 2022	-1,1 %	4,7 %

Neben der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Sohlhöhen wurde auch die Entwicklung der Sedimentzusammensetzung betrachtet. Hierfür wurden die Proben des Sedimentkatasters ausgewertet. Die dominierenden Sohlensedimente der Lühesander Nebenelbe sind Fein- und Mittelsand (Abbildung 85a). Im stromabgelegenen Drittel der Nebenelbe, der durch flachere Sohlgradienten und wenig Sohlformen gekennzeichnet ist, zeigt sich mit Ausnahme einer Probe ein dominierender Feinsandanteil. Im zentralen und stromauf gelegenen Drittel, die durch steilere Sohlgradienten und Sohlformen geprägt sind, dominieren Mittelsandanteile.

Die geringe Anzahl von Proben aus den Jahren 2006 bzw. 2011 und später lässt keine Schlüsse auf eine veränderte Zusammensetzung der Sohlsedimente zu. Um weitere Aussagen zur Verteilung und Entwicklung der Sedimente in der Lühesander Süderelbe treffen zu können, sind weitere Sedimentbeprobungen erforderlich.

a)



b)

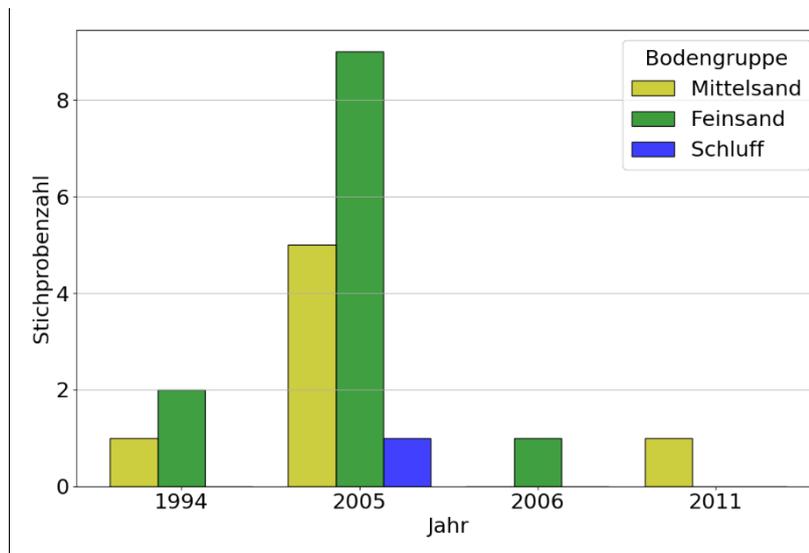
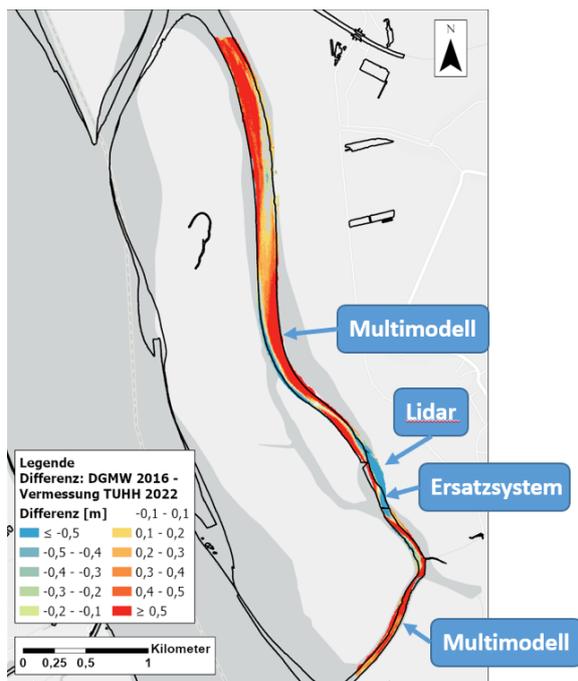


Abbildung 85: a) Räumliche Verteilung der Sohl-sedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Lühesander Süderelbe (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe) und b) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee)

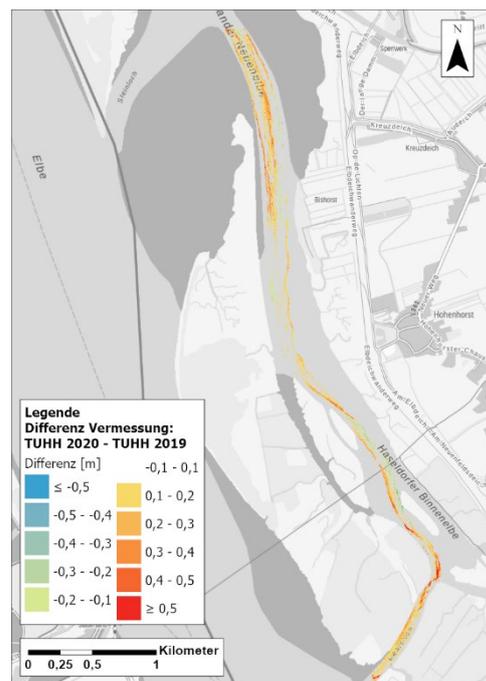
3.3.3 Haseldorfer Binnenelbe

Die für die Haseldorfer Binnenelbe berechneten räumlichen Differenzen sind in Abbildung 86 dargestellt. Die Darstellung a) zeigt die Differenz aus dem im Vorhaben erzeugten DGM 2022 und dem DGM-W 2016. Sowohl für den Zeitraum 2016 - 2022 als auch die Zeiträume 2019 – 2020, 2020 – 2021 und 2021 – 2022 dominieren in der gesamten Haseldorfer Binnenelbe Bereiche mit Verlandungstendenz (rote Farben). Größere zusammenhängende Verlandungsbereiche befinden sich im Übergangsbereich zur Pagensander NE, mittig des Bishorster Sandes sowie im Dwarsloch, der stromaufseitigen Verbindung zur Elbe. In der Gesamtschau ähneln sich die Muster der Tendenzen für die Zeiträume 2016 – 2021, 2019 – 2020, 2020 – 2021 und 2021 – 2022, wobei sich die Größenordnungen aufgrund des unterschiedlichen zeitlichen Abstands unterscheiden. In der südlichen Hälfte fällt in Abbildung 86 a) ein größerer Erosionsbereich auf, der sich in abgeschwächter Form auch in den Differenzendarstellungen 2019 – 2020, 2020 – 2021 und 2021 – 2022 abzeichnet.

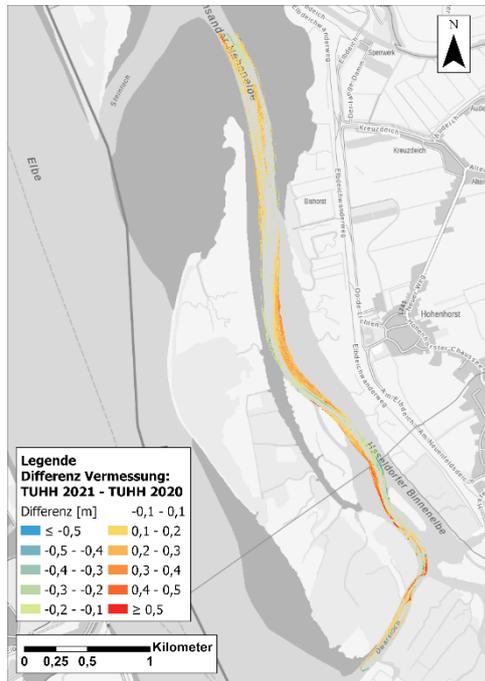
a)



b)



c)



d)

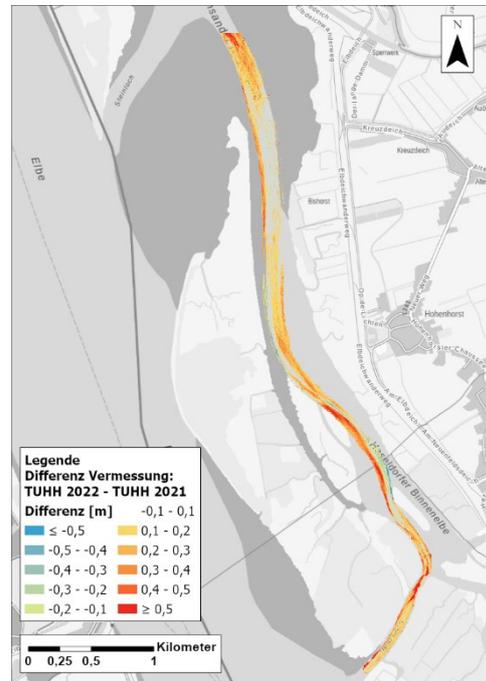
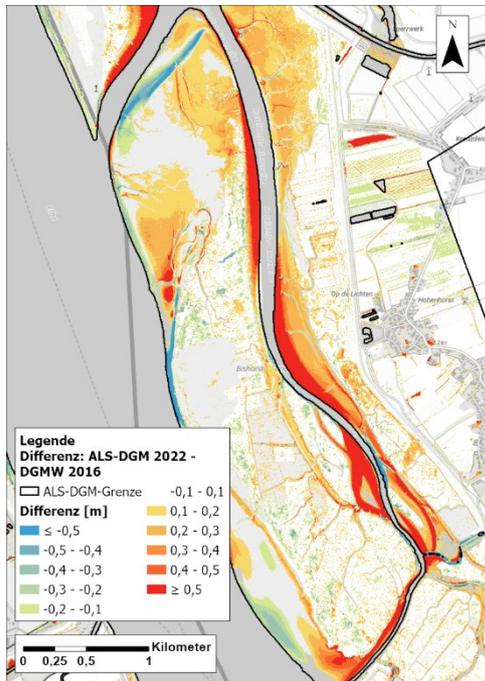


Abbildung 86: Differenzen zwischen a) dem DGM-W 2016 und dem DGM 2020 der TUHH, b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH, c) dem DGM 2020 und dem DGM 2021 der TUHH und d) dem DGM 2021 und dem DGM 2022 der TUHH im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGM-W 2016 an)

Abbildung 87 zeigt den Vergleich zwischen den Befliegungsdaten ALS-DGM-2022, dem DGM-W2016 und den Messungen der TUHH. Beide Vergleiche verdeutlichen den Trend zur Verlandung entlang der gesamten Haseldorfer Binnenelbe, von der Verbindung mit dem Elbe-Hauptstrom im Süden bis zur Verbindung mit der Pagensander Nebeneibe im Norden. Zudem offenbart der Vergleich mit der DGM-W 2016, dass der Verlandungstrend großflächig vorherrscht und auch einen Großteil der Wattflächen betrifft.

a)



b)

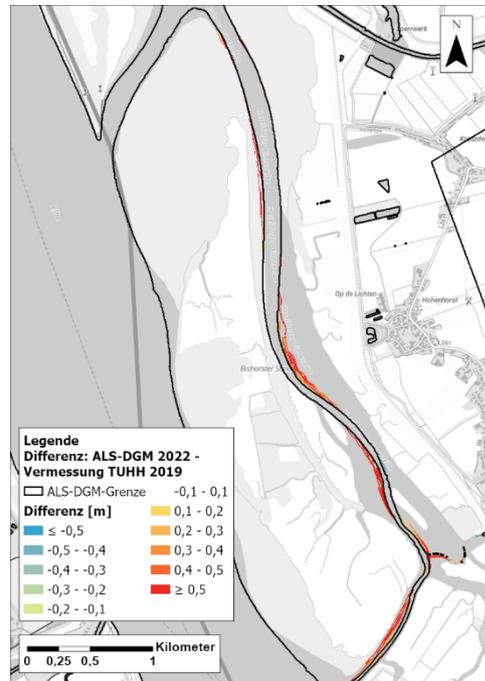


Abbildung 87: Differenz zwischen der Befliegung des DGM-W2022 und a) DGM-W2016 und b) DGM2019 der TUHH im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe

Neben der räumlich differenzierten Betrachtung erfolgt auch eine integrale Betrachtung auf Grundlage des gesamten vermessenen Bereiches. In Abbildung 88 sind die Tiefenwerte der Jahrestopographien als Histogramme aufgetragen. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen 4 Geländemodellen Werte vorliegen. Die Darstellung c) (Summenkurve) und d) (Dichtefunktion) basieren auf den Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 der TUHH. Der Vergleich der jahresweisen Summenkurven untereinander zeigt eine Volumenabnahme zwischen 2016 und 2019, die sich auch in den beiden Folgejahren fortsetzt. Der Großteil der vermessenen Flächen ist der Kategorie Flachwasser zuzuordnen, nur ein kleiner Anteil gehört zur Kategorie Tiefwasser. Bei den Dichtefunktionen ist über den betrachteten Zeitraum eine Verschiebung nach rechts zu erkennen, d.h. die betrachteten Flächen werden in der Tendenz flacher, was den visuellen Eindruck aus Abbildung 86 bestätigt. Konkret nehmen die Rasterzellen mit Werten zwischen NHN - 5 m und NHN - 3,5 m über die Zeit ab und die Rasterzellen mit Werten zwischen NHN - 3,5 m und NHN - 3 m sowie zwischen NHN - 2 m und NHN + 0 m zu. Zudem flacht der Peak, der in den Daten für das DGM-W 2016 bei NHN - 2,5 m zu erkennen ist, in den Folgejahren deutlich ab.

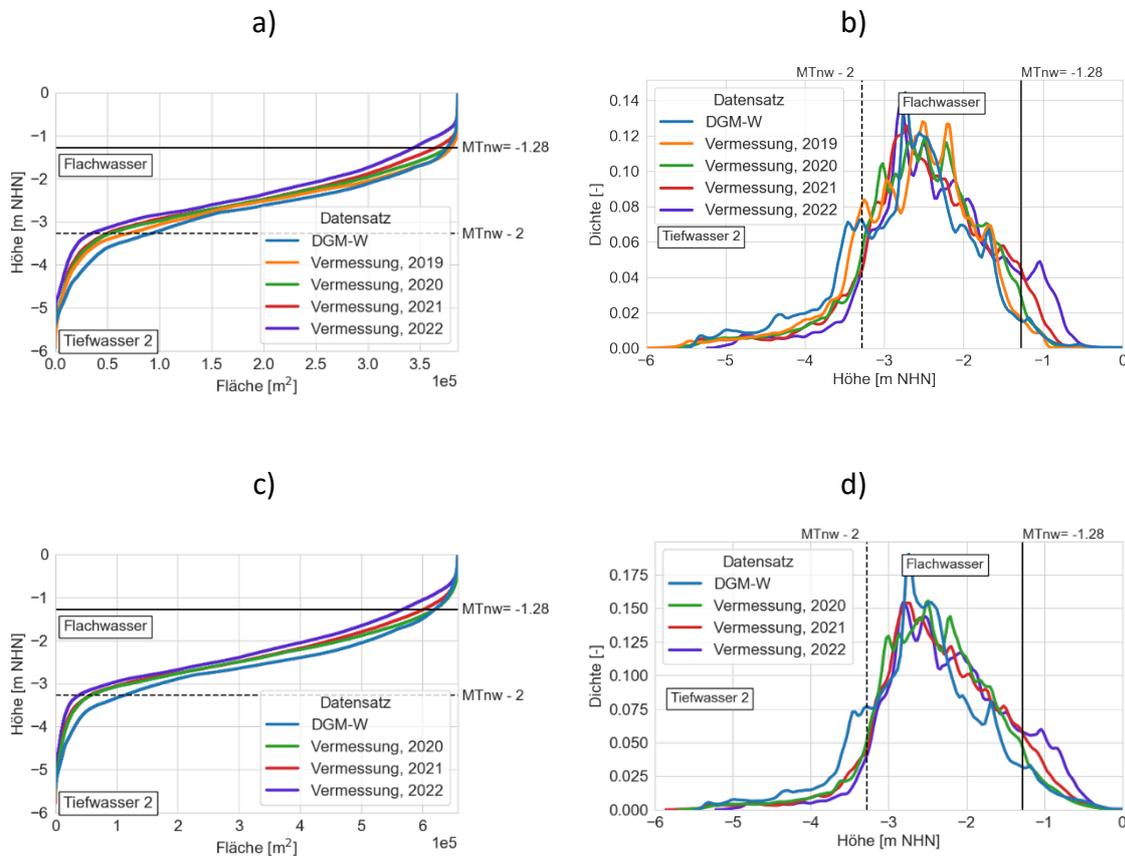


Abbildung 88: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Haseldorfer Binnenelebe a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie c) und d) auf den Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldata Kollmar für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

Tabelle 15 zeigt die relativen Änderungen für die Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Zeitraum 2016 - 2022. Es fällt auf, dass die Tiefwasserbereiche deutlich abnehmen, wobei die hohen prozentualen Werte auf den vergleichsweise kleinen absoluten Flächenanteil von etwa 10 ha zurückzuführen sind. Für die Flachwasserbereiche zeigt sich im betrachteten Zeitraum kein eindeutiger Trend. Auf Zunahmen in den Zeiträumen 2016 - 2019 (+8 %) und 2019 - 2020 (+3 %) folgt eine Abnahme in den Zeiträumen 2020 - 2021 (-3,5 %) und 2021 - 2022 (-2,1 %). Die Tendenzen und Größenordnungen bleiben auch erhalten, wenn das weniger dichte Raster des DGM bei der Auswertung weggelassen wird (Tabelle 16), was die Robustheit verdeutlicht.

Tabelle 15: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, bestimmt auf Grundlage des Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020 und 2021)

Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2019	- 24,5 %	8 %
2019 – 2020	- 24,7 %	3 %
2020 – 2021	- 5,1 %	- 3,5 %
2021 – 2022	- 29,9 %	-2,1 %

Tabelle 16: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, bestimmt auf Grundlage des Rasters des DGM 2020 und 2021 TUHH

Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2020	- 48,5 %	7,1 %
2020 – 2021	- 2,3 %	- 3,7 %
2021 – 2022	- 32,6 %	- 2,9 %

Die Wattflächen des Bishorster Sandes konnten trotz des geringen Tiefgangs des eingesetzten Vermessungsbootes nicht durch die Fächerpeilungen erfasst werden. Durch die in Kapitel 3.1.2.2 beschriebenen topographischen Lasermessungen mit einer Drohne ist jedoch eine Analyse der aktuellen Entwicklung für einen Ausschnitt dieses Gebietes im Zeitraum 2016 - 2021 möglich. Die Differenzen aus dem DGM 2021 (aus der Laservermessung) und dem DGM-W 2016 sind in Abbildung 89b dargestellt. Im betrachteten Gebiet überwiegen eindeutig Verlandungstendenzen mit einer durchschnittlichen Höhenzunahme von 0,32 m im gesamten Zeitraum 2016 - 2021 bzw. 0,064 m pro Jahr. Darüber hinaus ist anhand der Darstellung der 0-m-Isolinien für die beiden Jahre (Abbildung 89c) eine leichte Verlagerung des Wattgebietes nach Osten, d.h. in Richtung der Haseldorfer BE erkennbar.

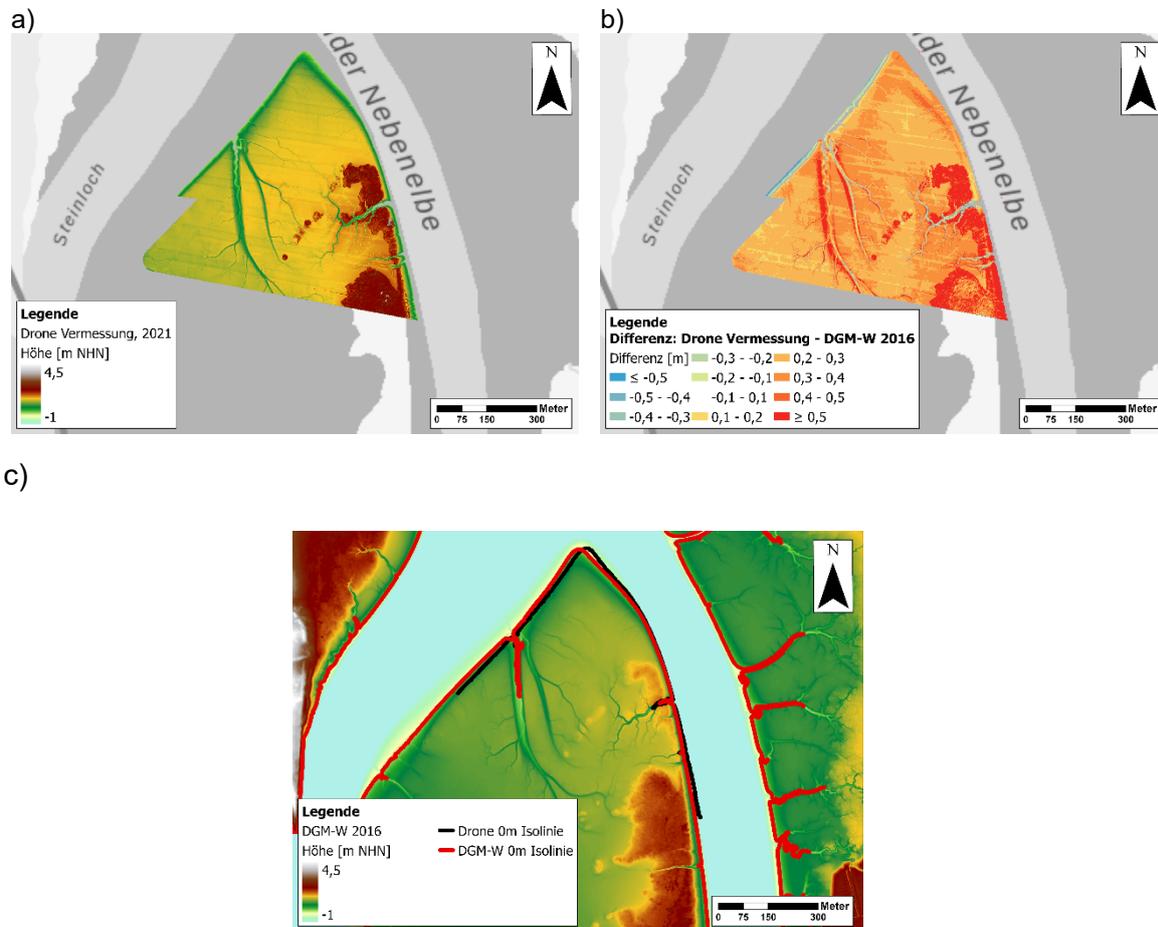
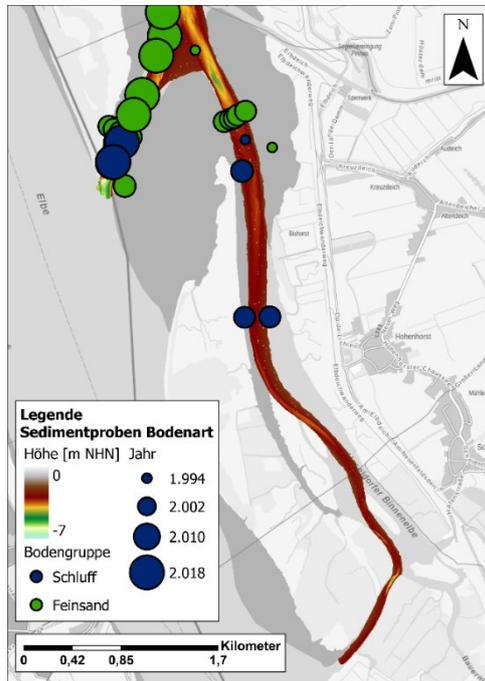


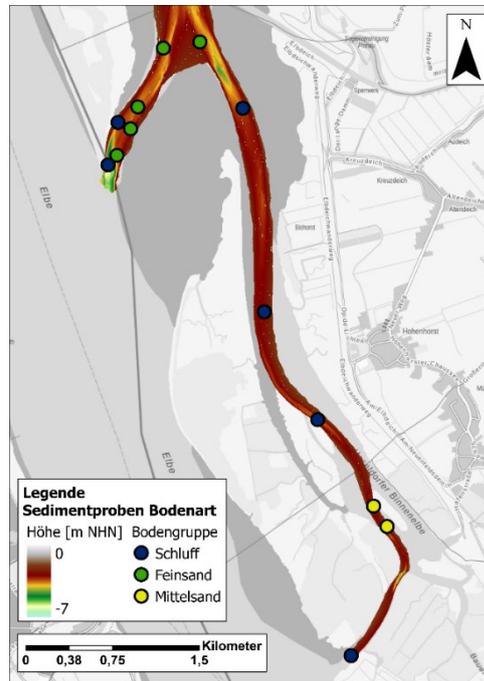
Abbildung 89: Aktuelle Entwicklung des Bishorster Sandes mit a) seiner aktuellen Morphologie, gemessen im Jahr 2021, b) der Differenz zwischen dem aktuellen Zustand im Jahr 2021 und dem DGM-W 2016 und c) der Differenz im Verlauf der 0-Meter-Isolinie der beiden Datensätze

Für die Haseldorfer BE liegen im Sedimentkataster nur sehr wenige Proben vor (Abbildung 90a). Von den insgesamt 10 Proben stammen 7 aus dem Jahr 2005, zwei aus 1994 und eine aus 2006. In allen Proben aus einem Querschnitt im Übergangsbereich zur Pagensander NE dominieren Feinsandanteile (Abbildung 90b). Weitere Proben aus den Böschungsbereichen weisen einen dominierenden Schluffanteil auf. Die im Jahr 2021 im Rahmen des Projekts entnommenen Proben aus der Nordhälfte zeigen ähnliche Bodengruppen wie das Sedimentkataster. Im Bereich der südlichen Hälfte wurden zuvor keine Beprobungen durchgeführt. Im Inneren der Haseldorfer BE sowie im Dwarssloch zeigen die Proben aus dem Jahr 2021 einen dominierenden Schluffanteil. In einem Abschnitt in dem auch ein kleines Dünenfeld identifiziert wurde dominiert in den Proben der Mittelsandanteil.

a)



b)



c)

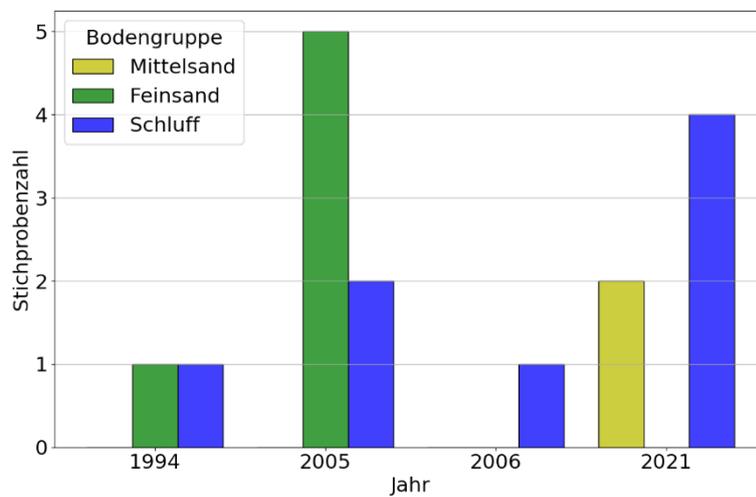
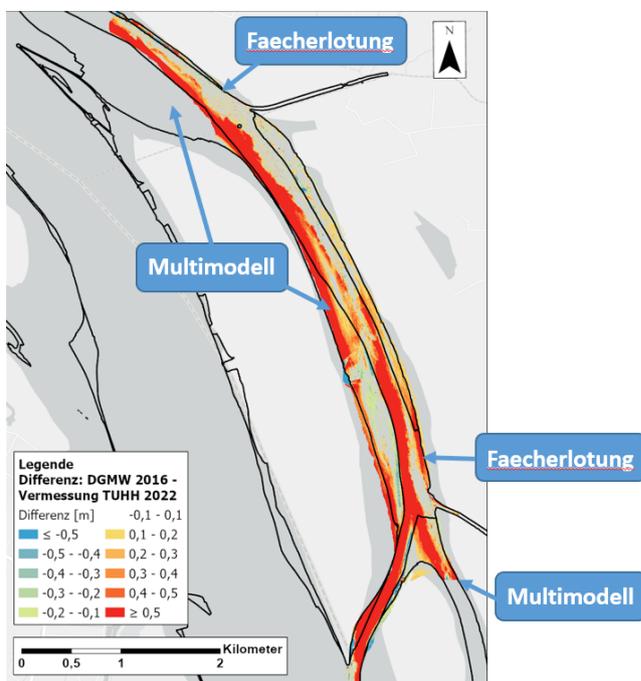


Abbildung 90: a) Räumliche Verteilung der Sohl-sedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Pagensander Nebeneibe (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe); b) Sedimentproben, die im Rahmen des Projekts Nebeneiben im Jahr 2021 entnommen werden und c) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee)

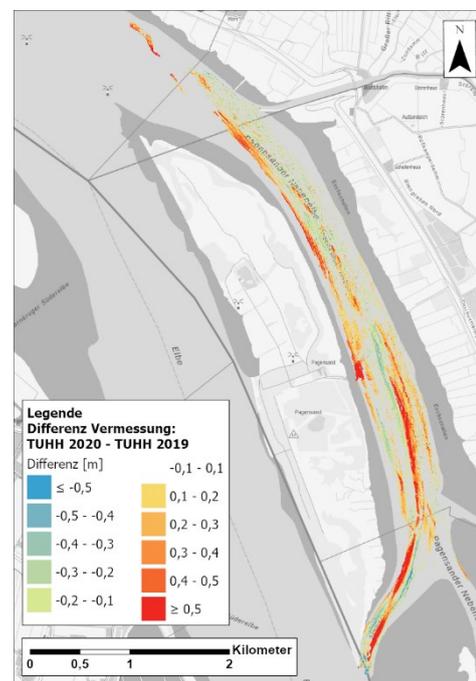
3.3.4 Pagensander Nebelbe

Die morphologische Entwicklung der Pagensander Nebelbe im Zeitraum 2016 bis 2022 zeigt Abbildung 91. Die obere Darstellung a) zeigt die Differenz aus dem im Vorhaben erzeugten DGM 2022 und dem DGM-W 2016. Insgesamt dominieren Bereiche mit Verlandungstendenz (rote Farben). Größere zusammenhängende Bereiche mit Verlandungstendenz erstrecken sich entlang des Ufers der Insel Pagensand (nördliche Hälfte), im Steinloch (Verbindung zur Elbe im Süden) und dessen Verlängerung sowie im Übergangsbereich zur Haseldorfer Binnenelbe. Erosionsbereiche sind nur vereinzelt und lokal begrenzt zu erkennen. Die beschriebenen Trends sind auch in den Darstellungen für die Zeiträume 2019 - 2020 sowie 2020 - 2021 und 2021 - 2022 (Abbildung 91 b, c und d) zu erkennen, allerdings aufgrund des kürzeren zeitlichen Abstands in entsprechend geringerer Ausprägung. Neben dem Zentrum der Insel Pagensand ist für den Zeitraum 2021 - 2022 eine Abnahme der Sohlhöhen (blaue Farbe) mit einer Differenz von mehr als 0,5 m zu erkennen. Diese Veränderungen sind auf Baggerarbeiten zurückzuführen, die im Rahmen der Unterhaltung des Anlegers Pagensand durchgeführt wurden.

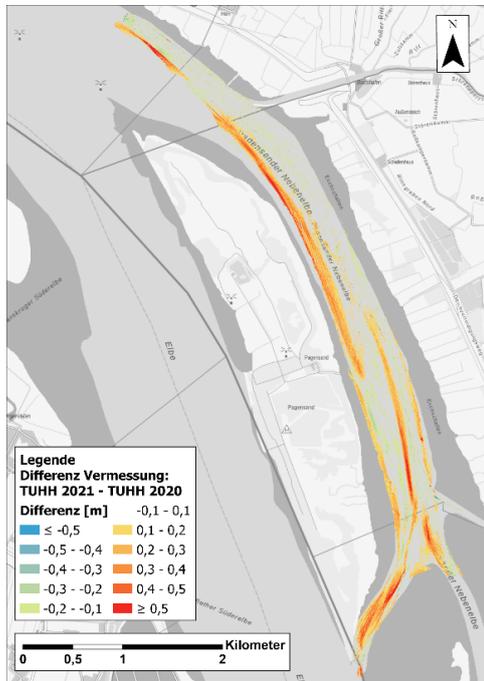
a)



b)



c)



d)

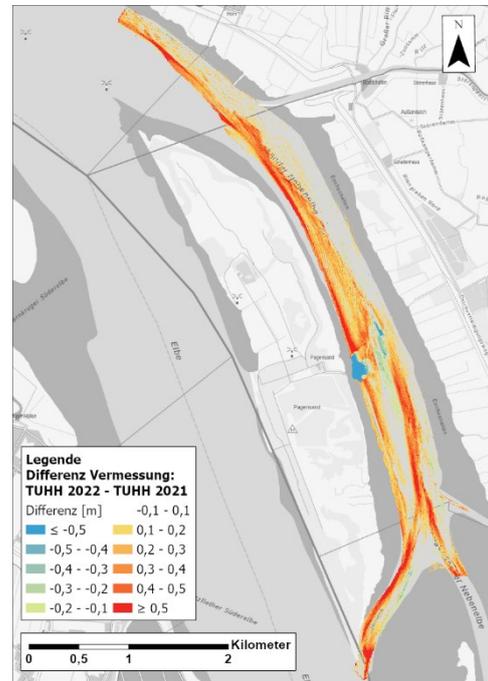
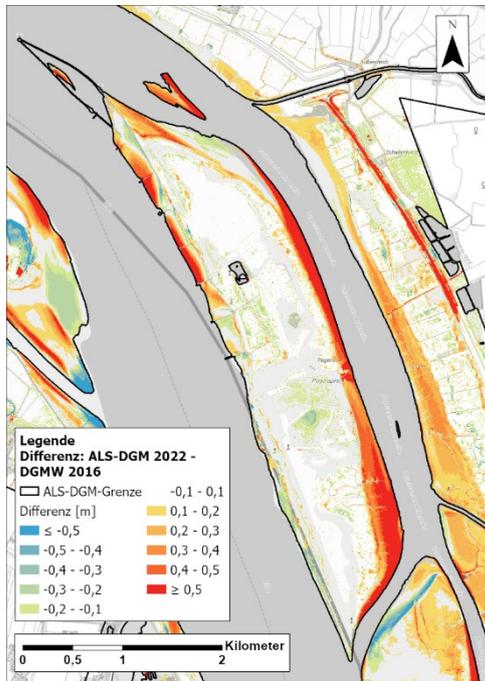


Abbildung 91: Differenzen zwischen a) dem DGM-W 2016 und dem DGM 2020 der TUHH, b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH und c) dem DGM 2020 und dem DGM 2021 der TUHH im Bereich der Pagensander NE (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGM-W 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an

Abbildung 92 zeigt den Vergleich zwischen den Befliegungsdaten ALS-DGM-2022, dem DGM-W2016 und den Messungen der TUHH. Beide Vergleiche zeigen deutliche Verlaufsmuster in den Wattbereichen. Die Entwicklungen im Bereich des Bishorster Sandes, die in Abbildung 92a dargestellt sind, ähneln den Ergebnissen der 2021 durchgeführten Drohnenbefliegung (Abbildung 89).

a)



b)

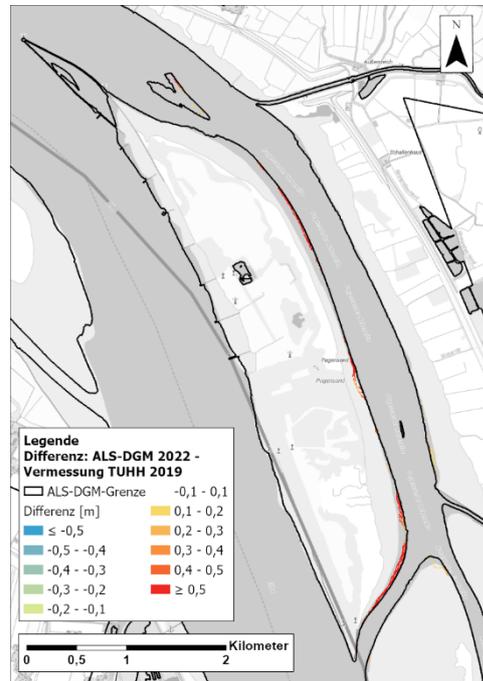


Abbildung 92: Differenz zwischen der Befliegung des DGM-W2022 und a) DGM-W2016 und b) DGM2019 der TUHH im Bereich der Pagensander Nebelbe

Neben der räumlich differenzierten Betrachtung erfolgt auch eine integrale Betrachtung auf Grundlage des gesamten vermessenen Bereiches. In Abbildung 93 sind die Tiefenwerte der Jahrestopographien als Histogramme aufgetragen. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen 4 Geländemodellen Werte vorliegen, d.h. dem Raster des DGM 2019. Die Darstellung c) (Summenkurve) und d) (Dichtefunktion) basieren auf den Rastern des DGM 2020, 2021 und 2022 der TUHH. Der Vergleich der jahresweisen Summenkurven untereinander zeigt eine deutliche Volumenabnahme zwischen 2016 und 2019, die sich auch in den beiden Folgejahren fortsetzt. Anhand der Dichtefunktionen ist zu erkennen, dass sich der Anteil von Rasterzellen mit Werten zwischen NHN - 7 m und NHN - 3 m verringert und zwar zugunsten der Rasterzellen mit Werten zwischen NHN - 3 m und NHN + 0 m. Das bedeutet eine Zunahme der Flachwasserzonen und eine Abnahme der Fläche im Bereich Tiefwasser².

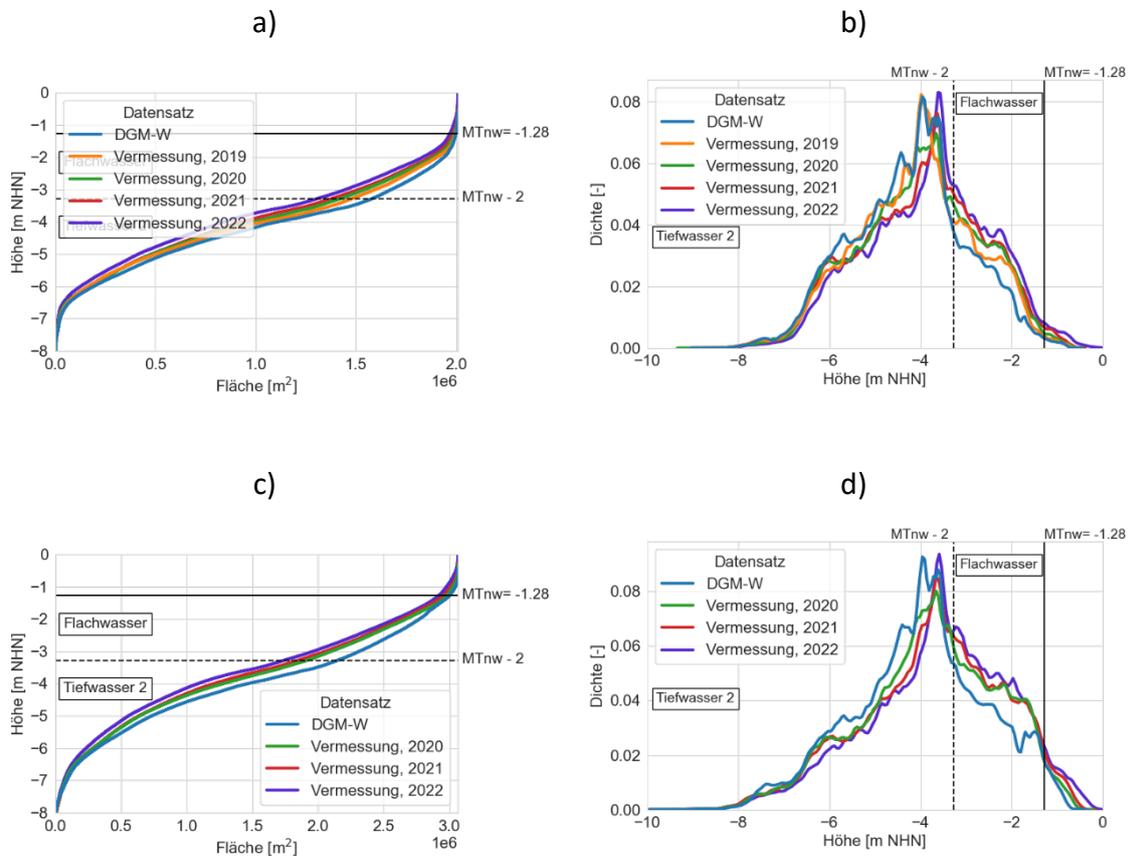


Abbildung 93: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Pagensander NE a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie c) und d) auf den Rastern des DGM 2020 und 2021 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegelraten Kollmar für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

Tabelle 17 zeigt die relativen Änderungen für die Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Zeitraum 2016-2022. Es fällt auf, dass die Flächen in der Klasse Tiefwasser2 zwischen 2016 und 2019 abnehmen (-6,4 %, ca. -2,1 % pro Jahr), während die Flächen der Flachwasserzone zunehmen (+23,7 %, ca. + 8% pro Jahr). Diese Trends setzen sich in den drei nachfolgenden Zeiträumen (2019 - 2020, 2020 - 2021 und 2021 - 2022) fort. Die Tendenzen und Größenordnungen bleiben auch erhalten, wenn das weniger dichte Raster des DGM bei der Auswertung weggelassen werden (Tabelle 18), was die Robustheit verdeutlicht.

Tabelle 17: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Bereich der Pagensander NE, bestimmt auf Grundlage des Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020 und 2021)

Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2019	- 6,4%	23,7%
2019 – 2020	- 3,9%	10%
2020 – 2021	- 3%	6,1%
2021 – 2022	- 5,2%	9,5%

Tabelle 18: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser2 und Flachwasser im Bereich der Pagensander NE, bestimmt auf Grundlage des Rasters des DGM 2020 und 2021 TUHH

Zeitraum	Tiefwasser2	Flachwasser
2016 – 2020	- 10,8%	25%
2020 – 2021	- 3,5%	3,9%
2021 – 2022	- 5,7%	6,1%

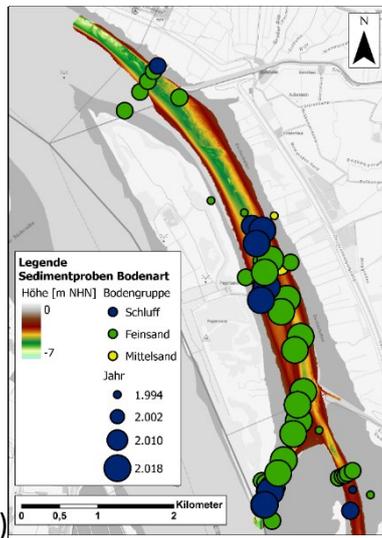
Neben der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Sohlhöhen wurde auch die Entwicklung der Sedimentzusammensetzung betrachtet. Hierfür wurden die Proben des Sedimentkatasters und die im Rahmen des Projekts im Jahr 2021 entnommenen Proben (s. Kapitel 3.1.3) ausgewertet. Die ältesten Proben des Sedimentkatasters im Bereich der Pagensander Nebeneibe stammen aus dem Jahr 1994. Die meisten Proben stammen aus den Jahren 2005 und 2018 (Abbildung 94b). In der überwiegenden Anzahl der Proben dominieren entweder der Feinsand- oder der Schluffanteil. Der Anteil der Proben mit dominierendem Schluffanteil hat über die Jahre zugenommen, was allerdings auch auf die Entnahmeorte zurückzuführen sein kann.

Die räumliche Zuordnung (Abbildung 94a) zeigt, dass die Proben hauptsächlich in der südlich (stromauf) gelegenen Hälfte entnommen wurden mit Schwerpunkten im Steinloch (überwiegend Feinsand) und auf Höhe des Anlegers Pagensand (Inselmitte), wobei hier zwei Cluster mit dominierendem Schluffanteil und ein Cluster mit dominierendem Feinsandanteil zu erkennen sind. Im Übergangsbereich zur nördlichen Hälfte, die größere Tiefen und steilere Sohlgradienten aufweist, wurde eine Probe entnommen in der der Feinsandanteil dominiert. Ansonsten wurden in der nördlichen Hälfte nur wenige Proben entnommen. In einer Serie von Proben entlang eines Querschnitts am stromabseitigen Ende dominiert der Feinsandanteil in den Proben mit Ausnahme der Probe nahe des Festlandufers (Schluff).

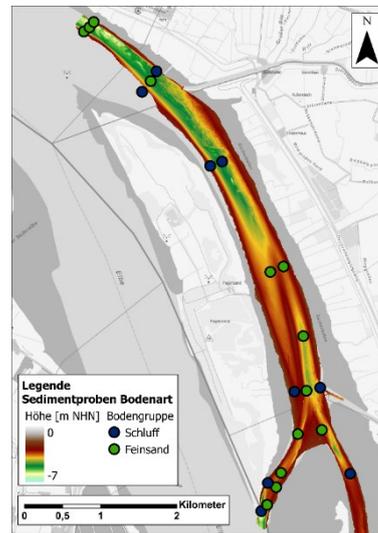
Die 2021 entnommenen Sedimentproben zeigen die gleichen feinen Bodengruppen (Schluff und Feinsand) wie die Proben aus der Vergangenheit. Tendenziell dominiert der

Schluffanteil im Bereich der flacheren (Ufer-) Bereiche und der Feinsandanteil in den tieferen (Rinnen-) Bereichen. Eine Ausnahme findet sich in der stromabwärts gelegenen Hälfte in der eine Probe aus der Rinne einen dominierenden Schluffanteil aufweist.

a)



b)



c)

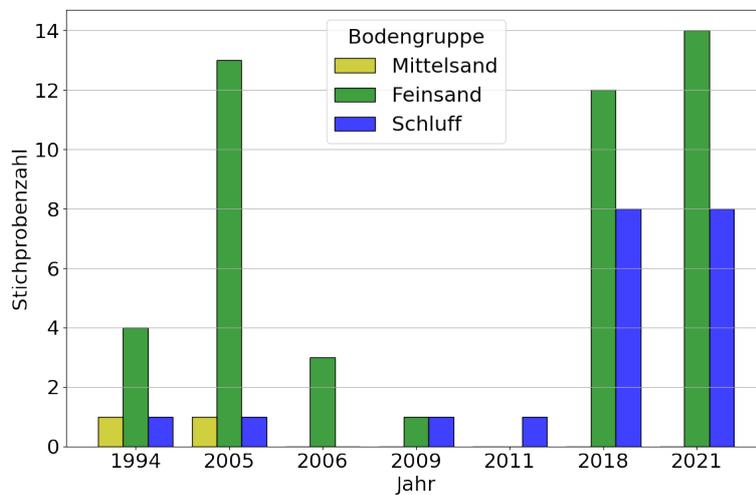


Abbildung 94: a) Räumliche Verteilung der Sohl-sedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Pagensander Nebelbe (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe) und b) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee)

3.3.5 Zusammenfassung

Für jede untersuchte Nebeneibe sind in Tabelle 19ff zusammenfassende Übersichten zur Morphologie sowie zur aktuellen (2016-2022) morphologischen Entwicklung gegeben.

Tabelle 19: Morphologie und aktuelle (2016-2022) morphologische Entwicklung der Hahnöfer Nebeneibe

Hahnöfer NE	Stromaufseitige Hälfte	Stromabseitige Hälfte
Topographie	Insgesamt flacher als stromabseitige Hälfte: <ul style="list-style-type: none"> NHN - 5 m und höher ansteigend bis zum Mühlenberger Loch auf NHN - 2,5 m im Mühlenberger Loch NHN + 0 m und höher 	Insgesamt tiefer als stromaufseitige Hälfte: <ul style="list-style-type: none"> NHN - 6 m und tiefer Tiefe Rinne zwischen Hafen Neuenschleuse und der Halbinsel Hahnöfersand
Sohlformen	Nahe Neßsand, nordöstlich von Hahnöfersand ein flacherer Bereich mit konkaven Strukturen (Dünen), überlagert von kleineren Bettformen	Mehrere Dünenfelder, Höhe bis ca. 1 m, Wellenlänge 10 - 40m, Verlagerung in Richtung stromauf um ca. 12 m/Jahr
Morphologische Entwicklung 2016-2022	Größere zusammenhängende Bereich mit Erosionstendenz sowie mit Verlandungstendenz Verlandungsbereiche <ul style="list-style-type: none"> Nordöstlich Hahnöfersand Übergang zum Mühlenberger Loch Erosionsbereich <ul style="list-style-type: none"> Zwischen Hahnöfersand und Übergang zum Mühlenberger Loch 	Lokal variierende Cluster bestehend aus kleineren Erosionsbereichen und Depositionsbereichen, z.T. zurückzuführen auf Bewegung der Transportkörper
	Tiefwasser2: <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2019: geringfügige Zunahme (ca. 0,5 % pro Jahr) 2019 – 2022: leichte Abnahme (< 3 % pro Jahr) Flachwasser: <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2019: geringfügige Abnahme (ca. 0,8 % pro Jahr) 2019 – 2022: leichte Zunahme (< 6 % pro Jahr) Watt (Mühlenberger Loch): <ul style="list-style-type: none"> 2006 - 2016: deutliche Zunahme (Verlandung Ausgleichsrinne) 2016 – 2022: keine Änderungen Insgesamt schwache Verlandungstendenz im Bereich der Rinne, deutliche Verlandungstendenzen der Wattflächen im Bereich Mühlenberger Loch mit abnehmender Tendenz	
dominierende Sohlsedimente (d_m)	Hauptsächlich Feinsand Schluff im Mühlenberger Loch	Hauptsächlich Mittelsand, Feinsand und Schluff im Übergangsbereich zur Elbe

Tabelle 20: Morphologie und aktuelle (2016-2022) morphologische Entwicklung der Lühesander Süderelbe

Lühesander Süderelbe	Stromaufseitiges Drittel	Mittleres Drittel	Stromabseitiges Drittel
Topographie	Größte Tiefen, räumliche variabel, steile Sohlgradienten Tiefere Bereiche: <ul style="list-style-type: none"> • Südspitze Lühesand (Übergang zur Tideelbe) • nördlich der Pionierinsel Flachere Bereiche: <ul style="list-style-type: none"> • Ufer Lühesand 	Größere Tiefen Tiefere Bereiche: <ul style="list-style-type: none"> • Bereich der landseitigen Vordeichung Flachere Bereiche: <ul style="list-style-type: none"> • nahe Festlandufer • Ufer Lühesand 	Geringste Tiefen Tiefere Bereiche: <ul style="list-style-type: none"> • Ufer Lühesand • Übergang zur Tideelbe Flachere Bereiche: <ul style="list-style-type: none"> • nahe Festlandufer • Nordspitze Lühesand
Sohlformen	Kleinere Dünenfelder	Größeres Dünenfeld	Kleinere Dünenfelder
Morphologische Entwicklung 2016-2022	Größeres zusammenhängendes Depositionsgebiet mittig Erosionsgebiete nahe Inselufer Lühesand und Pionierinsel	Größeres zusammenhängendes Depositionsgebiet Erosionsgebiete nahe Inselufer Lühesand und Festlandufer	Größerer, zusammenhängender Erosionsbereich nahe Inselufer Lühesand Größeres zusammenhängendes Depositionsgebiet im Übergangsbereich zur Tideelbe
	Keine eindeutigen Tendenzen der Flächen im Tiefwasser ² und Flachwasser, Aufwachsen der Wattflächen im Bereich der Festlandufers Gesamtvolumen tendenziell stabil		
dominierende Sohlsedimente (d_m)	Mittelsand	Mittelsand	Feinsand

Tabelle 21: Morphologie und aktuelle (2016-2022) morphologische Entwicklung der Haseldorfer Binneneibe

Haseldorfer Binneneibe	Stromaufseitiges Drittel	Mittleres Drittel	Stromabseitiges Drittel
Topographie	<p>Geringste Tiefen</p> <ul style="list-style-type: none"> Tiefen max. NHN - 3 m Ausnahme mit NHN - 5 m im Übergang zum Bauernloch 	<p>Größere Tiefen</p> <ul style="list-style-type: none"> max. NHN - 3,5 m flacher werdend in Richtung stromauf 	<p>Größte Tiefen</p> <ul style="list-style-type: none"> bis NHN - 5 m in der Rinne am Übergang zur Pagensander NE Richtung stromauf deutlich flacher werdend
Sohlformen	Keine	Ein kleines Dünenfeld	Keine
Morphologische Entwicklung 2016-2022	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich im Dwarssloch</p> <p>Kleinerer Erosionsbereich im Vorfeld der kleinen Insel</p>	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich an der Innenseite der Krümmung (festlandseitig)</p> <p>Schmäler, zusammenhängender Erosionsbereich an der Außenseite der Krümmung (inselseitig)</p>	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich nahezu im gesamten Querschnitt</p> <p>Verlandung der dem Bishorster Sand vorgelegerten Wattbereiche, Verlagerung der Wattfläche in Richtung Festland</p>
	<p>Tiefwasser2:</p> <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2019: deutliche Abnahme (ca. 8 % pro Jahr) 2019 – 2022: deutliche Abnahme (ca. 5 % pro Jahr und deutlich darüber) <p>Flachwasser:</p> <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2020: leichte Zunahme (ca. 3 % pro Jahr) 2020 – 2022: leichte Abnahme (2-3 % pro Jahr) <p>Watt (Bishorster Sand):</p> <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2022: leichte Zunahme <p>Insgesamt Verlandungstendenz im der Bereich Haseldorfer BE, deutliches Aufwachsen der Wattflächen entlang der ges. BE sowie im Bereich Bishorster Sand</p>		
dominierende Sohl-sedimente (d_m)	-	Schluff im Bereich der Böschungen	Feinsand im Querprofil der Rinne am Übergang zur Pagensander NE, sonst Schluff im Bereich der Böschungen

Tabelle 22: Morphologie und aktuelle (2016-2022) morphologische Entwicklung der Pagensander Nebeneibe

Pagensander Nebeneibe	Stromaufseitiges Drittel	Mittleres Drittel	Stromabseitiges Drittel
Topographie	<p>Geringste Tiefen, flache Sohlgradienten</p> <p>Tiefere Bereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> max. NHN - 4 m im Bereich Steinloch <p>Flachere Bereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> Festlandufer Inselufer Pagensand Nordspitze Bishorster Sand 	<p>Größere Tiefen, flache Sohlgradienten</p> <p>Tiefere Bereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> Östliche Rinne mit max. NHN - 5 m, flach auslaufend in Richtung stromab Westliche Rinne mit max. NHN - 5 m, flach auslaufend in Richtung stromauf <p>Flachere Bereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> Festlandufer Inselufer Pagensand 	<p>Größte Tiefen</p> <p>Tiefere Bereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> Übergang Elbe mit max. NHN - 7 m, flach auslaufend in Richtung stromauf <p>Flachere Bereiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> Festlandufer Inselufer Pagensand, insb. Nordspitze
Sohlformen	Keine	Keine	Keine
Morphologische Entwicklung 2016-2022	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich im Steinloch</p> <p>Kleinere längsgestreckte Erosionsbereiche entlang der Ufer im Steinloch</p>	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich mittig im Querprofile</p> <p>Schmalere Erosionsbereich außermittig links</p>	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich entlang des Ufers Pagensand</p>
	<p>Tiefwasser²:</p> <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2019: leichte Abnahme (ca. 2 % pro Jahr) 2019 – 2022: leichte Abnahme (3-5 % pro Jahr) <p>Flachwasser:</p> <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2019: deutliche Zunahme (ca. 8 % pro Jahr) 2019 – 2022: deutliche Zunahme (6-10 % pro Jahr) <p>Watt (Bishorster Sand):</p> <ul style="list-style-type: none"> 2016 – 2022: leichte Zunahme <p>Insgesamt Verlandungstendenz in der Pagensander NE, Aufwachsen der Wattflächen insbesondere am Inselufer</p>		
dominierende Sohlsedimente (d_m)	<p>Wenige Proben</p> <p>Im Querprofil am Übergang zur Hauptrinne der Elbe Feinsand, ufernah eine Probe mit Schluff</p>	<p>Zwei Schluff-Cluster</p> <p>Ein Cluster Feinsand</p>	<p>Feinsand im Steinloch und im Übergang zur Haseldorfer BE</p> <p>Schluff im Übergang zur Hauptrinne</p>

3.4 Unsicherheiten von digitalen Geländemodellen

Bathymetrische Daten liegen in der Regel in Form von digitalen Geländemodellen des Gewässerlaufs (DGM-W) vor. Dieses in der Lage verortete Raster gibt in jeder Zelle einen Wert an, der die Höhe der Gewässersohle bzw. der Geländeoberfläche beschreibt. Diese Höhenwerte sind mit Ungenauigkeiten (Fehlern) behaftet, die im Wesentlichen auf zwei Quellen zurückzuführen sind:

1. die Datenaufnahme (inkl. Messtechnik, Messverfahren) sowie die Datenauswertung und
2. die Interpolation der Vermessungsdaten auf ein regelmäßiges Raster (Produkterstellung).

Um eine zuverlässige Interpretation und Bewertung von Analysen, die auf Grundlage der DGMs durchgeführt werden, zu ermöglichen, sollte das Maß der Abweichung vom realen Wert (d.h. der Fehler) bekannt sein. Allerdings setzt sich der Fehler aus einer Vielzahl von einzelnen Faktoren aus den aufgezählten Quellen zusammen, so dass eine exakte Angabe praktisch nicht möglich ist. Um eine möglichst hohe Genauigkeit bei der Vermessung sicherzustellen, gibt es einige Regelwerke und Richtlinien. Nachfolgend sind die im Rahmen der Gewässervermessung im Projektgebiet zu beachtenden Richtlinien auszugsweise vorgestellt.

Zur Sicherstellung von einheitlichen Standards für alle Abläufe der Gewässervermessung von der Datenaufnahme über die Auswertung der Daten bis zur Produkterstellung wurde zum 1. Juni 2006 in der Seevermessung aller Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter im Küstenbereich das "Angewandte Qualitätsmanagementsystem Stufe I" (aQua) eingeführt (WSV 2023).

Im Rahmen von „aQua“ werden alle Prozesse der Gewässervermessung umfassend beschrieben, u.a.

- die Bestimmung der Installationsparameter der eingesetzten Messsensoren der Messschiffe
- das Prüfen und Kalibrieren der einzelnen Sensoren des Messsystems
- die Messung selbst und
- die Datenauswertung.

Der Begriff „Datenauswertung“ bezieht sich dabei auf die Aufbereitung der Rohdaten der Vermessung und umfasst nicht die Interpolation der aufbereiteten Messdaten auf das Raster (Punkt 2).

aQua (2014) definiert für die genannten Schritte auch zulässige Abweichungen für einzelne Komponenten sowie eine anzustrebende absolute kombinierte Unsicherheit U_{95} der Messwerte der Einzelmessung in Lage und Höhe. Die Grundlagen hierfür sind beschrieben im

„Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (ION 2008). Hier werden die Begriffe „Total Horizontal Uncertainty“ (THU) für die Lage und „Total Vertical Uncertainty“ (TVU) für die Höhe definiert (ebd.). Des Weiteren definiert die International Hydrographic Organization (IHO) in ihren Standards für die Hydrographische Vermessung IHO (2008) ebenfalls anzustrebende Werte u.a. für die TVU und THU .

Im Rahmen der im Vorhaben durchgeführten Fächerlotvermessungen wurden die genannten Standards berücksichtigt. Unter anderem erfolgten Kalibrierfahrten (Patch-Tests) zur Prüfung des eingesetzten Fächerlot-Messsystems, Drempelvermessungen zur Prüfung des Gesamtsystems und ein Abgleich der absolute kombinierten Unsicherheit U_{95} der Messwerte der Einzelmessung in Lage (THU) und Höhe (TVU).

Das verwendete Messsystem ist fest im Messboot der TUHH, welches im Vorhaben eingesetzt wurde, verbaut. Die durchgeführten Patch-Tests haben die ursprünglich ermittelten Werte von der Größenordnung her bestätigt. Der im Jahr 2020 durchgeführten Drempelvermessung am Krückau-Sperrwerk ging unmittelbar eine Grundräumung im Sperrwerksbereich voraus, so dass ein direkter Abgleich der Messwerte mit den bekannten Bauhöhen erfolgen konnte. Der Vergleich ergab maximale Abweichungen von etwa $\pm 0,1$ m, was beispielsweise deutlich unterhalb der höchsten von der IHO geforderten Genauigkeit von $\pm 0,2$ m liegt (IHO 2008). Details zu den Kalibrierfahrten und der Drempelvermessung sind ausführlich im Anhang A2 (A2.2.2) beschrieben.

Für die Vermessungsdaten der Hahnöfer Nebeneiben aus dem Jahr 2021 wurden mit der verwendeten Auswertesoftware Hypack 2021 die Werte TVU und THU berechnet. In die Berechnung fließen Informationen zu den verwendeten Messgeräten, der Offsets sowie die örtlichen Messbedingungen, wie z.B. die örtliche Tiefe und die Schiffsgeschwindigkeit ein. Die berechneten Werte wurden anschließend mit den Anforderungen von IHO (2008) und aQua (2014) abgeglichen. Der Vergleich in Tabelle 23 zeigt, dass die höchsten Anforderungen der IHO (exclusive) sowohl für TVU als auch THU bei den Messungen der TUHH einhalten werden. Die Anforderungen von aQua sind hinsichtlich der TVU etwas und hinsichtlich der THU deutlich strenger als die Anforderungen von IHO exclusive. Die definierten Grenzen für TVU werden bei der Messung der TUHH gerade eben eingehalten bzw. knapp überschritten. Die definierten Grenzen für THU werden hingegen deutlich überschritten. Hier stellt sich allerdings die Frage, warum der laut aQua anzustrebende Wert so deutlich unterhalb der Anforderung IHO exclusive liegt. In aQua (2014) ist für THU lediglich der Wert definiert, weitere Angaben hierzu fehlen.

Tabelle 23: Anforderungen der Standards von IHO (2008) und aQua (2014) an die TVU und THU sowie für die Vermessungsdaten der Hahnöfer NE im Jahr 2021 berechneten Werte für TVU und THU

Wassertiefe	5m		10m		15m	
	TVU [m]	THU [m]	TVU [m]	THU [m]	TVU [m]	THU [m]
IHO Special Order	0,25	2	0,26	2	0,27	2
IHO Exclusive	0,15	1	0,17	1	0,18	1
aQua	0,13	0,4	0,16	0,4	0,19	0,4
Messung TUHH (innere Beams -37,5° bis 37,5°)	0,15	0,7	0,16	0,75	0,17	0,8

Im Fokus der Untersuchungen im Vorhaben stand vor allem die Ableitung von Erkenntnissen, die zu einer verbesserten Interpretation der finalen Produkte, also der Geländemodelle, beitragen. In diesem Zusammenhang wurden zwei Sensitivitätsstudien zum Einfluss der Bootskorrekturparameter und zum Einfluss von manueller und automatischer Filterung bei der Datenauswertung durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Studien sind ausführlich im Anhang A2 dargestellt. An dieser Stelle werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst.

Wesentliche Erkenntnisse aus der Sensitivitätsstudie zum Einfluss der Bootskorrekturparameter (roll, pitch und yaw):

- Je größer die Abweichungen der Boots-Korrekturparameter yaw, pitch und roll, desto größer die Abweichungen im Differenzenraster
- Abweichungen des yaw-Winkels führen insbesondere bei vorhandenen Sohlstrukturen zu größeren Abweichungen, bei ebener Sohle sind die Abweichungen deutlich geringer
- Ein abweichender roll-Winkel verursacht deutlich größere Auswirkungen im Differenzenraster als abweichende Werte für yaw und pitch. Bereits bei einer Abweichung des roll-Winkels um 0,5° sind große Auswirkungen zu erkennen. Zudem wird der Fehler umso größer, je länger der Schall-Ping im Wasser unterwegs ist, d.h. bei größeren Wassertiefen und bei den äußeren (seitlichen) Beams des Fächerlotes.

Wesentliche Erkenntnisse aus der Sensitivitätsstudie zum Einfluss von manueller und automatischer Filterung bei der Datenauswertung:

- In der ersten Stufe der Datenfilterung führt eine manuelle Filterung der Daten vor der Anwendung von statistischen Filtern zu deutlich besseren Ergebnissen. Keiner der untersuchten statistischen Filter (2σ und 4σ) war in der Lage, die (zeitaufwändige) manuelle Filterung in der ersten Stufe sinnvoll zu ersetzen.
- In der zweiten Stufe der Datenfilterung ist die Anwendung von statistischen Filtern sinnvoll. Für die Lühesander Süderelbe und die Hahnöfer Nebelbe führen die Anwendung des 2σ - und 4σ - Filters zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Relativ werden hier durch beide stat. Filter deutlich mehr Ausreißer identifiziert als für die Pagensander Nebelbe, was auf das Vorhandensein von Transportkörpern zurückgeführt wird. Im Fall der Pagensander Nebelbe führt der 2σ -Filter zu besseren Ergebnissen. Dies kann an den fehlenden Transportkörpern sowie an dem verhältnismäßig großen Anteil an geringen Wassertiefen liegen. Im Ergebnis ist bei einer unregelmäßigen Sohle (z.B. Transportkörper) der weniger strenge 4σ -Filter und bei einer regelmäßigen Sohle und geringeren Wassertiefen der strengere 2σ -Filter zu bevorzugen.

Die bisherigen Ausführungen beziehen sich bislang ausschließlich auf die erste der beiden eingangs genannten Quellen für Ungenauigkeiten in den Höhenwerten von digitalen Geländemodellen, also die Datenaufnahme und Datenauswertung. Im Folgenden werden nun die wesentlichen im Vorhaben erzielten Ergebnisse hinsichtlich der zweiten Quelle, also der Interpolation der aufbereiteten Messdaten auf das Raster, dargestellt.

Die erste Erkenntnis, dass eine flächenhafte Vermessung eine deutlich exaktere Darstellung der Bathymetrie im digitalen Geländemodell ermöglicht als beispielsweise Querprofilmessungen, die in definierten Abständen erfolgen, ist offensichtlich. Ein besonderer Mehrwert entsteht insbesondere dann, wenn die Sohle Unregelmäßigkeiten aufweist, wie z.B. Sohlformen oder sonstige Unregelmäßigkeiten. Die Vorteile der flächenhaften Vermessung gegenüber dem Multimodell (interpolierte Querprofile) wurden in Kapitel 3.3.1 am Beispiel der Hahnöfer Nebelbe aufgezeigt. Dort wird deutlich, dass die flächenhafte Vermessung auch im Bereich der Nebelben zu bevorzugen ist, um die Grundlage für detaillierte Aussagen zur morphologischen Entwicklung zu schaffen.

Des Weiteren wurden zur Ableitung von praxisrelevantem Wissen zwei Sensitivitätsstudien zum Einfluss der Interpolationsmethode in Kombination mit der Rasterzellenweite sowie zum Einfluss der Messpunktdichte am Beispiel der 4 vermessenen Nebelben durchgeführt. Die Ergebnisse der Studien sind ausführlich im Anhang A2 dargestellt. An dieser Stelle werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst.

Wesentliche Erkenntnisse der Sensitivitätsstudie zum Einfluss der Interpolationsmethode in Kombination mit der Rasterzellenweite:

- Mit zunehmender Rasterzellenweite des DGM gehen Informationen zu kleinräumigen Strukturen wie z.B. Sohlformen und steilen Sohlgradienten verloren. Die gewählte Interpolationsmethode kann die Abnahme des Informationsgehalts mit zunehmender Rasterzellengröße im Einzelfall etwas abmildern aber nicht gänzlich kompensieren.
- Mit einer höheren Rasterzellenauflösung gehen größere Fehler einher. Untersuchungen für die 4 vermessenen Nebeneiben haben für die Rasterzellenweiten 1 m, 5 m und 10 m folgende Konfidenzintervalle (Medianwert der Verteilung, nicht normalverteilt) ergeben:
 - Auflösung 1m, Konfidenzintervall 0,067 - 0,092 m
 - Auflösung 5m, Konfidenzintervall 0,112 - 0,17 m
 - Auflösung 10m, Konfidenzintervall 0,16 - 0,235 m
- Die integrale Betrachtung der einzelnen Nebeneiben anhand der Dichtefunktionen der Rasterzellenhöhen zeigt bei verschiedenen Auflösungen (1 m, 5 m, 10 m) für die Hahnöfer NE, die Lühesander SE und die Pagensander NE keine signifikanten Unterschiede, was vermutlich auf die vergleichsweise großen Bereiche zurückzuführen ist. Für die schmale Haseldorfer BE, die im Vergleich zu den Sohlgradienten einen vergleichsweise kleinen Messbereich hat, zeigen sich in den Dichtefunktionen bereits bei einer Auflösung von 5 m deutliche Abweichungen zur Auflösung von 1 m. Je kleiner und struktureicher ein Betrachtungsbereich ist, desto höher sollte das DGM aufgelöst sein. Mittlerweile hat sich zwar ohnehin eine hohe Auflösung von 1x1 m etabliert. Ältere Datensätze, z.B. das DGM-W 2006 liegen aber in größerer Auflösung (10x10 m) vor.

Wesentliche Erkenntnisse der Sensitivitätsstudie zum Einfluss der Messpunktdichte:

- Es wurden unterschiedliche Mindestanzahlen von Messpunkten (1,3,5 und 10) untersucht, die je Rasterzelle vorhanden sein müssen, um eine Interpolation vorzunehmen.
- Mit steigender Mindestanzahl von Messpunkten nimmt die Anzahl von Rasterzellen im DGM mit gültigen Werten ab. Hierdurch gehen u.U. wertvolle Detailinformationen verloren. Im Gegenzug ist ein signifikanter positiver Einfluss auf die Standardabweichung erst ab einer Mindestanzahl von 10 Werten pro Rasterzelle festzustellen. Das Konfidenzintervall ändert sich in allen Fällen nur geringfügig. Im Ergebnis wird die Mindestanzahl von Messpunkten für das Vorhaben auf 1 festgelegt, um keine Informationen zu verlieren. Die Information zur Messpunktdichte wird aber bei der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere bei kleinräumigen Vergleichen, berücksichtigt.

Die vorgestellten durchgeführten Untersuchungen liefern praxisrelevante Erkenntnisse zur verbesserten Einschätzung von Unsicherheiten bei der Bewertung und Interpretation der im Vorhaben erstellten Geländemodelle (sowie der daraus abgeleitete Produkte, z.B. Differenzenmodelle) sowie bestehender Geländemodelle (DGM-Ws, und daraus abgeleitete Produkte). Zudem unterstützen die Erkenntnisse bei der Formulierung von zusätzlichen Anforderungen an die Vermessung, Datenaufbereitung und Datenauswertung, die erfüllt werden sollten, um eine möglichst präzise Datengrundlage zur Analyse morphologischer Änderungen zu schaffen.

Abschließend ist die Frage zu diskutieren, welche Aussagekraft den im Vorhaben genutzten Bestandsdaten (Seekarten, DGM-W) sowie den im Vorhaben erhobenen Daten (DGM) beizumessen ist. Klar ist, dass die quantitative Aussagekraft von älteren Datensätzen (z.B. Seekarten) deutlich geringer ist als von Datensätzen, die in der jüngeren Vergangenheit entstanden sind, z.B. DGM-Ws. Die Gründe hierfür sind offensichtlich. Zum einen wurden Verfahren und Messtechnik mit denen Daten, wie z.B. Tiefen, erhoben werden können stetig weiterentwickelt, so dass es heutzutage möglich ist, Daten in sehr hoher Auflösung flächig und mit vergleichsweise großer Genauigkeit zu erheben. Zum anderen haben sich die Möglichkeiten bei der Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Daten deutlich erweitert, z.B. durch Software zur Geodatenverarbeitung und die zugehörigen Rechnerinfrastruktur. Trotzdem können anhand der älteren Datensätze qualitative Aussagen zum Zustand und zur morphologischen Entwicklung der Nebenelben getroffen werden. Demgegenüber können auf Grundlage jüngerer Datensätze auch quantitative Aussagen getroffen werden. Tabelle 24 gibt einen Überblick darüber, was qualitative und quantitative Aussagen im Rahmen der Analyse morphologischer Änderungen bedeuten und ordnet die im Vorhaben genutzten Datensätze zu. Beim DGM-W fällt auf, dass die Zuordnung in Abhängigkeit von der Datenquelle vorgenommen wurde. Für Bereiche, die mit einem flächenhaften Messverfahren (Laserscan, Fächerlot) erfasst wurden, können anhand des DGM-W neben qualitativen auch belastbare quantitative Aussagen getroffen werden. Für Bereiche, die nur abschnittsweise mit einem punkt- oder linienhaften Messverfahren (Einstrahlecholot) erfasst wurden, ist die Aussagekraft eher qualitativ. Dies gilt insbesondere für Gewässerabschnitte mit vielfältigen Sohlformen (Transportkörper, steile Gradienten).

Zieht man beispielsweise das DGM-W 2016 heran, so findet man in den Metadaten die Information zur Erfassungsgenauigkeit für die LIDAR-Daten (± 15 cm bzw. ± 40 cm bei hoher Geländerauhigkeit) sowie die Peildaten (± 20 cm). Hintergrundinformationen hierzu fehlen jedoch genauso wie Angaben zu den zusätzlichen Ungenauigkeiten, die aus der Verschneidung und Interpolation von Daten aus unterschiedlichen Quellen auf ein Raster resultieren. Letztendlich obliegt es der auswertenden Person die Aussagekraft der Analysen einzuschätzen und den Fehler einzuschätzen. ENTELMANN (12.02.19a) verwendet bei der Darstellung von Differenzenplots für die Nebenelben beispielsweise einen pauschalen Unschärfbereich von ± 30 cm, was im Hinblick auf die Vermessungsdengrundlage (größtenteils interpolierte Querprofile) im Bereich der Nebenelben gerechtfertigt ist. Eine weitere

Möglichkeit zur Verfeinerung besteht, darin auch die Informationen aus der Datenquellkarte einzubeziehen und den Unschärfbereich individuell in Abhängigkeit des Messverfahrens festzulegen. Entsprechende Werte sind hierfür in den Metadaten gegeben.

Für die im Vorhaben erstellten DGMs der Nebenelben und der abgeleiteten Differenzenplots wird durchgängig ein Unschärfbereich von ± 10 cm verwendet, um einen möglichst hohen Informationsgehalt auch über kleinere Änderungsraten zu erhalten. Dieser Wert wird u.a. gestützt durch die Ergebnisse der Drempelvermessung und der durchgeführten Tests sowie Sensitivitätsuntersuchungen. Bei der Bewertung der Ergebnisse wird allerdings berücksichtigt, dass kleinere Änderungsraten im Differenzenplot natürlich nicht dieselbe quantitative Aussagekraft haben wie größere Änderungsraten.

Tabelle 24: Unterscheidung von qualitativen und quantitativen Aussagen im Rahmen der Analyse morphologischer Änderungen

<p>Eher qualitative Aussagekraft, d.h.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Änderungen verstehen • Muster und Trends erkennen • Qualitative Zusammenhänge identifizieren 	<p>Eher quantitative Aussagekraft, d.h.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Änderungen erklären • Kausale Beziehungen identifizieren • Zahlenmäßige Zusammenhänge darstellen
<p>Datensätze</p> <ul style="list-style-type: none"> • Historische Seekarten • Bereiche im DGM-W, in denen die Höhen aus weit auseinanderliegenden Messwerten interpoliert werden, z.B. Multimodell • Abgeleitete Daten, z.B. Morphozonen 	<p>Datensätze</p> <ul style="list-style-type: none"> • Jahrestopographien auf Grundlage von Fächerecholotungen aus dem Vorhaben Nebenelben • Bereiche im DGM-W, in denen die Höhen aus dicht beieinanderliegenden Messwerten interpoliert werden, z.B. Fächerecholotung, Laserscanning

4 Hydrodynamik im System Pagensander NE/Haseldorfer BE

Für das System Pagensander NE und Haseldorfer BE erfolgt eine detaillierte Analyse der Strömungsverhältnisse für den aktuellen Zustand sowie für veränderte Zustände (Maßnahmen). Um die Strömungsverhältnisse detailliert beschreiben und bewerten zu können, wurden zum einen lokale Messungen der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt und zum anderen ein hochauflösendes hydrodynamisch-numerisches (HN) Modell des Systems aufgebaut und in ein bestehendes HN-Modell der Tideelbe integriert. Zum Nachweis der Prognosefähigkeit des Modells, insbesondere im Bereich des Fokusgebietes, erfolgte eine Validierung anhand der erhobenen Messdaten. Mit dem validierten Modell wurden anschließend die Strömungsverhältnisse für verschiedene Zustände und für verschiedene hydrologische Situationen, wie Spring-/Nipptiden, Sturmfluten und variierenden Oberwasserzuflüssen simuliert. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der kleinräumigen Hydrodynamik im Bereich der Rinnen, der strömungsberuhigten Zonen in den Flachwasserbereichen und der Interaktion zwischen Rinnen und Flachwasserbereichen.

4.1 Strömungsmessungen

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wurden Strömungsgeschwindigkeitsmessungen im Steinloch und im Übergang zwischen Pagensander NE und der Haseldorfer BE durchgeführt. An beiden Standorten wurden Einzelpunktmessungen (WSA Elbe-Nordsee, Sensor: Seaguard RCM SW) und Querprofilmessungen (TUHH, Sensor: Teledyne ADCP Rio Grande) durchgeführt. Die Einzelpunktmessungen wurden durch das WSA Elbe-Nordsee ausgewertet und bereitgestellt.

Die Querprofilmessungen wurden durch die TUHH ausgewertet. Die Plausibilisierung erfolgt mit Hilfe der zugehörigen Standardsoftware WinRiver II von Teledyne. Die weitere Auswertung erfolgte in Matlab mit der VMT-Toolbox (Parsons et al. 2013). Dort wurden vier Querschnittsmessungen zu einem projizierten neuen Querschnitt zusammengefasst, wobei die Werte des Gitters aus dem arithmetischen Mittel der gemessenen Querschnitte berechnet wurden. Anschließend wurden die Zellen dieses neuen projizierten Querschnitts mit einem gleitenden Durchschnittsfenster von 2x2 Zellen interpoliert, um die Geschwindigkeiten zu glätten.

Die profilweisen Ergebnisse in Form der (querschnittsgemittelten) Geschwindigkeit und des Abflusses zeigen Tabelle 25 für den Bereich Steinloch und Tabelle 27 für den Übergang zwischen Pagensander NE und Haseldorfer BE. Positive Werte entsprechen der stromab gerichteten Strömung (Nordsee), negative Werte der stromauf gerichteten Strömung (Hamburg). Zur besseren Einordnung wird ebenfalls der Wasserstand am Pinnau-Sperrwerk dargestellt. Im Bereich Steinloch wurden maximale Abflüsse von 356 m³/s bei Ebbe- bzw. 382 m³/s bei Flutstrom gemessen. Im Übergang zur Haseldorfer BE wurden maximale Abflüsse von 244 m³/s bei Ebbe- bzw. 300 m³/s bei Flutstrom gemessen.

Die (innerhalb des Messkollektivs) maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich Steinloch betragen 0,67 m/s im Ebbstrom und 0,77 m/s im Flutstrom. Für den Querschnitt am Übergang zur Haseldorfer BE wurden maximal 0,54 m/s im Ebbestrom und 0,66 m/s im Flutstrom gemessen. Die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zeigen insgesamt eine Flutstromdominanz. Zudem treten die maximalen Geschwindigkeiten nicht zeitgleich mit den maximalen Abflüssen auf, was auf die schwankenden Wasserstände im Tideverlauf zurückzuführen ist. Dies gilt für den Querschnitt im Bereich Steinloch noch mehr als für den Querschnitt in der Haseldorfer Binnenelbe.

Eine bemerkenswerte hochdynamische Geschwindigkeitsentwicklung zeigt sich besonders im Querschnitt Steinloch. In den vier aufeinanderfolgenden Messungen vom 8.9.2021 um 10:56 Uhr, 11:40 Uhr, 12:08 Uhr und 12:50 Uhr (vgl. Tabelle 25) steigt die Ebbestromgeschwindigkeit bei vergleichbaren Wasserständen im Bereich des Tnw von 0,32 m/s (10:56 Uhr) auf 0,67 m/s (11:40 Uhr) an, um dann 27 Minuten später auf 0,07 m/s (12:08 Uhr) abzufallen. Weitere 42 Minuten später um 12:50 Uhr zeigt sich mit 0,76 m/s ein ausgeprägter Flutstrom. Die gemessenen Daten zeigen ein Strömungsphänomen, welches am besten als Flutrückströmung zu bezeichnen ist. Diese Strömung resultiert aus den unterschiedlichen Laufzeiten der Tidewelle in der Hauptrinne und der Nebenrinne. Aufgrund des weitaus größeren und vor allem tieferen Querschnitts in der Hauptrinne pflanzt sich die Welle hier schneller fort als in der flacheren Nebelbe. Über mehrere Kilometer entsteht somit am stromaufseitigen Ende der Pagensander Nebelbe ein Wasserspiegelgefälle in Richtung Nebelbe. Im Ergebnis setzt im Steinloch eine Strömung aus der Tideelbe in die Nebelbe ein, die zwar in Richtung des Ebbestroms gerichtet ist, aber während der Flutphase auftritt. Diese Charakteristik ist auch anhand der Ergebnisse der stationären Geschwindigkeitsmessung in Abbildung 96 a) gut zu erkennen an den kurzen Peaks im Geschwindigkeitsverlauf, z.B. am 07.09.21 gegen 23:30 Uhr. Hierbei ist zu beachten, dass die Geschwindigkeiten in der Abbildung betragsmäßig angegeben sind.

Die beschriebene Flutrückströmung durch das Steinloch macht sich auch im Geschwindigkeitsverlauf im Bereich des Querprofils im Übergang der Pagensander NE zur Haseldorfer BE bemerkbar und zwar in Form von deutlichen Peaks, die kurzzeitig Fließgeschwindigkeiten (in Flutstromrichtung) von bis zu 1 m/s erreichen (vgl. Abbildung 96 c)).

Tabelle 25 Mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Abfluss im Querschnitt gemessen in Steinloch, sowie Wasserstand am Pinnau-Sperrwerk (Datenquelle: Pegelonline)

Datum	Zeit [MEZ]	Mittlere Strömungsgeschw. [cm/s]	Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m NHN] (Pinnau-Sperrwerk)
06.09.2021	14:09	-43	-305	1,45
	14:43	-36	-279	1,67
	15:27	-25	-193	1,77
	15:58	-14	-104	1,67
	16:42	35	236	1,30
	17:13	62	356	1,02
08.09.2021	08:21	61	162	-0,18
	08:42	50	113	-0,36
	09:24	46	81	-0,75
	09:52	36	59	-0,96
	10:30	33	38	-1,25
	10:56	32	35	-1,40
	11:40	67	78	-1,46
	12:08	7	16	-0,58
	12:50	-76	-250	0,16
	13:25	-77	-297	0,52
	14:11	-70	-382	0,87

Tabelle 26: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit und Abfluss im Querschnitt gemessen im Übergang zwischen der Pagensander NE und der Haseldorfer BE, sowie Wasserstand am Pinnau-Sperrwerk (Datenquelle: Pegelonline)

Datum	Zeit [MEZ]	Mittlere Strömungsgeschw. [m/s]	Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m NHN] (Pinnau-Sperrwerk)
06.09.2021	13:47	-55	-274	1,27
	15:06	-25	-136	1,75
	16:20	47	244	1,47
	17:42	54	209	-0,74
08.09.2021	09:02	30	59	-0,58
	10:11	24	33	-1,12
	11:18	10	9	-1,48
	12:27	-71	-201	-0,17
	13:46	-51	-193	0,68
	14:37	-66	-300	1,10

Neben den Einzelbetrachtungen der Messergebnisse erfolgte auch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der kontinuierlichen Punktmessungen mit denen der temporären Querschnittsmessungen. Abbildung 95 a) und c) zeigen die kontinuierlichen Geschwindigkeits-

verläufe der Punktmessungen sowie die entsprechenden Geschwindigkeiten aus den temporären Querprofilmessungen. Die Werte wurden aus den aufbereiteten Querprofilen extrahiert und zwar aus dem Bereich, in dem auch die Messstation verortet war (vgl. Abbildung 96 oben). Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeiten aus den Querprofilen oberhalb der Werte aus den Punktmessungen liegen, insbesondere für die Lokation Steinloch (vgl. Abbildung 95 a) und c)).

Die vergleichsweise geringen Abweichungen sind zum einen auf die unterschiedlichen Messmethoden und zum anderen auf die Datenaufbereitung zurückzuführen. Die querschnittsgemittelten Werte sind Mittelwerte aus vier einzelnen Querschnittsfahrten, die etwa innerhalb von 10 Minuten aufgenommen wurden.

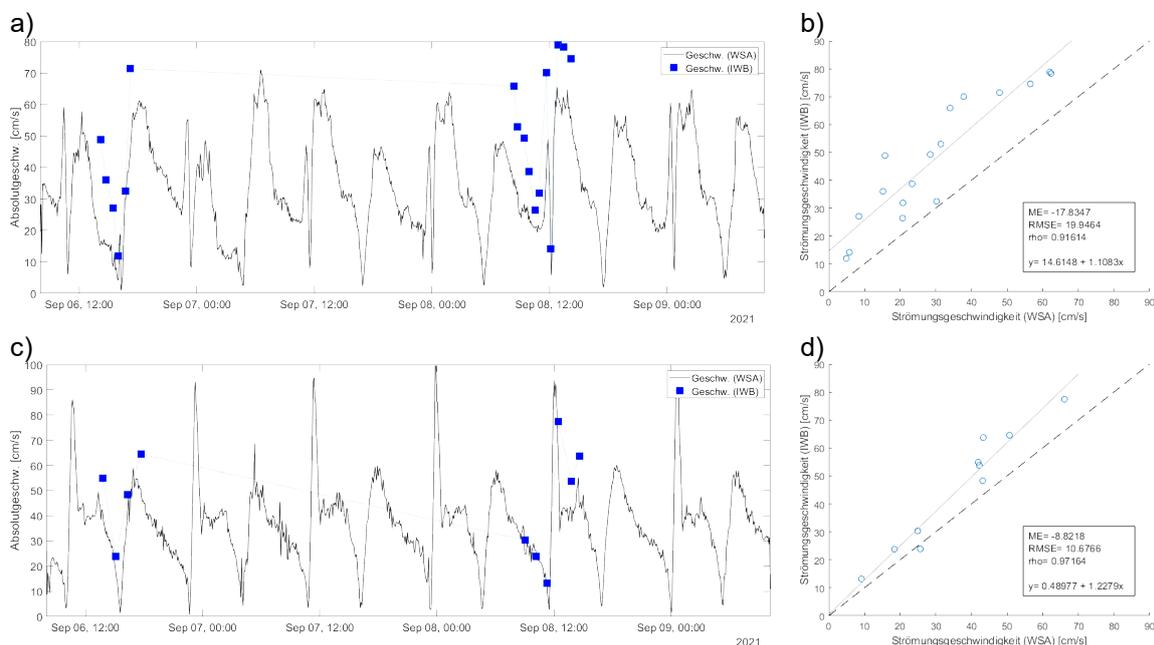


Abbildung 95: Vergleich zwischen Messungen von IWB und WSA Elbe-Nordsee für den Querschnitt Steinloch a) und b) sowie den Querschnitt im Übergang zwischen der Pagensander NE und der Hasel-dorfer BE c) und d).

Des Weiteren erfolgte ein Abgleich der Messergebnisse aus der Nebelbebe mit den Ergebnissen der Dauermessstation D3 (Sohle) aus der Hauptelbe. Aus Abbildung 96 geht hervor, dass sich die Geschwindigkeitsverläufe in Hauptelbe und Nebelbebe dem Grunde nach ähneln, allerdings in der Nebelbebe etwas gedämpfter sind. Zudem werden ein zeitlicher Versatz von etwa zwei Stunden sowie ein Peak zu Beginn des Flutstroms (Flutrückströmung, s.o.) deutlich. Aufgrund der Vielzahl an Abbildungen, die in dieser Analyse erzeugt wurden, wird in diesem Abschnitt nur Abbildung 96 gezeigt. Sämtliche erzeugten Querschnittsabbildungen sind im Anhang A3 aufgeführt.

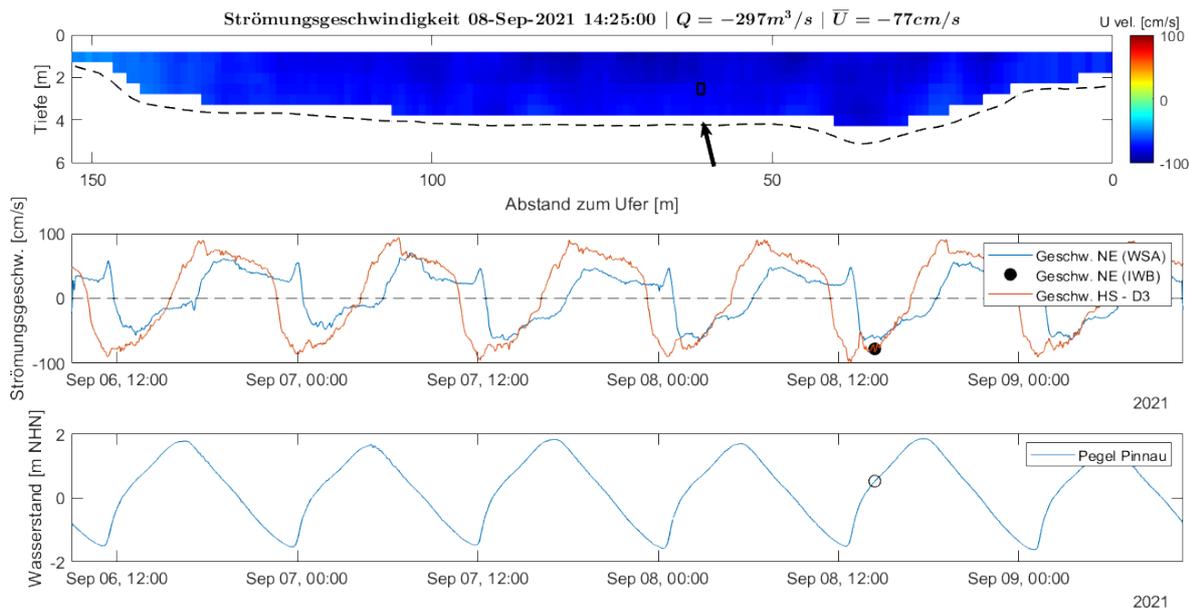


Abbildung 96: Gemessene Strömungsgrößen im Bereich Steinloch; oben: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt am 08.09.2021 um 14:25, Mitte: Einzelpunkt-Strömungsgeschwindigkeit im Bereich der NE und an der Station Pagensand-D3 (Sohle), unten: Wasserstand am Pegel Pinnau (Quelle: Portal Tideelbe)

4.2 Strömungsmodellierung

Um flächenhafte Analysen durchzuführen und um die Auswirkungen von Maßnahmen zu quantifizieren wurde ein hochauflösendes zweidimensionales Strömungsmodell vom System Pagensender NE / Haseldorfer BE aufgebaut, welches in ein vorhandenes Modell der Tideelbe integriert wurde. Zur Simulationen der Hydrodynamik wurde das Modul TELEMAC-2D des Modellierungssystems TELEMAC-MASCARET verwendet. Durch Lösung der Flachwassergleichungen berechnet TELEMAC-2D die Wassertiefe und die horizontalen tiefengemittelten Geschwindigkeiten an jedem Knoten des räumlich diskretisierten Modellgebietes (Ata 2018; Hervouet 2000). Das bei der numerischen Lösung der Gleichungen eingesetzte Finite-Elemente-Schema erlaubt eine große Flexibilität bei der Erstellung des Rechennetzes, wodurch auch kleinräumige Strukturen durch lokale Verfeinerungen im Modell erfasst werden können. Weitere Details zu den Grundlagen der Software finden sich in Hervouet (2000) und weitere Informationen zur verwendeten Version (v7.3.1) finden sich in Ata (2018).

4.2.1 Übergeordnetes HN-Modell des Elbeästuars

Bei den Modellierungsarbeiten im Vorhaben wurde auf das am Institut für Wasserbau aufgebaute HN-Modell des Elbeästuars zurückgegriffen. Die erste Version des Modells wurde im Zuge des EU-PF7-Vorhaben PEARL für eine operationelle Wasserstands-Vorhersage aufgebaut. Im Rahmen des BMBF/KFKI-Forschungsvorhaben RefTide wurde die Genauig-

keit des Modells durch Anpassungen des Berechnungsgitters und des Modell Set-up verbessert. Die im Vorhaben Nebelnelben vorgenommenen Erweiterungen werden in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Abbildung 97 zeigt das Modellgebiet und das Rechennetz sowie zwei Detailausschnitte im Bereich der Pagensander Nebelnelbe und im Hamburger Hafen. Tabelle 27 gibt Informationen zur räumlichen Auflösung des unstrukturierten Rechennetzes.

Tabelle 27: Überblick über die Auflösung des FE-Netzes des HN Modells des Elbeästuars

	Minimum	Mittelwert	Maximum
Elementflächen	24 m ²	1.400 m ²	99.000 m ²
Kantenlänge der Elemente	5 m	50 m	660 m
Anzahl der Elemente	352.000		

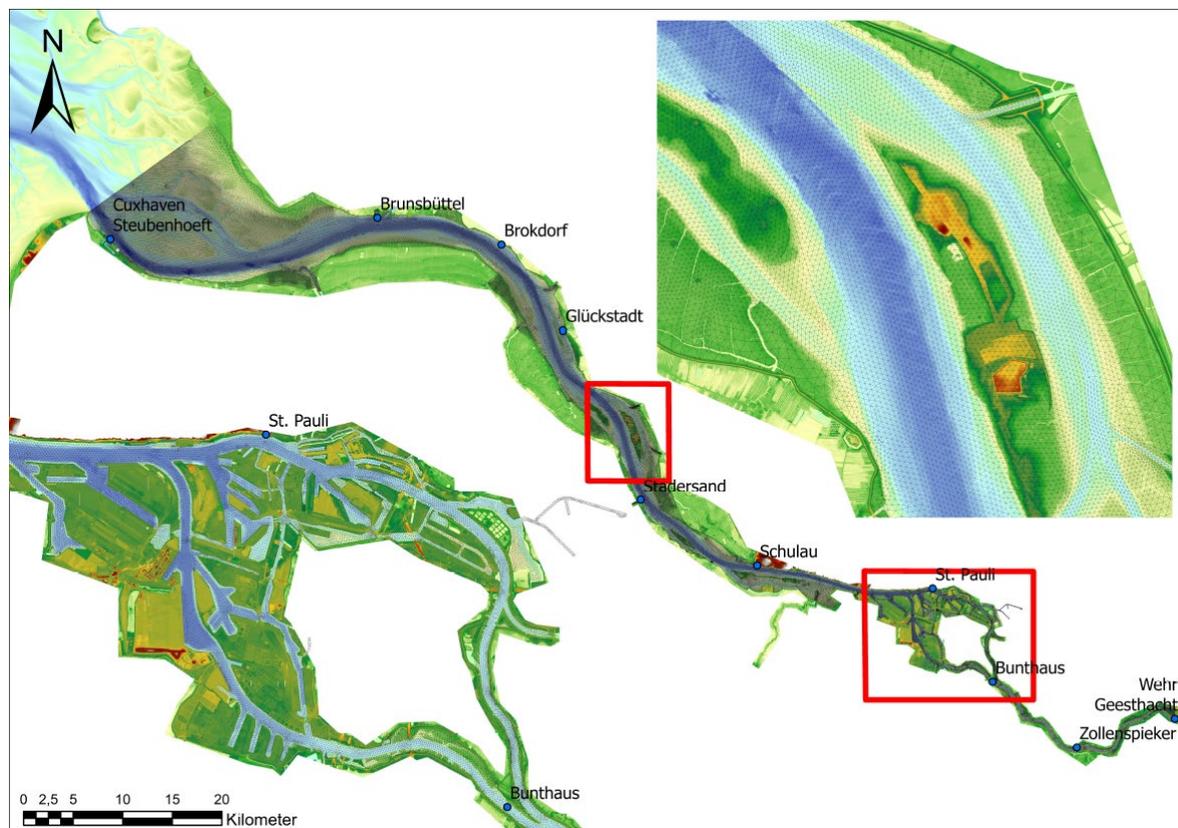


Abbildung 97: Darstellung des Netzes des HN-Modells der Tideelbe insgesamt sowie in zwei Ausschnitten im Bereich der Pagensander NE und im Bereich des Hamburger Hafens, hinterlegt ist das DGM-W 2016 (Daten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, www.kuestendaten.de)

Das Modell wird am seeseitigen Rand über Wasserstandsmessdaten des Pegels Cuxhaven sowie den Salinitätsmessdaten der Station Cuxhaven – Alte Liebe angetrieben. Binnenseitig werden Abflussmessdaten von Neu Darchau mit einer Hysterese von 20,25 Stunden, welche über eine beste Übereinstimmung einer Kreuzkorrelation des Tideniedrigwassers

zum Abfluss bestimmt wurde, als Randwerte eingesteuert. Zur Berechnung des Fließwiderstands an der Sohle wird der Reibungsansatz nach Nikuradse mit einem Reibungsbeiwert von $k_s = 0,05$ m verwendet. Größere Sohlstrukturen, wie z.B. Dünen, sind direkt im Rechenetz aufgelöst. An der freien Wasserspiegeloberfläche wird der Windeinfluss berücksichtigt. Hierzu werden die Windmessdaten von der DWD-Station Cuxhaven in das Modell eingesteuert. Als Turbulenzmodell wird das Elder-Modell verwendet mit einem dimensionslosen Dispersionskoeffizienten von 100 in Strömungsrichtung und 10 quer zur Strömungsrichtung. Die Geländehöhen stammen aus dem digitalen Geländemodell DGM-W 2010. Die Kalibrierung des Modells erfolgte im Rahmen des Vorhaben RefTide (Strotmann et al. 2022) mit Fokus auf die Hydrodynamik (Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeiten) bei mittleren Tideverhältnissen. Das Ergebnis der Kalibrierung zeigt Abbildung 98 exemplarisch für den Pegel St. Pauli.

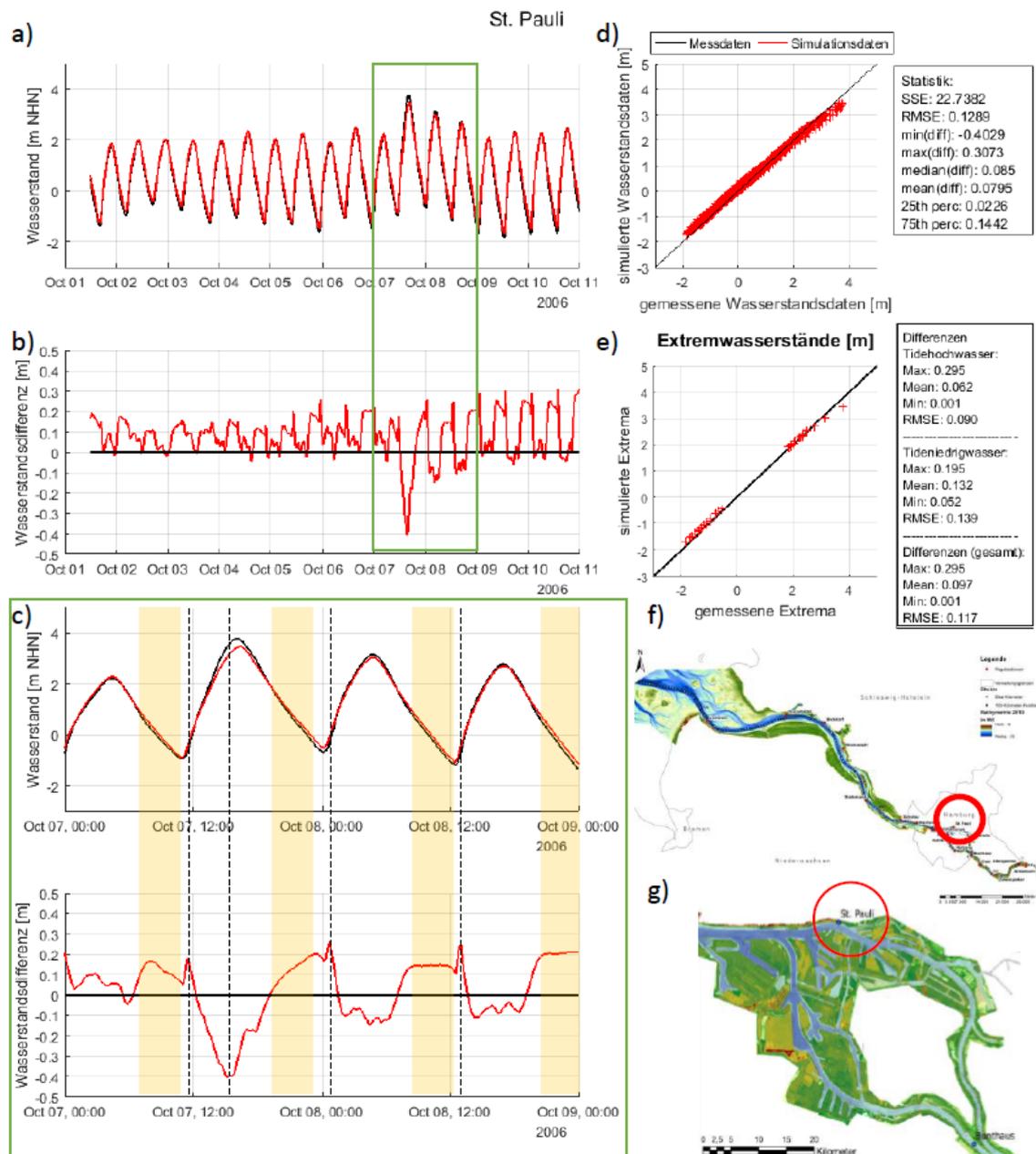


Abbildung 98: Kalibrierungsergebnis des HN-Modells der Tideelbe anhand der Wasserstände für Oktober 2006, a) Vergleich der Messung (schwarz) mit dem Modell (rot), b) Wasserstandsdifferenz zwischen Messung und Simulation (positiv: Modelldaten sind größer als Messdaten), c) Zeitausschnitt vom 07.-09. Oktober 2006, d) Vergleich der Wasserstände zum gleichen Zeitpunkt, e) Vergleich der Tidehoch- und Tideniedrigwasser, f) Lage des Pegels, g) Detailansicht Lage des Pegels (Quelle: Strotmann et al. (2022))

Die Validierung des Modells erfolgte ebenfalls im Rahmen des Vorhabens RefTide (Strotmann et al. 2022) für das Hochwasserereignis im März 2008 bei dem ein mittlerer Abfluss

von $Q = 1209 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Neu Darchau gemessen wurde. Da hohe Abflüsse insbesondere den Wasserstand stromauf von Hamburg beeinflussen, zeigt Abbildung 87 die Ergebnisse der Validierung für den Pegel Zollenspieker, welcher sich etwa auf der Hälfte der Fließstrecke zwischen Hamburg und Geesthacht befindet.

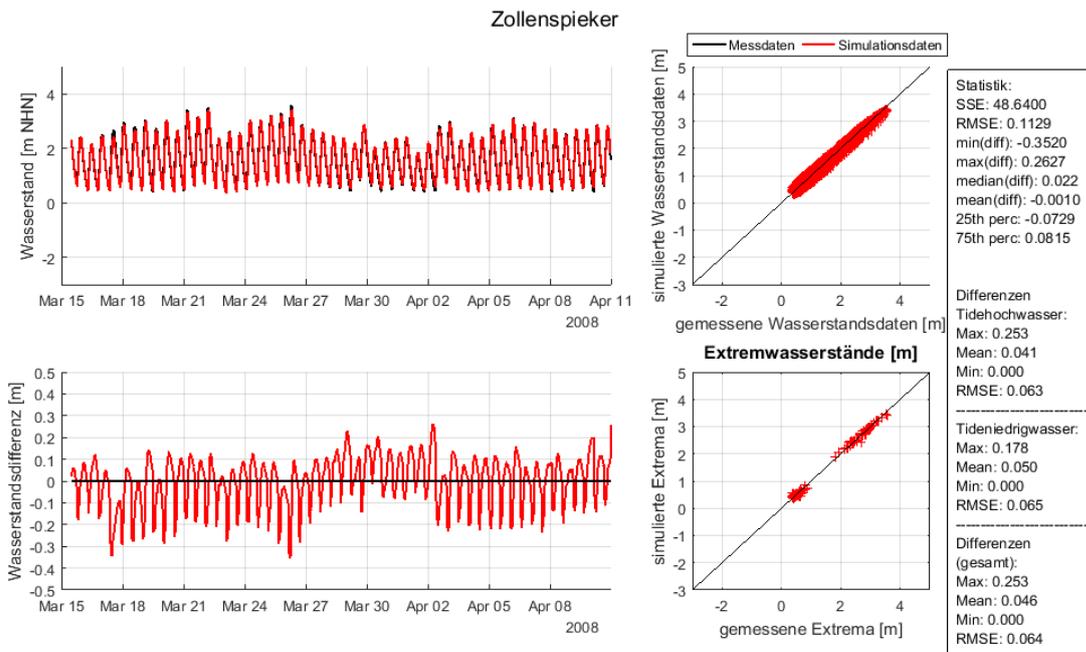


Abbildung 99: Validierungsergebnis des HN-Modells der Tideelbe anhand der Wasserstände für den Zeitraum März-April 2008, Vergleich der Messung (schwarz) mit dem Modell (rot) (Quelle: Strotmann et al. (2022))

Die Ergebnisse der Kalibrierung und Validierung zeigen, dass das Modell die Hydrodynamik (hier gezeigt für den Wasserstand) entlang des gesamten Elbeästuars sehr gut reproduziert. Abbildung 100 zeigt den mittleren Fehler (RMSE) sowie das Bestimmtheitsmaß (R^2) entlang des Ästuars, beide berechnet anhand der stationsweise gemessenen und simulierten Werte.

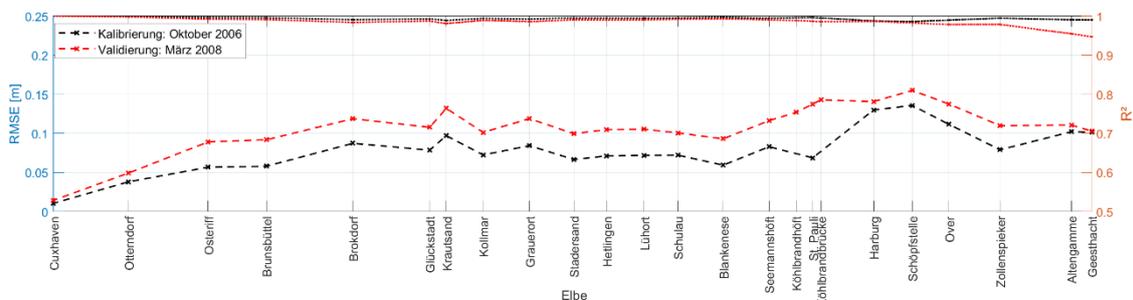


Abbildung 100: Fehlermaße entlang der der Tideelbe berechnet für stationsweise gemessene und simulierte Daten, linke y-Achse (gestrichelt): Root Mean Square Error, rechte y-Achse (gepunktet): R^2

4.2.2 Fokusgebietsmodell vom System Pagensander NE / Haseldorfer BE

Im Rahmen des Vorhabens erfolgten eine umfangreiche Anpassung des Berechnungsgitters im Bereich der Pagensander NE und Haseldorfer BE, Optimierungen am Gesamtmodell, die Aktualisierung der Höheninformationen auf Grundlage des DGM-W 2016 sowie eine Validierung für einen aktuellen Zeitraum (September 2021). Als Grundlage für die Verfeinerung im Bereich der Pagensander NE und der Haseldorfer BE dienten die im Vorhaben erzeugten digitalen Geländemodelle aus dem Jahr 2021, die auch detaillierte Informationen über kleinräumige Sohlstrukturen und Flachwasserbereiche beinhalten.

Abbildung 101a und b zeigen den Bereich (schwarz umrandet) in dem die Verfeinerung des Rechennetzes vorgenommen wurde sowie die gewählte Auflösung des Rechennetzes. Der Vergleich des Höheninformationen aus dem DGM-W 2016 mit dem DGM 2021 zeigt in einigen Bereichen (hellblaue Boxen) deutliche Abweichungen von mehr als einem Meter. Diese sind zum einen auf morphologische Änderungen in den Jahren zwischen den Aufnahmen und zum anderen auf unterschiedliche Messverfahren (vgl. Kapitel 3.2.3 und 3.2.4) zurückzuführen. Bei der Verschneidung der Daten entstehen künstliche Geländesprünge, die im Querprofil (Abbildung 101c) sichtbar werden. Um eine realistischere Bathymetrie zu erhalten, wurde wie folgt vorgegangen. In allen Bereichen in denen die digitalen Geländemodelle der Pagensander NE und der Haseldorfer BE des Jahres 2021 Werte liefern, werden diese angenommen. In einem Umkreis (Buffer) von 50m um die beiden DGM werden die Werte aus dem DGM-W 2016 gelöscht und die entstandene Lücke durch Interpolation geschlossen. Hierfür wurden unterschiedliche Methoden getestet (Abbildung 101c) mit dem Ergebnis, dass die lineare Interpolation im Hinblick auf eine realistische Bathymetrie die besten Ergebnisse liefert. Sofern sich innerhalb des 50m Abstands besondere Strukturen wie Inseln oder Steilufer befanden, wurde die beschriebene Interpolation nicht durchgeführt, sondern eine manuelle Anpassung vorgenommen.

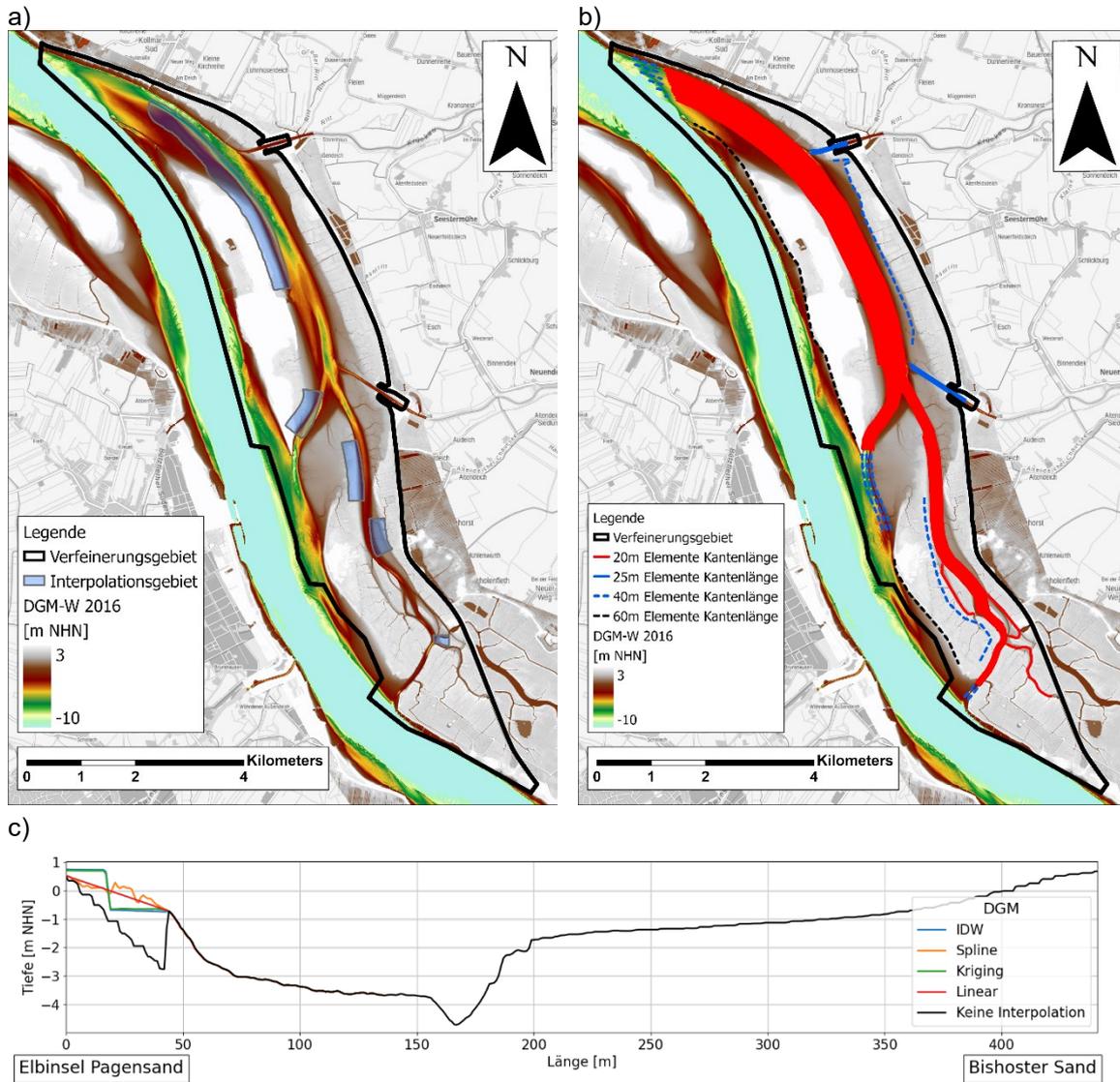


Abbildung 101: Modifikation des Elbmodells für a) die Interpolation von Gebieten mit einer Differenz von mehr als 1 m für IWB DGM und DGM-W und c) die Bewertung der Interpolationsmethode und b) die für die Gitterverfeinerung verwendeten Breaklinien.

Im Bereich der Pagensander NE und der Haseldorfer BE wurde anschließend das Rechenetz in zwei Stufen verfeinert. Das stufenweise Vorgehen folgt dem Prinzip einer Netzkonvergenzstudie, die zum Ziel hat, die Unabhängigkeit der Simulationsergebnisse vom Rechenetz nachzuweisen und zugleich eine optimale Auflösung des Gitters (so fein wie nötig, so grob wie möglich) zu finden. Beide neu erzeugten Varianten des Rechenetzes (V1 und V2) weisen die höchste Auflösung im Bereich der Rinnen sowie der Flachwasserbereiche auf. Variante V1 hat Elementkantenlängen von 20 m, 40 m und 60 m (jeweils in Abhängigkeit von der Größe der Rinnen und den lokalen Sohlgradienten), Variante V2 hat Elementkantenlänge von 10 m, 20 m und 40 m. In beiden Varianten sind die Mündungsbereiche von Krückau und Pinnau in einer Auflösung von 25 m aufgelöst. Eine Übersicht zu den

Auflösungen der drei Varianten (NV = unveränderte Auflösung, V1 und V2) geben Tabelle 28 bis Tabelle 30.

Tabelle 28: Übersicht über die Netzauflösung des HN-Modells im Fokusgebiet für Variante NV (= unveränderte Auflösung im Vergleich zum Bestandsmodell)

	Minimum	Mittelwert	Maximum
Elementflächen	81 m ²	1.900 m ²	34.000 m ²
Kantenlängen der Gitterelemente	10 m	65 m	275 m
Anzahl der Elemente	16.640		

Tabelle 29: Übersicht über die Netzauflösung des HN-Modells im Fokusgebiet für Variante V1 (= erste Verfeinerungsstufe)

	Minimum	Mittelwert	Maximum
Elementflächen	75 m ²	435 m ²	4.500 m ²
Kantenlängen der Gitterelemente	12,5 m	29 m	125 m
Anzahl der Elemente	72.000		

Tabelle 30: Übersicht über die Netzauflösung des HN-Modells im Fokusgebiet für Variante V2 (= zweite Verfeinerungsstufe)

	Minimum	Mittelwert	Maximum
Elementflächen	25 m ²	135 m ²	4.500 m ²
Kantenlängen der Gitterelemente	6,50 m	15 m	125 m
Anzahl der Elemente	232.500		

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Auflösungen auf die Abbildung der realen Geometrie zeigt Abbildung 102. In der Darstellung ist beispielhaft für einen Querschnitt im Steinloch zu sehen, wie präzise das jeweilige Rechnetz die reale Bathymetrie (gestrichelte Linie) approximiert. Die Abweichungen zwischen der nicht verfeinerten Variante (NV) und der realen Topographie sind deutlich zu erkennen. In einigen Bereichen werden Tiefen überschätzt, in anderen unterschätzt. In Bezug auf das Gesamtvolumen im Querschnitt führen Über- und Unterschätzungen zu einem weitgehenden Ausgleich. Allerdings ist zu erwarten, dass die lokale Hydrodynamik im Querschnitt von der Variante NV nicht exakt abgebildet wird. Eine deutlich bessere Anpassung zeigen die Varianten V1 und insbesondere V2.

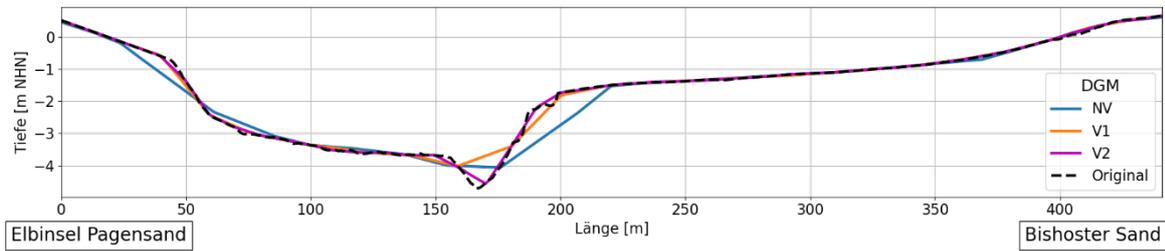
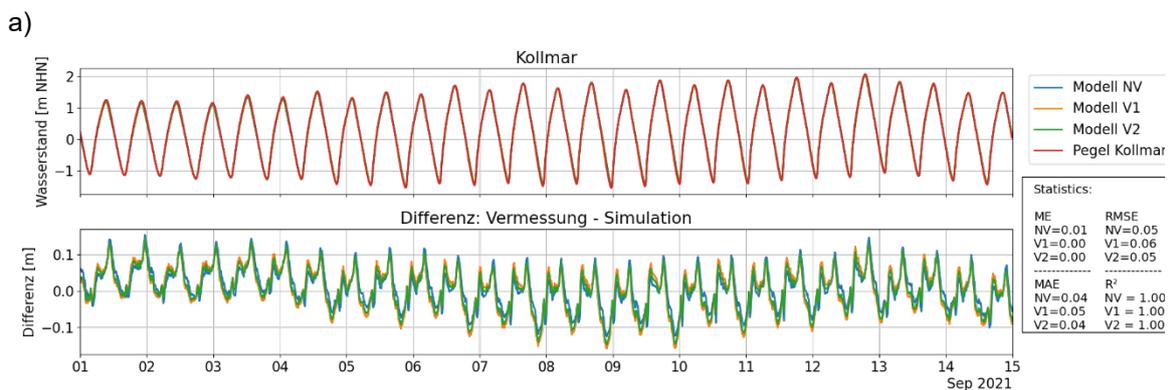


Abbildung 102: Vergleich der Bathymetrie von Modellen ohne Netzverfeinerung (NV), erster Netzverfeinerung (V1) und zweiter Netzverfeinerung (V2) mit dem Original-DGM aus Messungen von 2021 und DGM-W 2016

Im Rahmen einer Validierung wurde mit allen drei Modellen die Hydrodynamik in den ersten beiden Wochen des Septembers 2021 simuliert. Für diesen Zeitraum stehen auch Strömungs- und Wasserstandsdaten im Bereich des Fokusgebietes zur Verfügung (s. Kapitel 4.1). Als Randwerte wurden Wasserstandsmessdaten des Pegels Cuxhaven und Abflussmessdaten vom Pegel Neu Darchau verwendet.

Abbildung 103 zeigt die simulierten und gemessenen Wasserstände an den Pegeln Kollmar, Grauerort und Stadersand. Alle drei Pegel liegen an der Hauptrinne der Elbe. Der Pegel Kollmar befindet sich am stromabwärts gelegenen Ende der Pagensander NE, der Pegel Grauerort an der der Elbinsel Pagensand zugewandten Westseite der Hauptrinne und der Pegel Stadersand nahe der Mündung des Nebenflusses Schwinge. Die gemessenen Wasserstände werden von allen drei Modellen sehr gut wiedergegeben. Anhand der Fehlermaße ist zu erkennen, dass eine Verfeinerung des Gitters zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisse für den Wasserstand führt, was aufgrund der Lage der drei Pegel im Bereich der Hauptrinne auch zu erwarten war.



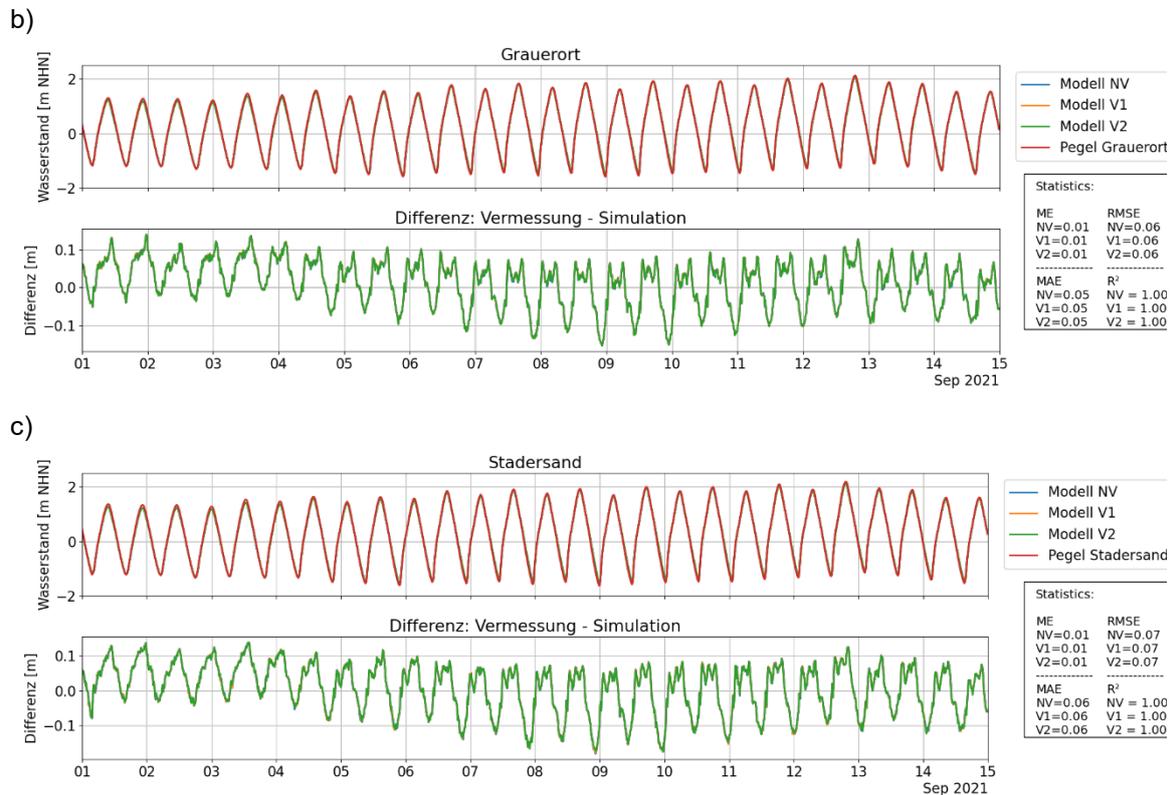


Abbildung 103: Vergleich der gemessenen und simulierten Wasserstände bei a) Kollmar, b) Grauerort und c) Stadersand sowie Fehlermaße ME (mittlerer Fehler), MAE (mittlerer absoluter Fehler), RMSE (mittlerer quadratischer Fehler) und R^2 = Bestimmtheitsmaß

Abbildung 104 zeigt einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten an der Dauermessstation D3, die sich auf Höhe der Insel Pagensand am Rand der Fahrrinne befindet. Es sind sowohl die sohnnah als auch oberflächennah gemessenen Werte dargestellt. Die simulierten Werte (2d, tiefengemittelt) verlaufen erwartungsgemäß zwischen diesen beiden Ganglinien und bilden die gesamte Dynamik sehr gut ab. Aufgrund der fehlenden direkten Vergleichbarkeit der Wert wurden keine Fehlermaße berechnet. Es zeigt sich auch hier (erwartungsgemäß), dass eine Verfeinerung des Gitters für den Bereich der Hauptrinne zu keiner signifikanten Verbesserung der Ergebnisqualität führt.

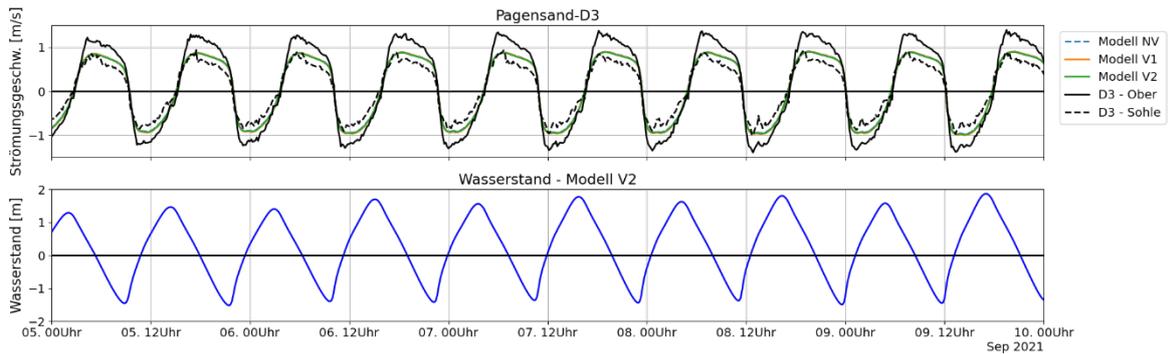
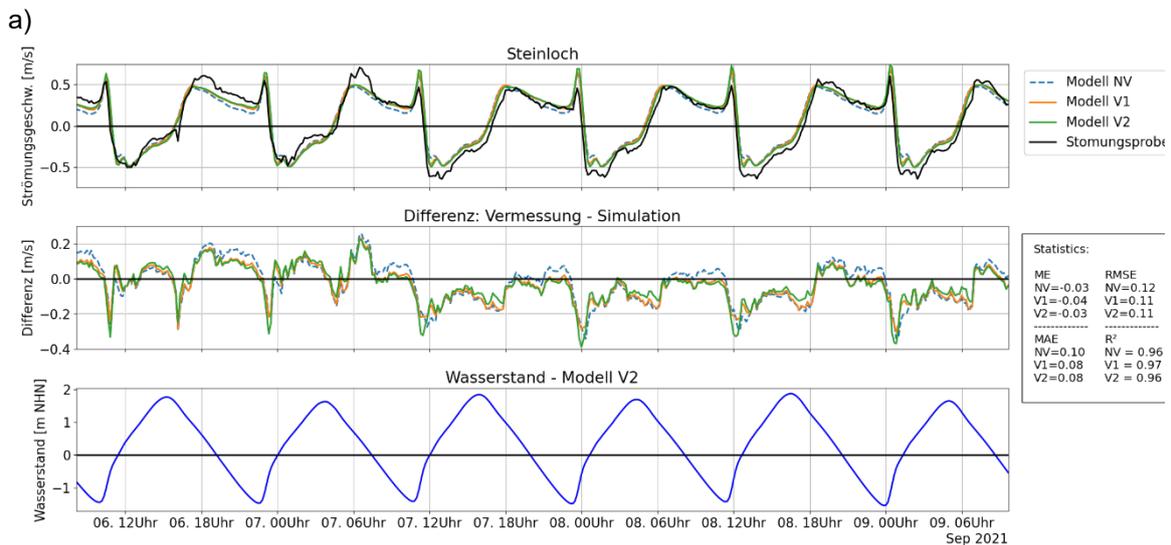


Abbildung 104: Vergleich der gemessenen und simulierten Strömungsgeschwindigkeit an der Station Pagensand-D3

Um das Modell für den Bereich des Fokusgebietes validieren zu können, wurden die Ergebnisse der im Vorhaben durchgeführten Strömungsmessungen verwendet (vgl. Kapitel 4.1). Der Vergleich der gemessenen mit den simulierten Geschwindigkeiten ist in Abbildung 105 dargestellt. Sowohl die gemessenen als auch die simulierten Geschwindigkeiten wurden zu Vergleichszwecken in Abhängigkeit von der gemessenen/simulierten Strömungsrichtung in positive (Querschnitt Steinloch 120° bis 300°) oder negative (Querschnitt Haseldorfer BE 70° bis 250°) Werte umgerechnet. Insgesamt werden die Strömungsverhältnisse von allen drei Modellen gut reproduziert, allerdings zeigt sich hier ein Effekt durch die Verfeinerung des Rechnernetzes. Die Abweichungen zwischen den gemessenen und simulierten Werten sind für die beiden Varianten V1 und V2 geringer als für Variante NV.



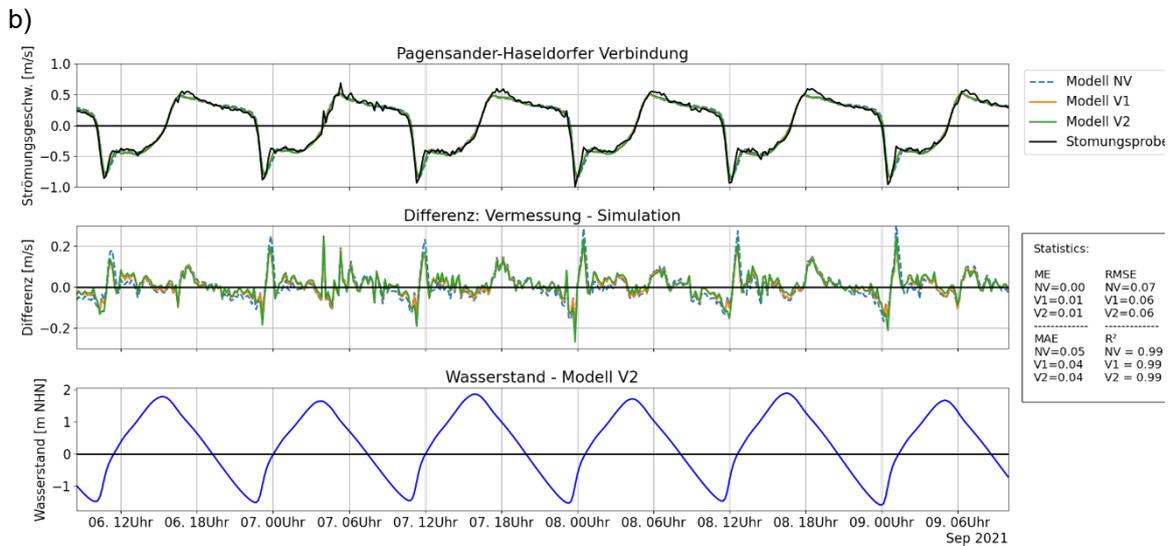


Abbildung 105: Vergleich der gemessenen und simulierten Strömungsgeschwindigkeit a) Steinloch und b) Pagensander- Haseldorfer Verbindung, positive Werte: stromabgerichtete Strömung, negative Werte: stromaufgerichtete Strömung

4.3 Strömungsmuster Ist-Zustand

Die aktuell vorherrschenden Strömungsmuster im Bereich der Pagensander NE und der Haseldorfer BE werden anhand der Simulationsergebnisse des zuvor beschriebenen Modells für den Zeitraum vom 01.09.2021 bis zum 15.09.2021 analysiert. In diesem Zeitraum herrschten mittlere Verhältnisse, d.h. die Wasserstände wurden durch die Meteorologie wenig beeinflusst. Der Abfluss in diesem Zeitraum lag etwas unterhalb des langjährigen² Mittelwerts (MQ= 696 m³/s). Zu Vergleichszwecken wurde derselbe Zeitraum auch mit höheren Abflüssen im Bereich des MHQ = 2000 m³/s und niedrigeren Abflüssen im Bereich des NQ = 128 m³/s simuliert. Für das betrachtete Fokusgebiet der Pagensander NE und der Haseldorfer BE ergaben sich hier im Vergleich zum mittleren Abflussszenario nur geringe Unterschiede, weshalb im Folgenden die Charakterisierung der Strömungsmuster für das mittlere Abflussszenario erfolgt.

Der Auswertzeitraum vom 01.09.2021 bis zum 15.09.2021 umfasst einen Spring-Nipp-Zyklus für den anhand der Simulationsergebnisse ausgewählte Tidekennwerte flächenhaft berechnet wurden. Abbildung 106 zeigt die mittleren und maximalen Flut- bzw. Ebbestromgeschwindigkeiten. Zur besseren Einordnung ist in den Darstellungen auch die Flachwasserlinie dargestellt. Die räumlichen Auswertungen zeigen für die beiden Nebeneiben deut-

² Bezugszeitraum 01.11.1874 - 31.12.2022

lich geringere Fließgeschwindigkeiten als in der Hauptrinne der Elbe. Innerhalb der Nebenelben treten im Bereich der tieferen Rinnen höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als in den Flachwasserbereichen

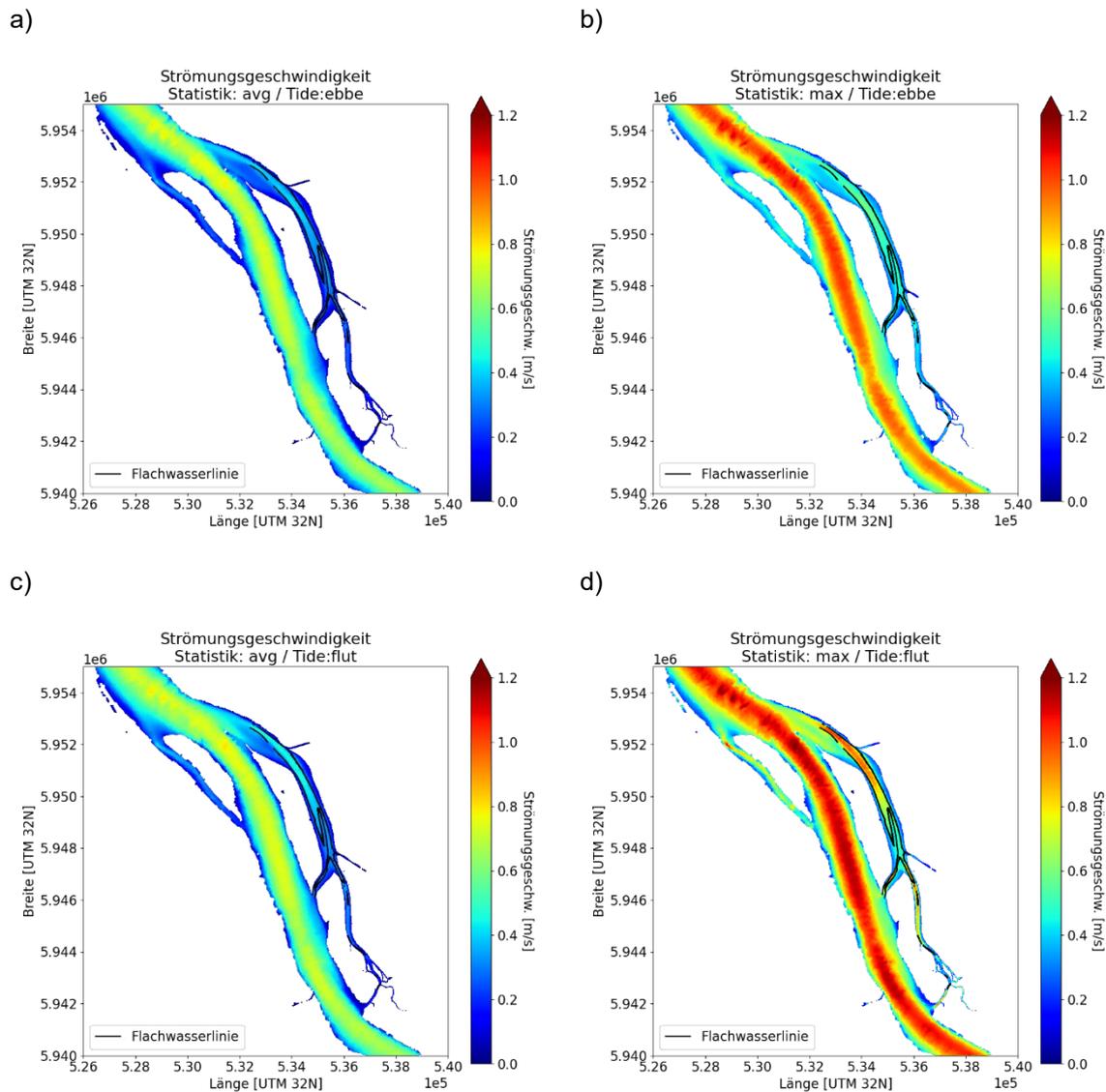


Abbildung 106 Tidekennwerte der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten für den Zeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021; a) mittlere Ebbestromgeschwindigkeiten; b) maximale Ebbestromgeschwindigkeiten; c) mittlere Flutstromgeschwindigkeiten und d) maximale Flutstromgeschwindigkeiten

. Grundsätzlich sind die Geschwindigkeiten im jeweils stromabwärts gelegenen Teil der Nebenelbe höher als im stromaufwärts gelegenen Teil. Insgesamt sind die Werte für die Pagensander NE größer als für die Haseldorfer BE. Die mittleren Geschwindigkeiten in den Flachwasserbereichen liegen sowohl für den Ebb- als auch für den Flutstrom unterhalb von 0,3 m/s. In den tieferen Rinnen, insbesondere in der Pagensander NE, werden mittlere

Geschwindigkeiten bis 0,5 m/s erreicht. Bei den maximalen Geschwindigkeiten zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Ebbe- und Flutstrom. Während bei Ebbestrom Werte bis etwa 0,6 m/s erreicht werden, sind es bei Flutstrom bis zu 1,0 m/s. Auch hier gilt, dass die höchsten Werte in beiden Nebeneiben im Bereich der tieferen Rinnen am stromaufseitigen Ende erreicht werden.

Das Verhältnis zwischen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten zeigt Abbildung 107 für die mittleren sowie die maximalen Geschwindigkeiten. Im Bereich der Pagensander NE und der Haseldorfer BE wird sowohl bei den mittleren als auch bei den maximalen Geschwindigkeiten die Flutstromdominanz deutlich, wobei Ausmaß der Dominanz beim Verhältnis der maximalen Geschwindigkeiten noch ausgeprägter ist. Die Verbindungsbereiche zur Hauptelbe (Pagensand Nord, Steinloch, Dwarsloch) werden am deutlichsten vom Flutstrom dominiert. Für wenige kleinräumige Bereiche innerhalb der Pagensander NE und der Haseldorfer BE zeigt sich eine schwache Ebbestromdominanz, u.a. nahe der Mündungen von Pinnau und Krückau sowie zentrale Pagensander NE.

Für den Hauptstrom der Elbe zeigt sich ebenfalls eine überwiegende Flutstromdominanz. Allerdings fallen auch Bereiche mit Ebbestromdominanz auf, die allesamt im Nahbereich der Verbindungen zu den Nebeneiben lokalisiert sind.

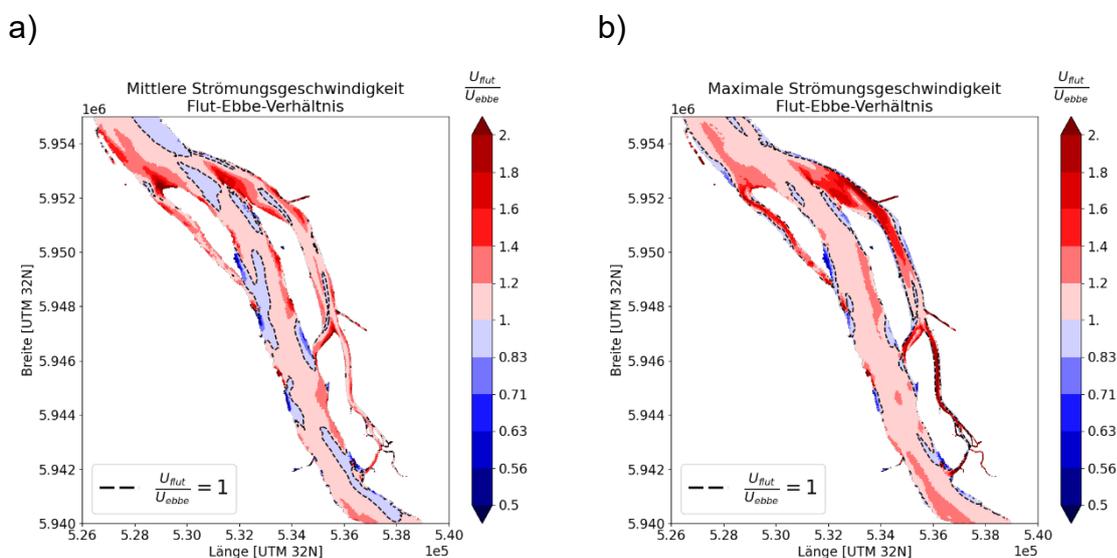


Abbildung 107: Verhältnis Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet, a) mittlere Strömungsgeschwindigkeiten, b) maximale Strömungsgeschwindigkeiten, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

Die Stauwasserdauer (hier definiert als Strömungsgeschwindigkeit unter 0,2 m/s) ist in Abbildung 108 dargestellt. Beide Nebeneiben weisen im Vergleich zur Hauptelbe eine längere Stauwasserdauer auf. Die längsten Stauwasserdauern von bis zu 5 h treten in der südlichen Haseldorfer BE, in den Watt- und Flachwasserbereichen der Pagensander NE sowie im

Bereich Bishorster Sand auf. Auf den Wattflächen in der Nähe des Pagensander Leitdammes sind die Stauwasserdauern kürzer, da die Strömungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich vergleichsweise zu anderen Wattflächen höher sind (vgl. Abbildung 106).

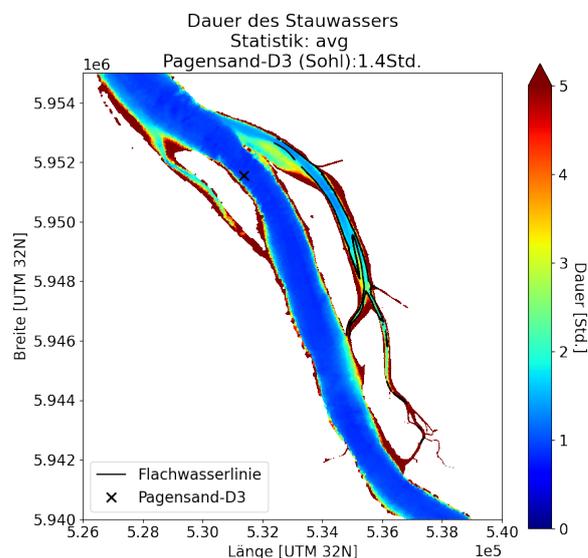


Abbildung 108: Mittlere Stauwasserdauern im Untersuchungsgebiet, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

Um die in Abbildung 106 gezeigten räumlichen Strömungsmuster in der Pagensander NE und der Haseldorfer BE noch detaillierter für Flach- und Tiefwasserbereiche zu beschreiben, wurden die beiden Nebenebenen in Abschnitte von einem Kilometer Länge unterteilt (Abbildung 109). Vor einer statistischen Analyse musste das unregelmäßige Rechennetz auf dem die Simulationsergebnisse vorlagen, in ein reguläres Gitter umgewandelt werden. Dazu wurden die Simulationsergebnisse zunächst trianguliert und anschließend auf ein Raster mit einer Zellauflösung von 10 m interpoliert (vgl. Abbildung 110). Für alle Rasterzellen innerhalb eines Abschnittes wurden dann die mittleren und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut und Ebbe ausgewertet und in Anhängigkeit von der Sohlhöhe im Streudiagrammen dargestellt. Abbildung 111 zeigt beispielsweise die Auswertung der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten für die Pagensander NE. Für jeden der 9 Abschnitte ist die detaillierte Verteilung der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten dargestellt. Zusätzlich ist zu erkennen bei welcher Sohlhöhe die jeweiligen Geschwindigkeiten auftreten und wie groß die Überlagerung der Verteilungen für Flut- bzw. Ebbestrom ist. Ein Wert von 1 bedeutet eine komplette Deckungsgleichheit für Flut- und Ebbestrom im Betrachtungsabschnitt. Ein Wert deutlich kleiner als 1 bedeutet deutlich voneinander abweichende räumliche Strömungsverteilungen bei Ebbe und Flut.

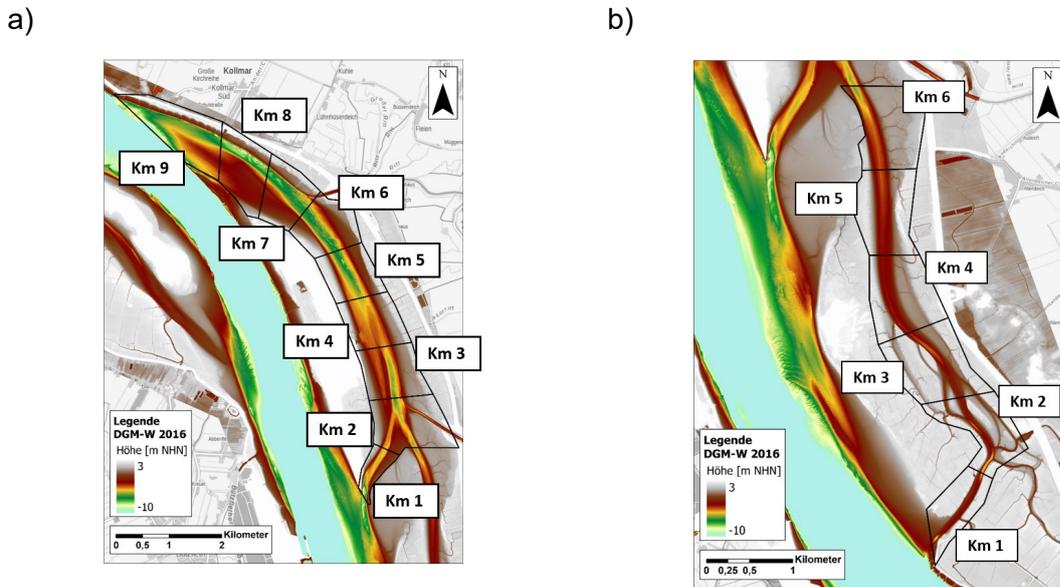


Abbildung 109: Abgrenzung der Kilometer von a) Pagensander Nebeneiben und b) Haseldorfer Binneneiben.

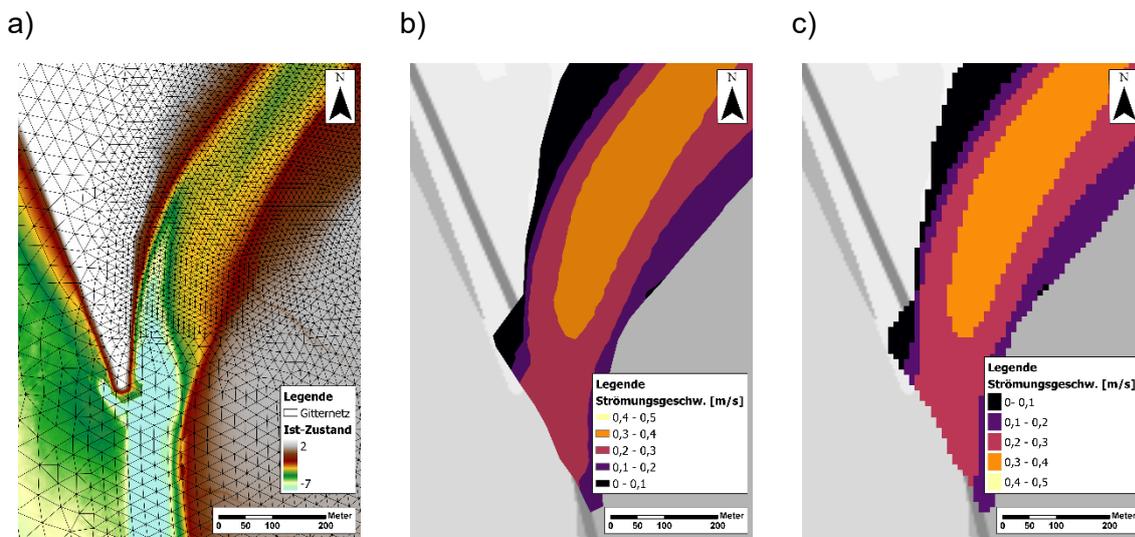


Abbildung 110: Steinloch-Beispiel für die Umwandlung von a) einem unregelmäßigen Netz in b) ein TIN-Modell und weiter in c) ein Raster (regelmäßiges Netz).

Im Bereich der Pagensander NE ähneln sich die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut und Ebbe mehr als die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Verteilungen der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten der beiden Tidephasen überlagern sich mit einer Ausnahme (Kilometer 9) zu mehr als 60 % (Abbildung 111). Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten überlagern sich mit zwei Ausnahmen (Kilometer 2 und 3) zu deutlich weniger als 60%. Tendenziell ist die Überlagerung in Abschnitten mit größeren Tiefen geringer.

Die Abweichungen sind in der Regel darauf zurückzuführen, dass die Flutstromgeschwindigkeiten höher sind als die Ebbestromgeschwindigkeiten.

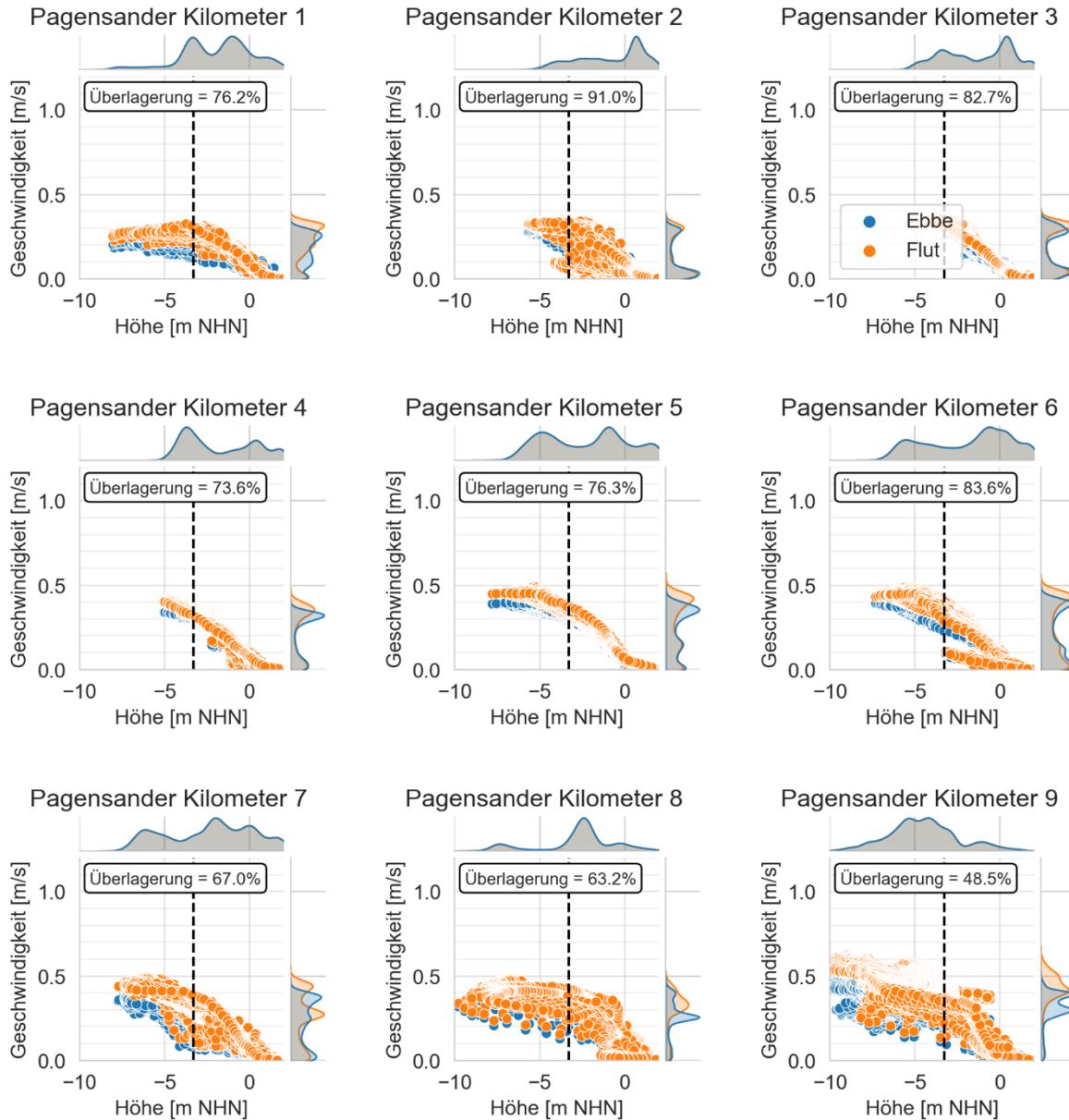


Abbildung 111: Pagensander NE mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wassertiefe für jeden Kilometer; die eingezeichnete vertikale Linie stellt die Grenze zwischen der Flachwasserzone und der Tiefwasserzone 2 dar, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

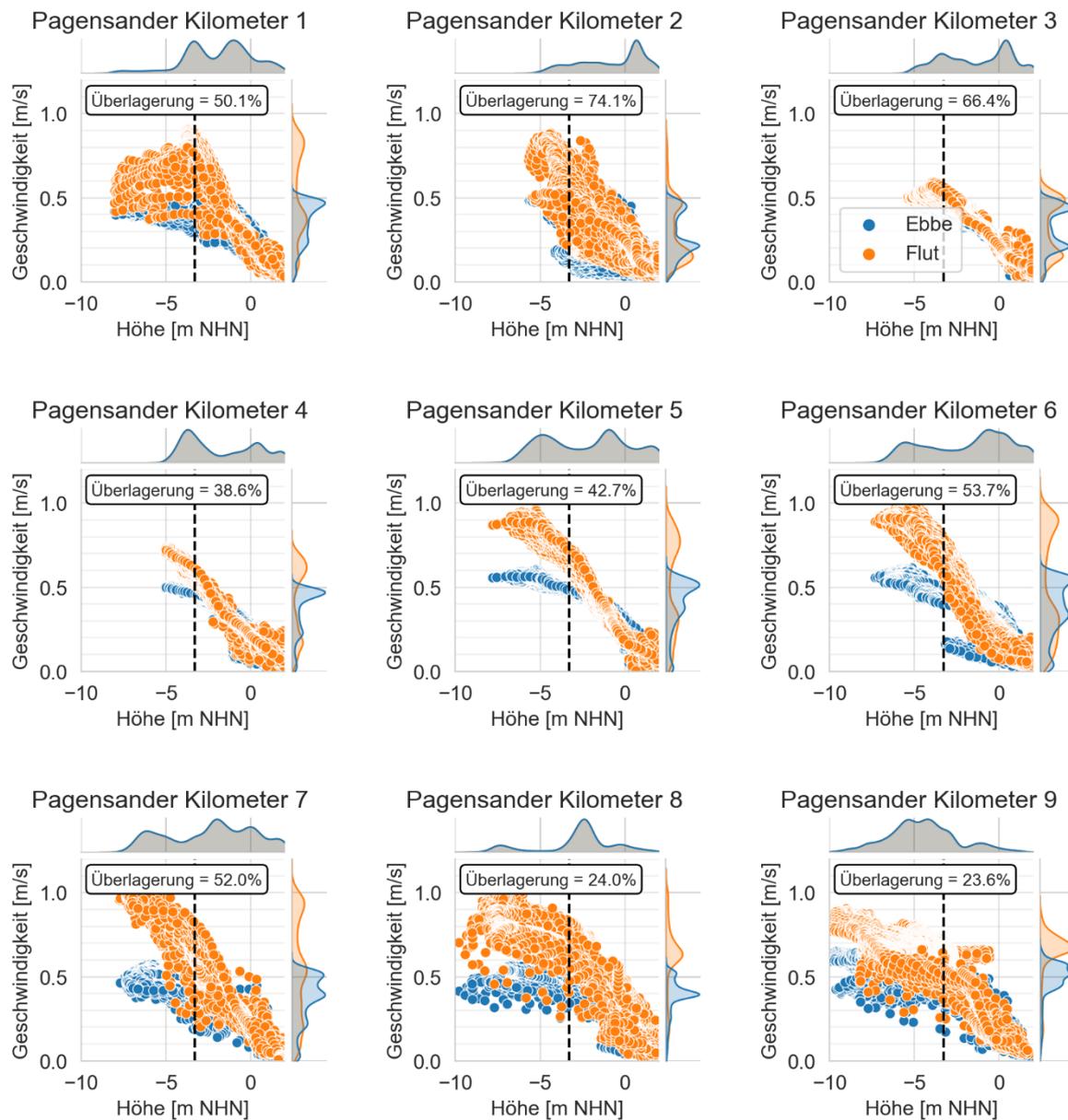


Abbildung 112: Pagensander NE maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wassertiefe für jeden Kilometer; die eingezeichnete vertikale Linie stellt die Grenze zwischen der Flachwasserzone und der Tiefwasserzone 2 dar, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

Um die Strömungsverteilungen in den einzelnen Abschnitten besser untereinander vergleichen zu können, wurden aus den Verteilungen Boxplots abgeleitet (Abbildung 113f). Dabei wurden Boxplots für den Flachwasserbereich, den Tiefwasserbereich und den Gesamtbereich (Flachwasser + Tiefwasser + Watt) erstellt. In den Diagrammen wird deutlich, dass die Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut im Vergleich zu den Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe dominieren und zwar sowohl für die mittleren als auch für die maximalen Ge-

schwindigkeiten. Im Bereich Steinloch (Kilometer 1) zeigt sich die bereits beschriebene Flut-rückströmung sehr deutlich bei den maximalen Geschwindigkeiten in Form einer klaren Dominanz der Flutstromgeschwindigkeiten (Abbildung 114).

Insgesamt zeigen die Auswertungen für nahezu die gesamte Pagensander NE sowohl räumlich als auch zeitlich eine diverse Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten.

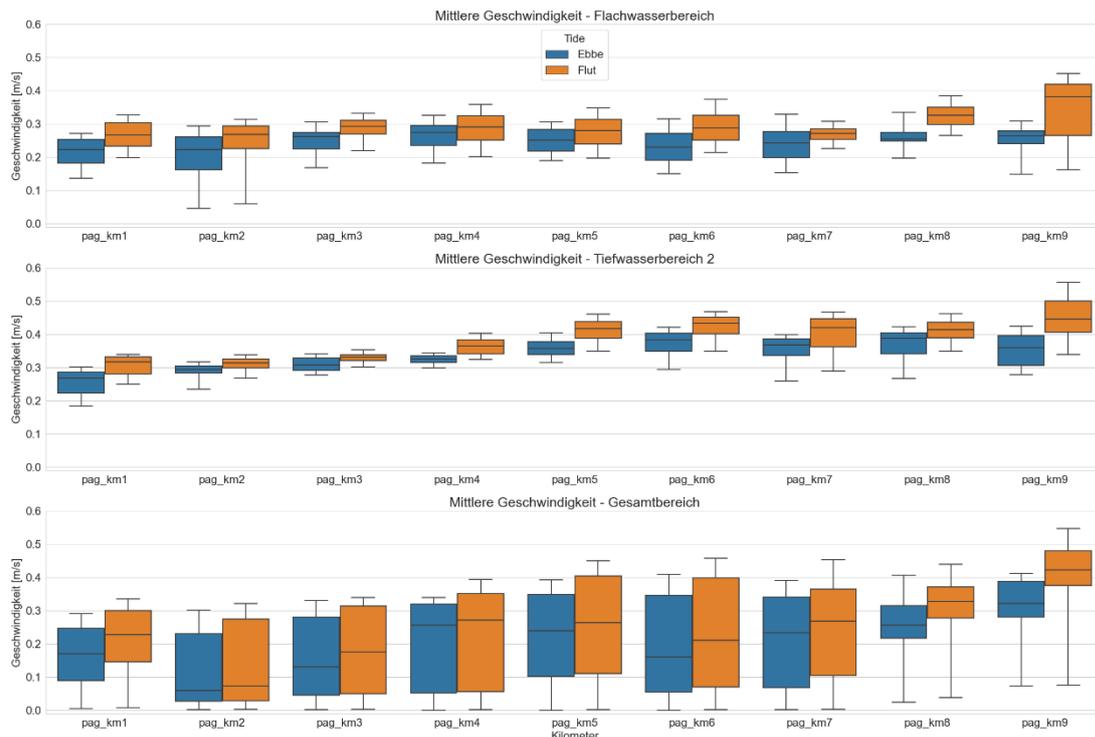


Abbildung 113: Pagensander NE, Boxplots der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

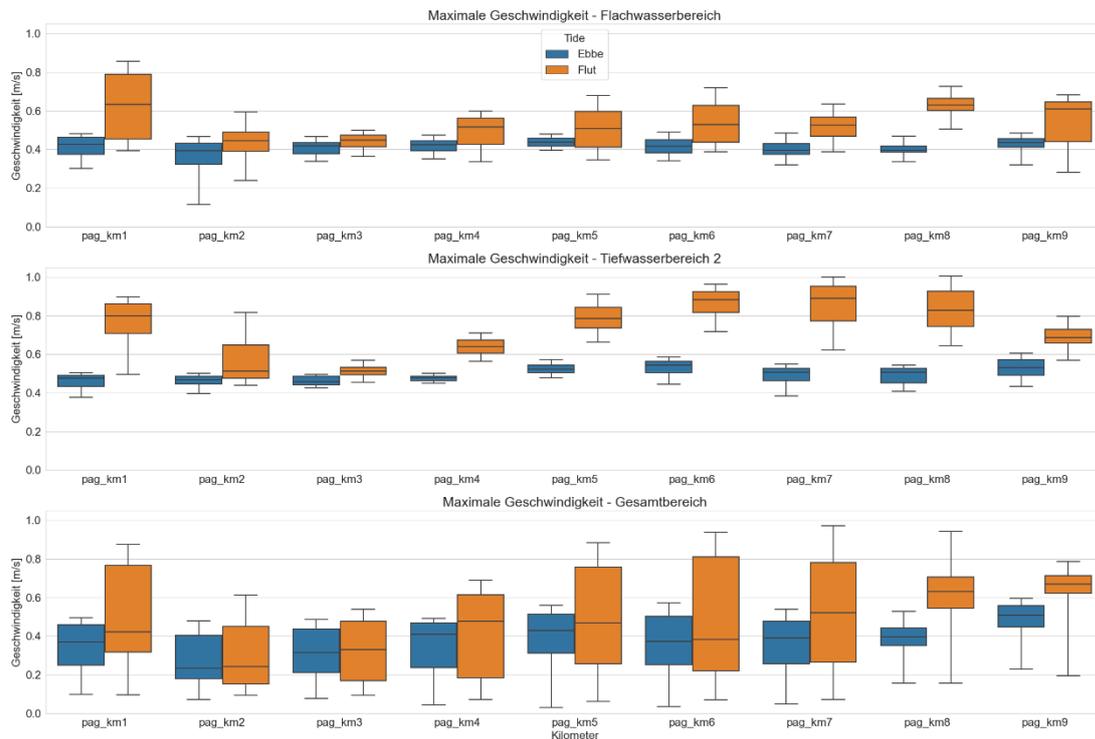


Abbildung 114: Pagensander NE, Boxplots der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

Für den Bereich der Haseldorfer BE zeigen die Auswertungen ein deutlich höheres Maß an Überlagerung der räumlichen Strömungsverteilungen bei Ebbe und Flut im Vergleich zur Pagensander NE (Abbildung 115f). Dies ist im Wesentlichen auf die Geometrie (Rinnensystem, geringere Tiefen) und insgesamt kleinere Bandbreiten der Strömungsgeschwindigkeiten zurückzuführen. Bei den mittleren Strömungsgeschwindigkeiten beträgt die Überlagerung von Ebbe- und Flutstrom in der gesamten Nebelbebe mehr als 80 % (Abbildung 115). Bei den maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sind es zum Teil deutlich mehr als 50% (Abbildung 116). In allen 6 Abschnitten der Haseldorfer BE, insbesondere bei Kilometer 5 und 6 (Übergangsbereich zur Pagensander NE), ist ein kleiner Anteil an sehr hohen maximalen Flutstromgeschwindigkeiten zu erkennen, welche aus der bereits beschriebenen Flutrückströmung im Steinloch resultieren.

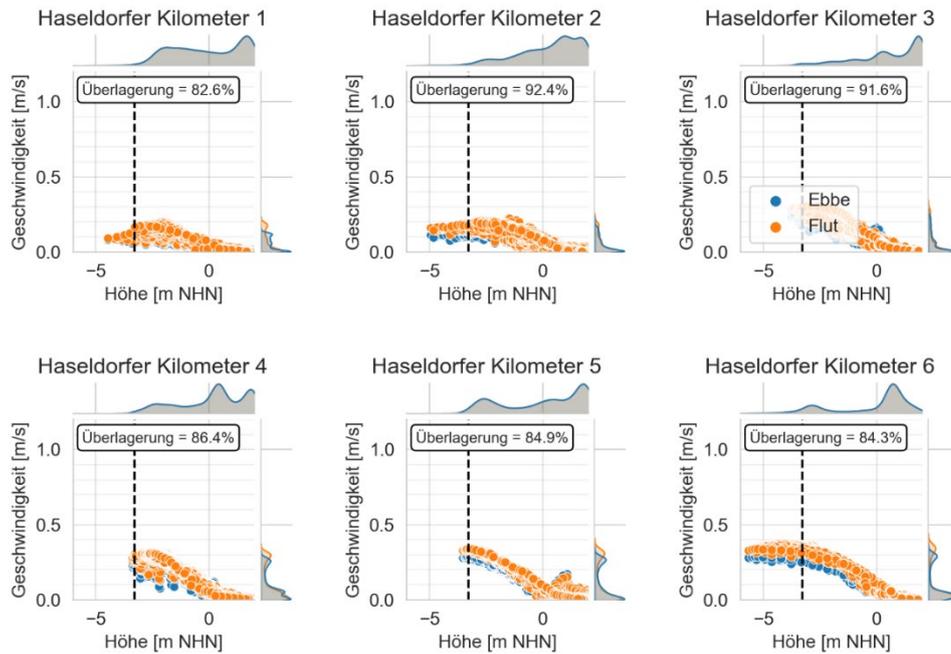


Abbildung 115: Haseldorfer BE mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wassertiefe für jeden Kilometer, die eingezeichnete vertikale Linie stellt die Grenze zwischen der Flachwasserzone und der Tiefwasserzone 2 dar, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

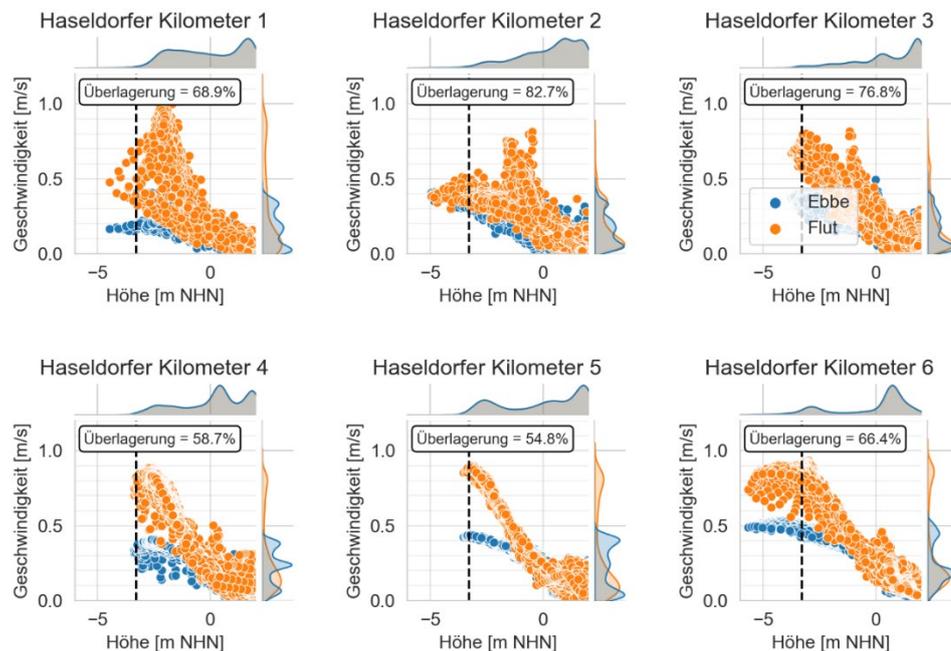


Abbildung 116: Haseldorfer BE mittlere Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wassertiefe für jeden Kilometer; die eingezeichnete vertikale Linie stellt die Grenze zwischen der Flachwasserzone und der Tiefwasserzone 2 dar, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

Die Boxplots in Abbildung 117 und Abbildung 118 zeigen eine generelle Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten von Süd (Kilometer 1) nach Nord (Kilometer 6). Die Boxen mit einem kleinen Wertebereich für das Tiefwassergebiet in Abbildung 117 sind auf den geringen Anteil an Tiefwasserflächen in der Haseldorfer Binnenelbe zurückzuführen. Bei den maximalen Strömungsgeschwindigkeiten (Abbildung 118) zeigt sich insgesamt eine deutliche Dominanz der Flutstromgeschwindigkeiten gegenüber den Ebbestromgeschwindigkeiten. Dies ist besonders für den ersten Kilometer (Dwarsloch) interessant und weist ebenfalls auf eine Flutrückströmung, ähnlich der im Steinloch, hin. In den Boxplots für den Gesamtbereich fallen die geringen Strömungsgeschwindigkeiten auf, die in den einzelnen Boxplots für den Flach- bzw. Tiefwasserbereich nicht enthalten sind. Diese Werte treten im Bereich der Wattflächen auf, die in den Abbildungen für den Flach- bzw. Tiefwasserbereich nicht enthalten sind.

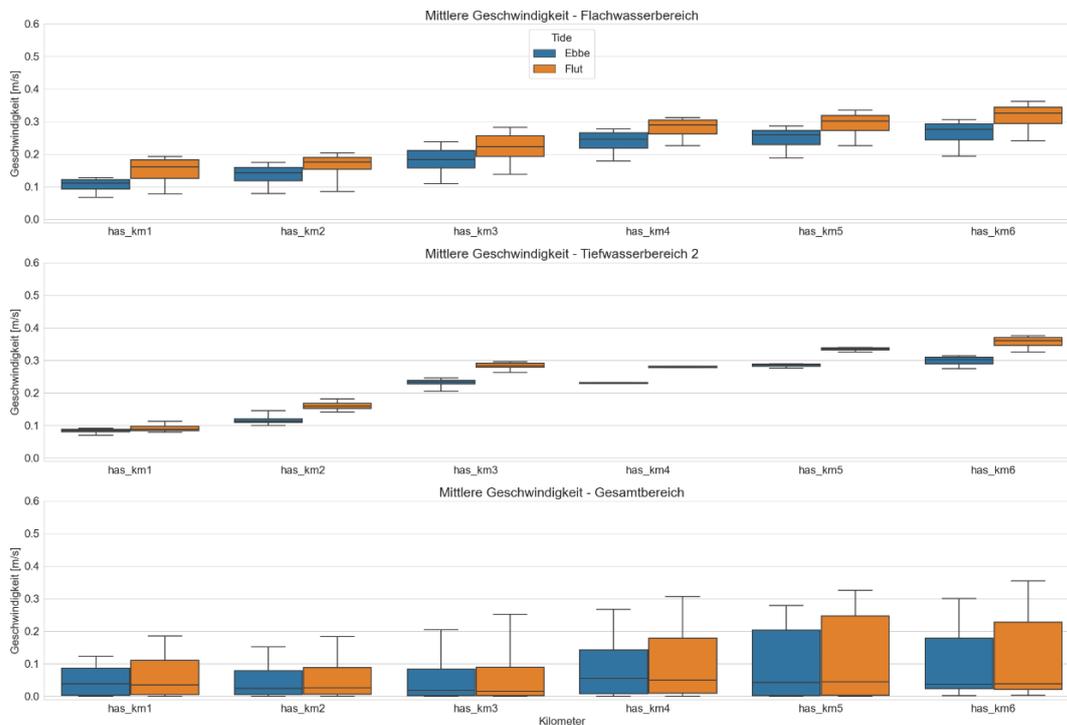


Abbildung 117: Haseldorfer BE, Boxplots der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten, Auswertzeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

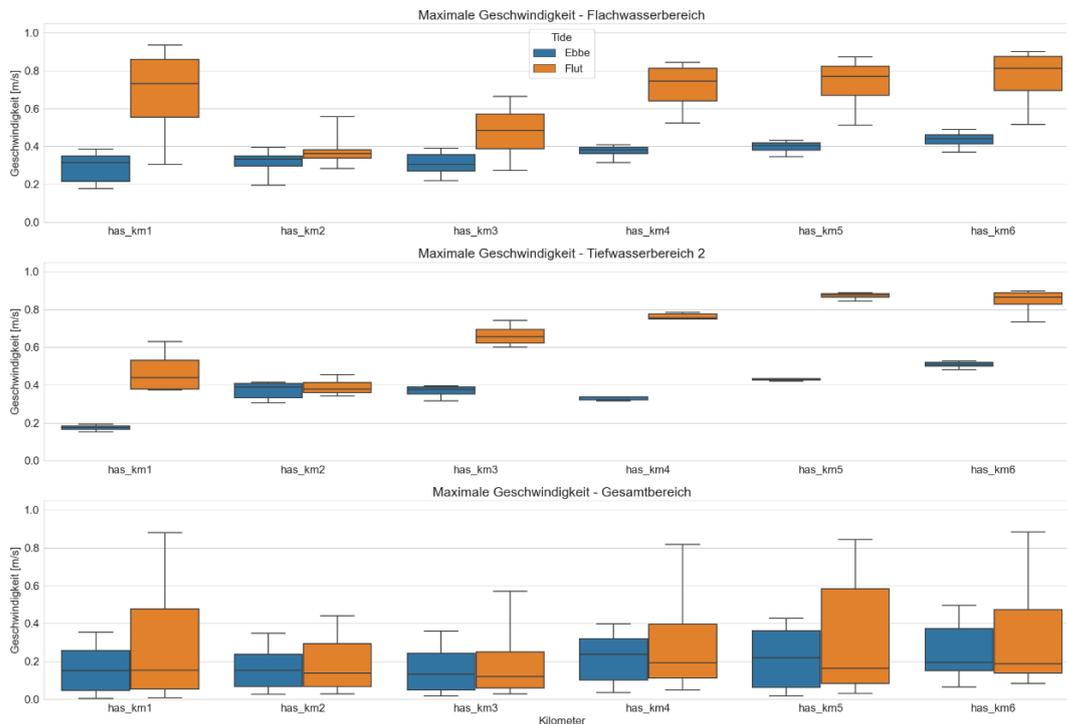


Abbildung 118: Haseldorfer BE, Boxplots der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten, Auswertez Zeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

4.3.1.1 Flutrückströmung im Bereich Steinloch

Das besondere Strömungsphänomen der Flutrückströmung im Bereich Steinloch wurde bereits in den Ergebnissen der Strömungsmessungen (Kapitel 4.1) deutlich. Das dort beschriebene Phänomen wird im Folgenden anhand von Simulationsergebnissen im Detail verdeutlicht. Abbildung 120 zeigt das Strömungsfeld zu vier Zeitpunkten, die in Abbildung 119 zeitlich verortet sind. Letztere bildet zudem die Verläufe der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Messprofile aus Kapitel 4.1 mit ab.

Zeitpunkt a (10:00 Uhr) zeigt das Strömungsbild am Ende des Ebbestroms. Sowohl in der Hauptrinne als auch in den beiden Nebelnelben ist die Strömung in Richtung Nordsee gerichtet. Etwa 70 Minuten später, also um 11:10 Uhr (Zeitpunkt b) ist die Strömung in der Hauptrinne gekentert. Im Bereich der Hauptrinne ist der Wasserstand schneller angestiegen als in den Nebelnelben, weshalb sich ein Gefälle in Richtung Nebelnelbe eingestellt, dass eine Durchströmung des Steinlochs in Richtung Nebelnelbe zur Folge hat. Die Strömungsgeschwindigkeit im Steinloch hat gegenüber dem Zeitpunkt a deutlich zugenommen, die Ausrichtung ist aber weiterhin in Richtung Ebbestrom (vgl. Abbildung 119). Am landseitigen Ende des Steinlochs verzweigt sich die Strömung zum einen in nördliche Richtung, wo sie im Bereich der Pinnaumündung auf den Flutstrom der Pagensander NE trifft, und

zum anderen in südliche Richtung in die Haseldorfer BE. Hier nimmt die Strömungsgeschwindigkeit (Ausrichtung Flutstrom) ebenfalls deutlich zu und erreicht ihren Höhepunkt um ca. 11:30 Uhr, also zwischen Zeitschritt b und c (vgl. Abbildung 119).

Um 11:40 Uhr (Zeitpunkt c) ist der Wasserspiegel zwischen Haupttrinne und Pagensander NE ausgeglichen und die Strömungsgeschwindigkeiten im Steinloch sind nur noch sehr gering. In der Haseldorfer BE ist die Strömungsgeschwindigkeit immer noch hoch, nimmt aber langsam ab.

Bei einem Wasserstand von etwa NHN+0 m hat sich in beiden Nebelnelben ein Wasser-
spiegelgefälle in Richtung des Flutstromes eingestellt, wie das Strömungsfeld um 13:00 Uhr
(Zeitpunkt d) beispielhaft zeigt. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind nun eine Zeit lang
konstant im Bereich von 0,5 m/s bis sie mit steigendem Wasserstand langsam abnehmen.

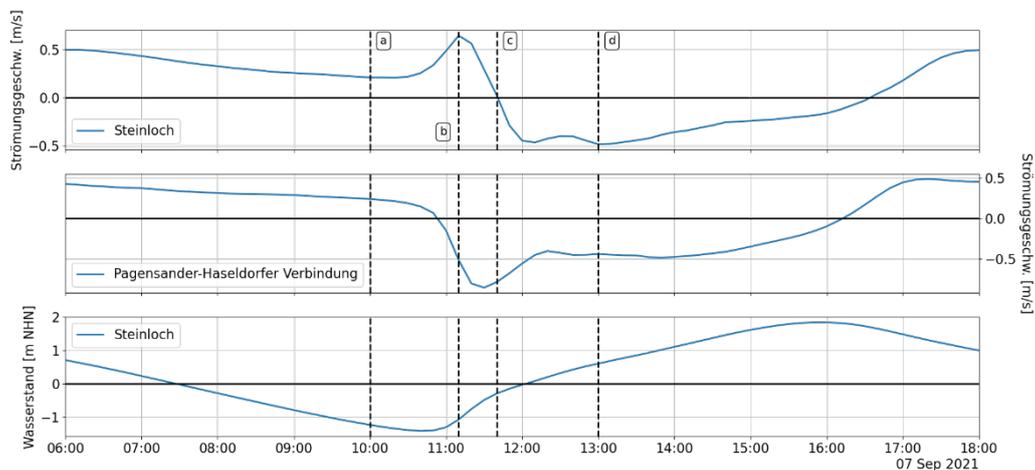


Abbildung 119: Simulierte (Modell V2) Strömungsgrößen im Steinloch für den 07.09.2021, vertikalen Linien kennzeichnen die Zeitpunkte für die die Fließfelder (Abbildung 120) dargestellt werden

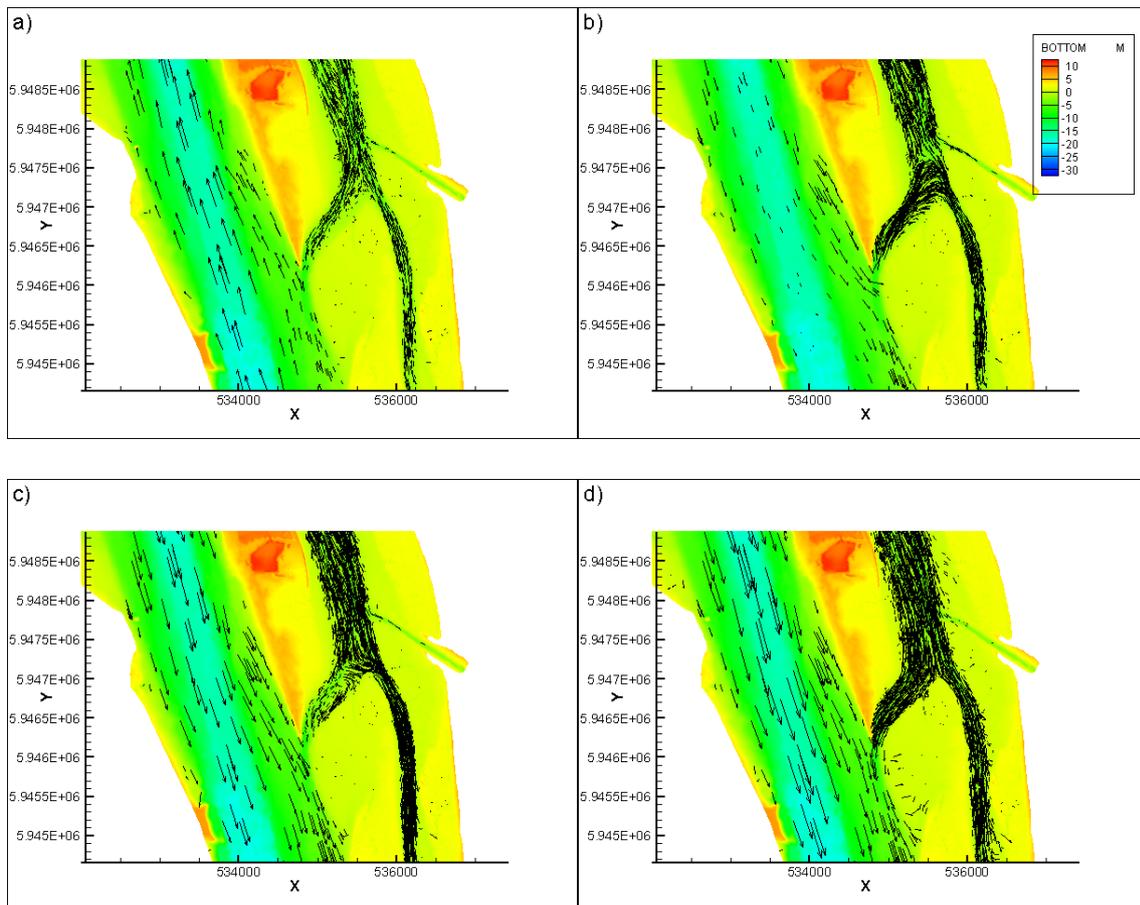


Abbildung 120: Simulierte Strömungsverhältnisse mit dem hochauflösenden Modell (V2); die Zeitpunkte der Ausschnitte sind durch die jeweiligen vertikalen Linien in der Abbildung 119 angegeben

4.3.1.2 Durchflussverhältnisse in den Nebenelben

Zur Analyse der Strömungsmuster wurde mit dem hochauflösenden Modell des Systems Pagensander NE / Haseldorfer BE der Zeitraum vom 01.09.2021 - 15.09.2021 simuliert. Da das Modell in das Gesamtmodell der Tideelbe integriert ist, liegen auch Ergebnisse für andere Nebenelben vor. Diese sind zwar nicht so hochauflösend wie die Pagensander NE und die Haseldorfer BE abgebildet, aber immer noch in ausreichend hoher Auflösung, um die Durchflussverhältnisse in guter Genauigkeit abzubilden.

Abbildung 121 zeigt die Auswertung der Simulationsergebnisse hinsichtlich der Abflussaufteilung zwischen der Haupt- und der jeweiligen Nebenelbe. Die Analyse zeigt, dass der Abflussanteil bei Flut in allen betrachteten Nebenelben größer ist als bei Ebbe. Den größten Abflussanteil insgesamt hat die Hahnöfer NE mit etwa 20% bei Flutstrom bzw. 17% bei Ebbestrom, gefolgt von der Glückstädter NE und der Pagensander NE (jeweils etwa 10% bei Flutstrom und 8% bei Ebbestrom). Der Abflussanteil der Lühesander Süderelbe, der Schwarztonnensander NE und der Haseldorfer BE beträgt sowohl bei Flut- als auch bei

Ebbstrom weniger als 5% (Lühesander SE) bzw. weniger als 2% (Schwarztonnensander NE, Haseldorfer BE).

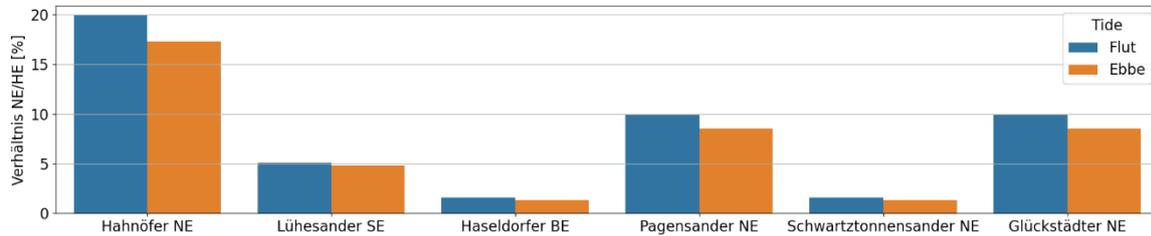


Abbildung 121: Simulierte Abflussverhältnisse im Bereich der Nebelben, Auswertezeitraum 01.09.2021 - 15.09.2021

Der Vergleich der simulierten Werte mit den Auswertungen von (ENTELMANN 12.02.19a) zeigt für die meisten Nebelben eine gute Übereinstimmung (vgl. Abbildung 122). Die beiden Ausnahmen bilden die Glückstädter Nebelbe und die Pagensander NE, deren Abflussanteil von (ENTELMANN 12.02.19a) deutlich höher eingeschätzt wird als es die Modellierungsergebnisse zeigen. Mögliche Ursachen für die Unterschiede sind in den unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen sowie in den unterschiedlichen Methoden (punktuelle Messwerte vs. flächenhafte Simulationsergebnisse) zu finden.

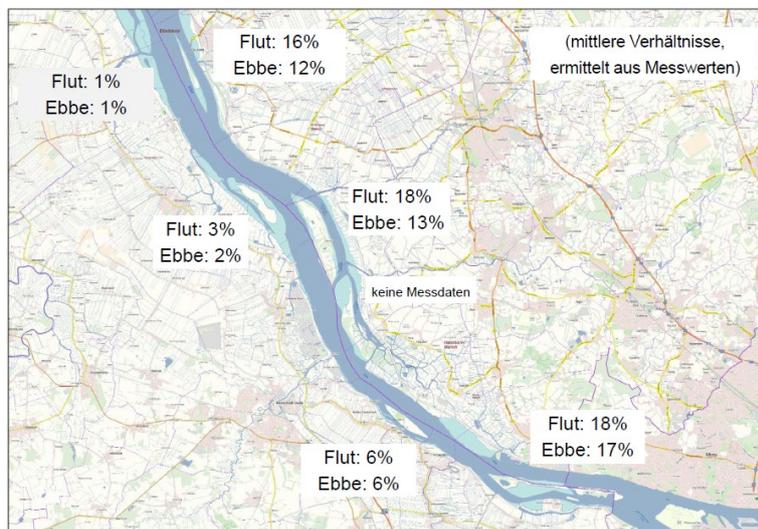


Abbildung 122: Anhand von Messwerten bestimmte Abflussverhältnisse im Bereich der Nebelben aus (EN- TELMANN 12.02.19a)

4.4 Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Strömung

Neben der einer detaillierten Beschreibung der Strömungsmuster für den Ist-Zustand wurde das im Vorhaben erstellte Modell auch zur Untersuchung der Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen auf das Strömungsgeschehen verwendet. Im Fokus der Untersuchungen standen vor allem naturnahe Maßnahmen, die nicht nur aus strombaulicher Sicht vorteilhaft sind, sondern auch aus naturschutzfachlicher Sicht, wie z.B. Maßnahmen zur Schaffung von Flachwasser- und/oder Wattbereichen, Uferverlegungen sowie eine Verfeinerung möglicher Rinnen-Geometrien.

Bei der Entwicklung geeigneter Maßnahmen wurde die Expertise von Fachleuten einbezogen. Hierzu fand am 15.09.2022 in der Hamburger Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Landwirtschaft (BUKEA) eine Informations- und Austauschveranstaltung Nebelben statt, an der Experten aus unterschiedlichen Fachgebieten teilnahmen. Ein Großteil des Teilnehmerkreises war bereits in der AG Nebelben, die im Rahmen des Forum Tideelbe entstanden ist, engagiert. Aufgabe des Forums [Tideelbe] war es Lösungen zu finden, die [die] nachteilige Tidedynamik dämpfen und gleichzeitig wieder mehr hochwertige Tide-Lebensräume an der Unterelbe [...] schaffen (Forum Tideelbe 2020). Die AG Nebelben hatte in diesem Zusammenhang die Reaktivierung der Nebelben im Fokus. Beispielhaft wurde die Pagensander NE vertieft betrachtet.

Bei dem Treffen am 15.09.2022 wurde der Fokus im Anschluss an die Vorstellung der Untersuchungsergebnisse des Vorhabens zur aktuellen morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelben auf das System Pagensander Nebelbe / Haseldorfer Binnenelbe gerichtet. Die präsentierten Auswertungen der Mess- und Simulationsergebnisse zur Beschreibung der Strömungsmuster im System bildete die Grundlage für eine Arbeitssession in der Maßnahmen zur Verbesserung der hydrodynamischen und ökologischen Bedingungen identifiziert und dem Grunde nach entwickelt wurden. Die Notwendigkeit des Anpassungsbedarfes gründete sich auf der Feststellung, dass die Entwicklung des Systems Pagensander NE / Haseldorfer BE vor allem in eine Richtung geht, d.h.:

- vor allem Flachwasserflächen gehen verloren,
- Wattflächen nehmen zu, wachsen immer weiter auf und
- strömungsdiverse Lebensräume nehmen infolge der Entwicklungen ab.

Vom Teilnehmerkreis wurde darauf aufbauend die Zielsetzung entwickelt, den wertvollen Zustand des Systems zu erhalten, indem der Entwicklung der letzten Jahrzehnte entgegen gewirkt wird. Dies soll durch die Schaffung von stabilen, wenig unterhaltungsintensiven Flachwasserzonen (positiver Effekt auf Sauerstoffeintrag, Lebensraum für Fische etc.) aus

den bestehenden Tiefwasserflächen und in geringem Umfang aus den zunehmenden Wattflächen³ erreicht werden. Mit der Formulierung „stabil“ ist dabei die Stabilisierung in einem dynamischen Gleichgewicht gemeint. Die Maßnahmen sollen dazu beitragen, Bereiche mit vielfältigen Strömungsmustern zu schaffen, die geeignete Lebensbedingungen für standorttypische Fischarten und andere Organismen bieten.

Im Rahmen der Arbeitssession wurde eine Vielzahl von Maßnahmen an diversen Standorten vorgeschlagen und diskutiert. Ein Schwerpunkt bildete sich im Bereich des Steinlochs (vgl. Abbildung 123). Im Nachgang wurden die nachfolgenden 8 Maßnahmen ausgewählt und im Vorhaben modelltechnisch untersucht:

- a) Aufweitung Pagensand Nord (Aufweitung Einlaufbereich, kein Rückbau Leitdamm aus nautischen Gesichtspunkten)
- b) Aufweitung Steinloch (klein)
- c) Aufweitung Haseldorfer BE
- d) Aufweitung Dwarsloch
- e) Kombination b) + c) + d)
- f) Rinne im Bereich der südl. Pagensander NE/Steinloch in Anlehnung an die von der BAW im Rahmen des Forum Tideelbe untersuchten Rinne
- g) Aufweitung Steinloch (groß)
- h) Querschnittseinengung im Bereich Steinloch (reduzierte Unterhaltung)

³ Der Umgang mit den Wattflächen für die nach §30 BNatSchG ein Zerstörungs- und Veränderungsverbot gilt, war unter den Teilnehmern teilweise strittig.

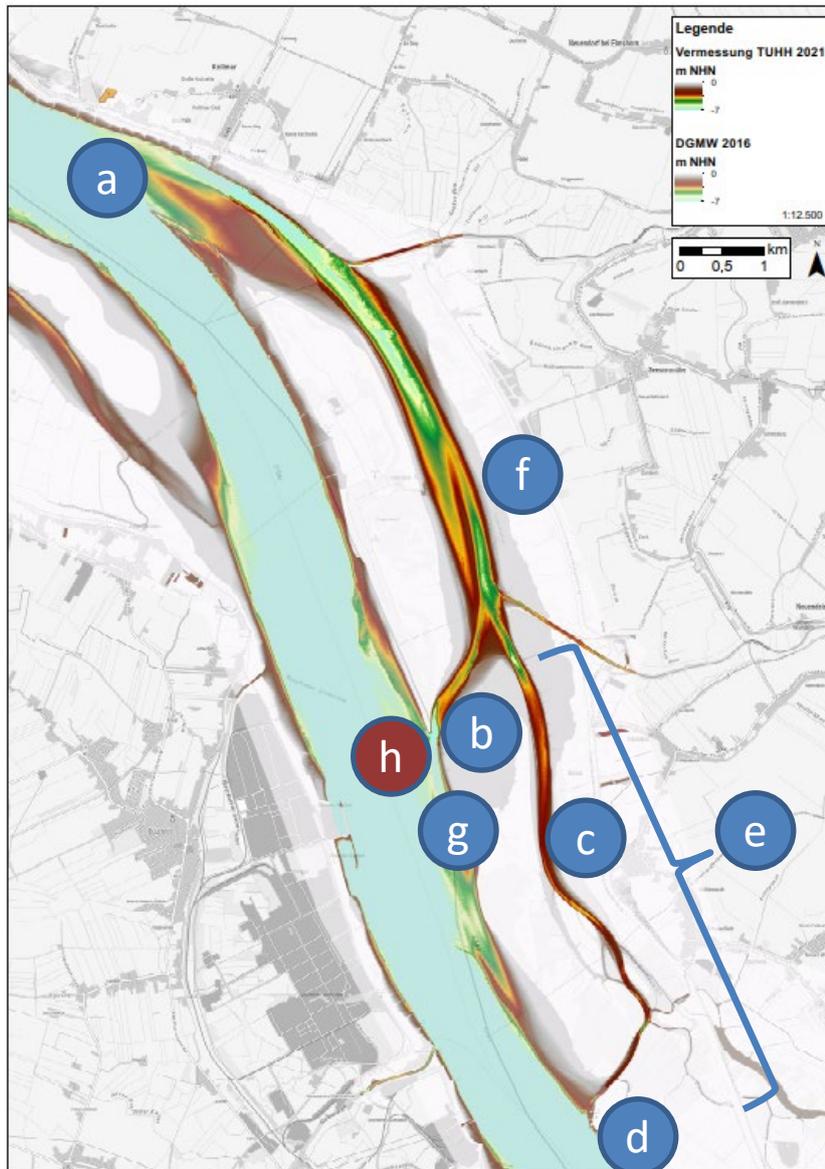


Abbildung 123: Verortung der identifizierten und untersuchten Maßnahmen

Details zur Ausgestaltung sind in den Maßnahmensteckbriefen zu finden, die für jede Maßnahme erstellt wurden (siehe Anhang A4). Die Steckbriefe wurden im Rahmen eines weiteren Treffens der Gruppe am 09.11.23 vorgestellt und diskutiert. Im Ergebnis besteht jeder Steckbrief aus 4 Abschnitten. Abschnitt 1 liefert Informationen zur Bathymetrie, Volumenänderung und Auswirkungen auf die Morphozonen. In Abschnitt 2 sind flächenhaft die Auswirkungen auf die Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. In Abschnitt 3 erfolgt eine Analyse und Bewertung der jeweiligen Maßnahme hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten, der Fischfauna und der Morphologie. Der 4. Abschnitt ist auf Anregung der Expertengruppe entstanden und zeigt flächenhaft die Auswirkungen der jeweiligen Maßnahme auf die Stauwasserdauer. Der Steckbrief von Maßnahme e) enthält zudem einen flächenhaften

Vergleich der Auswirkungen der Überlagerung der simulierten Änderungen der maximalen Flutgeschwindigkeiten für die Einzelmaßnahmen b), c) und d).

Um die Wirkungen bzw. die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen auf das Strömungsgeschehen im System Pagensander NE / Haseldorfer BE darzustellen und untereinander zu vergleichen, erfolgt ergänzend zu den flächenhaften Darstellungen in den Steckbriefen eine integrierte Darstellung in Form von Boxplots der Strömungsgeschwindigkeiten, die in Kapitel 4.3 vorgestellt wurden. Die Darstellung erfolgt wie dort erläutert abschnittsweise für jeden Kilometer und getrennt für die Haseldorfer BE (Abbildung 124) und die Pagensander NE (Abbildung 125).

In den beiden Darstellungen sind bestimmte Werte der Fließgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Dabei handelt es sich um Grenzwerte für Strömungsgeschwindigkeiten, die ein subadulter Rapfen dauerhaft (U_{dauer}) bzw. kurzzeitig ($U_{\text{gesteigert}}$) toleriert. Durch diese Verknüpfung von Simulationsergebnissen mit den Eigenschaften rheophiler Arten soll ein weiterer Mehrwert der Ergebnisse aus dem Vorhaben beispielhaft verdeutlicht werden.

Die Fischart Rapfen in der subadulten Lebensphase wurde exemplarisch aus einem Kollektiv von 6 Fischarten ausgewählt. Die Auswahl der Arten erfolgte auf Basis des Natura 2000-Programms (IBP Arbeitsgruppe 2011b). Die Lebensphasen wurden gewählt anhand von Informationen zum Vorkommen im Bereich der Pagensander NE / Haseldorfer BE aus dem Fachinformationssystem (FIS) der Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe 2023).

Als Referenzwerte für die Belastung von Fischen durch Strömungsgeschwindigkeiten wurden gemäß DWA (2010) zwei Arten von Strömungsgeschwindigkeiten verwendet: U_{dauer} und $U_{\text{gesteigert}}$. Der erste Parameter beschreibt die obere Grenze der "normalen Schwimmggeschwindigkeit", die ein Fisch gerade noch länger als 20 Stunden ermüdungsfrei halten kann, während der zweite die obere Grenze definiert, die ein Individuum mindestens 200 Minuten lang aufrechterhalten kann (ebd.). Die Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Arten (vgl. Tabelle 31) erfolgt auf Grundlage des in DWA (2010) beschriebenen funktionalen Zusammenhangs zwischen Körperlänge und Strömungsgeschwindigkeit in Verbindung mit den Angaben in Wöbking (2020), der auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche Bereiche der Körperlängen für Fischarten in unterschiedlichen Lebensphasen angibt. Entsprechend der für die Parameter beschriebenen Charakteristik erfolgt in den Abbildungen eine Gegenüberstellung von U_{dauer} mit den mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und $U_{\text{gesteigert}}$ mit den maximalen Strömungsgeschwindigkeiten.

Die Modellrechnungen zeigen, dass die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Pagensander NE und der Haseldorfer BE nicht wesentlich über 1 m/s liegen. Bei der Betrachtung der Werte für $U_{\text{gesteigert}}$ in Tabelle 31 ist ersichtlich, dass die maximal tolerierte Geschwindigkeit entsprechend für nahezu alle ausgewählten Arten eingehalten ist. Da der subadulte Rapfen die geringsten Werte aufweist, wurde seine Grenzwerte beispielhaft ausgewählt.

Tabelle 31: Strömungsgeschwindigkeitsgrenzwerte für ausgewählte Fischarten in Anlehnung an DWA (2010) und Wöbking (2020)

Fisch	Lebensphase	U _{dauer} [m/s]	U _{gesteigert} [m/s]
Finte (Alosa fallax)	Adult	0,46	2,75
Rapfen (Leuciscus aspius)	Subadult	0,32	0,8
Flussneunauge (Lampetra fluviatilis)	Adult	0,8	2
Meerneunauge (Petromyzon marinus)	Adult	1,6	4
Schnäpel (Coregonus oxyrinchus)	Subadult	0,58	1,45
Lachs (Salmo salar)	Subadult	0,98	2,45

Anhand von Abbildung 124 (Haseldorfer BE) und Abbildung 125 (Pagensander NE) sind die Auswirkungen der betrachteten Maßnahmen auf die mittleren und maximalen Flut- bzw. Ebbestromgeschwindigkeiten abzulesen. Es wird deutlich, dass die Maßnahmen das Strömungsgeschehen in den beiden Nebeneiben beeinflussen. Die Wirkung erfolgt vor allem lokal im Nahfeld der jeweiligen Maßnahme, z.B. bewirkt die Aufweitung des Dwarslochs (Maßnahme d) im Bereich der Maßnahme (Haseldorfer BE, km 1) eine Reduktion der Bandbreite der Strömungsgeschwindigkeiten und damit eine einheitlichere Strömung. Teilweise zeigen sich jedoch auch in anderen Bereichen, die weiter von der Maßnahme entfernt sind, Wirkungen, z.B. bewirkt die Maßnahme c) Aufweitung der Haseldorfer BE auch im Bereich Dwarsloch (Haseldorfer BE, km 1) eine deutliche Zunahme der mittleren und maximalen Geschwindigkeiten (vgl. Abbildung 124).

Insgesamt zeigt sich, dass die Auswirkungen der Maßnahmen mit zunehmenden Volumen, welches durch die Maßnahme geschaffen wird, größer werden. Allerdings bleibt auch die Wirkung der größeren Maßnahmen auf den Bereich des Systems Pagensander NE / Haseldorfer BE beschränkt. Auf lokaler Ebene bewirken viele der Maßnahmen im Vergleich zum Ist-Zustand eine - wenn auch geringfügige - Diversifizierung des Strömungsgeschehens.

Die vom subadulten Rapfen tolerierten Grenzwerte sind in der Haseldorfer BE fast überall eingehalten. Dies gilt mit Einschränkungen auch für den Bereich der Pagensander NE. Die Ausnahme bildet das stromabseitige Ende (km 8 und 9) in dem der Grenzwert für die Dauerschwimmgeschwindigkeit flächig überschritten wird.

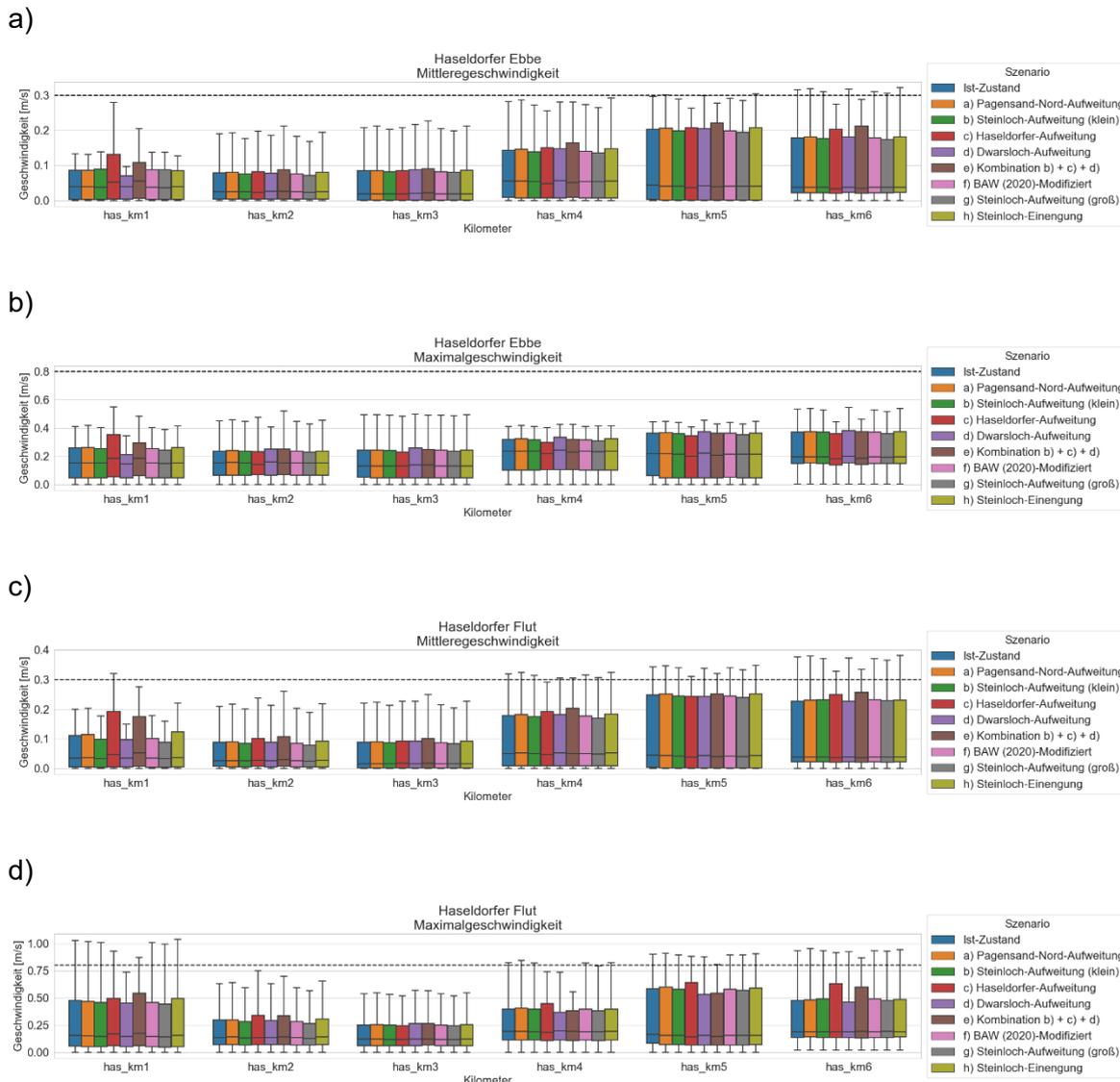


Abbildung 124: Boxplots der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten für den Ist-Zustand sowie für die betrachteten Maßnahmen im Bereich der Haseldorfer BE; a) mittlere Ebbestromgeschwindigkeit, b) maximale Ebbestromgeschwindigkeit, c) mittlere Flutstromgeschwindigkeit und d) maximale Flutstromgeschwindigkeit; gestrichelte Linien stellen die Werte von U_{dauer} (Abbildungen a) und c)) und $U_{gesteigert}$ (Abbildungen b) und d)) für die ausgewählte Fischart subadulter Rapfen dar

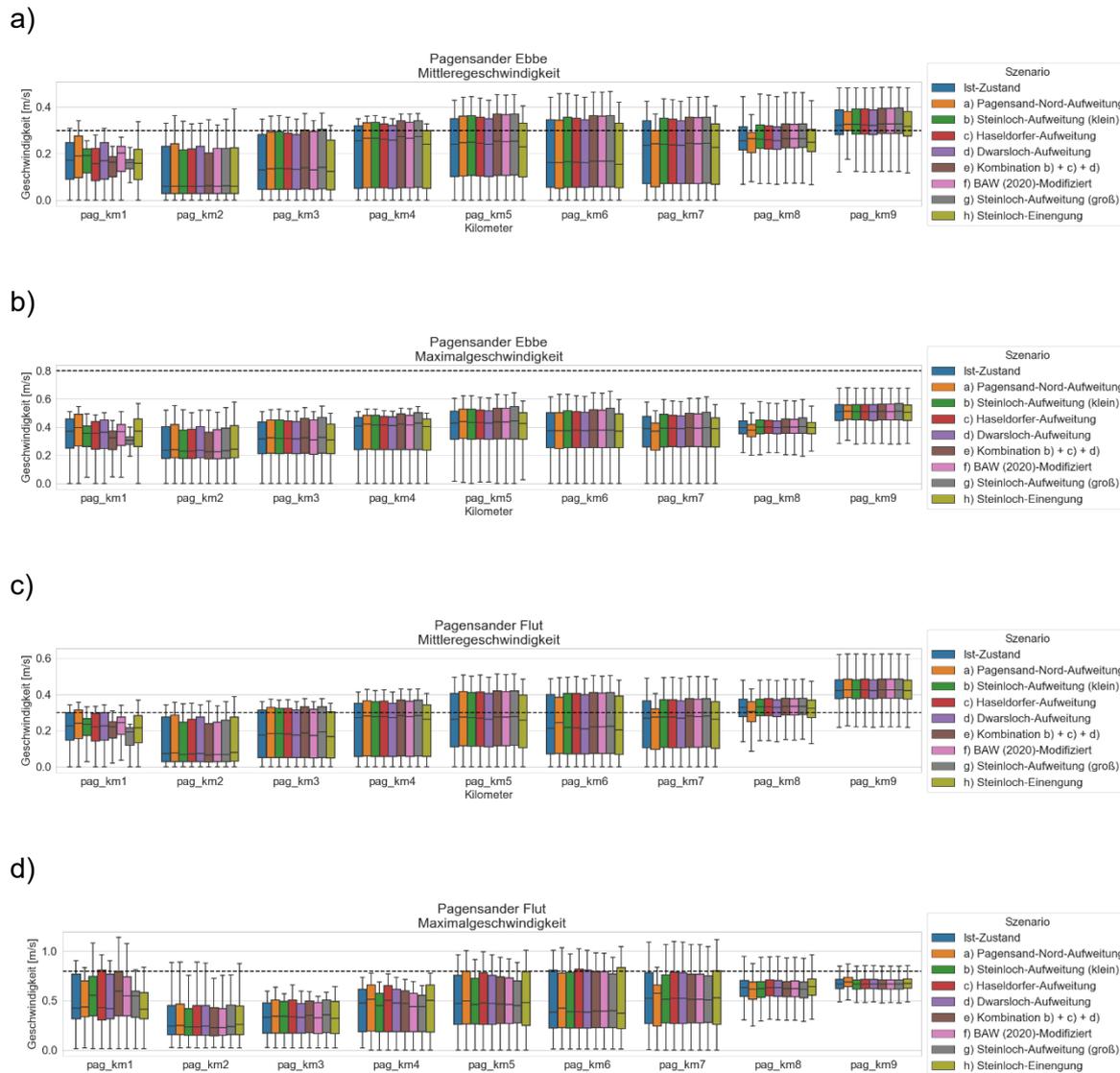


Abbildung 125: Boxplots der simulierten Strömungsgeschwindigkeiten für den Ist-Zustand sowie für die betrachteten Maßnahmen im Bereich der Pagensander NE; a) mittlere Ebbestromgeschwindigkeit, b) maximale Ebbestromgeschwindigkeit, c) mittlere Flutstromgeschwindigkeit und d) maximale Flutstromgeschwindigkeit; gestrichelte Linien stellen die Werte von U_{dauer} (Abbildungen a) und c)) und $U_{gesteigert}$ (Abbildungen b) und d)) für die ausgewählte Fischart subadulter Rapfen dar

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die im Vorhaben erarbeiteten Untersuchungsergebnisse dienen der Verbesserung des Verständnisses der morphologischen Entwicklungen und der hydrodynamischen Prozesse in den Nebelbensystemen der Tideelbe. Darüber hinaus verdeutlichen die Ergebnisse am Beispiel des Gebietes Pagensander Nebelbe / Haseldorfer Binnenelbe die Auswirkungen von unterschiedlichen Maßnahmen auf die Hydrodynamik, stellen einen Zusammenhang zu Eigenschaften rheophiler Fischarten her und ermöglichen eine Abschätzung der Auswirkungen der betrachteten Maßnahmen auf die Morphologie. Damit leisten die Untersuchungsergebnisse insgesamt einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses des Gesamtsystems Tideelbe.

Im Hinblick auf das Vorhabenziele „Verbesserte Einschätzung der Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelben auf der Grundlage von bestehenden Daten“ und bezüglich der im Vorhaben neu erhobenen flächenhaften Fächer-echolotdaten können folgende wichtigste Ergebnisse festgehalten werden:

- Hinsichtlich der Datenaufnahme des IWB (inkl. Messtechnik, Messverfahren) sowie die Datenauswertung:
 - Der Vergleich der Vermessung des Drempels vom Krückau-Sperrwerk mit den Bauplänen ergab maximale Abweichungen von etwa $\pm 0,1$ m, was deutlich unterhalb der höchsten von der IHO (International Hydrographic Organization) geforderten Genauigkeit von $\pm 0,2$ m liegt.
 - Hinsichtlich der Standards wurden im Rahmen der Vermessungsarbeiten durch die TUHH die höchsten Anforderungen der IHO (exclusive) sowohl für TVU („Total Vertical Uncertainty“) als auch THU („Total Horizontal Uncertainty“) einhalten. Die Anforderungen von aQua (Angewandtes Qualitätsmanagement in der Gewässervermessung) sind hinsichtlich der TVU etwas und hinsichtlich der THU deutlich strenger als die Anforderungen von IHO exclusive. Die definierten Grenzen für TVU wurden bei der Messung der TUHH gerade eben eingehalten bzw. knapp überschritten. Die definierten Grenzen für THU wurden hingegen deutlich überschritten. Hier stellt sich allerdings die Frage, warum der laut aQua anzustrebende Wert so deutlich unterhalb der Anforderung IHO exclusive liegt.
 - Je größer die Abweichungen der Boots-Korrekturparameter yaw, pitch und roll sind, desto größer sind die Abweichungen im Differenzenraster. Abweichungen des yaw-Winkels führen insbesondere bei vorhandenen Sohlstrukturen zu größeren Abweichungen. Ein abweichender roll-Winkel verursacht deutlich größere Auswirkungen im Differenzenraster als abweichende Werte für yaw und pitch. Bereits bei einer Abweichung des roll-Winkels um $0,5^\circ$ sind große Auswirkungen zu erkennen. Zudem wird der Fehler umso größer,

- je länger der Schall-Ping im Wasser unterwegs ist, d.h. bei größeren Wassertiefen und bei den äußeren (seitlichen) Beams des Fächerlotes.
- In der ersten Stufe der Datenfilterung führt eine manuelle Filterung der Daten vor der Anwendung von statistischen Filtern zu deutlich besseren Ergebnissen. Keiner der untersuchten statistischen Filter (2σ und 4σ) war in der Lage, die (zeitaufwändige) manuelle Filterung in der ersten Stufe sinnvoll zu ersetzen. In der zweiten Stufe der Datenfilterung ist die Anwendung von statistischen Filtern sinnvoll. Im Ergebnis ist bei einer unregelmäßigen Sohle (z.B. Transportkörper) der weniger strenge 4σ -Filter und bei einer regelmäßigen Sohle und geringeren Wassertiefen der strengere 2σ -Filter zu bevorzugen.
 - Hinsichtlich Interpolation der Vermessungsdaten auf ein regelmäßiges Raster (Produkterstellung):
 - Mit zunehmender Rasterzellenweite des DGM gehen Informationen zu kleinräumigen Strukturen wie z.B. Sohlformen und steilen Sohlgradienten verloren. Die gewählte Interpolationsmethode kann die Abnahme des Informationsgehalts mit zunehmender Rasterzellengröße im Einzelfall etwas abmildern aber nicht gänzlich kompensieren.
 - Die integrale Betrachtung der einzelnen Nebenebenen anhand der Dichtefunktionen der Rasterzellenhöhen zeigt bei verschiedenen Auflösungen (1 m, 5 m, 10 m) für die Hahnöfer NE, die Lühesander SE und die Pagensander NE keine signifikanten Unterschiede, was vermutlich auf die vergleichsweise großen Bereiche zurückzuführen ist. Für die schmale Haseldorfer BE, die im Vergleich zu den Sohlgradienten einen vergleichsweise kleinen Messbereich hat, zeigen sich in den Dichtefunktionen bereits bei einer Auflösung von 5 m deutliche Abweichungen zur Auflösung von 1 m. Je kleiner und strukturreicher ein Betrachtungsbereich ist, desto höher sollte das DGM aufgelöst sein.
 - Mit steigender Mindestanzahl von Messpunkten nimmt die Anzahl von Rasterzellen im DGM mit gültigen Werten ab. Hierdurch gehen u.U. wertvolle Detailinformationen verloren. Im Gegenzug ist ein signifikanter positiver Einfluss auf die Standardabweichung erst ab einer Mindestanzahl von 10 Werten pro Rasterzelle festzustellen.
 - Hinsichtlich der Aussagekraft der im Vorhaben genutzten Bestandsdaten (Seekarten, DGM-W) sowie der im Vorhaben erhobenen Daten (DGM):
 - Die quantitative Aussagekraft von älteren Datensätzen (z.B. Seekarten) ist deutlich geringer als von Datensätzen, die in der jüngeren Vergangenheit

entstanden sind, z.B. DGM-Ws. Allerdings können anhand der älteren Datensätze qualitative Aussagen zum Zustand und zur morphologischen Entwicklung der Nebelnelben getroffen werden.

- Bei der Verwendung von DGM-W für Analysen hängt die quantitative Aussagekraft von der Datenquelle ab, die zur Erstellung des DGM-W verwendet wurde. Für Bereiche, die mit einem flächenhaften Messverfahren (Laserscan, Fächerlot) erfasst wurden, können anhand des DGM-W neben qualitativen auch belastbare quantitative Aussagen getroffen werden. Für Bereiche, die nur abschnittsweise mit einem punkt- oder linienhaften Messverfahren (Einstrahlecholot) erfasst wurden, ist die Aussagekraft eher qualitativ. Dies gilt insbesondere für Gewässerabschnitte mit vielfältigen Sohlformen (Transportkörper, steile Gradienten). Eine Möglichkeit zur Verfeinerung des Aussagen besteht, darin nicht einen pauschalen Unsicherheitsbereich zu verwenden wie z.B. ENTELMANN (12.02.19a), sondern auch die Informationen aus der Datenquellkarte einzubeziehen und den Unschärfbereich individuell in Abhängigkeit des Messverfahrens festzulegen.
- Für die im Vorhaben erstellten DGMs der Nebelnelben und der abgeleiteten Differenzenplots wurde durchgängig ein Unschärfbereich von ± 10 cm verwendet, um einen möglichst hohen Informationsgehalt auch über kleinere Änderungsraten zu erhalten. Dieser Wert wird u.a. gestützt durch die Ergebnisse der Drempelvermessung und der durchgeführten Tests sowie Sensitivitätsuntersuchungen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur aktuellen Morphologie sowie zu aktuellen morphologischen Entwicklungen ausgewählter Nebelnelben zeigen:

- Vielfältige Morphologien in den vier betrachteten Nebelnelben
 - Hahnöfer NE: große Tiefenvariation, teilw. Sohlstrukturen, heterogene Sedimentverteilung (Grobsand bis Schluff)
 - Lühesander SE: große Tiefenvariation, teilw. Sohlstrukturen, überwiegend Fein- und Mittelsand
 - Haseldorfer BE: geringere Tiefenvariation, überwiegend Schluff
 - Pagensander NE: große Tiefenvariation, überwiegend Feinsand und Schluff
- Sehr individuelle morphologische Entwicklungen
 - Hahnöfer NE: insgesamt schwacher Verlandungstrend, Tiefwasserflächen nehmen leicht ab, Flachwasserflächen nehmen leicht zu, Wattflächen (Beispiel Mühlenberger Loch) nehmen nicht weiter zu, wachsen aber weiter auf

- Lühesander SE: insgesamt morphologisch stabil, Tiefwasserflächen und Flachwasserflächen verändern sich nur geringfügig, Wattflächen wurden nicht betrachtet
- Haseldorfer BE: insgesamt Verlandungstrend, Tiefwasserflächen nehmen deutlich ab, Flachwasserflächen ändern sich kaum, Wattflächen nehmen deutlich zu
- Pagensander NE: insgesamt Verlandungstrend, Tiefwasserflächen nehmen leicht ab, Flachwasserflächen und Wattflächen (Beispiel Bishorster Sand) nehmen deutlich zu

Die Ergebnisse der Modelluntersuchungen zum Strömungsgeschehen im System der Pagensander NE / Haseldorfer BE sowie zu den Auswirkungen von Maßnahmen zeigen:

- Die räumlichen und zeitlichen Strömungsmuster sind bereits vielfältig (s. Strömungs- und Boxplots in Kap. 4).
- Die vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten bieten den betrachteten rheophilen Arten passende Lebensbedingungen. Davon teilweise ausgenommen ist das stromabseitige Ende der Pagensander NE, wo die mittleren Geschwindigkeiten, insbesondere bei Flutstrom, vergleichsweise hoch sind.
- Die entwickelten und untersuchten Maßnahmen beeinflussen das Strömungsgeschehen sowie die Sedimentdynamik und wirken aufgrund der gewählten Größenordnungen insbesondere lokal.
- Die Maßnahmen bewirken lokal Verbesserungen (im Sinne der Ökologie und des Strombaus) des Strömungs- und/oder Sedimentationsgeschehens und tragen dazu bei, die negativen Auswirkungen der historischen Entwicklungen abzumildern.
- Es ist davon auszugehen, dass durch die Maßnahmen (Aufweitungen) die Verlandungstendenzen im jeweiligen Nebeneibensystem nicht signifikant reduziert werden können. Allerdings können die Sedimente gezielt gefangen werden bzw. ausgewählte Baggerbereiche „angelegt“ werden, um den Verlandungstrend in angrenzenden Bereichen zu reduzieren. Durch aktives Sedimentmanagement kann die Pufferwirkung gesteuert und langfristig erhalten werden.
- Auswirkungen auf das Gesamtsystem Tideelbe (hier insb. auf den Stromauftransport) sind erwartungsgemäß von untergeordneter Größenordnung.

Die Ergebnisse zur aktuellen morphologischen Entwicklung sowie zu den Auswirkungen von Maßnahmen im System Pagensander NE / Haseldorfer BE wurden im Rahmen des Projektabschlusstreffens am 09.11.23 vorgestellt und mit Experten diskutiert. Die Ergebnisse sowie der daraus abgeleitete Ausblick lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die in den Maßnahmensteckbriefen formulierten Aussagen zu Strömungsgeschwindigkeiten, Fischfauna und Morphologie wurden in der Gruppenarbeit bestätigt.

- Maßnahmen im Bereich Steinloch (Aufweitung über die bisherigen Unterhaltungsmaßnahmen der WSV hinaus bis in den Bereich der Wattflächen des Bishorster Sandes unter Inkaufnahme verstärkter Neusedimentation, u.a. mit Zielrichtung Minderung von Sedimenteinträgen in die Haseldorfer Binnemelbe und in Folge Abschwächung dortiger Verlandungsprozesse) wurden von der Mehrheit der TeilnehmerInnen des Expertenworkshops als zielführend erachtet.
- Die Begriffe Strömungsdiversität und morphologisches Gleichgewicht müssen im Rahmen konkreter Maßnahmenplanungen näher definiert und sofern möglich quantifiziert werden.
- Von der Expertengruppe wurde die Bedeutung des Funktionsraums herausgehoben im Hinblick auf:
 - Flachwasserzonen, die Rückzugs- bzw. Fluchräume für Fische, insbesondere für schwächere Schwimmer und heranwachsende Fische, sind und zudem wichtig sind für den physikalischen Sauerstoffeintrag in die Tideelbe
 - Wattgebiete, die Rast- und Rückzugsflächen für die Avifauna sind.
- Als Herangehensweise an die nächsten Aufgaben bleibt festzuhalten:
 - Um vermehrt Flachwasserzonen zu schaffen, muss in Wattgebiete eingegriffen werden. Eine Lösungsmöglichkeit für den Zielkonflikt „Flachwasser vs. Watt“ wäre es, den Lebensraumtyp (LRT) Ästuarien ganzheitlich zu betrachten.
 - Zudem ist eine Gesamtschau aller Nebelnelben im System Tideelbe erforderlich. Dabei ist eine Betrachtungstiefe anzustreben, welche vergleichbar ist mit der des präsentierten Vorhabens Systemverständnis Nebelnelben.
 - Die bestehenden Maßnahmen sind weiter zu entwickeln und weiter zu priorisieren.
 - Eine Umsetzung sollte mittels kleinen, zügig realisierbaren Pilotmaßnahmen beginnen (Vermeidung Fokus auf große politisch, rechtlich wie finanziell nur schwer umzusetzende Maßnahmen). Um deren Wirksamkeit möglichst exakt zu quantifizieren, ist eine wissenschaftliche Begleitung angeraten.

6 Zusammenfassung

Das Institut für Wasserbau (IWB) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) führte im Rahmen einer Forschungsk Kooperation mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee (WSA Elbe-Nordsee) im Zeitraum April 2019 bis Juni 2023 das Vorhaben „Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelnelben als Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe“ (kurz: Systemverständnis Nebelnelben) durch. Ziel des Vorhabens war es, die hydrodynamischen Prozesse und morphologischen Entwicklungen in den Nebelnelben-Systemen besser zu verstehen und damit einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses des Gesamtsystems Tideelbe zu leisten. Im betrachteten Untersuchungsgebiet zwischen Elbe-km 632 und Elbe-km 683 befinden sich die Hahnöfer Nebelnelbe, die Lühesander Süderelbe, die Haseldorfer Binnenelbe, die Pagensander Nebelnelbe, die Schwarztonnensander Nebelnelbe, die Glückstädter Nebelnelbe und das Wischhafener Fahrwasser. Im Vorhaben wurden drei wesentliche Ziele verfolgt:

- 1 Verbesserte Einschätzung der Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelnelben auf der Grundlage von bestehenden Daten
- 2 Detaillierte Beschreibung der Morphologie sowie der morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelnelben auf der Grundlage von verfügbaren Daten sowie von im Zuge des Vorhabens neu aufgenommenen flächenhaften Daten
- 3 Numerische Modelluntersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses von hydrodynamischen und morphologischen Prozessen und deren Veränderungen infolge wasserbaulicher Maßnahmen in den Nebelnelben

Das gesamte Vorhaben, insbesondere die Bearbeitung des letztgenannten Ziels, war besonders vom Leitgedanken der Vereinbarkeit von Strombau und Naturschutz beeinflusst, der auch die Arbeiten der AG Nebelnelben im Rahmen des Forum Tideelbe prägte.

Im vorliegenden Abschlussbericht sind die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse des Vorhabens Systemverständnis Nebelnelben dokumentiert. Einige Inhalte, wie z.B. die detaillierte Konzeption des Vorhabens, sind im Abschlussbericht verkürzt dargestellt, wurden aber in den Zwischenberichten ausführlich behandelt oder sind in den Anhängen A1 bis A4 dargestellt.

Die heutige Gestalt der Tideelbe mit einer Hauptrinne und abschnittsweise abzweigenden Nebenrinnen, die als Nebelnelben bezeichnet werden, ist in vor allem in Verbindung mit strombaulichen Maßnahmen, aber auch aber auch einhergehend mit Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes der Elbmarsch entstanden. Für alle Nebelnelben im Untersuchungsgebiet werden die Entstehungsgeschichte, die Morphometrie, die Hydrodynamik und der Sedimenttransport, die morphologische Entwicklung, die aktuelle Unterhaltung sowie die Ufersicherung anhand bestehender Informationen im Detail und umfassend beschrieben. Es wird deutlich, dass alle Nebelnelben neben der namensgebenden Eigen-

schaft (eine Nebenrinne wird durch eine Insel vom Hauptstrom abgetrennt) weitere Gemeinsamkeiten aufweisen, aber auch deutliche Unterschiede, z.B. hinsichtlich der Morphologie (Länge, Breite, Tief, Tiefenverteilung, Sohlstruktur), der morphologischen Entwicklung und der Hydrodynamik. Ein besonderer Strömungsprozess ist die Flutrückströmung, die aus den unterschiedlichen Laufzeiten des Flutstromes in der Hauptrinne im Vergleich zur Nebenrinne resultiert. Diese führen dazu, dass die Nebenrinnen nach dem Einsetzen des Flutstromes in der Elbe nicht nur wie erwartet von Unterstrom, sondern auch kurzzeitig von Oberstrom (Flutstrom ist seewärts gerichtet) mit Wasser gefüllt werden. Hierbei erfolgt eine Mitführung von Schwebstoffen, die zu verstärkten Verlandungstendenzen an den stromaufseitigen Ende der Nebelben führt. Die Laufzeitdifferenzen und die resultierenden Effekte sind umso größer, je länger die Rinne der Nebelbe ist.

Die vorliegende Untersuchung beschreibt die aktuelle Morphologie sowie die morphologische Entwicklung für vier ausgewählte Nebelben, Hahnöfer NE, die Lühesander SE sowie das System Pagensander NE / Haseldorfer BE im Detail anhand von flächenhaften Daten, die eigens zu diesem Zweck im Vorhaben erhoben wurden. Die Ergebnisse zeigen für die vier Nebelben sehr unterschiedliche Morphologien und individuelle morphologische Entwicklungen. Die Hahnöfer NE zeichnet sich durch eine große Tiefenvariation, Sohlstrukturen und eine heterogene (Grobsand bis Schluff) Sedimentverteilung aus. Aktuell herrscht ein schwacher Verlandungstrend vor. Die Lühesander SE ist ebenfalls gekennzeichnet durch eine große Tiefenvariation und Sohlstrukturen, weist aber eine weniger heterogene Sedimentverteilung (Mittelsand bis Feinsand) auf. Morphologisch ist die Lühesander SE aktuell stabil. Die Haseldorfer BE weist die geringste Tiefenvariation aller betrachteten Nebelben auf. Das Sohlmaterial ist vergleichsweise fein (überwiegend Schluff) und die aktuelle morphologische Entwicklung zeigt einen deutlichen Verlandungstrend. Die Pagensander NE weist eine große Tiefenvariation auf, die Sedimente sind überwiegend schluffig, teilweise auch feinsandig. Die aktuelle morphologische Entwicklung (2019 – 2023) zeigt einen Verlandungstrend. Insgesamt ist in den vier Nebelben Tiefwasserfläche verloren gegangen, während die Flachwasserfläche im Zeitraum leicht und die Wattfläche deutlich zugenommen hat.

Ein besonderer Fokus der Untersuchungen lag auf dem System Pagensander NE / Haseldorfer BE, für das die Strömungsverhältnisse im aktuellen Zustand sowie für durch Maßnahmen veränderte Zustände im Detail anhand von Messdaten sowie Ergebnissen eines numerischen Modells analysiert werden. Die Ergebnisse für den Ist-Zustand zeigen in räumlicher wie zeitlicher Dimension vielfältige Strömungsmuster und bieten rheophilen Fischarten in dieser Hinsicht passende Lebensbedingungen. Die betrachteten Maßnahmen beeinflussen das Strömungsgeschehen sowie die Sedimentdynamik vor allem lokal und bewirken hier Verbesserungen (im Sinne der Ökologie und des Strombaus) des Strömungs- und/oder Sedimentationsgeschehens. Sie können dazu beitragen, die negativen Auswirkungen der historischen Entwicklungen abzumildern. Die Verlandungstendenzen im jewei-

ligen Nebelbensystem sind durch die Maßnahmen nicht signifikant zu reduzieren. Möglich ist es aber Sedimente gezielter „einzufangen“ bzw. ausgewählte Baggerbereiche „anzulegen“ und dabei den Verlandungstrend in angrenzenden Bereichen zu reduzieren (gezielte Sedimententnahme). Zudem kann diese Pufferwirkung durch aktives Management gesteuert und langfristig erhalten werden.

Die Erkenntnisse des Vorhabens Systemverständnis Nebelben liefern eine fundierte Grundlage für ein verbessertes Systemverständnis im Bereich der Nebelben und ermöglichen erstmalig eine flächendeckende, belastbare quantitative Beschreibung und Bewertung der Hydrodynamik und der morphologischen Entwicklung. Zudem werden die Möglichkeiten und Grenzen zur Beeinflussung der Systeme am Beispiel der Pagensander NE und der Haseldorfer BE beschrieben. Damit steht nun eine Grundlage für mögliche weitere Schritte in Richtung Pilotmaßnahmen bereit.

Auf dem Weg zur Umsetzung von Pilotmaßnahmen sind Begrifflichkeiten (vielfältiges naturnahes Strömungsmuster) sowie die Zielsetzung (Watt vs. Flachwasser) weiter zu schärfen. Die Wirksamkeit von umgesetzten Maßnahmen ist möglichst im Detail zu quantifizieren. Des Weiteren ist zukünftig für ein noch umfassenderes Verständnis eine Gesamtschau aller Nebelben erforderlich. Insbesondere sollte deren morphologische Entwicklung in vergleichbarer zeitlicher und räumlicher Qualität wie im Vorhaben beobachtet werden.

7 Schrifttum

- AQUA (2014): Peilarbeiten auf Elbe und Nebenflüssen 2018. Leistungsbeschreibung zur Gewässerbettdatenerfassung - UVgO. Hg. v. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV).
- ARGE SMILE CONSULT, I. (2018): ALS- und MS-Datenerfassung der Tide- und Außenelbe 2015/2016. Befliegungen Tide-/Außenelbe 2015/2016. Abschlussbericht. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft (ARGE) smile consult GmbH – Inphoris GmbH (1.1).
- ATA, R. (2018): Telemac 2D, User Manual. Version v7p3. Online verfügbar unter http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=documentation_v7p3r1, zuletzt geprüft am 01.04.2022.
- Bautechnik. Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau (1937). Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & co. KG; Ernst.
- Bautechnik. Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau (1939). Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & co. KG; Ernst.
- BAW (1996): UVU zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Materialband I - Zusammenfassendes Gutachten Hydromechanik. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau.
- BFG (1997): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt-Landschaftspflegerischer Begleitplan.
- BFG (2002a): Untersuchung des ökologischen Entwicklungspotenzials der Unter- und Außenelbe. Ökologische Potenzialanalyse. Teil 1. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-1346).
- BFG (2002b): Untersuchung des ökologischen Entwicklungspotenzials der Unter- und Außenelbe. Ökologische Potenzialanalyse. Teil 2 - Konkretisierung von Maßnahmen. Hg. v. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz (BfG-1388).
- BFG (2004): Analyse der aktuellen räumlichen Veränderungen ufernaher Röhrichte und Uferstauden unter besonderer Berücksichtigung ihrer historischen Entwicklung (der letzten 30 bis 50 Jahre). Untersuchung im Rahmen der Beweissicherung zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt (14,5 m-Ausbau).
- BFG (2006): Die Elbevertiefung 1999. Ökologische Zusammenhänge zu Sauerstoffhaushalt und Sedimentdynamik. Unter Mitarbeit von Christine Habermann, Andreas Schöl, Nikolas Uffmann und Heike Büttner (BfG-1523).

- BFG (2008): BfG-Bericht 1584: WSV-Sedimentmanagement Tideelbe - eine Systemstudie. Ökologische Auswirkungen der Umlagerung von Weddeler Baggergut. Hg. v. BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde. Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- BFG (2013): Ergänzungsuntersuchung zur Störung der Avifauna durch Freizeitaktivitäten im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe.
- BFG (2014a): Ästuar und Küstengewässer der Nordsee. Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- BFG (2014b): Sedimentmanagement Tideelbe. Strategien und Potenziale ; Systemstudie II. Unter Mitarbeit von Michael Fiedler und Heiko Leuchs.
- BOEHLICH, M.; STROTMANN, T. (2008): The Elbe Estuary. In: *Die Küste : Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee : archive for research and technology on the North Sea and Baltic Coast* (74).
- BOEHLICH, M. J. (2003): Realisierte Strombaumanahmen an der Elbe. BAW Kolloquium 2003, 13.11.2003.
- BOEHLICH, M. J.; STROTMANN, T. (2019): Das Elbeästuar. *Die Küste* 87 (2019), Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). DOI: 10.18171/1.087106.
- BOHN, J. (2005): Pagensand. Die Geschichte der Elbinsel und ihrer Bewohner. 2. Aufl. Husum: Husum.
- BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE [HG.] (2010): *Veranstaltungen - Flusssysteme in Raum und Zeit*. Koblenz. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- BUND-LÄNDER-ARBEITSGRUPPE BEWEISSICHERUNG (1995): Ausbau der Unterund Außenelbe zur Herstellung der Fahrwassertiefe von 13,5 m unter Kartennull, Strömungsmessungen in den Nebeneiben. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord.
- Deutsche Beiträge. 32. Internationaler Schifffahrtskongreß; Liverpool, Großbritannien, 10. - 14. Mai 2010 (2010).
- DHI (2019): Maßnahmen zur Gewinnung von Flutraum in der Haseldorfer Marsch. Beratung und numerische Modellierung. Unter Mitarbeit von Monika Donner, Janett Brandt, Marion Dziengel Uwe Stöber, Ines Hiller und Tobias Drückler. Hg. v. DHI WASY GmbH. DHI WASY GmbH.
- DWA (2010): Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- EICHWEBER, G. (2005): Hydromorphologie des Elbeästuars. ARGE Elbe- Workshop. WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORD. Kiel, 2005. Online verfügbar unter https://www.fgg-elbe.de/files/Downloads/Dokumente/ARGE_09/Vortraege/3_Morph_Eichweber.pdf, zuletzt geprüft am April 2021.

- ELSEBACH, J.; KAISER, R.; NIEMEYER, H. (2007): Spatial Balance of Habitats in the Weser Estuary.
- ENTELMANN, I. (25.09.18): Gesamtüberblick Nebelben aus WSV-Sicht. Diskussionsbeitrag WSA Hamburg zur 1. Sitzung der AG Nebelben im Forum Tideelbe. WSV. Hamburg, 25.09.18.
- ENTELMANN, I. (12.02.19a): Hydrologie und Morphologie der Nebelben. Stand des Wissens und Wissensdefizite. Beitrag WSA Hamburg zur 2. Sitzung der AG Nebelben im Forum Tideelbe. Hamburg, 12.02.19.
- ENTELMANN, I. (12.02.19b): Modellstudien Pagensander Nebelben. Grundlegende Betrachtung und weiteres Vorgehen. Beitrag WSA Hamburg zur 2. Sitzung der AG Nebelben im Forum Tideelbe. WSV. Hamburg, 12.02.19.
- ENTELMANN, I. (2019): Entwicklung Wischhafener Fahrwasser / Brammer Bank. WSV. Hamburg, 2019.
- ENTELMANN, I.; QREFA-SANDER, M. (2013): Gewässerkundlicher Bericht. Morphologische Strukturen im Fahrrinnenbereich der Tideelbe – Ein Beitrag zum Reviersteckbrief Tideelbe. Hg. v. Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg. Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg.
- FGG ELBE (2013): Sedimentmanagementkonzept der FGG Elbe Vorschläge. Vorschläge für eine gute Sedimentmanagementpraxis im Elbegebiet zur Erreichung überregionaler Handlungsziele. Unter Mitarbeit von Dr. Peter Heininger (BfG Koblenz und Leitung).
- FGG ELBE (2023): Das Fachinformationssystem (FIS) der Flussgebietsgemeinschaft Elbe. Magdeburg. Online verfügbar unter <https://www.elbe-datenportal.de/FisFg-Elbe/content/start/ZurStartseite.action>, zuletzt geprüft am 18.08.2023.
- FORUM TIDEELBE [HG.] (2020): Die Zukunft der Tideelbe gemeinsam gestalten. Ergebnisbericht des Forum Tideelbe. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.forum-tideelbe.de/files/download/200928-fte-ergebnisbericht-s-61-korrigiert.pdf>, zuletzt geprüft am 13.01.2022.
- FRANZIUS, L. (1888): Die Korrektur der Unterweser : auf Veranlassung der Bremischen Deputation für die Unterweserkorrektur. Online verfügbar unter <https://brema.suub.uni-bremen.de/content/titleinfo/1490943>, zuletzt aktualisiert am 23.03.2022, zuletzt geprüft am 23.03.2022.
- FRÄSDORF, J. (1995): Morphologische Veränderungen der Nebelben. BAW Kolloquium. Hamburg, 1995.
- GÄTJE, B.; CORDES, R. (2013): Ufersicherungen an der Tideelbe. BAW Kolloquium, 29.08.2013.

- HENSEN, W. (1939): Der Einfluß der Erdumdrehung auf Tideflüsse in der Natur und im Modell. In: Bautechnik. Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau, Bd. 21. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & co. KG; Ernst.
- HERVOUET, J.-M. (2000): TELEMAC modelling system: an overview. In: *Hydrol. Process.* 14 (13), S. 2209–2210. DOI: 10.1002/1099-1085(200009)14:13<2209::AID-HYP23>3.0.CO;2-6.
- HPA; WSA HH (2008): Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe. Hg. v. Hamburg Port Authority (HPA) und Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Hamburg Port Authority (HPA); Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV).
- IBP ARBEITSGRUPPE (2011a): Integrierter Bewirtschaftungsplan Elbästuar. Gesamträumliche Betrachtung. Teil B, HH SH. Hg. v. Arbeitsgruppe IBP in Hamburg und Schleswig-Holstein:
- IBP ARBEITSGRUPPE (2011b): Integrierter Bewirtschaftungsplan Elbästuar. Gesamträumliche Betrachtung. Teil C, NiSa. Hg. v. Arbeitsgruppe IBP in Hamburg und Schleswig-Holstein:
- IBP ARBEITSGRUPPE (2011c): Integrierter Bewirtschaftungsplan Elbästuar. Gesamträumliche Betrachtung. Teil A. Hg. v. IBP Arbeitsgruppe.
- IHO (2008): IHO STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS. Special Publication No. 44 Published by. Unter Mitarbeit von INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. Hg. v. International Hydrographic Bureau. MONACO (44, 5).
- ION (2008): ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. 1. ed., corr. and reprinted. Genève.
- KAPPENBERG, J.; FANGER, H.-U. (2007): Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee. Als Ms. vervielfältigt. Hg. v. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH. Geesthacht (GKSS, GKSS-2007-20).
- KEIL, W. (1985): Die schrittweise Anpassung der Elbe an die Entwicklung des Seeschiffsverkehrs. In: Rudolf Schwab und Wolfgang Becker (Hg.): 1983/84. Berlin, Heidelberg: Springer (Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 40), S. 47–59.
- KERNER, M. (2007): Effects of deepening the Elbe Estuary on sediment regime and water quality. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 75 (4), S. 492–500. DOI: 10.1016/j.ecss.2007.05.033.
- KUR; NLWKN (2012): Secondary Channels in European Estuaries. Occurrence and Importance of Secondary Channels in European Estuaries. Literature study in the

- framework of the Interreg IVB project TIDE. Varel, Oldenburg, zuletzt geprüft am 15.04.2021.
- LANGE, D. (1993): Veränderung der Morphologie von Nebelben innerhalb eines Zeitraums von 6 bis 7 Jahren. Untersuchungsgebiete: Glückstädter Fahrwasser (1976, 1978 und 1981); Pagensander Nebelbe (1975, 1977 und 1981); Lühesander Nebelbe (1981, 1985, 1987 und 1988).
- MALEIKA, W. (2015): The influence of the grid resolution on the accuracy of the digital terrain model used in seabed modeling. In: *Mar Geophys Res* 36 (1), S. 35–44. DOI: 10.1007/s11001-014-9236-6.
- MARNITZ, U. (1995): Über den Einfluß baulicher Veränderungen in der Elbe auf Über den Einfluß baulicher Veränderungen in der Elbe auf die Morphologie im Gebiet Hahnöfer Nebelbe / Mühlenberger Loch. In: *Die Küste : Archiv für Forschung u. Technik an d. Nord- u. Ostsee ; archive for research and technology on the North Sea and Baltic Coast* (57), S. 95–120. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101379>.
- Modellprojekt "Nebenarm Unterweser" (2022). Online verfügbar unter https://www.blaues-band.bund.de/Projektseiten/Blaues_Band/DE/neu_04_Projekte/Aktuelle_Projekte/04_Unterweser/Unterweser_node.html, zuletzt aktualisiert am 23.03.2022, zuletzt geprüft am 23.03.2022.
- NEHLSSEN, E.; HESSE, R.; VARELA, D.; FRÖHLE, P. (2020): Systemverständnis Nebelben - Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelben als Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe. Jahresbericht Nr. 1. Technische Universität Hamburg - Institut für Wasserbau. Hamburg.
- NEHLSSEN, E.; VARELA, D.; FRÖHLE, P. (2021): Systemverständnis Nebelben - Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelben als Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe. Jahresbericht Nr. 2. Technische Universität Hamburg - Institut für Wasserbau. Hamburg.
- NETZ, B. U.; HARTMANN, J. (2010): Die Vogelwelt der Elbinsel Auberg-Drommel (Hamburger avifaun. Beitr., 37, S. 7-30).
- NIENHUIS, J. H.; ASHTON, A. D.; EDMONDS, D. A.; HOITINK, A. J. F.; KETTNER, A. J.; ROWLAND, J. C.; TÖRNQVIST, T. E. (2020): Global-scale human impact on delta morphology has led to net land area gain. In: *Nature* 577 (7791), S. 514–518. DOI: 10.1038/s41586-019-1905-9.
- PARSONS, D. R.; JACKSON, P. R.; CZUBA, J. A.; ENGEL, F. L.; RHOADS, B. L.; OBERG, K. A. ET AL. (2013): Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. In: *Earth Surf. Process. Landforms* 38 (11), S. 1244–1260. DOI: 10.1002/esp.3367.

- ROLINSKI, S.; EICHWEBER, G. (2000): Deformations of the tidal wave in the elbe estuary and their effect on suspended particulate matter dynamics. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 25 (4), S. 355–358. DOI: 10.1016/S1464-1909(00)00025-3.
- SAMU, G. (1987): Geomorphologische Untersuchungen im Bereich der Brammerbank und des Krautsander Watts in der Unterelbe. In: *25 Jahre Außenstelle Küste* (60), S. 211–234. Online verfügbar unter http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/102889/1/mb60_Samu.pdf.
- SCHÄTZLER, T.; MEISEL, K. (1937): Stromregelungsarbeiten in der Unterelbe. bei der Ostebank und bei Pagensand. In: Bautechnik. Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau, Bd. 15. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & co. KG; Ernst, S. 368–379.
- SCHRÖDER, U.; FUCHS, E.; MAIKE, H. (2010): Ermittlung des Potenzials für einen naturnahen Rückbau technisch gesicherter Ufer unter Anwendung von Modelltechniken an der Tideelbe. In: Deutsche Beiträge. 32. Internationaler Schifffahrtkongreß; Liverpool, Großbritannien, 10. - 14. Mai 2010, S. 138–144.
- SCHUCHARDT, B.; RAHLF, H. (2012): Zur ökologischen Funktion von Nebenrinnen in den inneren norddeutschen Ästuaren. BAW-Kolloquium. Hamburg, 20.09.2012.
- SCHWAB, R.; BECKER, W. (1985): Die Hafentechnische Gesellschaft 1983/84. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer (Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 40). Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=NG3RBgAAQBAJ>.
- SCHWAB, RUDOLF; BECKER, WOLFGANG [HG.] (1985): 1983/84. Berlin, Heidelberg: Springer (Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 40).
- STROTMANN, T.; HEIN, S.; FRÖHLE, P.; NELSEN, E.; SOHRT, V. (2022): Abschlussbericht Ref-Tide: Das Reflexions- und Resonanzverhalten Tide-dominiertes Ästuare (RefTide), Eine Analyse des Antwortverhaltens der Tideelbe auf die Gezeitenanregung. Teilprojekte: Reflexion und Resonanz. Fachlicher Schlussbericht. Hg. v. Hamburg Port Authority, Technische Universität Hamburg.
- VISSCHER, G.; WOLF, G. (1987): Untersuchungen im hydraulischen Modell über die Untersuchungen im hydraulischen Modell über die zweckmässige Linienführung und Höhe des Leitdammsystems "Pagensand Nord" in der Unterelbe. In: *Die Küste : Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee : archive for research and technology on the North Sea and Baltic Coast* (45), S. 89–115. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101256>.
- WITTE, H.-H.; EICHWEBER, G. (2010): System Seeschifffahrtsstraße – Schifffahrt, Umwelt, Entwicklungen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.): Veranstaltungen -

- Flusssysteme in Raum und Zeit. Koblenz. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde, S. 103–111.
- WÖBKING, C. (2020): Machbarkeitsstudie Steinloch - Umweltbelange einer strombaulichen Maßnahme im Bereich der Pagensander Nebelbe. Master Thesis. HOCHSCHULE UND UNIVERSITÄT OSNABRÜCK, Osnabrück, Germany.
- WSA ELBE-NORDSEE (2021): Kartenserie zum aktuellem Zustand der Ufer im Bereich von Nebelben. WSA Elbe-Nordsee. Hamburg.
- WSA HH; HPA (2005): Bericht zur Beweissicherung – An-passung der Fahrrinne der unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt. 2007. Aufl. Hamburg, zuletzt geprüft am 04.09.2021.
- WSV (2008): WSV Sedimentmanagement Tideelbe, Strategien und Potenziale - eine Systemstudie - . Ökologische Auswirkungen der Umlagerung von Wedeler Baggergut (BfG-1584).
- WSV (2018): Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung 2018. Unter Mitarbeit von Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt und Wasserstraßen-und Schifffahrtsverwaltung Des Bundes. Bonn; Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt. Online verfügbar unter <https://henry.baw.de/handle/20.500.11970/106959>.
- WSV (2020): Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe. Online verfügbar unter <https://www.fahrrinnenanpassung.de/kompensation.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2020.
- WSV (2023): Peilwesen (Seevermessung). Online verfügbar unter https://www.wsa-weser-jade-nordsee.wsv.de/Webs/WSA/Weser-Jade-Nordsee/DE/Wasserstras-sen/BauUnterhaltung/Peilwesen/peilwesen_node.html, zuletzt aktualisiert am 05.12.2023.

A1 Literatur und Datenquellen

Für die Ableitung bzw. Darstellung des gegenwärtigen Wissensstands zu den Nebelben wurde nach relevanter Literatur recherchiert. Diese teilweise unveröffentlichte Literatur bildet zusammen mit den verfügbaren Daten den Stand des Wissens. Die gefundene Literatur umfasst Veröffentlichungen, Berichte und Vorträge in denen i) Nebelben explizit erwähnt werden, ii) auf Untersuchungen zu Aspekten im Bereich der Nebelben Bezug genommen wird und iii) auf die Entwicklung sowie auf Eingriffe in die Nebelben eingegangen wird. Tabelle 32 gibt einen Überblick über das identifizierte Schrifttum. Zum gegenwärtigen Stand der Literaturrecherche ist keine veröffentlichte Arbeit bekannt, die explizit die Nebelben bzw. das System der Nebelben in ihrer Gesamtheit sowie die Entwicklung und Bedeutung umfassend für die Tideelbe darstellt und beschreibt. Im Wesentlichen existieren Arbeiten, in denen Untersuchungen zu bestimmten Aspekten für (einzelne) Nebelben beschrieben werden. Zudem wird, insbesondere in (Fach-) Berichten, auf die Bedeutung von Nebelben im Kontext übergreifender Themen und Fragestellungen eingegangen. Es existieren nur wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen. In Abstimmung mit dem WSA Elbe-Nordsee werden demgemäß auch Vorträge und Berichte („graue Literatur“) in die Literaturrecherche und Zusammenstellung einbezogen.

Tabelle 32: Übersicht über zusammengestellte Literatur zu den Nebelben. Die als besonders relevant eingestufte Literatur ist hervorgehoben

Jahr	Autor	Titel	Referenz
Wissenschaftliche Artikel			
2010	Schröder et al.	Ermittlung des Potenzials für einen naturnahen Rückbau technisch gesicherter Ufer unter Anwendung von Modelltechniken an der Tideelbe	(Schröder et al. 2010)
2010	Witte und Eichweber	System Seeschiffahrtsstraße – Schifffahrt, Umwelt, Entwicklungen	(Witte und Eichweber 2010)
2008	Boehlich und Strotmann	The Elbe Estuary	(Boehlich und Strotmann 2008)
2007	Kerner	Effects of deepening the Elbe Estuary on sediment regime and water quality	(Kerner 2007)
2000	Rolinski und Eichweber	Deformations of the tidal wave in the Elbe estuary and their effect on suspended particulate matter dynamics	(Rolinski und Eichweber 2000)
1995	Marnitz	Über den Einfluss baulicher Verminderungen in der Elbe auf die Morphologie im Gebiet Hahnöfer Nebelbe / Mühlenberger Loch	(Marnitz 1995)
1993	Lange	Veränderung der Morphologie von Nebelben (1970-1980)	(Lange 1993)
1987	Visscher und Wolf	Untersuchungen im hydraulischen Modell über die zweckmäßige Linienführung und Höhe des Leitdammsystems	(Visscher und Wolf 1987)

		"Pagensand Nord" in der Untereibe (BAW)	
1987	Samu	Geomorphologische Untersuchungen im Bereich der Brammerbank und des Krautsander Watts in der Untereibe	(Samu 1987)
Berichte			
2019	DHI	Maßnahmen zur Gewinnung von Flutraum in der Haseldorfer Marsch - Beratung und numerische Modellierung	(DHI 2019)
2014	BfG	BfG-Bericht 1763 Sedimentmanagement Tideelbe -Strategien und Potenziale - Systemstudie II	(BfG 2014b)
2013	BfG	Ergänzungsuntersuchung zur Störung der Avifauna durch Freizeitaktivitäten im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe	(BfG 2013)
2013	WSA HH	Gewässerkundlicher Bericht Morphologische Strukturen im Fahrrinnenbereich der Tideelbe – Ein Beitrag zum Reviersteckbrief Tideelbe –	(Entelmann und Qrefa-Sander 2013)
2013	FGG Elbe	Sedimentmanagementkonzept der FGG Elbe	(FGG Elbe 2013)
2012	KuR und NLWKN	Secondary Channels in European Estuaries. Occurrence and Importance of Secondary Channels in European Estuaries	(KuR und NLWKN 2012)
2011	IBP Arbeitsgruppe	Integrierter Bewirtschaftungsplan für das Elbeästuar. (IBP)	(IBP Arbeitsgruppe 2011b, 2011a, 2011c)
2008	HPA und WSA HH	Strombau- und Sedimentmanagementkonzept (SSMK) für die Tideelbe	(HPA und WSA HH 2008)
2008	BfG	BfG-Bericht 1584: WSV-Sedimentmanagement Tideelbe – eine Systemstudie	(BfG 2008)
2007	GKSS	Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee	(Kappenberg und Fanger 2007)
2006	BfG	BfG-Bericht 1523: Die Elbevertiefung 1999	(BfG 2008)
2005	WSA HH und HPA	Bericht zur Beweissicherung – Anpassung der Fahrrinne der unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt	(WSA HH und HPA 2005)
2004	BfG	Analyse der aktuellen räumlichen Veränderungen ufernaher Röhrichte und Uferstauden unter besonderer Berücksichtigung ihrer historischen Entwicklung (der letzten 30 bis 50 Jahre). Untersuchung im Rahmen der Beweissicherung zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt (14,5 m-Ausbau)	(BfG 2004)
2002	BfG	Untersuchung des ökologischen Entwicklungspotenzials der Unter- und Außenelbe (Ökologische Potenzialanalyse)	(BfG 2002a, 2002b)

Vorträge			
2019	Entelmann (WSA HH)	Entwicklung Wischhafener Fahrwasser / Brammer Bank	(ENTELMANN 2019)
2019	Entelmann (WSA HH)	Hydrologie und Morphologie der Nebelnelben - Stand des Wissens und Wissensdefizite	(ENTELMANN 12.02.19a)
2019	Entelmann (WSA HH)	Modellstudien Pagensander Nebelnelben - Grundlegende Betrachtung und weiteres Vorgehen	(ENTELMANN 12.02.19b)
2018	Entelmann (WSA HH)	Gesamtüberblick Nebelnelben aus WSV-Sicht	(ENTELMANN 25.09.18)
2013	GÄTJE UND CORDES	Ufersicherungen an der Tideelbe	(GÄTJE UND CORDES 2013)
2012	SCHUCHARDT UND RAHLF	Zur ökologischen Funktion von Nebenrinnen in den inneren norddeutschen Ästuaren	(SCHUCHARDT UND RAHLF 2012)
2005	EICHWEBER	Hydromorphologie des Elbeästuars	(EICHWEBER 2005)
2003	BOEHLICH	Realisierte Strombaumaßnahmen an der Elbe	(BOEHLICH 2003)
1995	Fräßdorf	Morphologische Veränderungen der Nebelnelben von ca. 1950 bis 1995	(FRÄßDORF 1995)
Bücher			
2005	Bohn	Pagensand. Die Geschichte der Elbinsel und ihrer Bewohner	(Bohn 2005)
1985	Schwab und Becker	Die Hafentechnische Gesellschaft 1983/84	(Schwab und Becker 1985)

Im Rahmen des Vorhabens wurden umfangreiche Daten durch das WSA Elbe-Nordsee direkt an das Institut für Wasserbau für die Verwendung im Projekt übergeben. Die Daten wurden gesichtet und zur weiteren Nutzung im Vorhaben aufbereitet. Tabelle 33 gibt eine Übersicht über die übergebenen Daten.

Tabelle 33: Übersicht über die vom WSA Elbe-Nordsee im Rahmen des Vorhabens bereitgestellten Daten

Bezeichnung	Datenname/ Datei	Übergabedatum	Geplante Verwendung
Sedimentkataster	Sedimentkataster_1992_2018V.xls Anl1_Parametertabelle.pdf	10.06.19	Zus. Information / Qualitative Auswertung (AP 1: Beschreibung der Entwicklung)
Strömungsdaten	Nebelnelben_2006.zip GEW-JAHRESMESSPROGRAMM_2006_Anlage.pdf Übersicht_Strömungsmessungen_Bereich_Pagensand.pdf	11.-14.06.19	Modellierung (AP 3)
Baumaßnahmen	elbe_baumaßnahmen.mdb bauwerke_hh1.pdf	17.06.19	Zus. Information

	bauwerke_hh2.pdf		
<u>Geodaten (GIS)</u> Basisdaten	Elbe_Fahrrinnen-km.shp Fahrrinne_1_Elbvertiefung_1999.shp	17.06.19	Zus. Information
DGM-W	DGM-W2010.gdb DGM-W2016.gdb		Quantitative Auswertung (AP 1.3: Datengenauigkeit) sowie Modellierung (AP3: Modellaufbau)
Morphozonen/ Habitate/ Vegetation	Map 1900, 1950, 1995,2010 (<...>.shp)		Qualitative Auswertung (AP 1: Stand des Wissens: Beschreibung der Entwicklung)
Datenquellenkarte	DGM-WGREN.gdb Elbe_2015-16_Abschlussbericht_V1.1.pdf	24.06.19	Quantitative Auswertung (AP 1.3: Datengenauigkeit)
Hauptpeilung & Vegetation	PeilungPN2015.zip VegetationEI2016.zip Kartier-Codes_Elbe_2017_nature-consult.pdf		Quantitative Auswertung (AP 1.3: Datengenauigkeit)

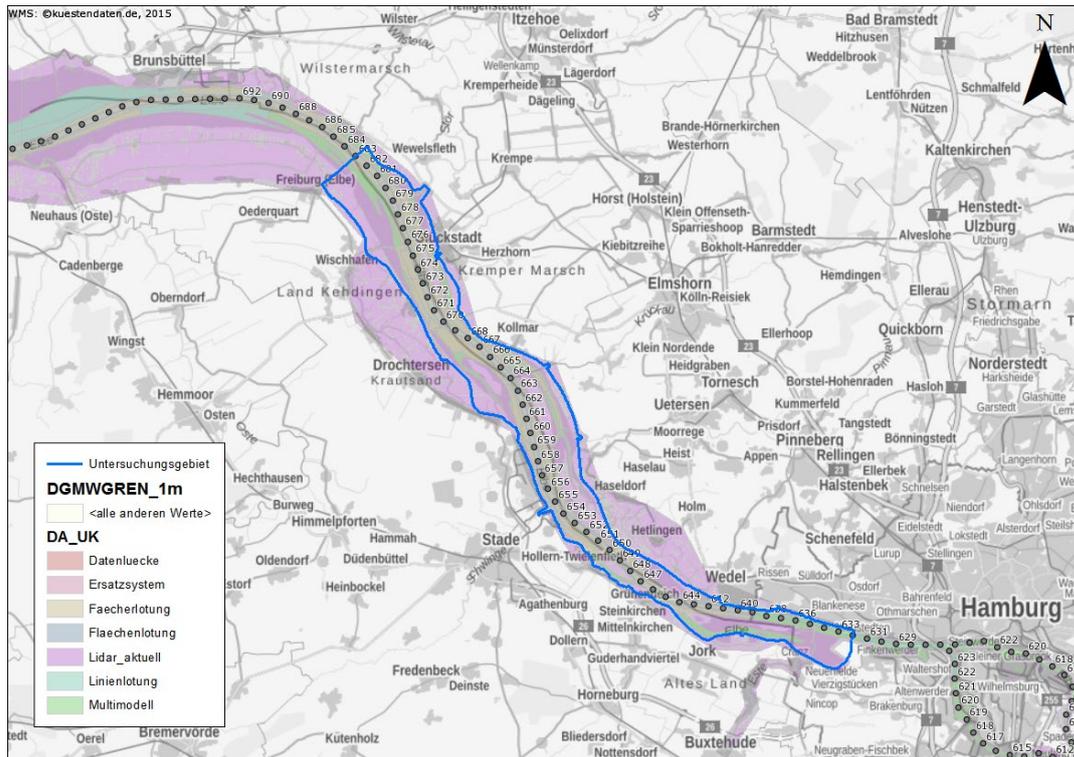


Abbildung 127: Datenquellenkarte des DGM-W 2016 (ARGE smile consult 2018) für Tideelbe mit Untersuchungsgebiet als Referenz

Im Folgenden wird das DGM-W 2016 für die Bereiche der Nebelnelben ausgewertet. Abbildung 128f zeigen exemplarisch die Datenquellenkarte für die Pagensander und die Hahnöfer Nebelnelbe. Es wird deutlich, dass hier im Wesentlichen Daten aus Laserscan-Befliegungen (Wattbereiche und Vorland) und aus dem sogenannten „Multimodell“ (nicht trockenfallende Bereiche) verwendet wurden. Die Daten des Multimodells basieren im Wesentlichen auf interpolierten Linienpeilungen. Das Verfahren wird WSV-intern durchgeführt. Eine Ausnahme stellt die Pagensander NE dar, für die im Bereich der Rinne auch Fächerlotdaten vorliegen. Für alle andern Nebelnelben gilt ebenfalls, dass die tieferen Rinnen und Seitenarme durch die Daten des Multimodells abgedeckt sind, während für die trockenfallenden Flächen LIDAR Daten vorliegen.

Die Analyse von morphologischen Veränderungen erfolgt auf der Grundlage einer Differenzbildung. In Abbildung 130 ist beispielhaft die Differenz zwischen DGM-W 2016 und DGM-W 2010 für den Bereich der Pagensander NE dargestellt. Zusätzlich liefert Abbildung 131 die Informationen zu den Datenquellen. Es wird deutlich, dass sich die Bereiche mit unterschiedlichen Datenquellen in der Differenzendarstellung ausprägen und Inkonsistenzen hervorbringen. Übergänge zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Entwicklung (Auflandung und Erosion) sowie Unstetigkeiten in den Differenzen fallen mit den Grenzen der entsprechenden Datensätze unterschiedlicher Quellen zusammen. Dieser auffällige Aspekt ist bei der Analyse und Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Dazu sollte zunächst ein Blick auf die Ursachen für die festgestellten Abweichungen geworfen werden. Grundsätzlich sind folgende Ursachen denkbar:

1. Es liegen tatsächlich morphologische Änderungen vor

Da die Messungen nicht alle zeitgleich stattfinden – das gilt insbesondere für die Aufnahmen mit unterschiedlichen Messverfahren – kann es sein, dass im Zeitraum zwischen den Messungen Änderungen der Morphologie stattgefunden haben. Das können entweder natürliche Änderungen sein oder anthropogen verursachte Änderungen, z.B. Baggerungen.

2. Bereiche in unterschiedlichen Tiefen entwickeln sich unterschiedlich

Ein gutes Beispiel sind hier die Wattflächen, die i.d.R. per LIDAR vermessen werden. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten tendieren diese eher zur Verlandung als die räumlich nahegelegenen tieferen Rinnen, die eine höhere Strömungsdynamik aufweisen und in der Regel per Peilung vermessen wurden. Dementsprechend wären gegenläufige Trends in beiden Bereichen erklärbar.

3. Erfassungsgenauigkeit der Messverfahren

Die eingesetzten Messverfahren, z.B. LIDAR oder Peilung, haben unterschiedliche Genauigkeiten bei der Erfassung der Höhen. Für das DGM-W 2016 sind die Erfassungsgenauigkeiten für die genannten Messverfahren angegeben (Tabelle 34). Diese variieren u.a. in Abhängigkeit des Untergrunds (z.B. Bewuchs oder kein Bewuchs, sandiges Sohlsubstrat oder Schlick). In der Regel werden die tiefergelegenen Wattflächen mit beiden Verfahren erfasst (Peilung um Thw, Befliegung um Tnw). Aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsgenauigkeiten der beiden Messverfahren können somit unterschiedliche Höhen resultieren.

Tabelle 34: Erfassungsgenauigkeiten für Messverfahren, Quelle: Metadaten zum DGM-W 2016, https://www.kuestendaten.de/media/zdm/portaltideelbe/Allgemeine_Informationen/Archiv/GIS/DGM-W_Unterelbe_2016_1x1m/Metadaten_DGM-W_2016_ETRS89UTM32N.pdf, abgerufen am 10.06.2020)

Messverfahren	Erfassungsgenauigkeit
LIDAR	± 0,15 m (bei geringer Geländerauhigkeit) ± 0,40 m (bei hoher Geländerauhigkeit)
Peildaten	± 0,20 m

4. Räumliche Zuordnung der Messverfahren

Die räumliche Zuordnung der Messverfahren zu einzelnen Bereichen steht größtenteils fest (tiefergelegene Bereiche werden gepeilt, höhergelegene Bereiche werden befliegen). Gerade in den Übergangsbereichen, d.h. in den unteren Wattbereichen kann es aber zu Verschiebungen kommen. Das fällt insbesondere dann für einen Bereich ins Gewicht, wenn bei einem DGM die Daten mit der einen Methode (z.B. Linienlot, Multimodell) und bei dem anderen DGM die Daten mit einer anderen Methode (z.B. LIDAR) erhoben wurden. Letztere ermöglicht aufgrund der höheren Datendichte einen höheren Detaillierungsgrad im DGM-W. Allein durch diese Tatsache können bei der Differenzenbildung Auffälligkeiten entstehen.

5. Aufbereitung der Messdaten

Die erhobenen Messdaten werden aufbereitet, d.h. plausibilisiert und um Ausreißer bereinigt. In Abhängigkeit der angewendeten Methodik und der Strenge der Kriterien bei der Filterung werden mehr oder weniger Einzelwerte entfernt. Dabei spielen vor allem die Untergrundverhältnisse eine Rolle, die je nach Zustand eine größere (Bewuchs, Wasserlachen, weicher Untergrund...) oder kleinere Streuung (ebene regelmäßige Fläche, harter Untergrund) der Messdaten bedingen.

6. Erzeugung des DGM-W

Die aufbereiteten Rohdaten werden schließlich zu einem digitalen Geländemodell interpoliert. Wie der Name „Modell“ bereits impliziert, werden Vereinfachungen vorgenommen. Vereinfachungen sind beispielsweise die Vorgabe einer Rasterzellenweite mit Raster-Stützstellen sowie das Interpolationsverfahren, das auf die aufbereiteten Messdaten angewendet wird. Bei Daten aus einer Fächerlotung oder eine Laserscan-Befliegung stehen meist mehrere Punkte pro Rasterzelle zur Verfügung. Hier kann die Wahl der Interpolationsmethode Einfluss auf den ermittelten Wert haben (z.B. Mittelwert, Median, oberes Quantil, unteres Quantil...). Bei Linienlotungen liegen Messdaten nur in vergleichsweise (im Vergleich zu Rasterzellenweite des DGM) großen Abständen vor. Die Zwischenräume werden durch Interpolation geschlossen. Mögliche vorhandene Abweichungen der Höhen in diesen Bereich, z.B. aus Geometrieänderungen, Sohlstrukturen...) sind nicht im Modell enthalten. Somit ergibt sich hier im Vergleich zu den flächenhaft vermessenen Bereichen eine weitaus größere Ungenauigkeit, die bislang noch nicht quantifiziert wurde.

Im Rahmen der Erstellung des DGM-Ws wurden die Daten plausibilisiert. In der Dokumentation wird insbesondere der Übergang zwischen Daten aus Peilung und Befliegung für einige Bereiche als nicht konsistent beschrieben (ARGE smile consult 2018, Anlage 4.3, 1.18, S.14/20 ; 1.13, S.28/40). Für einige Abschnitte treten Abweichungen in der Größenordnung einiger Dezimeter bis über einem Meter zwischen den Datensätzen auf. In Bezug auf die quantitative Beschreibung der großräumigen morphologischen Änderungen (Höhen- und Volumendifferenzen) wird diesen Abweichungen aber eine untergeordnete Rolle beigemessen, da diese nur die Übergangsbereiche betreffen und demgemäß vom Umfang her nur einen geringen Teil der Gesamtfläche ausmachen. Inwieweit diese Aussage auch für Analysen kleinräumiger Änderungen, wie z.B. im Bereich der Nebelnelben, zutrifft, in denen es viele Übergangsbereiche gibt, ist im Weiteren zu prüfen.

In der Dokumentation zum DGM-W wird die Erfassungsgenauigkeit innerhalb eines Datensatzes als maßgebend angesehen. Grundsätzlich ist es demgemäß sinnvoll, insbesondere bei der quantitativen Betrachtung der morphologischen Entwicklung die entsprechenden Datenquellenzugehörigkeit bzw. deren Übergänge zu berücksichtigen, da sich diese im Geländemodell ausprägen.

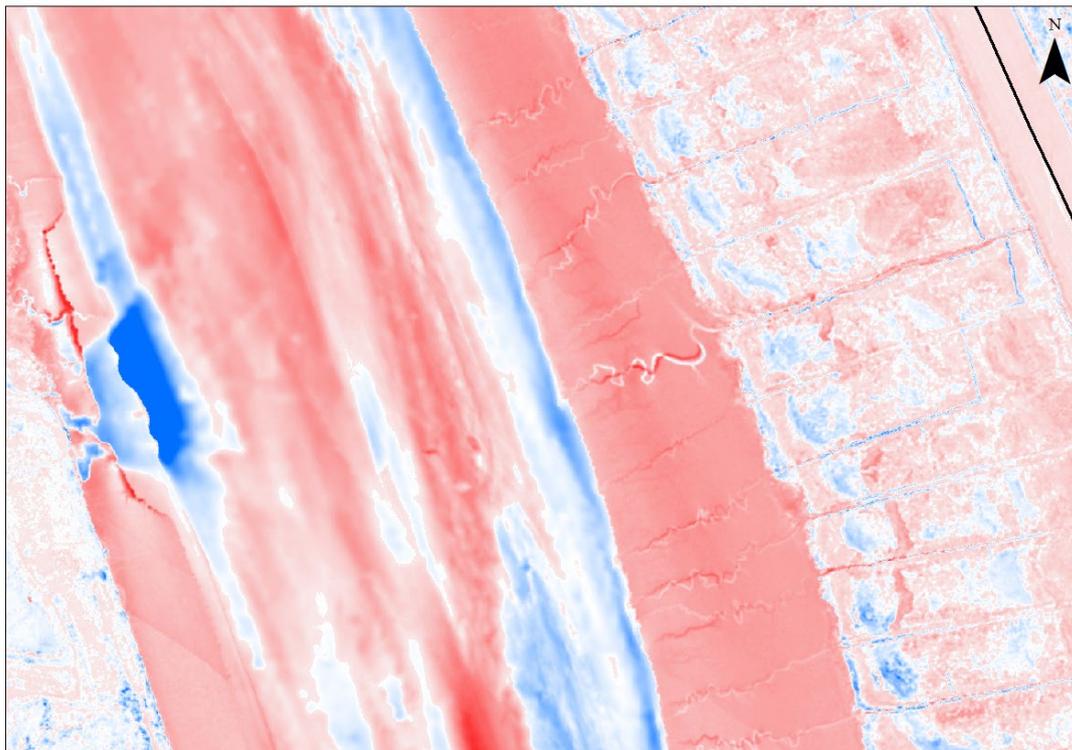


Abbildung 130: Exemplarische Darstellung der Höhendifferenz (± 1 m) des DGM-W 2016 zu DGM-W 2010 für einen Ausschnitt in der Mitte der Pagensander NE

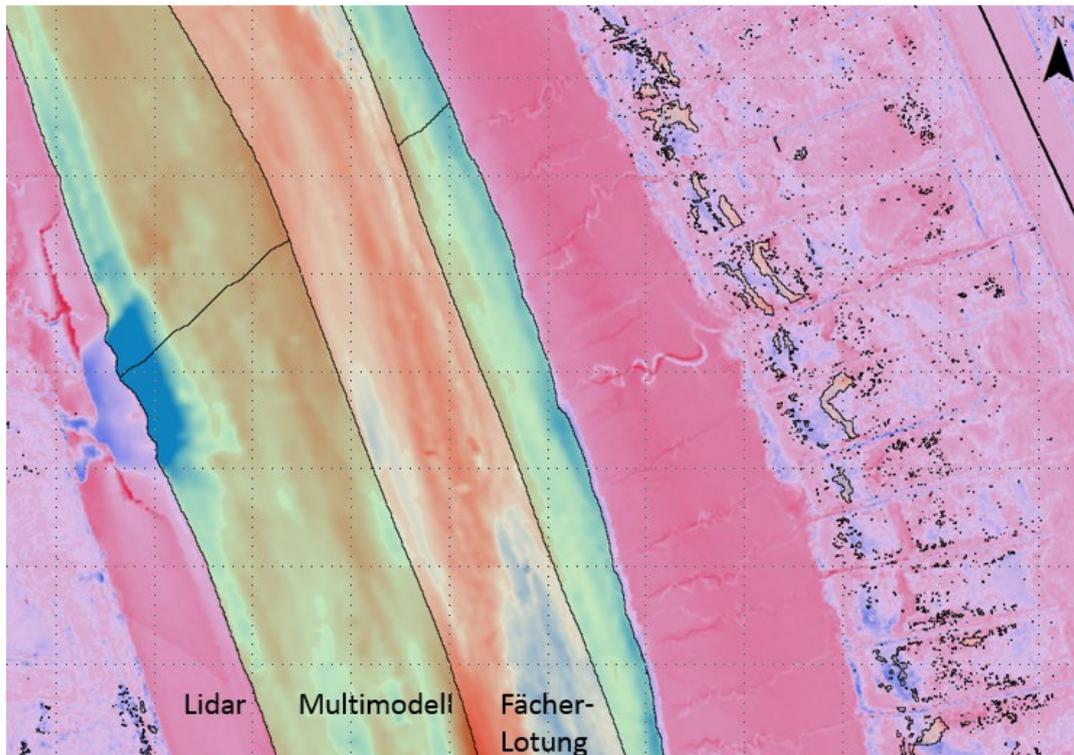


Abbildung 131: Exemplarische Darstellung der Datenquellen gemäß Datenquellenkarte DGM-W 2016 für einen Ausschnitt in der Mitte der Pagensander NE

A2.2 Untersuchungen und Versuche zur Ermittlung der tatsächlichen Messunsicherheit bei der bathymetrischen Vermessung

A2.2.1 Kalibrierfahrten zur Prüfung des Fächerlot-Messsystems

Zur Überprüfung der Werte der Boots-Korrekturparameter für Latency, roll, pitch und yaw (Abbildung 132), die in der Hardware-Konfiguration verwendet werden, werden regelmäßige Kalibriermessungen (Patch-Tests) durchgeführt.

Der Patch-Test (Abbildung 132) ist ein Datenerfassungs- und -verarbeitungsverfahren zur Kalibrierung der Winkel roll, pitch und yaw zusammen mit der Verzögerung (Latency) des Positionierungssystems.

Im zweiten Projektjahr wurden Patch-Tests mit dem Vermessungssystem des IWB-eigenen Peilbootes Nekton durchgeführt. Dabei wurden die ursprünglich für das fest installierte System ermittelten und in den Untersuchungen verwendeten Werte von der Größenordnung her bestätigt (Tabelle 35). Kleinere Abweichungen können auch bei fest installierten Systemen wie dem der Nekton aufgrund der nicht optimalen Bedingungen (Sohlform und -beschaffenheit) auftreten.

Vor einer Vermessung mit einem Fächerecholotsystem sind die Werte der Boots-Korrekturparameter für Latency, roll, pitch und yaw (Abbildung 132) zu bestimmen, bzw. zu überprüfen. Dies gilt insbesondere für Systeme mit beweglichen bzw. verschieblichen Komponenten aber auch für Systeme mit festinstallierten Komponenten, wie dem Messboot Nekton der TUHH. Zur Prüfung der Korrekturparameter werden regelmäßige Kalibriermessungen (Patch-Tests) durchgeführt. Der Patch-Test ist ein Datenerfassungs- und -verarbeitungsverfahren zur Kalibrierung der Winkel roll, pitch und yaw zusammen mit der Verzögerung (Latency) des Positionierungssystems.

Im zweiten Projektjahr (2020) wurde ein Patch-Test mit dem Vermessungssystem des Peilbootes Nekton durchgeführt. Dabei wurden die ursprünglich ermittelten und in den Untersuchungen verwendeten Werte von der Größenordnung her bestätigt (Tabelle 35). Theoretisch dürften bei fest installierten Komponenten keine Unterschiede auftreten. Praktisch ergeben sich für diese Systeme kleinere Abweichungen aus den Bedingungen in der Natur (Sohlform und -beschaffenheit), die den Anforderungen für Patch-Tests selten genügen.

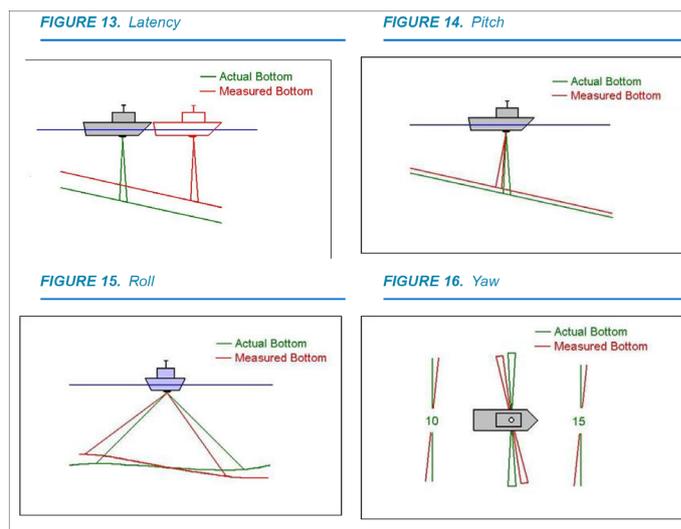


Abbildung 132: Schematische Darstellung von Boots-korrekturparametern (Quelle: Hypack user manual)

Tabelle 35: Patch-Tests, durchgeführt mit dem Boot Nekton

		yaw	pitch	roll
Patch Test 2020	Head 1	2,25	1,25	-0,5
	Head 2	-2,50	1,25	0,3
Patch Test 2007	Head 1	1,50	1,00	-0,40
	Head 2	-2,00	1,00	0,40
Patch Test 2005	Head 1	1,50	3,50	-0,40
	Head 2	-1,50	3,50	0,50

A2.2.2 Drempeifahrt

Im Rahmen der Vermessung der Pagensander Nebelbe wurde der Bereich um den elbseitigen Drempe des Krückau-Sperrwerks in den Jahren 2019 (Abbildung 133) und 2020 (Abbildung 134) vermessen. Ziel ist es, die per Fächerlot gemessenen Höhen mit bekannten Höhen, z.B. aus Bauplänen oder anderen Vermessungen, zu vergleichen und die absolute Genauigkeit der Messungen abzuschätzen.

Aus Bauplänen ist bekannt, dass der Drempe eine Höhe von $N(H)N-3,5$ m hat, wobei die konkrete Bezugsfläche nicht eindeutig aus den Plänen hervorgeht. Vermutlich handelt es sich um das DHHN92. Der Bereich vor dem Drempe hat gemäß Plan eine Höhe von $NN-4,0$ m. Der Betreiber des Sperrwerks LKN gibt als Drempehöhe $NHN -3,52$ m an, weitere Höhen sind dort nicht bekannt.

Bei einer Vermessung im Sperrwerksbereich sind einige Herausforderungen zu bewältigen. Die Betonsohle und die seitlichen Spundwände verursachen aufgrund ihrer Reflexionseigenschaften deutlich mehr Messfehler. Außerdem stören die hoch aufragenden Bauteile den GPS/GNSS-Empfang. Weiter ist bekannt, dass im Sperrwerksbereich eine starke Verlandungstendenz vorherrscht, der mit regelmäßigen Spülvorgängen und Grundräumungen entgegengewirkt wird.

Die Vermessungsergebnisse aus dem Jahr 2019 (Abbildung 133) zeigen in einigen Bereichen der Sperrwerkssohle deutliche Verlandungen. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2020 eine Drempeifahrt unmittelbar nach einer Grundräumung durchgeführt. Bei einer Grundräumung werden einzelne Bereiche trockengelegt, um Sedimente zu entfernen. Andere Bereiche, die nicht trockengelegt werden, werden von Tauchern per Wasserinjektion geräumt. Abbildung 134 zeigt das aus den Messwerten erzeugte digitale Geländemodell. Der Vergleich der Höhen mit den Bauplänen ergibt maximale Abweichungen von etwa $\pm 0,1$ m, was deutlich unterhalb der von der IHO geforderten Genauigkeit von $\pm 0,2$ m liegt (IHO 2008).

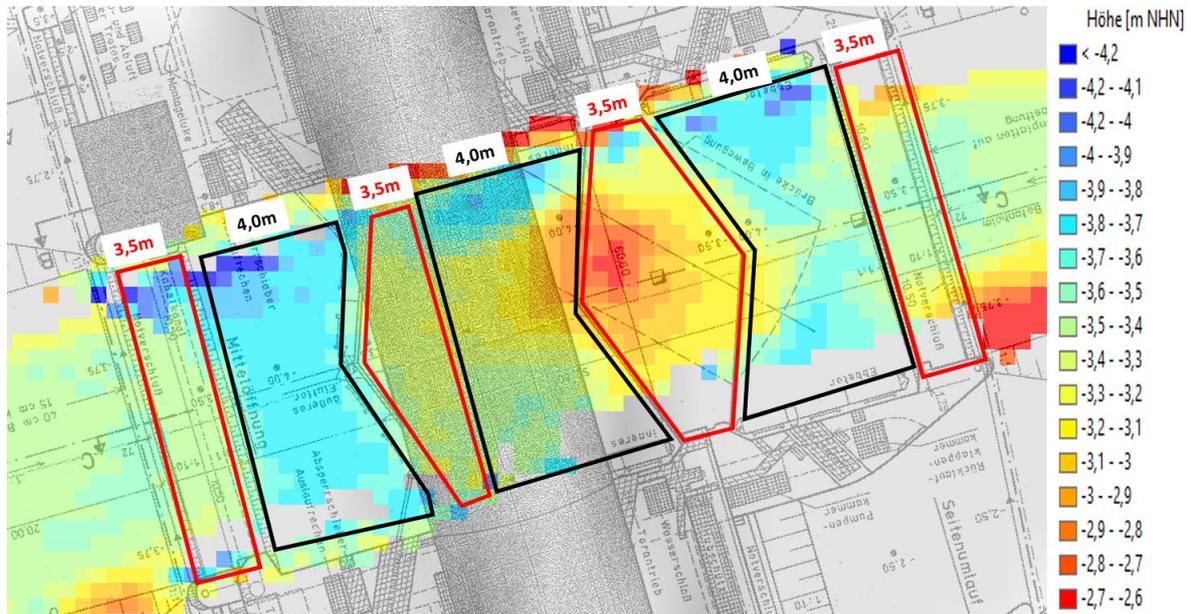


Abbildung 133: Ergebnisse der Vermessung des Drenpels im Bereich des Krückau-Sperrwerks im Jahr 2019.
 Die Höhen aus den Bauplänen sind für unterschiedliche Bereiche angegeben

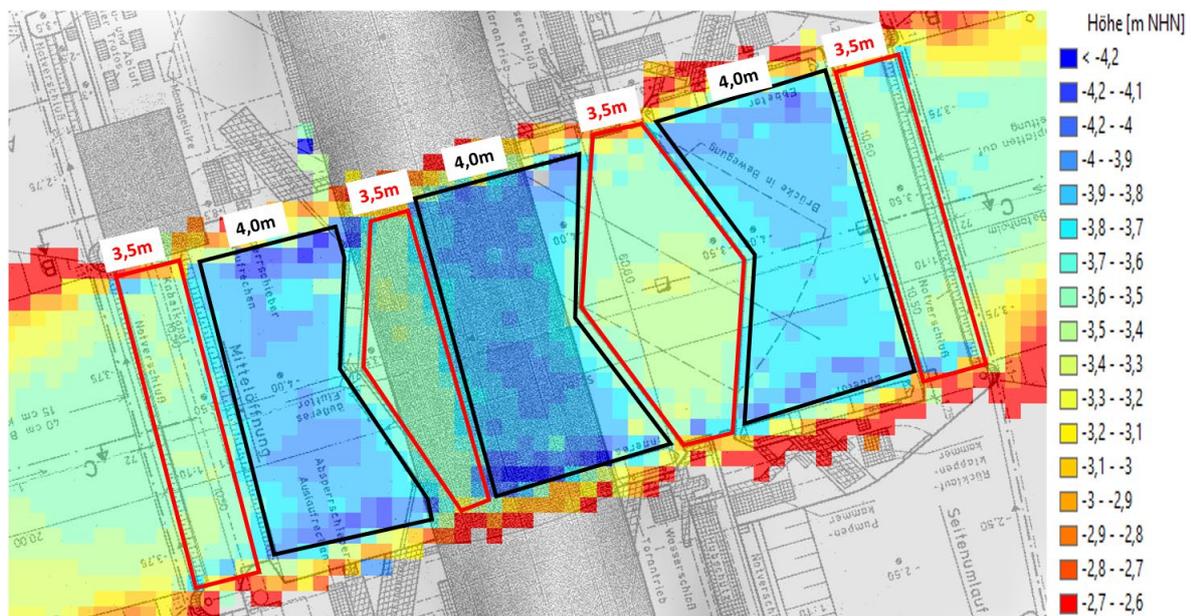


Abbildung 134: Ergebnisse der Vermessung des Drenpels im Bereich des Krückau-Sperrwerks im Jahr 2020.
 Die Höhen aus den Bauplänen sind für unterschiedliche Bereiche angegeben

A2.2.3 Kombinierte Unsicherheit U_{95} der Messwerte der Einzelmessung in Lage (THU) und Höhe (TVU)

Abbildung 135 gibt einen Überblick über einzelne Einflussfaktoren auf die Gesamt-Messunsicherheit bezogen auf ein Messsystem. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen A) zufälligen Abweichungen; B) systematischen Abweichungen sowie C) Störeinflüssen. Formal ist die Kategorie C) der Kategorie B) zuzuordnen. Beide wären im Rahmen einer statistischen Auswertung von Messdaten mit dem Ziel der Ermittlung der (statistischen) Messgenauigkeit (A) grundsätzlich auszuschließen. Da bei der praktischen Durchführung aber einige der systematischen Abweichungen (z.B. durch Kalibrierung und Berücksichtigung von Offsets) grundsätzlich in das Messverfahren einbezogen und unmittelbar während (z.B. rollausgleich) oder nach der Messung bei der anschließenden Korrektur (z.B. Schallgeschwindigkeitskorrektur) standardmäßig berücksichtigt werden, ist dies für ungeplante Störeinflüsse bzw. falsche Annahmen („grobe Fehler“) nicht der Fall. Insofern ist eine Differenzierung zwischen C und B für den praktischen standardmäßigen Ablauf der Datenerhebung und Korrektur sinnvoll. Zur Abschätzung der möglichen Größenordnung der Fehler, die durch systematische Abweichungen – bei keiner bzw. falscher Korrektur – für verschiedene Einflussgrößen (Abweichung des Einbauwinkels im Boot oder Salzgehalt und Temperatur des Gewässers, etc.) auftreten können, wird eine Sensitivitätsanalyse zur Einordnung der Bedeutung verschiedener Einflussfaktoren durchgeführt.

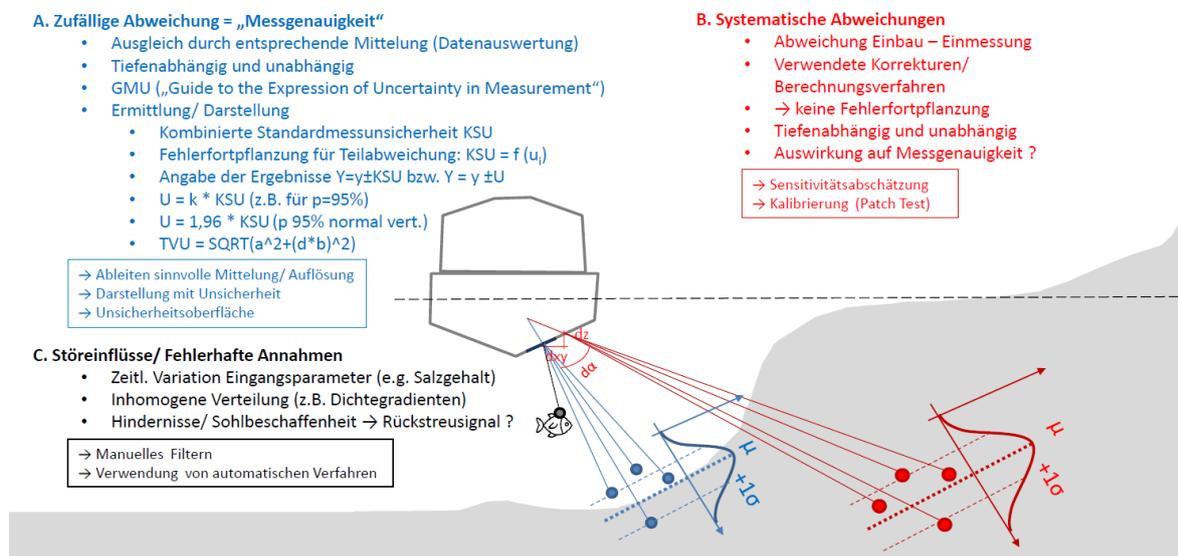


Abbildung 135: Skizze zur Zusammensetzung der Messabweichungen

Zur Angabe der zufälligen Abweichungen (Messgenauigkeit) wird die Gesamtunsicherheit aus der kombinierten Standardmessunsicherheit (KSU) für einen bestimmten Grad des Vertrauens (GdV) exemplarisch für das eingesetzte Messsystem ermittelt. Dazu werden positions- (THU) und tiefenabhängige Abweichungen (TVU) unterschieden. Die Gesamtunsi-

cherheit kann mittels Fehlerfortpflanzung einzelner Messkomponenten mit Teilunsicherheiten abgeleitet werden. Abbildung 135 zeigt exemplarisch die Fehlerfortpflanzung für die Komponenten und Teilunsicherheiten des verwendeten Fächerecholotsystem (Seabeam SB1185).

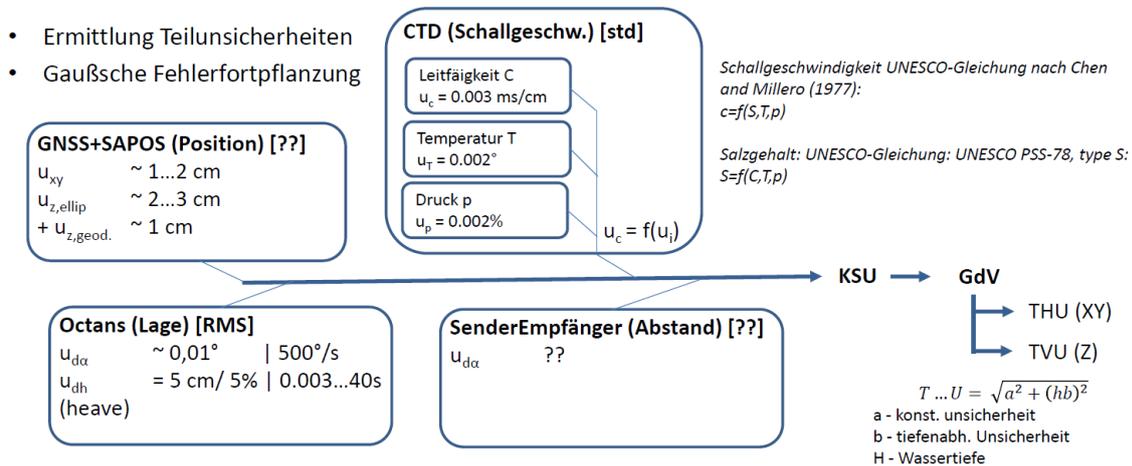


Abbildung 136: Korrekturdaten mit Teilunsicherheiten und Fehlerfortpflanzung für Fächerecholotmesssysteme

Im Wesentlichen ergeben sich Teilunsicherheiten für

- i. die Bestimmung der Position mittels GNSS in Abhängigkeit des verwendeten Ortungsverfahrens (z.B. SAPOS, eigene Base),
- ii. die Lagekorrektur mit der inertialen Messeinheit (Octans),
- iii. die Ableitung der Schallgeschwindigkeit aus den zugrunde liegenden Messgrößen mit der CTD-Sonde sowie
- iv. der eigentlichen Abstandsmessung Sende-und-Empfangeinheit des Fächerecholotes.

Zur Ermittlung und Beschreibung der Gesamtunsicherheit werden der GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ sowie die Technische Regel ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 Messunsicherheit – Teil 3) herangezogen. Zu Konzeption und konkreten Ermittlung der Gesamtunsicherheiten wird auf bestehende Berechnungsverfahren der BfG (u.a. Hydrography-Analyst oder entsprechende Verfahren) mit Unterstützung des WSA Elbe-Nordsee zurückgegriffen. Hierzu ist ein Austausch mit der BfG angedacht.

Durch die Software Hypack, die für die Sammlung und Verarbeitung von Peildaten verwendet wird, ist eine Bewertung der THU, TVU und Zielerkennung (Mindestgröße eines Objekts oder Gegenstands, der vom Fächerlot erkannt werden soll, z. B. ein Rohr am Boden) möglich. Für die Berechnung dieser Werte werden verschiedene Parameter als Input verwendet, die meist von der verwendeten Ausrüstung und dem Offset des Schiffes stammen, aber

auch von den Messbedingungen, wie z.B. der örtlichen Tiefe und der Schiffsgeschwindigkeit. Auf diese Weise ist es möglich, ein Gesamtideal der gesamten Messunsicherheit unter Berücksichtigung aller verwendeten Geräte zu erhalten. Leider wird das Tool von der Softwarefirma entwickelt und sein Code ist nicht verfügbar.

Die berechnete TVU (Tiefenunsicherheit), TPU (Positionsunsicherheit) und Zielerkennung (Zielerkennung) für die mit dem Boot Nekton vom IWB TUHH durchgeführten Nebenebenenmessungen sind in Abbildung X für die Tiefen 5m, 10m und 15m dargestellt. Als Referenz wird die IHO Special Order verwendet, die die höchsten Kriterien hat und in Gebieten angewendet wird, in denen der Abstand unter dem Boot kritisch ist (IHO 2008).

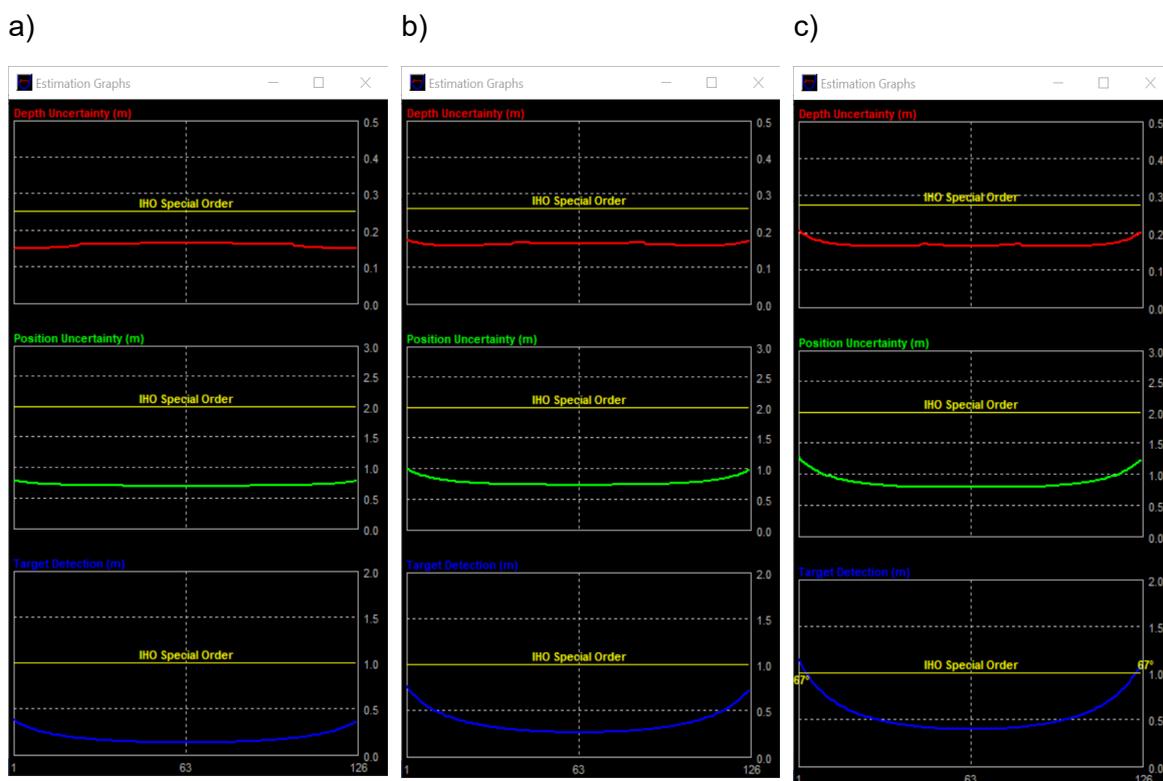


Abbildung 116 Screenshots aus der Hypack-Software für die berechnete TVU, THU und Zielerkennung für die Tiefen von a) 5m, b) 10m und c) 15m

Die Ergebnisse zeigen, dass die durchgeführten Messungen TVU- und THU-Werte von weniger als 0,2 m bzw. 1,5 m für die drei verschiedenen analysierten Tiefen aufweisen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Tiefen in den Nebenebenen kaum größer als 10m NHN sind, ist die Genauigkeit sogar noch besser. Darüber hinaus entspricht die Genauigkeit in fast allen Fällen den Anforderungen des IHO Special Orders, mit der einzigen Ausnahme der Zielerkennung in 15m Tiefe bei Strahlenwinkeln von mehr als 67°.

A2.3 Sensitivitätsstudien als Grundlage zur Prüfung der Anforderungen an die bathymetrische Vermessung und Datenaufbereitung

Bathymetrische Daten liegen in der Regel in Form von digitalen Geländemodellen des Gewässerlaufs von (DGM-W) vor. Dieses in der Lage verortete, regelmäßige Raster gibt in jeder Zelle einen Höhenwert an, der die Höhe der Gewässersohle beschreibt.

Die Höhenwerte des DGM-W sind mit Ungenauigkeiten (Fehlern) behaftet, die zum einen aus der Interpolation der Rohdaten der Vermessung resultieren und zum anderen bei der Erhebung der Rohdaten entstehen. Letztere setzen sich im Wesentlichen zusammen aus

- i. Messungenauigkeiten (Lage- und Höhenungenauigkeiten, ungenaue Bootskorrekturparameter) und
- ii. Ungenauigkeiten, die durch die Aufbereitung der Rohdaten entstehen (manuelle Filterung, statistische Filterung).

Ziel im Rahmen dieses Vorhabens ist es, den Einfluss von Messungenauigkeiten, Ungenauigkeiten aus der Datenaufbereitung sowie der Interpolation der Daten auf ein regelmäßiges Raster zu untersuchen und möglichst zu quantifizieren. Hierzu werden Sensitivitätsstudien durchgeführt.

A2.3.1 Einfluss der Boots-Korrekturparameter (Datenaufnahme)

Um herauszufinden welchen Einfluss Abweichungen in den Boots-Korrekturparametern auf die erzeugten digitalen Geländemodelle haben, wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt. Hierbei wurden die im Rahmen des Patch-Tests 2020 ermittelten Korrekturwerte für roll-, yaw- und pitch als korrekt angenommen. Die mit diesen Werten ermittelten Jahrestopographien bilden die Referenz. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden die Werte für yaw, pitch und roll jeweils um 0,5, 1,0, 2,0 bzw. 5,0 Grad⁴ geändert und jeweils neue Jahrestopographien erzeugt. Diese neuen Jahrestopographien wurden anschließend von der Referenztopographie subtrahiert und das resultierende Differenzenraster analysiert und ausgewertet.

Die Ergebnisse der Auswertung der Differenzenraster für die Variation von yaw und pitch sind in Abbildung 137 dargestellt. Dort sind die Anzahlen der Rasterzellen (y-Achse) in Klassen mit 10 cm Klassenbreite (x-Achse) dargestellt. Es wird deutlich, dass die Variation der Korrekturwerte yaw und pitch bei einer gesamtheitlichen Betrachtung nur zu geringen Änderungen führt (beachte: logarithmische y-Achse).

4 Da das Messboot des Instituts für Wasserbau der TUHH mit zwei Schwingköpfen ausgestattet ist, wurden zunächst ausschließlich positive Werte auf beide Schwingköpfe betrachtet, da negative Werte sich genau spiegelbildlich auswirken.

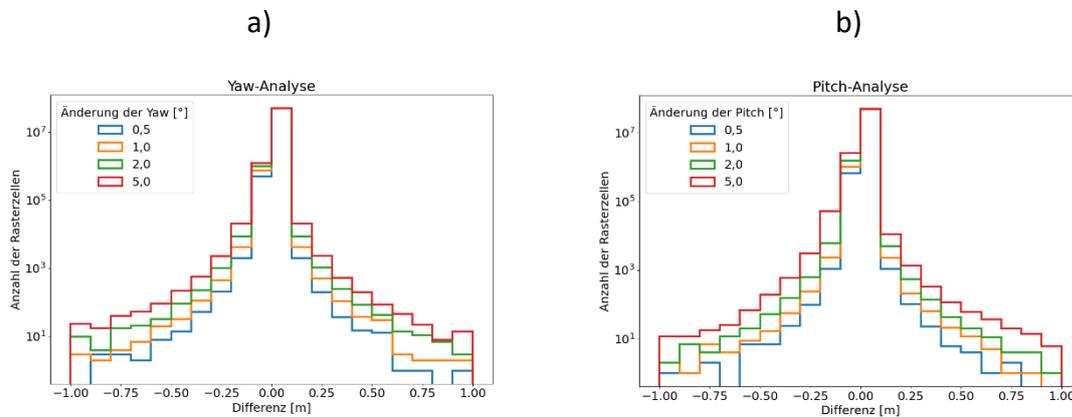


Abbildung 137: Sensitivitätsanalyse: Auswertung der Differenzenraster (Referenz - Szenario) für a) yaw-Variation und b) pitch-Variation, y-Achse in logarithmischer Skala

Eine detaillierte Betrachtung von einem strukturreichen Abschnitt (Dünen) der Hahnöfer Nebelbe (Abbildung 138) zeigt jedoch größere Auswirkungen und stellt die Bedeutung des Parameters yaw im Fall von strukturreichen Sohlformen heraus. Durch die falschen yaw-Werte werden die Dünen zwar erfasst, jedoch nicht richtig im Raum verortet. Im Differenzenraster drückt sich dies durch scheinbar wandernde Sohlstrukturen aus. Im Fall einer vergleichsweise ebenen Sohle sind die Auswirkungen sehr gering.

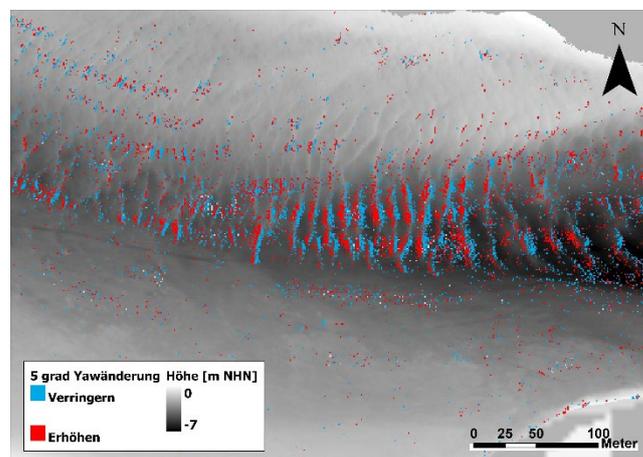


Abbildung 138 Auswirkung einer 5-Grad Änderung des yaw-Korrekturwerts auf die abgeleitete Bathymetrie in einem Sanddünenfeld in der Hahnöfer Nebelbe

Die Ergebnisse der Auswertung der Differenzenraster für die Variation des roll-Winkels sind in Abbildung 139 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass eine Abweichung des roll-Winkels von seinem korrekten Wert bereits um nur $0,5^\circ$ eine Vielzahl von Rasterzellen mit größeren Differenzen hervorruft. Mit zunehmender Abweichung des Winkels nehmen die Rasterzellen mit größeren Abweichungen ebenfalls zu.

Werden die Abweichungen im Differenzenraster über die absolute Tiefe im Referenzraster aufgetragen, wird eine Tiefenabhängigkeit deutlich: je größer die Tiefe, desto größer die Abweichung. Die Erklärung hierfür liegt darin, dass der Fehler durch einen falschen roll-Winkel umso größer ist, je länger ein einzelner Schallbeam im Wasser unterwegs ist. Dies ist einerseits bei einer größeren Wassertiefe und andererseits bei den äußersten Beams des Fächerecholotes, die seitlich abgestrahlt werden, gegeben. Abbildung 140 verdeutlicht die Effekte für einen Querschnitt der Lühesander Süderelbe. In der Abbildung steht die farbliche Codierung für einzelne aufgenommene Tracks. Der obere Teil zeigt das Querprofil mit korrekten roll-Werten, der untere Teil zeigt dasselbe Querprofil mit einem roll-Winkel, der um 5° vom korrekten Wert abweicht. Ein falscher roll-Winkel führt zu einer V-förmigen Ausprägung der einzelnen Tracks, die mit zunehmender Tiefe immer stärker ausfällt.

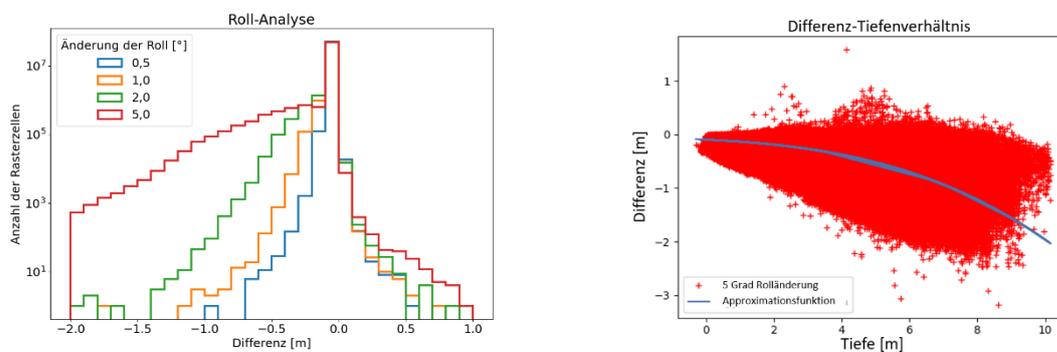
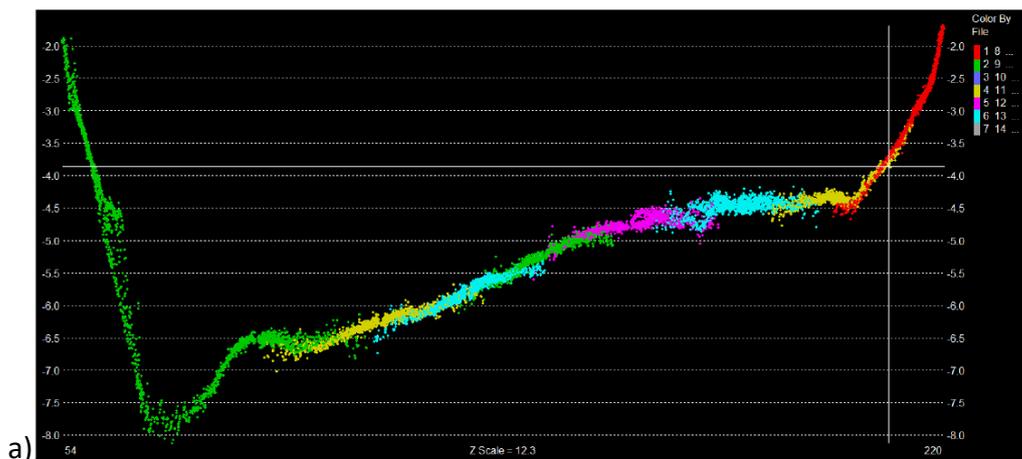


Abbildung 139: links: Sensitivitätsanalyse: Auswertung der Differenzenraster (Referenz - Szenario) für roll - Variationen, y-Achse in logarithmischer Skala; rechts: Tiefenabhängigkeit der Differenzen bei 5° Abweichung des roll-Winkels



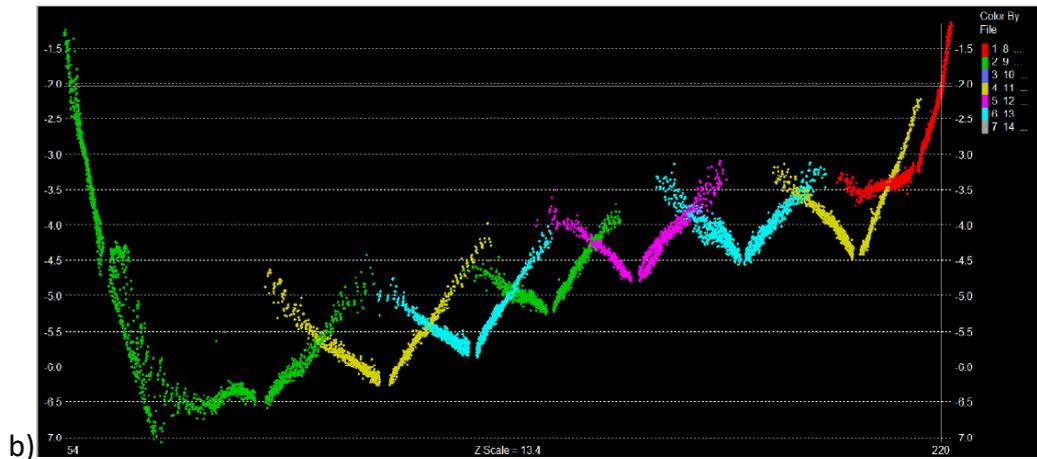


Abbildung 140: Querschnitt der gesammelten Daten der Lühesander Süderelbe mit a) korrekten rollwerten und b) 5 Grad Rolländerung

Insgesamt lässt sich zusammenfassen:

- Je größer die Abweichungen der Boots-Korrekturparameter yaw, pitch und roll, desto größer die Abweichungen im Differenzenraster
- Abweichungen des yaw-Winkels führen insbesondere bei Sohlstrukturen zu größeren Abweichungen, bei ebener Sohle sind die Abweichungen gering
- Ein abweichender roll-Winkel verursacht deutlich größere Auswirkungen im Differenzenraster als abweichende Werte für yaw und pitch. Bereits bei einer Abweichung des roll-Winkels um $0,5^\circ$ sind große Auswirkungen zu erkennen. Zudem wird der Fehler umso größer, je länger der Schall-Ping im Wasser unterwegs ist, d.h. bei größeren Wassertiefen und bei den äußeren (seitlichen) Beams des Fächerlotes.

Die Sensitivitätsstudie zeigt insgesamt die Bedeutung von Boots-Korrekturparametern. Es wird deutlich, dass insbesondere ein möglichst genauer roll-Korrekturparameter entscheidend für die Genauigkeit der Messdaten ist. Im Fall eine strukturreichen Gewässersohle ist zudem der Korrekturwerte für den yaw-Winkel von großer Bedeutung.

Im Ergebnis wird empfohlen, dass mit jedem Vermessungsdatensatz die Ergebnisse der vorangegangenen Patch-Tests übergeben werden. Dabei ist nachzuweisen, dass die Variation der einzelnen Korrekturparameter einen noch zu definierenden Grenzwert nicht überschreitet.

A2.3.2 Einfluss von manueller und automatischer Filterung bei der Datenaufbereitung (Datenauswertung)

Auch bei optimaler Einstellung des Messsystems und Verwendung korrekter Bootskorrekturparameter enthalten die Vermessungsrohdaten in der Regel unplausible Einzelwerte. Diese resultieren u.a. aus einer unterschiedlichen Eindringtiefe in die Sohle, ungünstige Einfallwinkel, Bewuchs, Luftbläschen oder Schwebstoffe in der Wassersäule, Nebenkeulen oder Mehrfachreflexionen (z.B. im Bereich von Spundwänden). Je nach den Bedingungen vor Ort kann der Anteil der unplausiblen Einzelwerte 10% und mehr ausmachen.

Im Rahmen der Datenaufbereitung, die sich an die Messung anschließt, werden die unplausiblen Einzelwerte herausgefiltert. Dies geschieht in der Regel in zwei Stufen, einer manuellen Filterung und einer anschließenden statistischen Filterung. Die im Vorhaben angewendete Standard-Abfolge ist in Tabelle 7 dargestellt.

Bei der manuellen Filterung werden die Daten gesichtet und unter Berücksichtigung der Verhältnisse vor Ort dem Grunde nach plausibilisiert. Offensichtliche Ausreißer werden manuell entfernt. Anschließend werden statistische Filter angewendet, um weitere Ausreißer zu identifizieren und zu entfernen. Dabei ist festzuhalten, dass sowohl die manuelle Filterung (subjektive Entfernung von Ausreißern) als auch die statistische Filterung (Wahl und Abfolge der Filter) von individuellen, subjektiven Entscheidungen beeinflusst sind.

Um den Einfluss unterschiedlicher Filterprozeduren in der ersten und zweiten Stufe zu ermitteln, wurden zwei Sensitivitätsstudien durchgeführt. Dabei wurden die gängigen statistischen Filterprozeduren 2σ , 4σ und Überhang/Unterschneidung (vgl. Abbildung 141 sowie die manuelle Filterung untersucht. Die Grundlage der Untersuchungen bildeten wiederum die im Jahr 2020 erhobenen Messdaten für die Nebeneiben. Auf die Vermessungsrohdaten wurden im Rahmen der Sensitivitätsstudien unterschiedliche Filter in unterschiedlicher Abfolge angewendet. Aus den gefilterten Datensätzen wurden Szenario-Raster erzeugt, die von einem Referenz-Raster subtrahiert wurden. Die so entstandenen Differenzenraster wurden anschließend analysiert.

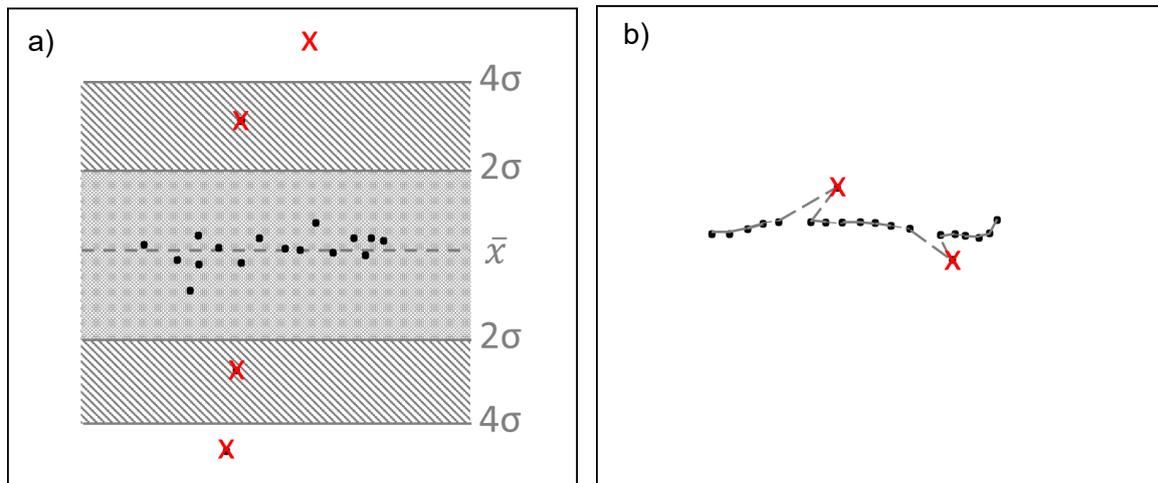


Abbildung 141: a) Wertebereiche des 2σ bzw. 4σ - Filters mit identifizierten Ausreißern, b) Überhang/Unterschneidung Filter mit identifizierten Ausreißern

Folgende Sensitivitätsstudien wurden durchgeführt:

Studie A zum Einfluss des gewählten Filters in der ersten Stufe: manuelle Filterung, 2 verschiedene statistische Filter

Diese Studie fokussiert auf die erste Stufe der Datenfilterung. Aus die Vermessungsrohdaten werden ohne vorherige manuelle Filterung verschiedene statistische Filter angewendet. In einem Fall erfolgt eine manuelle Filterung der Ausreißer. Die resultierenden Raster werden mit den im Vorhaben erzeugten Jahrestopographien verglichen, die in der ersten Stufe manuell und in der zweiten Stufe statistisch mit dem 2σ -Filter bereinigt wurden. Diese Studie soll zeigen, inwieweit die zeitaufwändige, subjektive manuelle Filterung in der ersten Stufe durch statistische Filter ersetzt werden kann.

Studie B zum Einfluss einzelner statistischer Filter in der zweiten Stufe, nachdem zuvor in der ersten Stufe eine manuelle Filterung durchgeführt wurde

Diese Studie fokussiert auf die zweite Stufe der Datenfilterung. Die verwendeten Daten wurden zuvor in der ersten Stufe manuell gefiltert. Anschließend werden in der zweiten Stufe verschiedene statistische Filter auf die Daten angewendet. Hierzu sein angemerkt, dass die jeweils unter Anwendung des 2σ Filters erzeugten Datensätze den Jahrestopographien entsprechen. Die resultierenden Raster werden anschließend mit einem Referenzraster, welches aus dem nur manuell gefilterten Datensatz erzeugt wird, verglichen. Diese Studie soll den Effekt der einzelnen statistischen Filter verdeutlichen.

Die Ergebnisse von Studie A sind in Abbildung 142 dargestellt. Diese zeigt die Anzahl der Rasterzellen (y-Achse, logarithmisch) des Differenzrasters für definierte Klassen (x-Achse). Für alle drei Nebelnelben bzw. Nebelnelbensysteme zeigt sich, dass vergleichsweise viele Rasterzellen des Differenzrasters (betragsmäßig) größere Werte aufweisen,

was bedeutet, dass insgesamt große Abweichungen vom Referenzraster bestehen und zeigt, dass die alleinige Anwendung eines statistischen Filters in der ersten Stufe der Datenfilterung zu schlechten Ergebnissen führt. Werden die Daten nur manuell gefiltert, sind die Abweichungen in der Größenordnung und um Umfang deutlich geringer. Dies gilt insbesondere für die Hahnöfer NE und die Lühesander SE, aber auch für das System Pagensander NE/Haseldorfer BE. Die fehlende Eignung von statistischen Filtern in der ersten Stufe lässt sich dadurch erklären, dass die berechneten Standardabweichungen bei fehlender manueller Vorfilterung aufgrund der größeren Streuung größer sind. Dementsprechend werden durch den 2σ und 4σ Filter deutlich weniger Ausreißer identifiziert. Folglich ist der Unterschied zu den gänzlich ungefilterten Rohdaten sehr gering. Insgesamt wird deutlich, dass keiner der untersuchten statistischen Filter in der Lage ist, die (zeitaufwändige) manuelle Filterung in der ersten Stufe sinnvoll zu ersetzen.

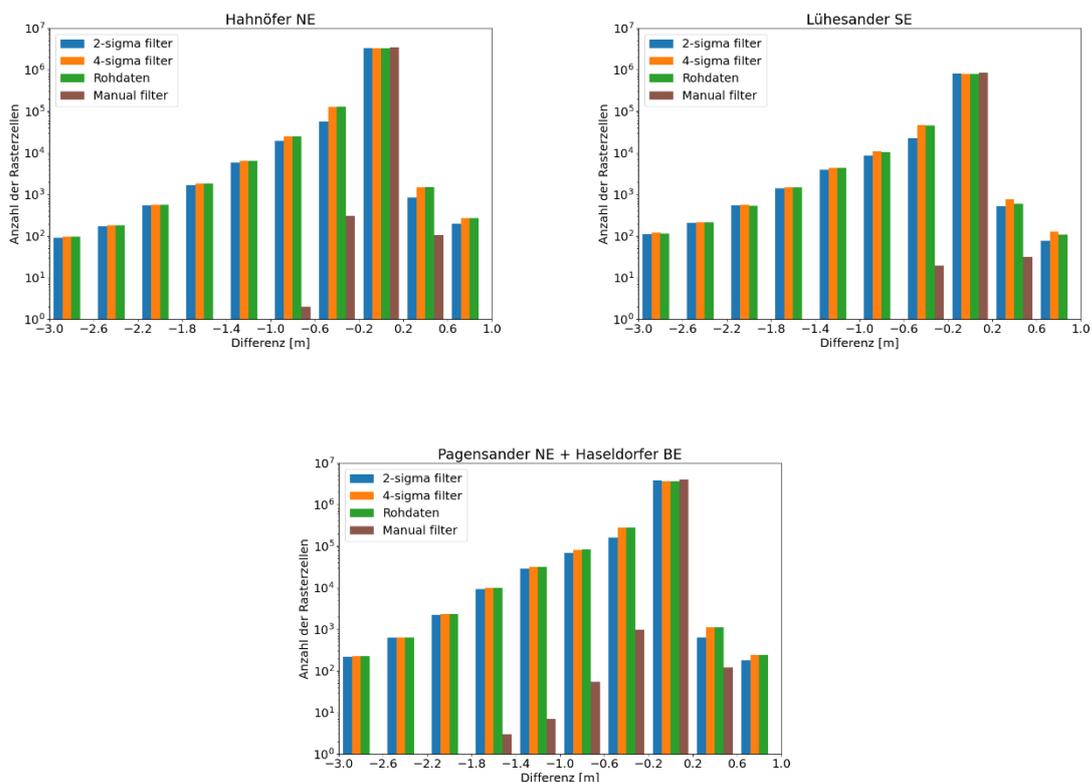


Abbildung 142: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie A (Erste Phase der Datenaufbereitung mit statistischen bzw. manuellen Filtern), dargestellt ist die Auswertung der jeweiligen Differenzraster (Referenzraster – Szenario-Raster) für die Hahnöfer NE, die Lühesander SE und das System Pagensander NE/Haseldorfer BE

Die Ergebnisse von Studie B sind in Abbildung 143 dargestellt. Diese zeigt die Anzahl der Rasterzellen (y-Achse, logarithmisch) des Differenzrasters für definierte Klassen (x-Achse). Im Fall der Hahnöfer NE und der Lühesander SE führen die Anwendung des 2σ -

und 4σ -Filters in der zweiten Stufe zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Mit dem Überhang/Unterschneidung Filter werden mehr Ausreißer herausgefiltert, weshalb die Abweichungen größer (mehr Zellen, betragsmäßig größere Werte) sind. Die Auswertung des Differenzenrasters für das System Pagensander NE/Haseldorfer BE zeigt ein anderes Ergebnis. Hier werden mit dem 4σ -Filter deutlich weniger Ausreißer herausgefiltert als mit den anderen Filtern. Ein Grund hierfür könnte der weitaus größere Anteil an Bereichen mit geringen Wassertiefen sein. Mit dem 2σ -Filter und dem Überhang/Unterschneidung Filter werden mehr Ausreißer detektiert. Allerdings ist die Gesamtanzahl der detektierten Ausreißer geringer als für die Datensätze der Hahnöfer NE und der Lühesander SE, was möglicherweise an den dort vorhandenen Transportkörpern liegt.

Insgesamt wird deutlich, dass die Anwendung von statistischen Filtern in der zweiten Stufe der Datenaufbereitung sinnvoll ist, da im Rahmen der manuellen Filterung keine vollständige Ausreißerbereinigung möglich ist. Mit dem 4σ Filter werden die wenigsten Ausreißer detektiert, gefolgt vom 2σ Filter und dem Überhang/Unterschneidung Filter.

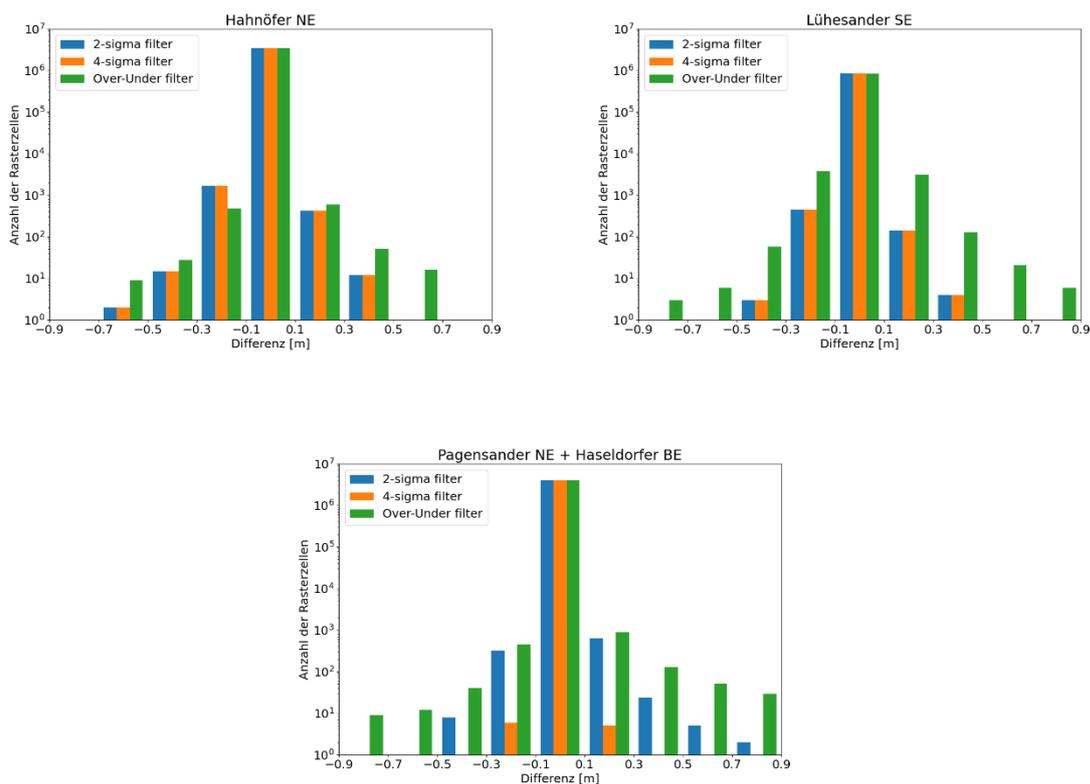


Abbildung 143: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie B (Zweite Phase der Datenaufbereitung mit statistischen Filtern), dargestellt ist die Auswertung der jeweiligen Differenzenraster (Referenzraster (= Raster aus manuell gefilterten Daten) – Szenario-Raster) für die Hahnöfer NE, die Lühesander SE und das System Pagensander NE/Haseldorfer BE

A2.3.3 Einfluss von Interpolationsmethodik und Zellauflösung

Die in Kapitel 3.2 vor- und zusammengestellten digitalen Geländemodelle (DGMs) der Nebenelben repräsentieren die Bathymetrie in den Nebenelben in jährlichen Zeitschritten auf räumlichen Rastern und wurden nach einer durchgängigen Methodik ermittelt. Bei der Ermittlung der digitalen Geländemodelle wird die Modellgüte und das Maß der Unsicherheiten der DGMs durch mehrere Einflussgrößen determiniert. Hierbei spielen neben der Kalibrierung der Messgeräte und der automatischen und manuellen Filterung der Daten insbesondere auch die Arbeitsschritte bei der finalen Berechnung des jeweiligen DGMs aus den vorher prozessierten Messdaten eine nicht unerhebliche Rolle. Wesentlich sind hierbei die Netzauflösung des DGMs und die Anzahl von validen Messpunkten innerhalb einer Gitterzelle.

Für die Ermittlung der in Kapitel 3.2 zusammengefassten DGMs wurden Zellgitter mit einer Auflösung von 1m x 1m gewählt. Die Knotenpunkte wurden in Anlehnung an die DGM-W Zellraster jeweils auf ganzzahlige UTM-Koordinaten gelegt. Als Attributwert (Höhenwert) einer Zelle wurde das arithmetische Mittel aller in einer Zelle valide (s.o.) erfassten Messpunkte (Beams) zugeordnet. Sofern in einer Zelle lediglich ein valider Messpunkt erfasst wurde, so bestimmt dessen Wert den Attributwert (Höhenwert) der Zelle. Zellen in denen kein Messpunkt erfasst wurde das Attribut "kein Datenwert" zugewiesen. Eine Interpolation der Attribute aus umgebenden Zellen wurde nicht durchgeführt.

Das Ziel der im Folgenden zusammengefassten Analyse ist es, die Unsicherheiten bei der Erstellung von DGMs mit der vorgenannten Methodik zu ermitteln. Daneben werden die Auswirkungen anderer Vorgehensweisen zur Ermittlung von DGM vergleichend betrachtet. Hierbei stehen die Auswirkungen von verschiedenen Analysemethoden auf die Repräsentation der örtlichen Topographie durch das DGM im Vordergrund. Schwerpunkt bilden die Auflösung des dem DGM zugrunde liegenden Rasters sowie die Interpolationsmethode für den Attributwert innerhalb der Zellen.

Interpolation

Grundsätzlich stehen verschiedene Interpolationsmethoden für die Ermittlung eines DGM-Zellenwertes (Attributwert) zur Verfügung. Die Interpolationsmethoden sollten entsprechend der vorgesehenen Anwendung bzw. Interpretation der DGM verwendet werden. Wird ein DGM beispielsweise für die Beschreibung der lokalen Topografie verwendet, wie es im Projekt Nebenelben der Fall ist, ist vielfach die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts der Messdaten die geeignetste Interpolationsmethode. Dient das DGM hingegen ausschließlich nautischen Zwecken, kann die Verwendung des größten Höhenwerts (geringste Tiefe) geeignet sein, um mehr Sicherheit für den Schiffsverkehr zu gewährleisten. Andere statistische Verfahren, wie die Verwendung des ersten oder dritten Quartils, oder komplexe Methoden, wie die stärkere Gewichtung der Mittelbeams in benutzerdefinierten Modellen, sind weniger üblich, aber ebenfalls denkbar.

Zellauflösung

Wie die Interpolationsmethode determiniert auch die Zellauflösung die Unsicherheiten bei der Erstellung eines DGM (Maleika 2015). Je nach räumlicher Auflösung des Zellgitters kommt es zu Verzerrungen des DGMs oder zu einer mehr oder weniger guten Abbildung von (hier morphologischen) Details bei der Charakterisierung der lokalen Topografie. Diese Verzerrungen und die Auflösung von Details werden je nach Interpolationsmethode mehr oder weniger gut ausgeglichen. Im Allgemeinen besteht der Haupteffekt einer Erhöhung oder Verringerung der räumlichen Zellauflösung in einer Erhöhung bzw. Verringerung der Detailgenauigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Vergrößerung einer Zelle die gemessenen Punkte von Übergangsbereichen, wie z. B. Ufer, stärkere Steigungen und kleinräumige Sohlformen, durch die Mittelung der Daten (teilweise) überblendet. Exemplarisch sind die für jede Zelle der DGM der Nebelnelben berechneten Standardabweichungsverteilungen für Zellauflösungen von 1m, 5m und 10m in Abbildung 144 dargestellt. Als Auswirkung der Vergrößerung der Zellgröße wird die Standardabweichung der ermittelten Werte jeder Zelle größer. Dies führt zu rechnerisch höheren Unsicherheiten (Abweichungen) der Werte innerhalb des DGMs.

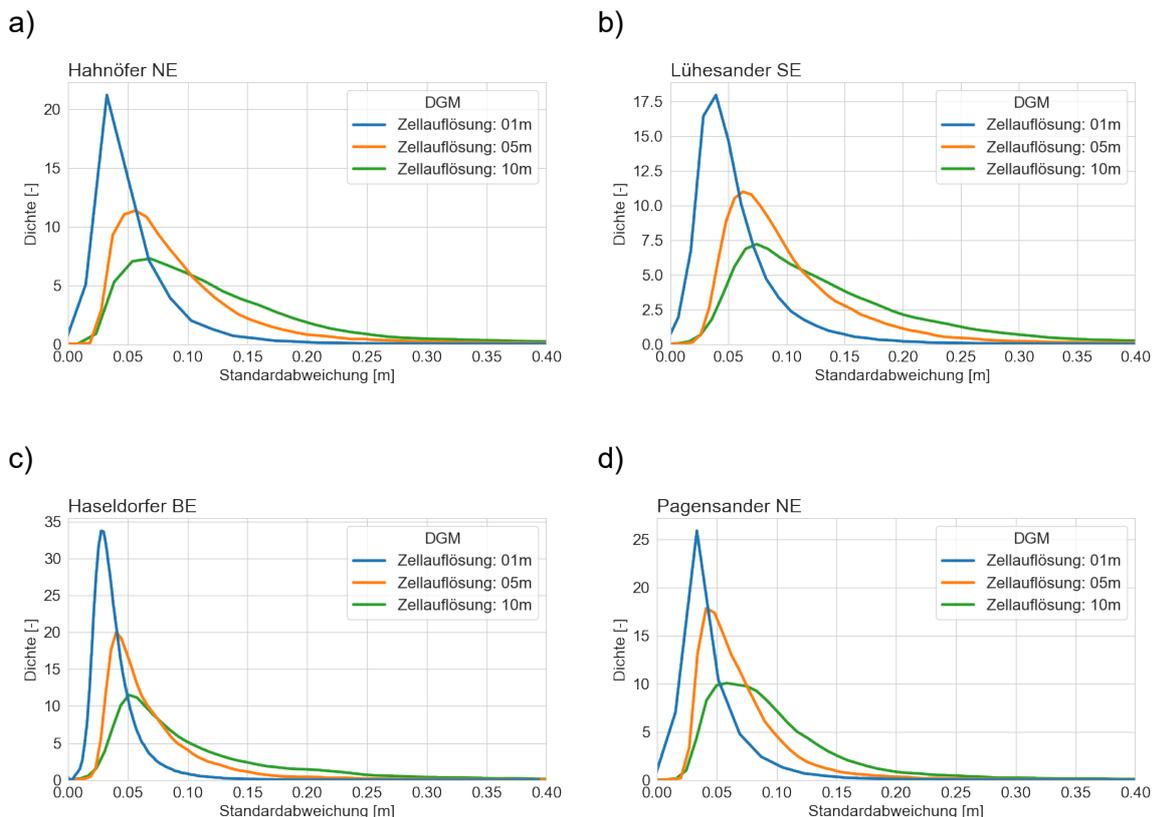


Abbildung 144: Standardabweichungsverteilung der DGM mit 1m, 5m und 10m Zellauflösung für a) Hahnöfer NE, b) Lühesander SE, c) Haseldorfer BE und d) Pagensander NE.

Unsicherheiten

Es gibt kein Standardverfahren zur Berechnung der Unsicherheiten bei der Erstellung eines DGM. Vielfach werden die Werte auf Grundlage der Standardabweichungswerte der Verteilungen bewertet. Nimmt man eine Normalverteilung der Abweichungen der Einzelwerte einer Zelle vom Mittelwert an, dann ergibt sich ein Konfidenzintervall von 95% aus der Standardabweichung multipliziert mit $\pm 1,96$. Die im vorliegenden Fall ermittelten Verteilungen der Standardabweichungen im DGM sind offensichtlich nicht normalverteilt (vgl. Abbildung 144). D.h. die Standardabweichung der Standardabweichungen ergibt kein sinnvolles Maß für die Bewertung. Vergleichend wurden daher zwei verschiedene Werte aus den Dichtefunktionen der Verteilungen extrahiert, um jeweils einen einzigen Wert aus der Verteilung der Standardabweichungen als Grundlage für die Berechnung des Konfidenzintervalls mit den drei Zellauflösungen zu extrahieren. Die erste Methode verwendet den Maximalwert der Verteilung. Dieser kann für eine Zellauflösung von 1 m eindeutig ermittelt werden, ist aber für den flacheren Gipfel der Verteilung mit einer Zellauflösung von 10 m beispielsweise nicht immer ganz eindeutig zu ermitteln. Daher wird vergleichend bei der zweiten Methode der Medianwert der Verteilungsfunktion verwendet. Dieser ist aufgrund der Schiefe der Verteilung immer größer als der Maximalwert der Dichtefunktion.

Die sich nach der vorgenannten Methodik ergebenden „repräsentativen“ Standardabweichungen und die entsprechenden Konfidenzintervalle sind in Tabelle 36 für die vier Nebenebenen unter Verwendung der drei Zellauflösungen (1m, 5m und 10m) angegeben. Betrachtet man den Median der Verteilung als Referenzwert, so haben alle DGM mit einer Zellauflösung von 1 m ein Konfidenzintervall von weniger als 0,1 m. Die Konfidenzintervalle steigen mit geringerer (größer werdender) Auflösung an. Maximal wurden für das DGM von Lühesander SE mit einer Zellauflösung von 10 m ein Konfidenzintervall von 0,235 m erreicht. Bei Verwendung des Maximums der Dichtefunktion der Verteilungen sind alle Konfidenzintervalle kleiner 8cm für Rasterauflösung von 1m. Der höchste ermittelte Wert der Konfidenzintervalle auf der Grundlage der Maximalwerte beträgt 0,146 m für das DGM der Lühesander SE mit einer Zellauflösung von 10 m.

Tabelle 36: Standardabweichung und, in Klammern, die Größe des Konfidenzintervalls für 95 % der DGM-Zellen bei Verwendung unterschiedlicher Auflösungen sowie unterschiedlichen Parametern (Maximalwert, Median) als Grundlage für die Definition „signifikanter“ Werte der Standardabweichungen aus der Dichtefunktion der Raster-basierten Standardabweichungen eines DGM.

	Maximalwert			Median		
	1m	5m	10m	1m	5m	10m
Hahnöfer NE	0,032 (0,064)	0,056 (0,111)	0,069 (0,135)	0,044 (0,085)	0,078 (0,152)	0,106 (0,208)
Lühesander SE	0,039 (0,077)	0,063 (0,123)	0,074 (0,146)	0,047 (0,092)	0,087 (0,170)	0,120 (0,235)
Haseldorfer BE	0,028 (0,054)	0,040 (0,079)	0,051 (0,100)	0,034 (0,067)	0,057 (0,112)	0,082 (0,160)
Pagensander NE	0,033 (0,065)	0,041 (0,080)	0,058 (0,114)	0,036 (0,071)	0,061 (0,119)	0,085 (0,166)

Der Vergleich der Auswirkungen der Wahl unterschiedlicher Interpolationsmethoden Mittelwert bzw. Höchstwert der Messdaten einer Zelle ist in Abbildung 145 für drei verschiedene Zellauflösungen (1m, 5m und 10m) für die vier betrachteten Nebeneiben zusammengefasst. Exemplarisch ist die Dichtefunktion der Höhenlagen der analysierten DGM dargestellt. Sofern für die Ermittlung der Bathymetrien das arithmetische Mittel der gemessenen Höhenlagen verwendet wird, wird die Verteilung der Höhenlagen nur geringfügig beeinflusst. Eine Ausnahme zeigt sich beim dem DGM der Haseldorfer BE. Diese ist geprägt durch eine recht schmale Haupt-Durchflussrinne und eine allgemein flache Bathymetrie. Dadurch wirken sich unterschiedliche Zellengrößen deutlicher aus als bei einer homogeneren Verteilung der Wassertiefen in den übrigen Nebeneiben. Demgegenüber führt die Verwendung des Höchstwerts für eine Zelle erwartungsgemäß für gröbere Auflösungen zu einer Verschiebung der Dichtefunktion der Höhenlagen (PDF) in Richtung flacherer Gewässer. Dieser Trend ist in allen vier Nebeneiben zu beobachten. Diese Beobachtung ist logisch, da einer Vergrößerung der Zellen zu einer höheren Anzahl von Messpunkten innerhalb einer Zelle führt und somit die Wahrscheinlichkeit erhöht ist, dass flachere Messpunkte in einer Zelle enthalten sind.

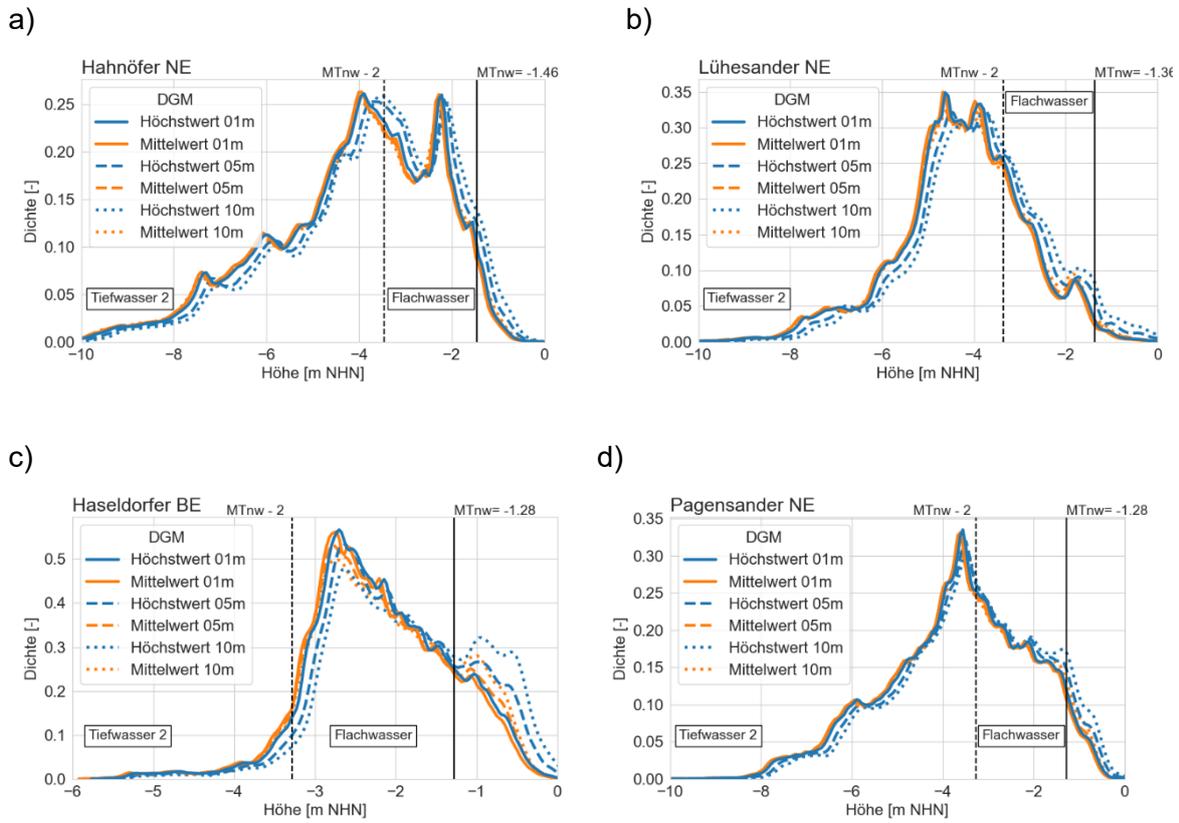
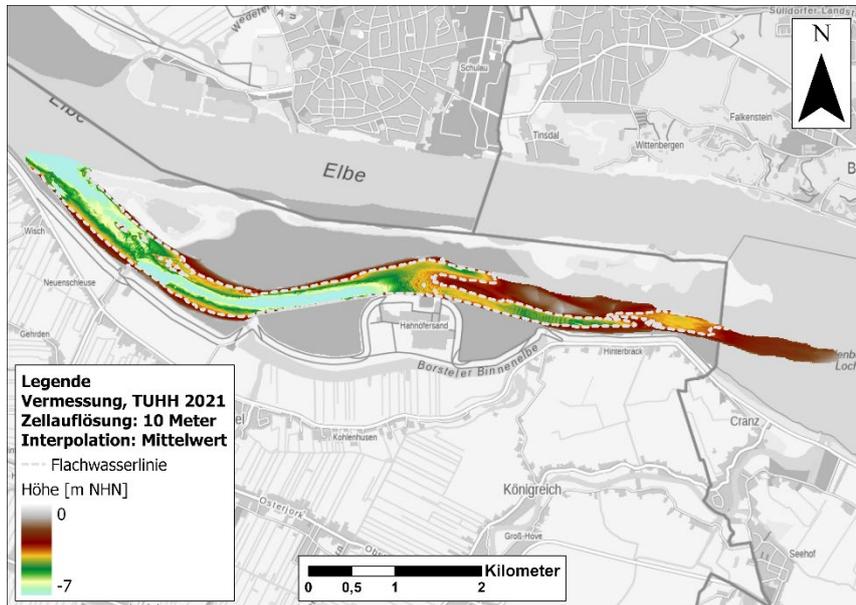


Abbildung 145: Verteilung der Höhen für verschiedene Zellauflösungen und Interpolationsmethoden Mittelwert und Höchstwert von a) Hahnöfer NE, b) Lühesander SE, c) Haseldorfer BE und d) Pagensander NE

Kartendarstellungen

Um einen Eindruck davon zu erhalten, wie die Verwendung von Höchst- oder Mittelwerten die Erscheinung der Morphologie bei einer Kartendarstellung verändert, ist exemplarisch in Abbildung 146 die Hahnöfer NE mit einer Zellauflösung von 10m x 10m unter Verwendung beider Interpolationsmethoden dargestellt. Diese Zellauflösung wurde verwendet, um die Unterschiede besser visualisieren zu können, da es bei der gewählten Darstellungsgröße schwierig wäre, die Unterschiede zwischen den DGM zu erkennen. Zusätzlich sind in die Karten die Flachwasserlinien als Grenze zum Flachwasser eingetragen. Hierdurch wird deutlich, dass die Flachwasserbereiche bei Wahl der Höchstwerte deutlich größer werden.

a)



b)

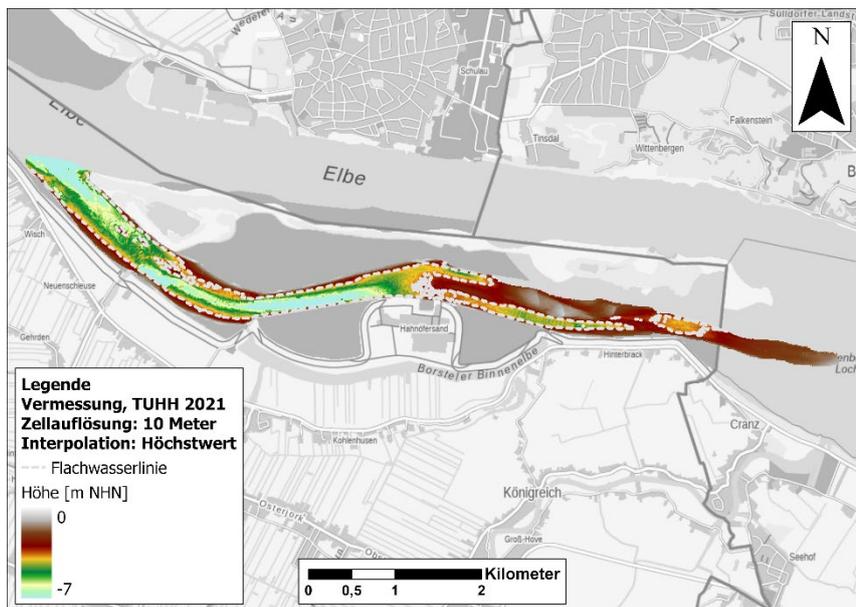


Abbildung 146: Das Hahnöfer NE DGM erzeugt mit a) Mittelwertinterpolator und b) Höchstwertinterpolator.

Sohlformen

Die Auswirkungen der Einflüsse von Interpolationsmethode und Zellauflösung bei der Ermittlung eines DGM sind in Bereichen mit ausgeprägten Sohlformen verstärkt zu beobachten (vgl. Abbildung 147 und Abbildung 148). Die Erhöhung der Gitterzellengröße führt scheinbar zu einer Verformung der Sohlformen. Dünen werden deutlich flacher. Durch die Verwendung eines Höchstwertinterpolators wird die Bathymetrie scheinbar angehoben und kleinere Dünen werden noch weiter abgeflacht.

Obwohl die in Abbildung 145 dargestellten Ergebnisse darauf hindeuten, dass die Verwendung geringerer Auflösungen aus globaler Sicht keinen Einfluss auf die statistische Charakterisierung der Morphologie der Nebenebenen (eines DGM) hat, zeigt Abbildung 147, dass die Auflösung für die räumliche Charakterisierung lokaler Strukturen tatsächlich eine wichtige Einflussgröße ist. Die aus der Methodik resultierenden Verformungen der Dünen können zu unrealistischen Bestimmungen von Luv- und Leeseiten, der Steigung von Luv- und Leeseiten und der Ausbreitung des Dünenfeldes führen.

Die Verwendung eines Höchstwertinterpolators erhöht die Verzerrung, die durch geringere Zellauflösungen entsteht (Abbildung 147b, d, e) weiter. Mit zunehmender Größe der Gitterzellen wird die Charakterisierung der Dünen unzuverlässig. Es wird daher insbesondere für die Analyse von Sohlstrukturen empfohlen, die Zellgröße möglichst gering zu wählen und das arithmetische Mittel der gemessenen Höhenlagen als repräsentativen Wert für die Bathymetrie zu verwenden.

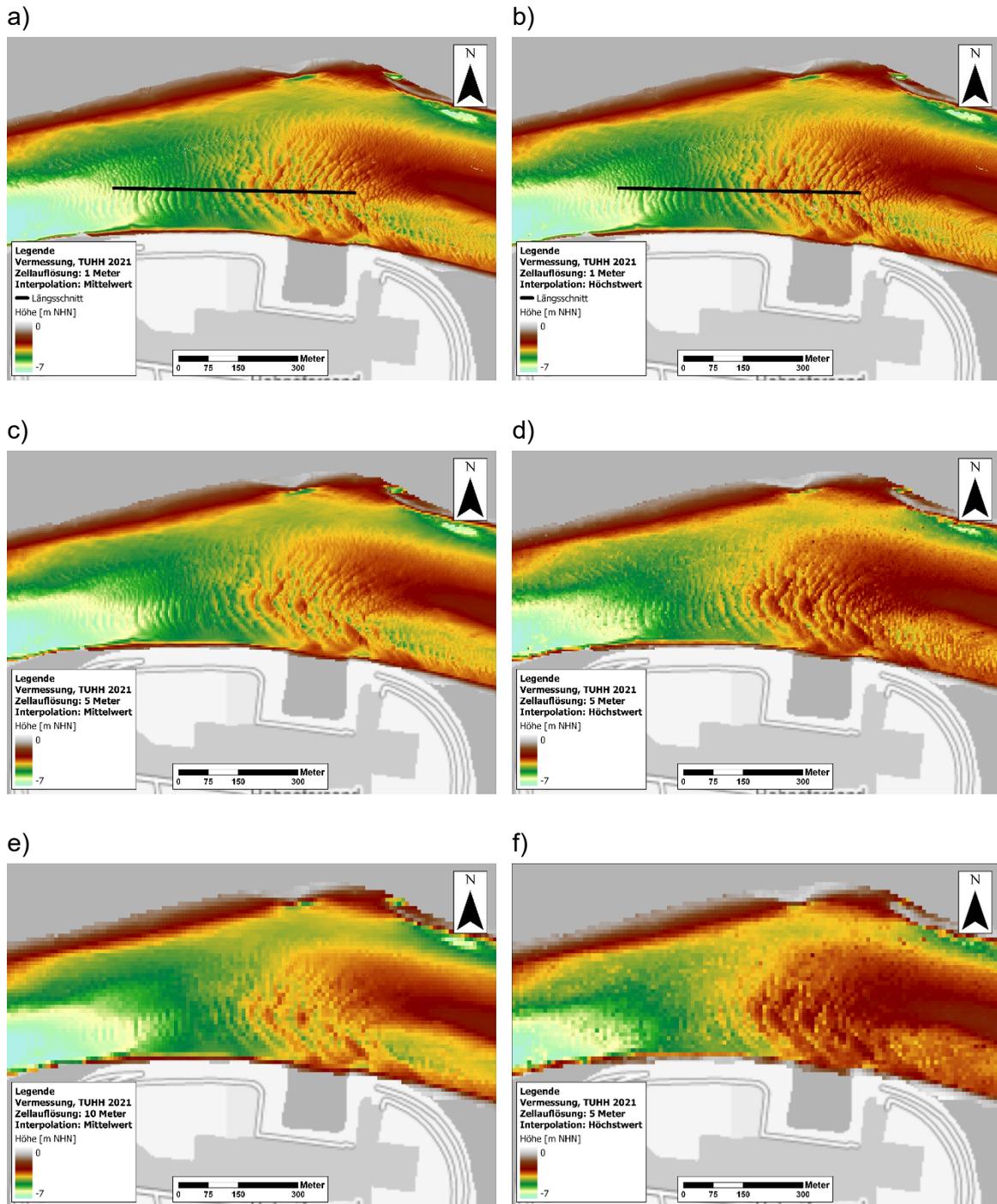


Abbildung 147: Das Sanddünenfeld in der Mitte der Hahnöfer NE, dargestellt durch einen Mittelwertinterpolator (links) und einen Höchstwertinterpolator (rechts). Die Abbildungen haben eine Zellauflösung von 1 m oben, 5 m in der Mitte und 10 m unten

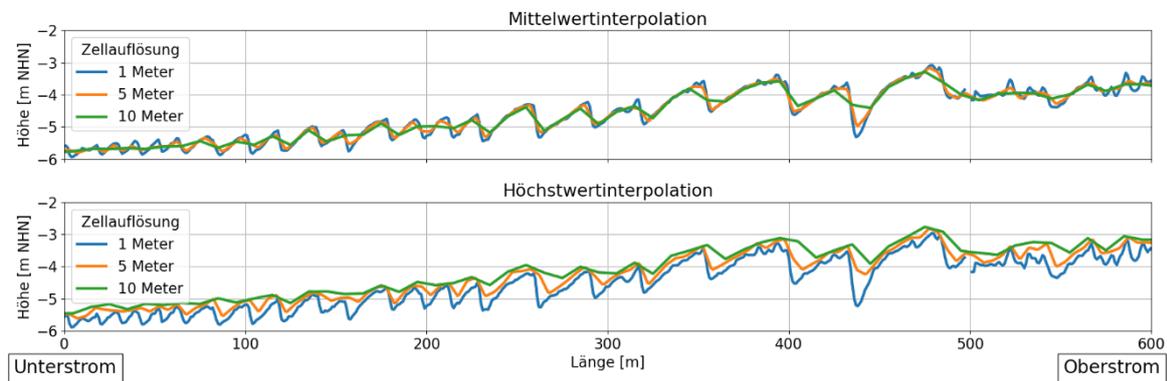


Abbildung 148: Längsschnitt durch die Sanddünen im Zentrum von Hahnöfer NE

Die Standardabweichung der in einer Zelle gemessenen Werte ist ebenfalls ein guter Parameter für die Identifizierung von Sohlformen und ihren jeweiligen Luv- und Leeseiten. Wie bei der Beschreibung der Höhenlagen hat die Auflösung der Zellen jedoch auch hier deutliche Auswirkungen. Abbildung 149 zeigt die Standardabweichung der in einer Zelle gemessenen Werte für das Dünenfeld, welches in Abbildung 147 dargestellt ist. Hierbei repräsentieren dunklere Bereiche geringere und hellere Bereiche höhere Werte für die Standardabweichungen. Höhere Werte (helle Bereiche) stellen hier die Zonen mit steileren Hängen dar. Der Einfluss der Zellauflösung ist ebenfalls gut zu erkennen.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Zellauflösungen wird ebenfalls durch die Betrachtung der Variabilität der Standardabweichungen innerhalb eines DGMs deutlich. Abbildung 150 zeigt denselben Längsschnitt wie Abbildung 148. Zusätzlich sind jedoch Bereiche, in denen die Standardabweichung größer als 0,15m ist, rosa hinterlegt. Während bei 1m Zellauflösung nur die Leeseiten der Dünen Standardabweichungen größer 0,15m aufweisen und somit eindeutig charakterisierbar sind, weisen bei 5m Zellauflösung nicht nur die Leeseiten der Dünen Standardabweichungen größer als 0,15m auf, sondern manchmal ganze Dünen. Bei einer Zellauflösung von 10 m wird es unmöglich, die Leeseite der Dünen auf der Grundlage der vordefinierten Grenze für die Standardabweichungen zu bestimmen.

Hierzu ist anzumerken, dass der hier verwendete Wert für die charakteristische Standardabweichung von 0,15 m auf Daten mit einer Zellauflösung von 1 m basiert. Es ist natürlich möglich, den Wert zu erhöhen und im Hinblick auf eine 5-m-Zellauflösung zu optimieren. Hierdurch werden insgesamt weniger Leeseiten identifiziert insbesondere kleine und kurze Dünen werden nicht sicher identifiziert. Auf Grundlage des Rasters mit 10m-Zellauflösung sind Dünen nicht mehr eindeutig identifizierbar.

Daneben wirkt sich bei der vorgenannten Methodik auch die etwas geringere Genauigkeit der gemessenen Punkte im äußeren Bereich eines Fächerecholotsystems aus. Dieses Phänomen führt ebenfalls zu geringfügig höheren Standardabweichungen in den äußeren Bereichen. Mit Bezug zur Identifikation von Sohlformen wirkt sich dies natürlich aus. In Abbildung 150 ist dies zu erkennen am rosafarbenen Bereich (Standardabweichung > 0,15m)

etwa an der 500m-Marke des Längsschnitts mit 1m Auflösung. Hier sind die Standardabweichungen hoch, ohne dass es eine Dünenleeseite oder einem Hang gibt. Die direkt nach rechts anschließende Leerstelle (keine Standardabweichung ermittelt) auf der blauen Linie mit einer Auflösung von 1 m ist auf einen einzigen Messwert in der betreffenden Zelle zurückzuführen.

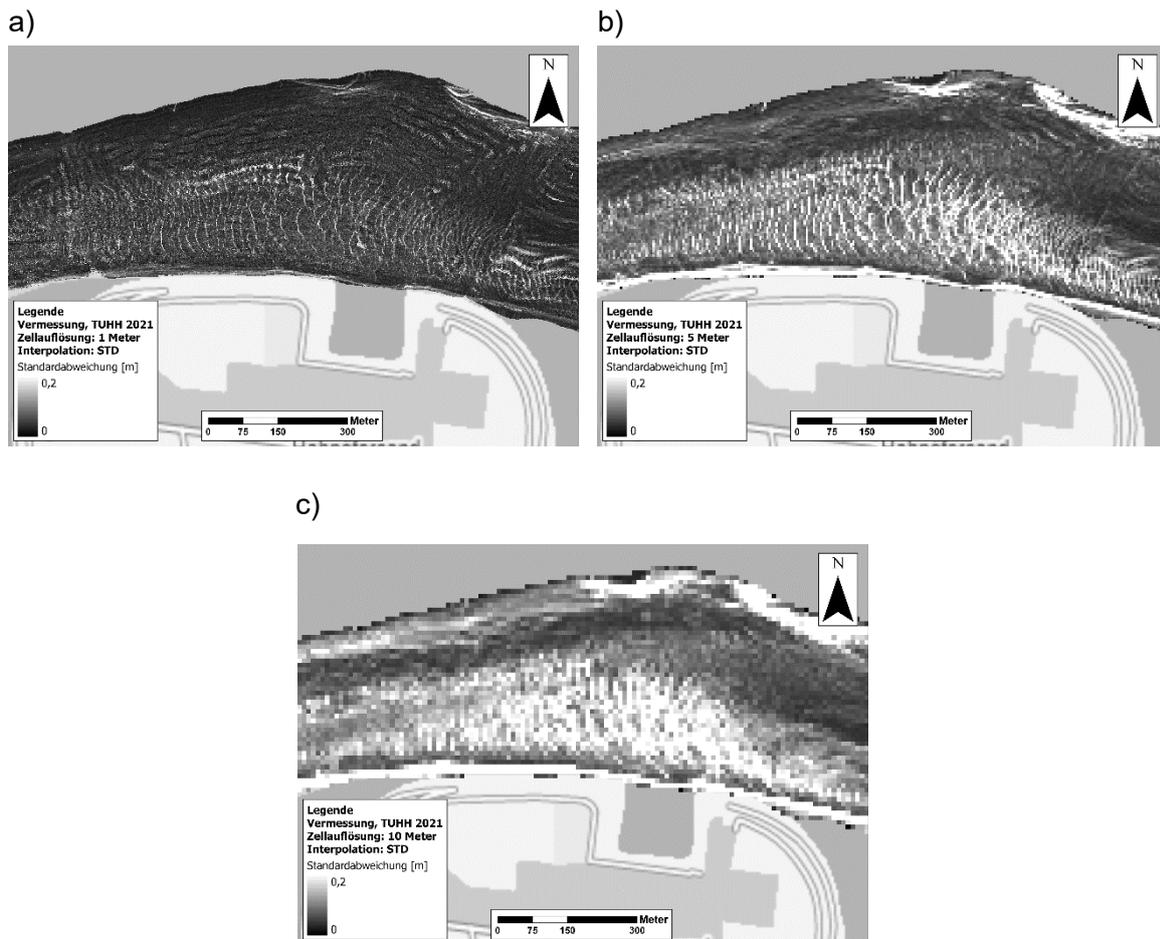


Abbildung 149: Sanddünenfeld in der Mitte von der Hahnöfer NE, dargestellt durch die Standardabweichung der DGM-Zellen.

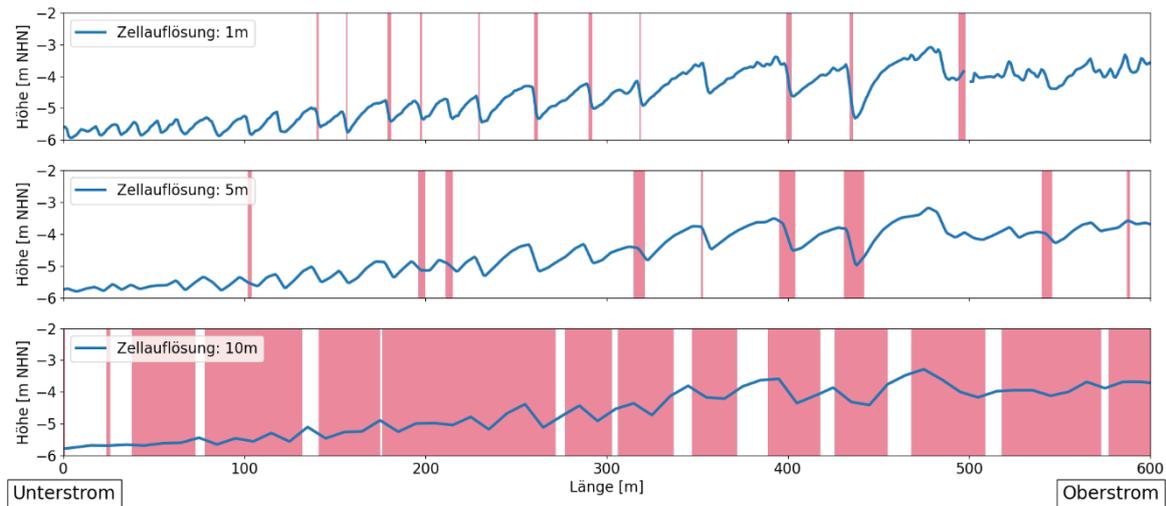


Abbildung 150: Längsschnitt durch die Sanddünen in der Mitte von Hahnöfer NE. Die rosafarbenen Flächen stellen Standardabweichungen von mehr als 0,15 m dar.

A2.3.4 Einfluss der Mindestanzahl von Messpunkten innerhalb einer Zelle

Um den Einfluss der Anzahl der gemessenen Werte innerhalb jeder Zelle zu bewerten wurden zunächst 4 Schwellenwerte für die Mindestanzahl an Messwerten innerhalb einer Zelle definiert: 1, 3, 5 und 10. Für Zellen, die die vorgenannten Kriterien erfüllen, wurde jeweils ein neues DGM erstellt.

Der Auswirkungen dieser Datenfilterung ist in Abbildung 151 für alle vier analysierten Nebenebenen dargestellt. Je höher der Schwellenwert, desto mehr verschiebt sich die Verteilung der Höhenlagen in Richtung flache Gewässer. Dies bedeutet, dass tiefere Gebiete im Allgemeinen weniger Messpunkte aufweisen als flachere. Dies wird besonders deutlich bei einem Schwellenwert von 10 Punkten (violett). Die Verteilungen für die Haseldorfer BE weisen keine großen Unterschiede in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte auf. Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Haseldorfer BE die insgesamt flachste der vier Nebenebenen ist.

Das praktische Problem bei der Anwendung eines Schwellenwerts für die Mindestanzahl der Messwerte innerhalb einer Rasterzelle ist jedoch, dass gemessene Bereiche mit gemessenen Werten (die ja durchaus korrekt sind) nur aufgrund einer geringen Anzahl von Messpunkten je Fläche nicht berücksichtigt werden. Um die Auswirkungen einer derartigen Filterung auf die Güte des DGM zu bewerten, wurde die Standardabweichung jeder Zelle des DGMs berechnet, und ihre Verteilung ist in Abbildung 152 dargestellt. Wie man sehen kann, nimmt die Standardabweichung der Höhenlagen nur dann signifikant ab, wenn mehr als 10 Messpunkte in jeder Zelle liegen. Ein scheinbarer Vorteil, der allerdings die auswertbare Fläche deutlich verringert. Außerdem bleibt das Maximum der Verteilungen der Standardabweichungen fast gleich, so dass sich das Konfidenzintervall für die meisten Zellen nicht ändert.

Die Verwendung eines anzahlabhängigen Filters wird daher für Vermessungen in den Nebeneben nicht vorgeschlagen. Er kann jedoch verwendet werden, um Bereiche hervorzuheben, die während der Messungen eine schlechte Überlagerung aufweisen, um diese bei der Interpretation der Ergebnisse mit berücksichtigen zu können.

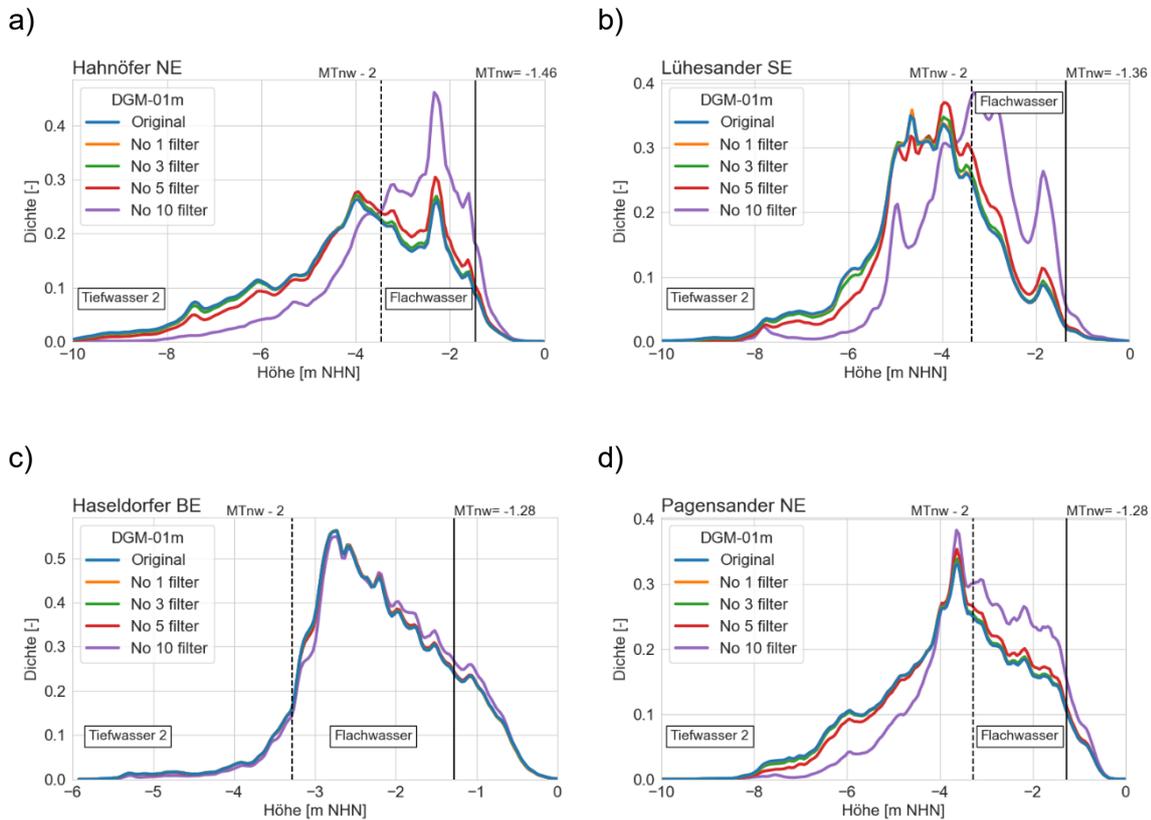


Abbildung 151: Auswirkungen der Filterung von Zellen mit einer Mindestanzahl von Messpunkten auf die Höhe von a) Hahnöfer NE, b) Lühesander SE, c) Haseldorfer BE und d) Pagensander NE.

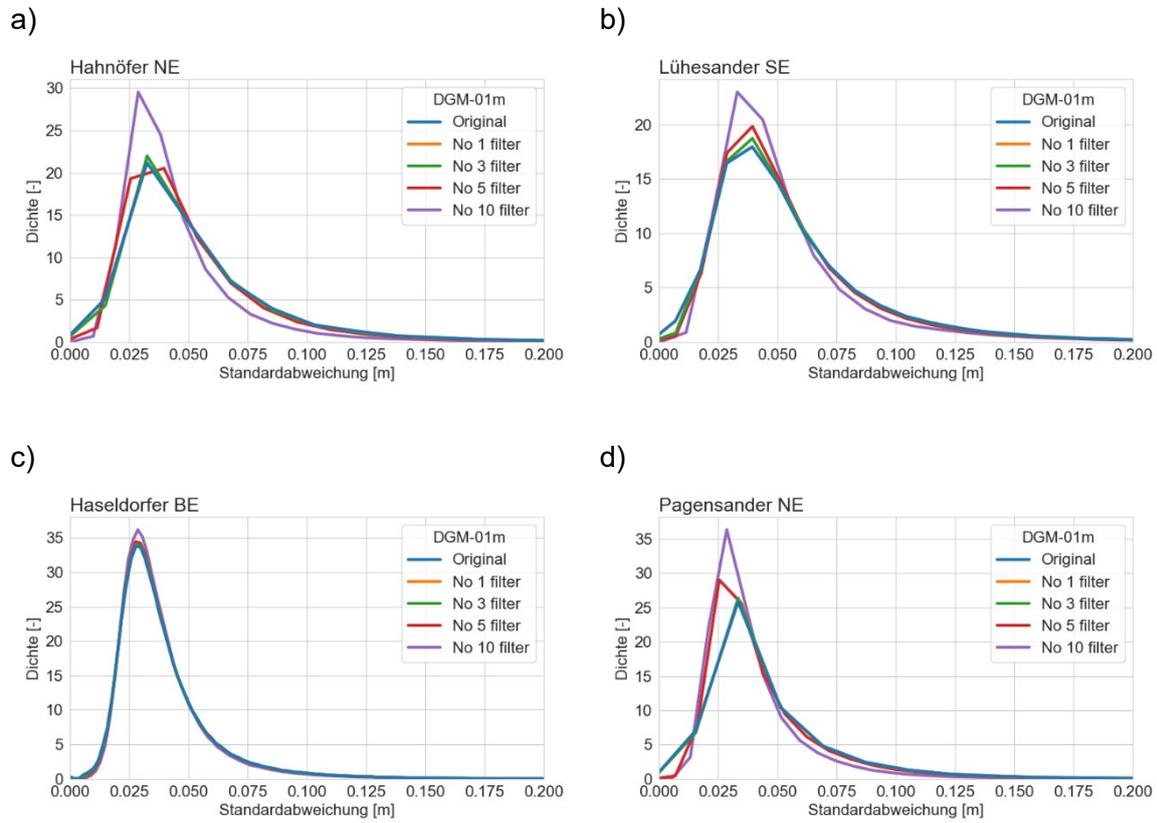
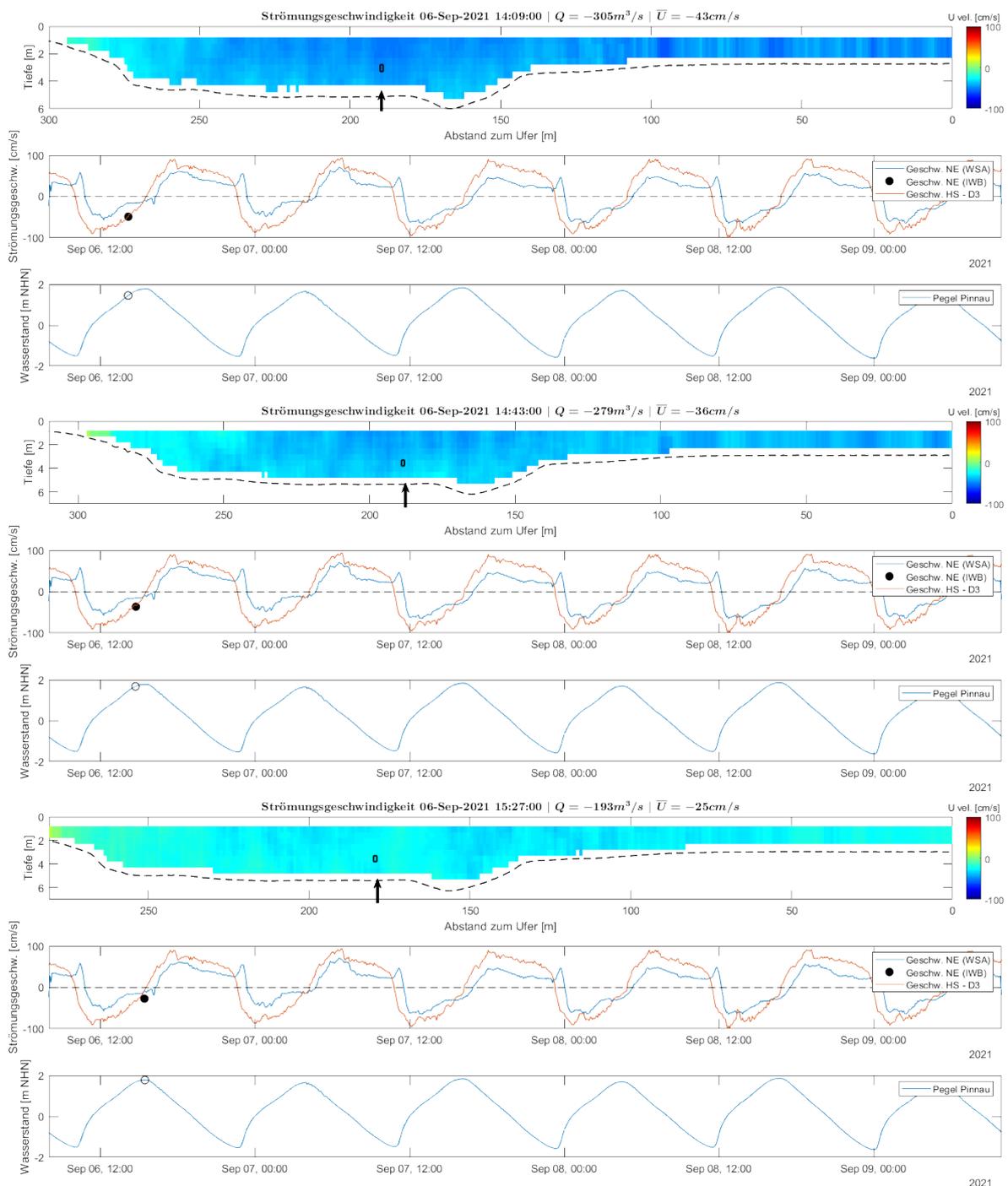


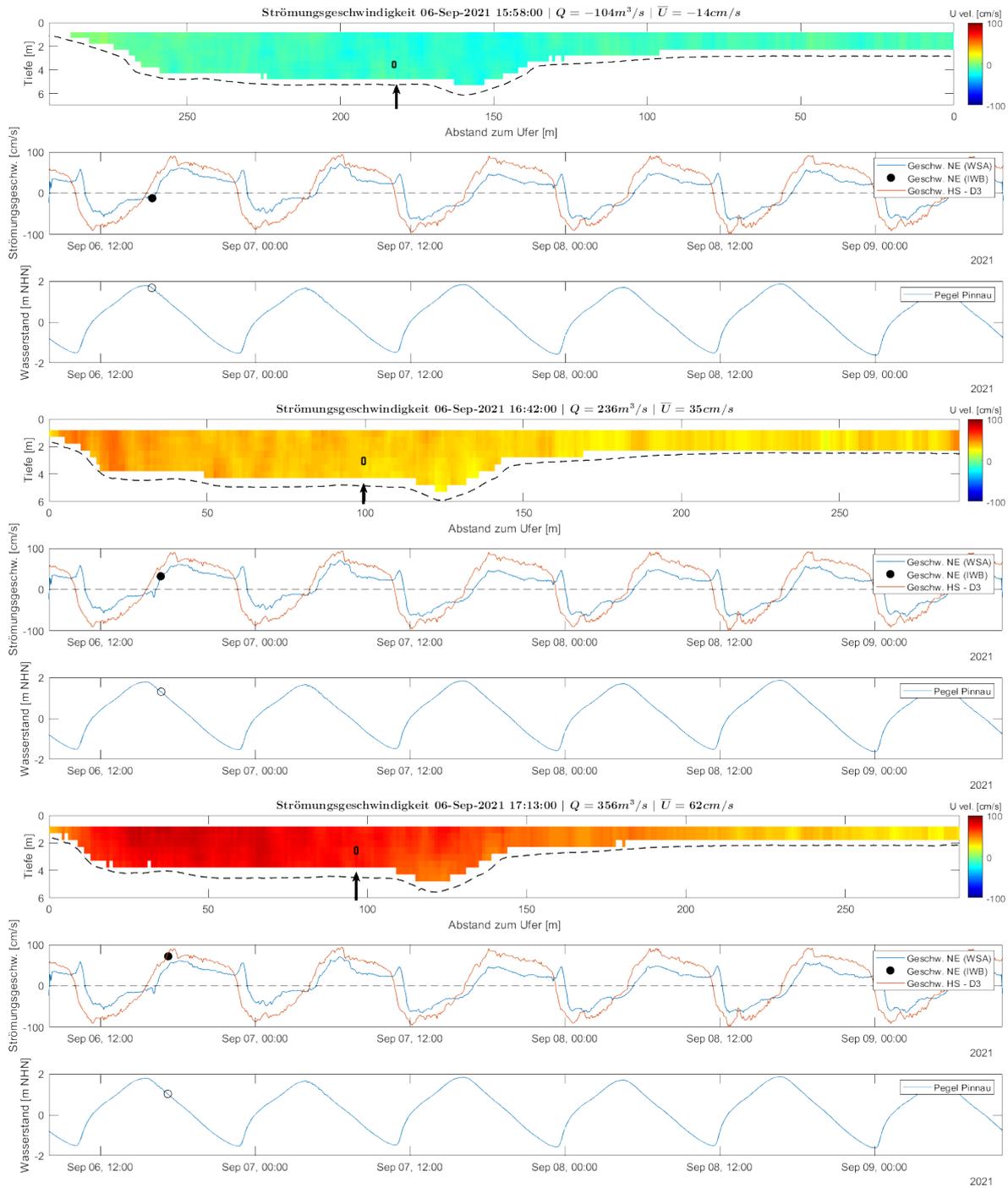
Abbildung 152: Verteilung der Standardabweichung der Zellen beim Filtern von Zellen mit einer Mindestanzahl von Messpunkten für a) Hahnöfer NE, b) Lühesander SE, c) Haseldorfer BE und d) Pagensander NE

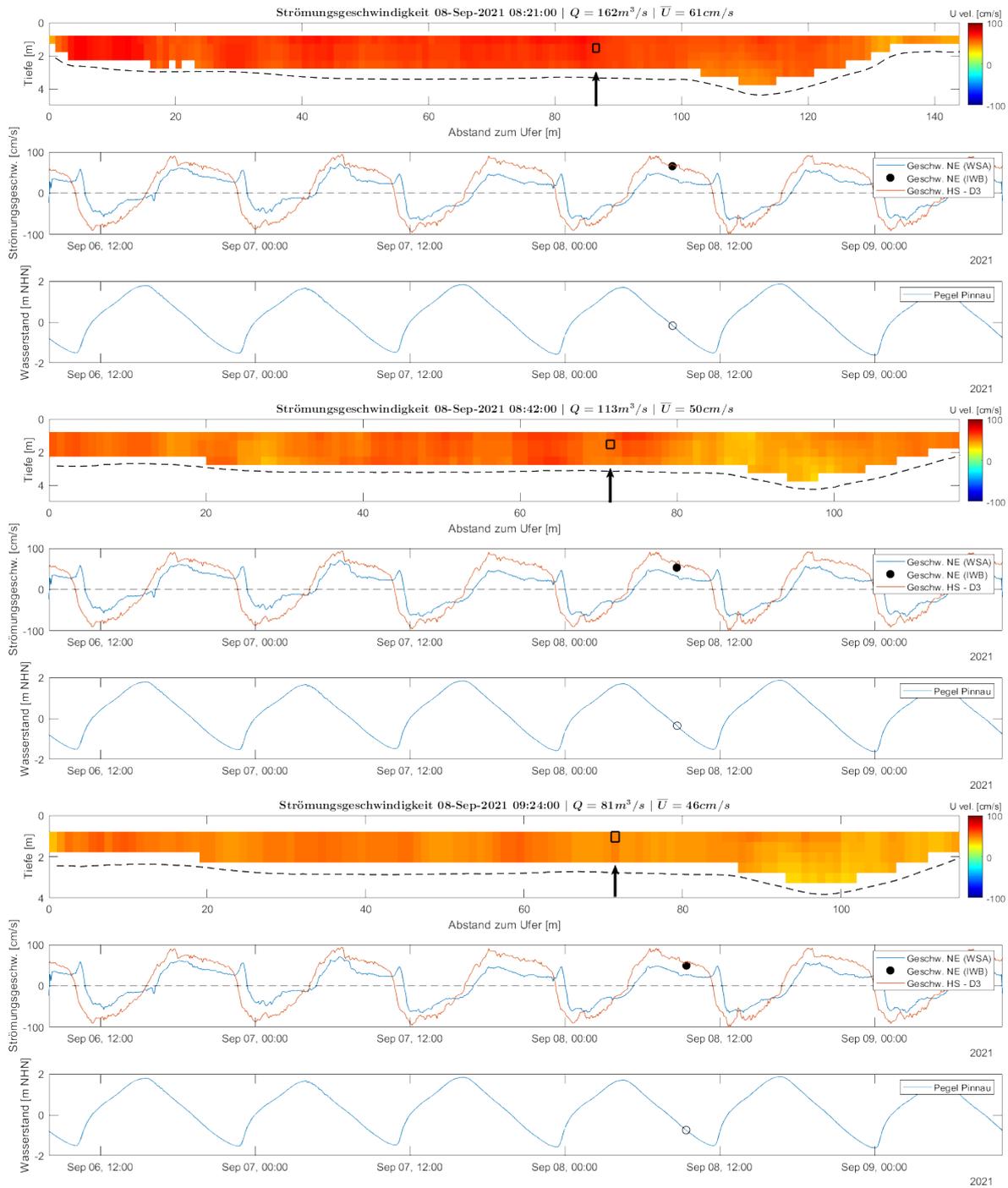
A3 Strömungsmessungen

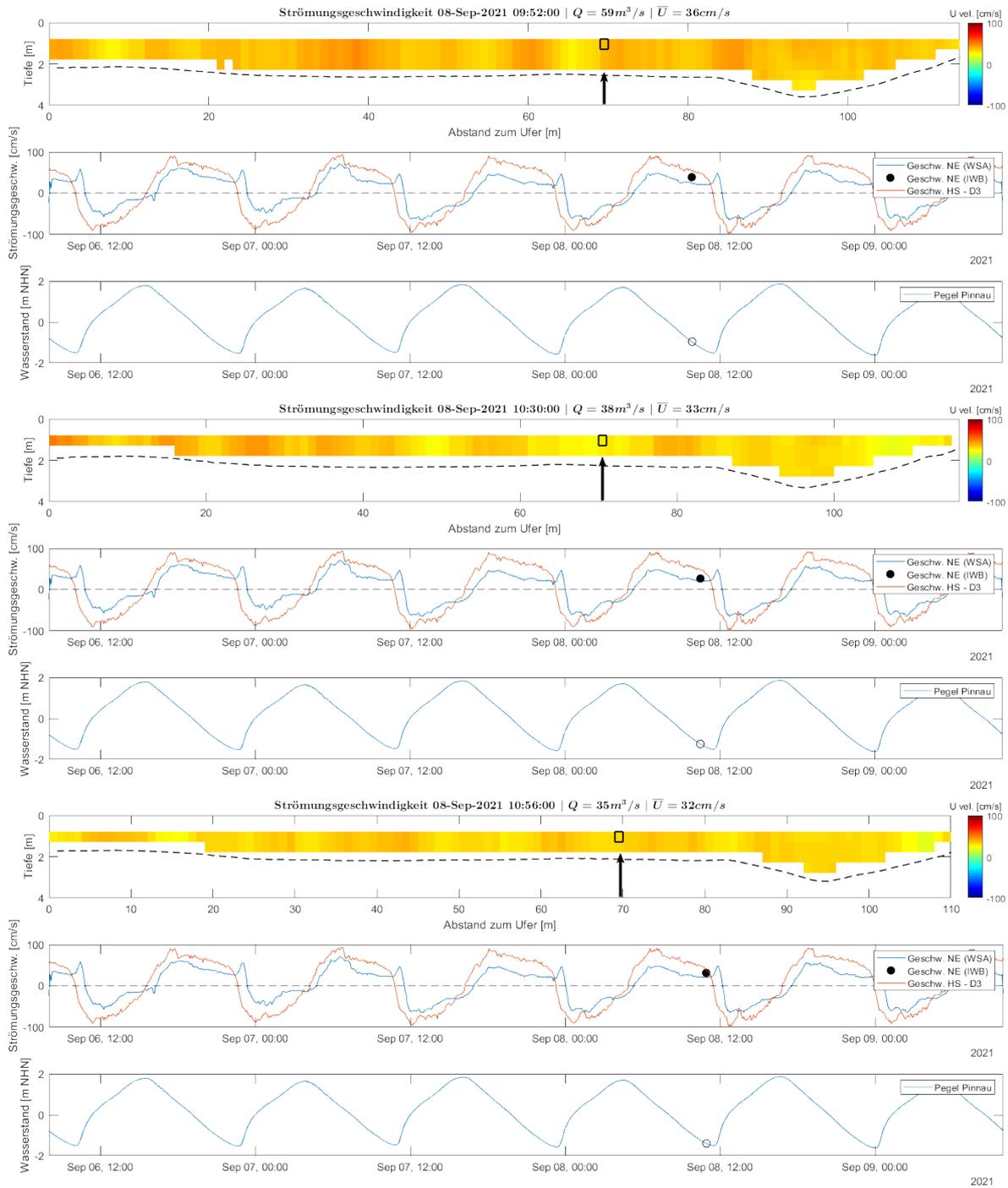
A3.1 Querschnittsmessungen – Steinloch

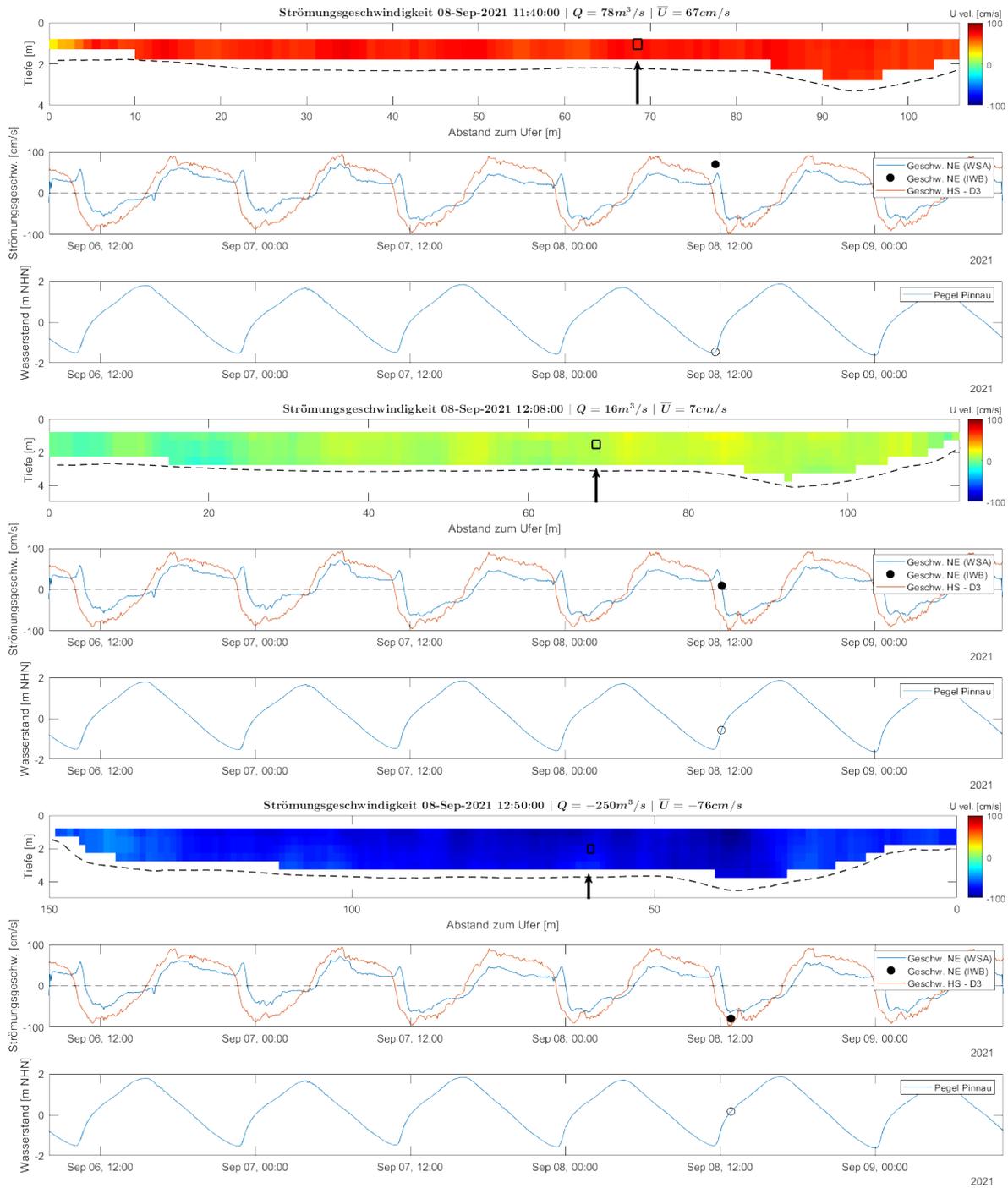
Darstellung der Ergebnisse der Querschnittsmessungen für den Bereich Steinloch (vgl. 4.1).

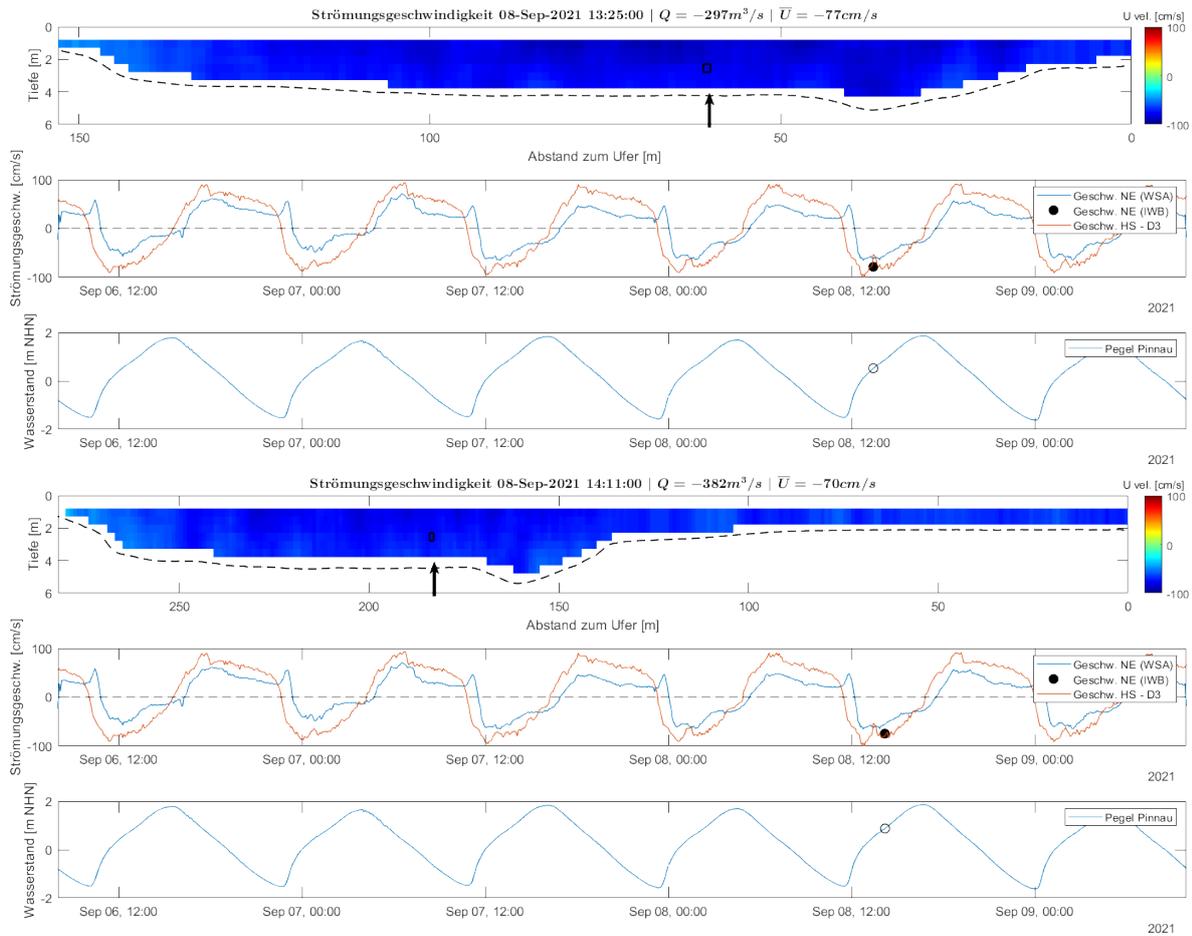






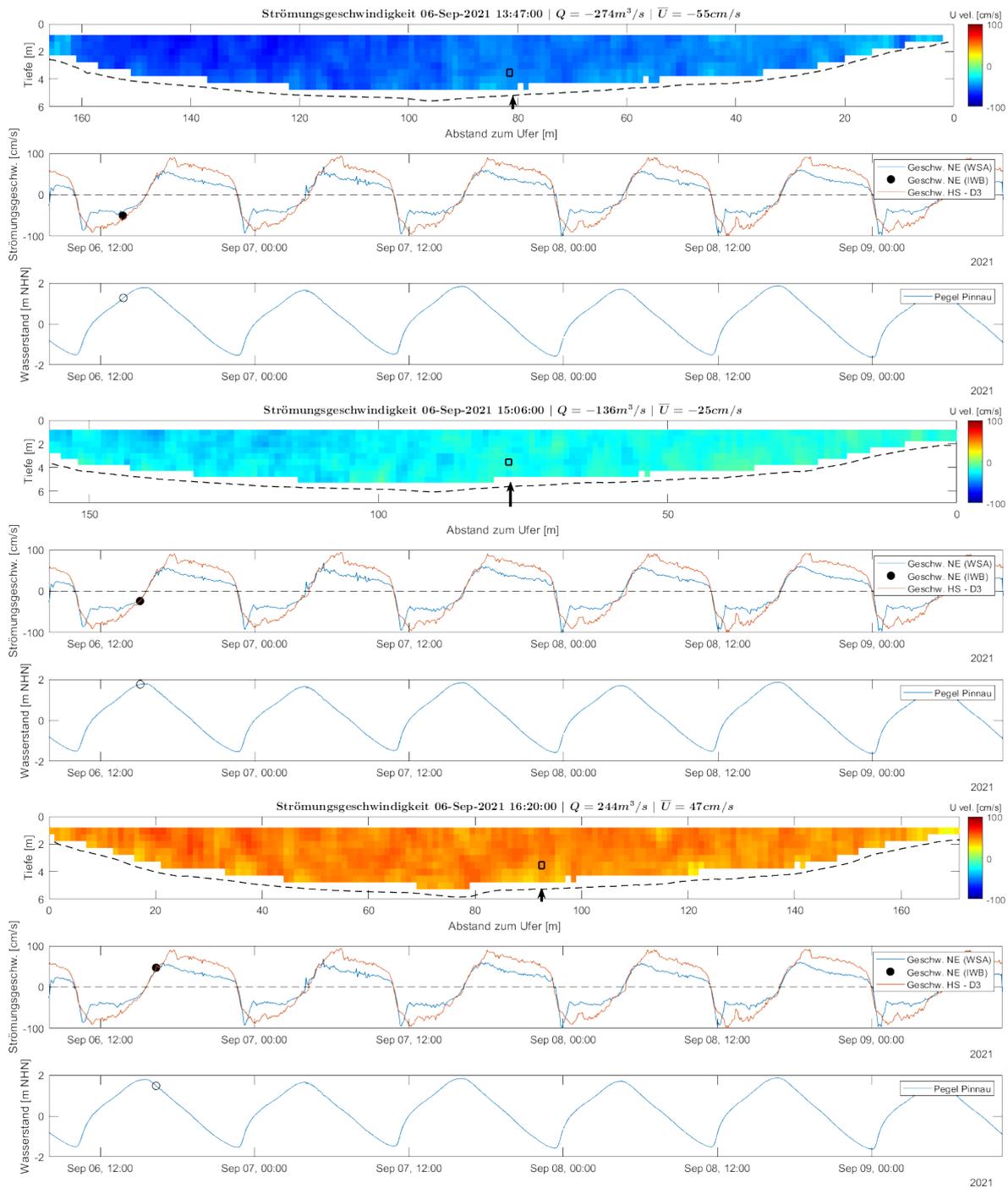


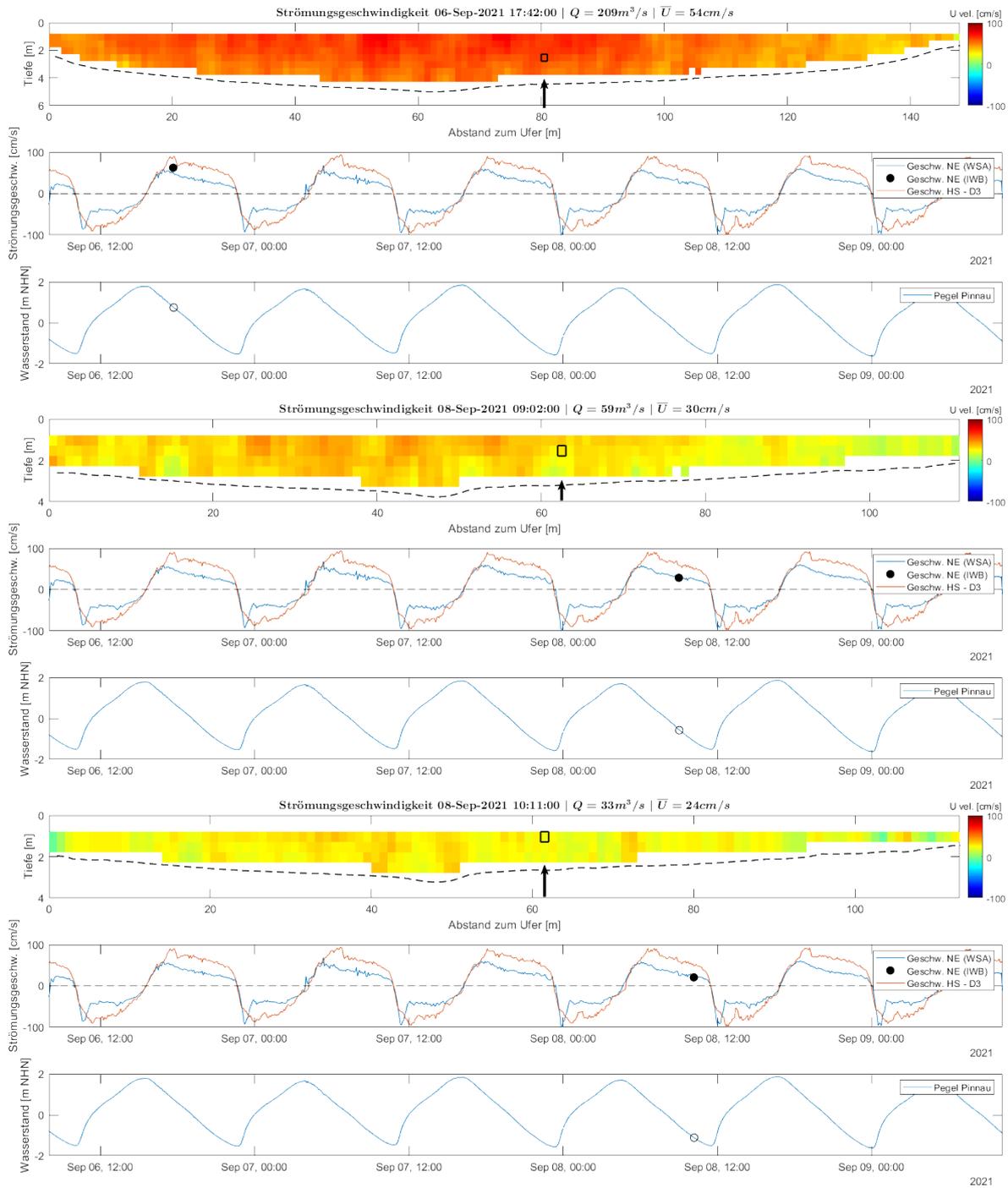


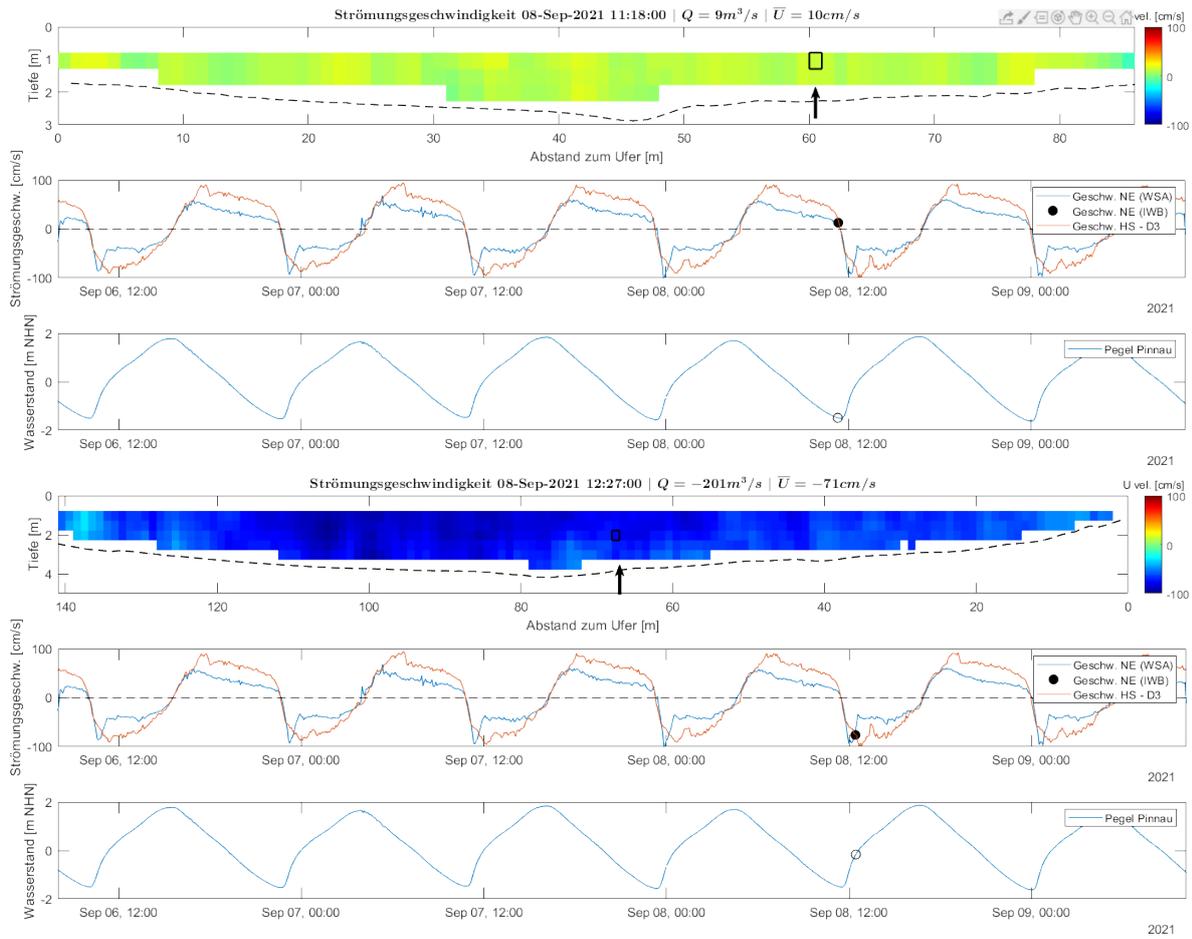


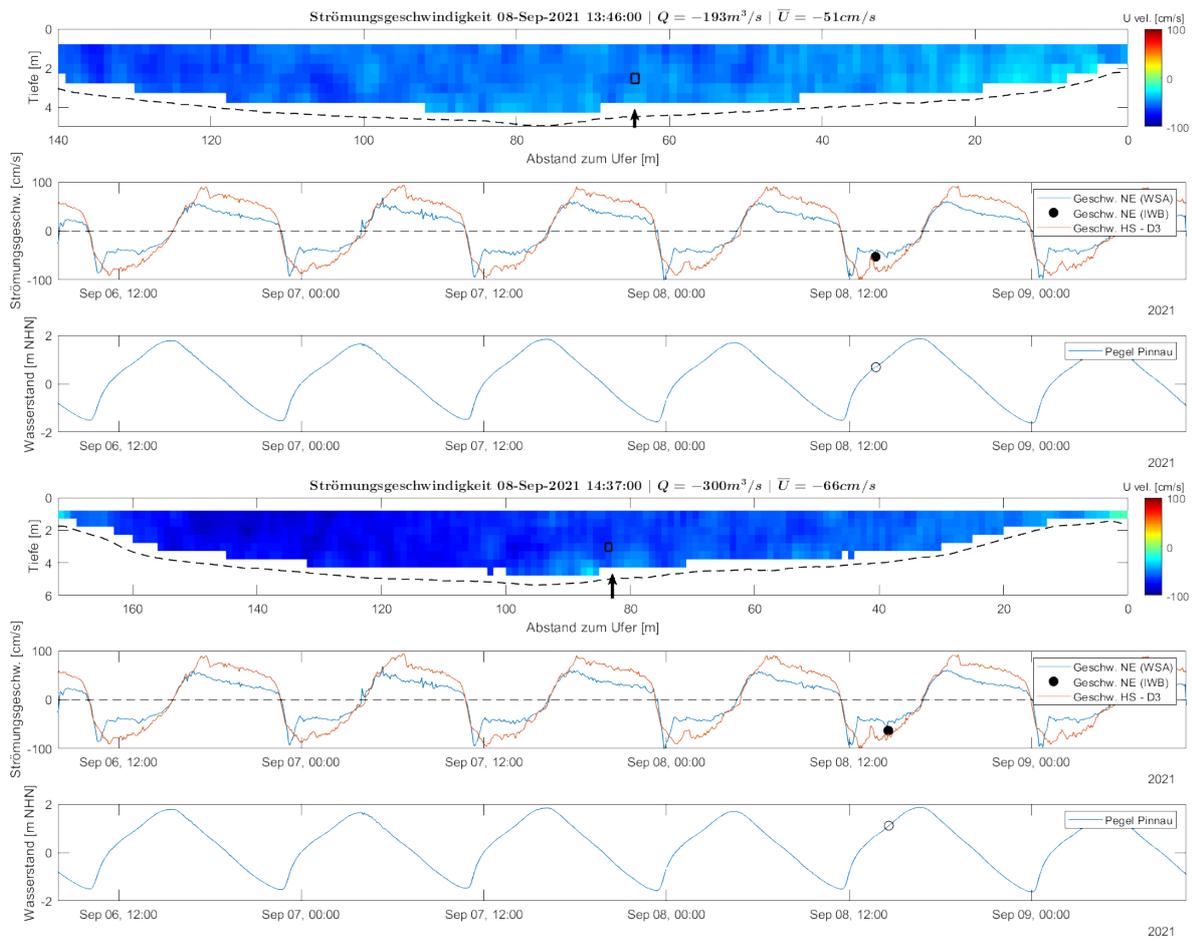
A3.2 Querschnittsmessungen - Übergang zwischen der Pagensander NE und der Haseldorfer BE

Darstellung der Ergebnisse der Querschnittsmessungen für den Bereich Übergang Pagensander NE und Haseldorfer BE (vgl. 4.1).





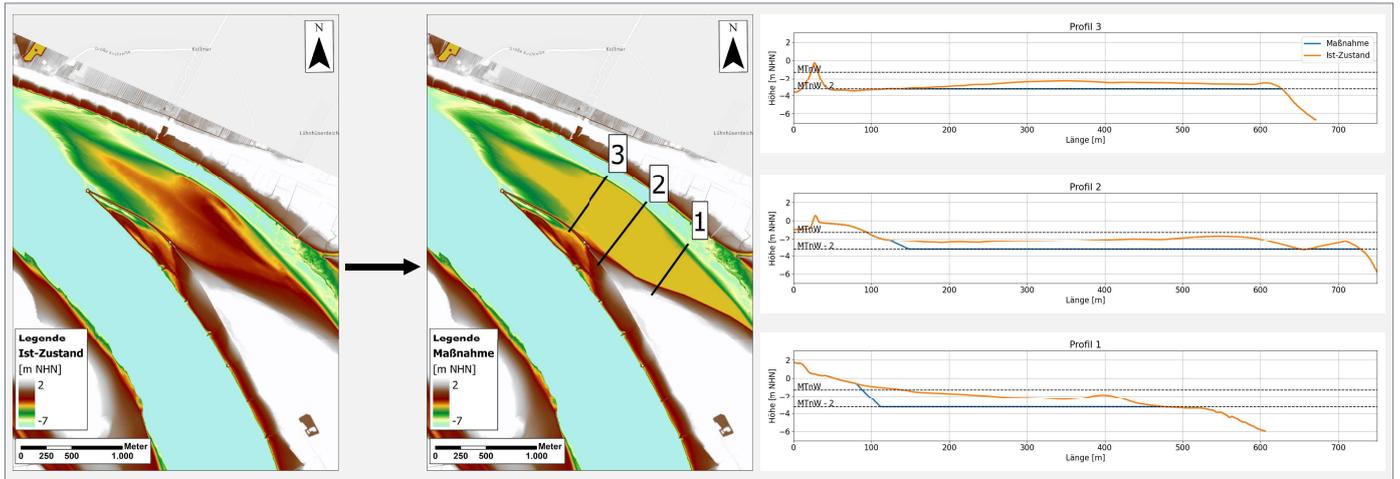




A4 Steckbriefe Maßnahmen Nebelben

Maßnahme a)

Pagensand-Nord - Aufweitung

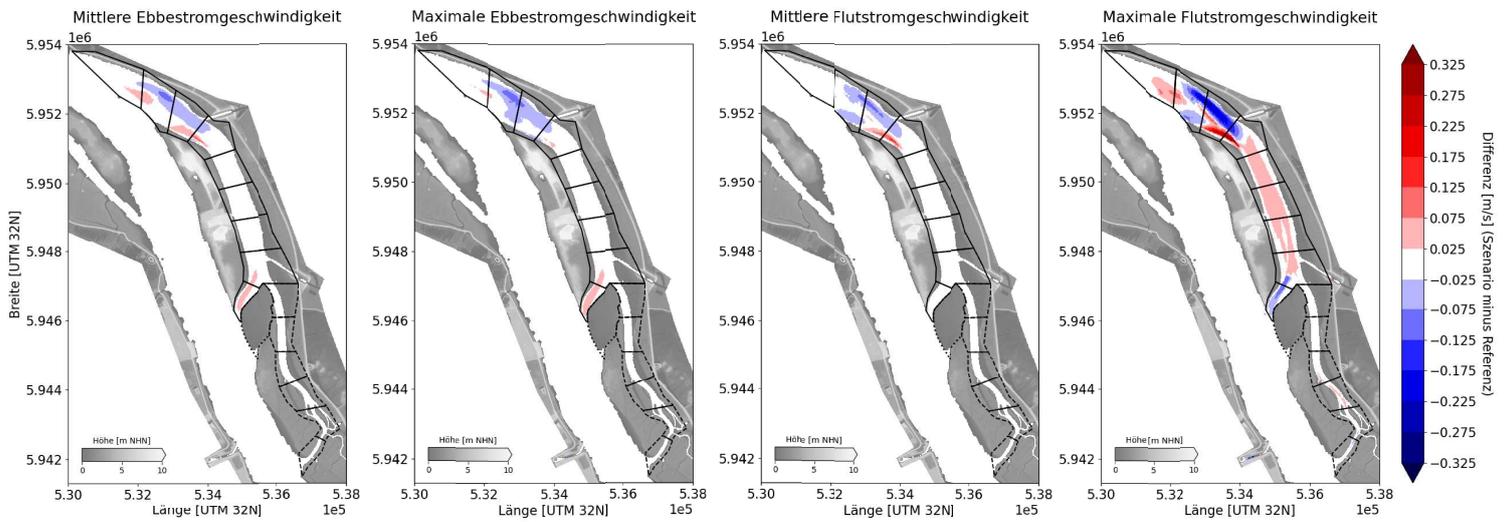


Maßnahme: Umwandlung von Wattbereichen in Flachwasserbereiche (NHN-3,28 m)

Volumenänderung [Tsd. m³]: -930

Flächenänderung [Tsd. m²]: Watt: -65 / Flachwasser: 65 / Tiefwasser 2: 0

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



Strömungsgeschwindigkeit

- Zunahme der Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich der Ufer bei Pagensand Nord und im Steinloch, Abnahme der Ebbestromgeschwindigkeit im Bereich der Rinne
- Abnahme der Flutstromgeschwindigkeit im Bereich der Rinne bei Pagensand Nord und im Steinloch, Zunahme der max. Flutstromgeschwindigkeit in der zentralen Pagensander NE



Fischfauna

- Tendenzielle Verbesserung für rheophile Arten durch vielfältigere Strömungsmuster im Bereich Steinloch
- Beeinflussung der Lebensbedingungen für rheophile Arten durch homogenere Strömungsmuster im Bereich Pagensand-Nord



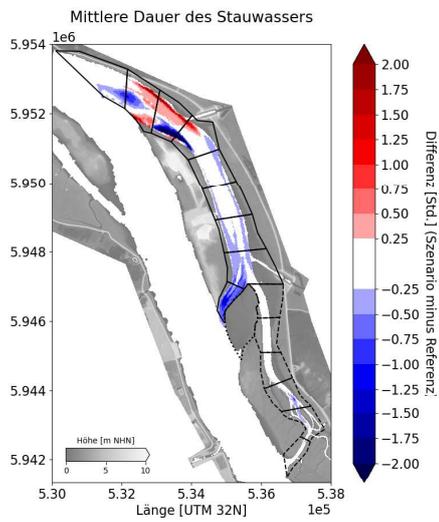
Morphologie

- Verlust von Wattflächen zugunsten von Flachwasserflächen im Bereich Pagensand-Nord
- Verlandungstendenz insbesondere in vertieften Bereich zu erwarten

Maßnahme a)

Pagensand-Nord - Aufweitung

Einflüsse auf die Stauwasserdauer

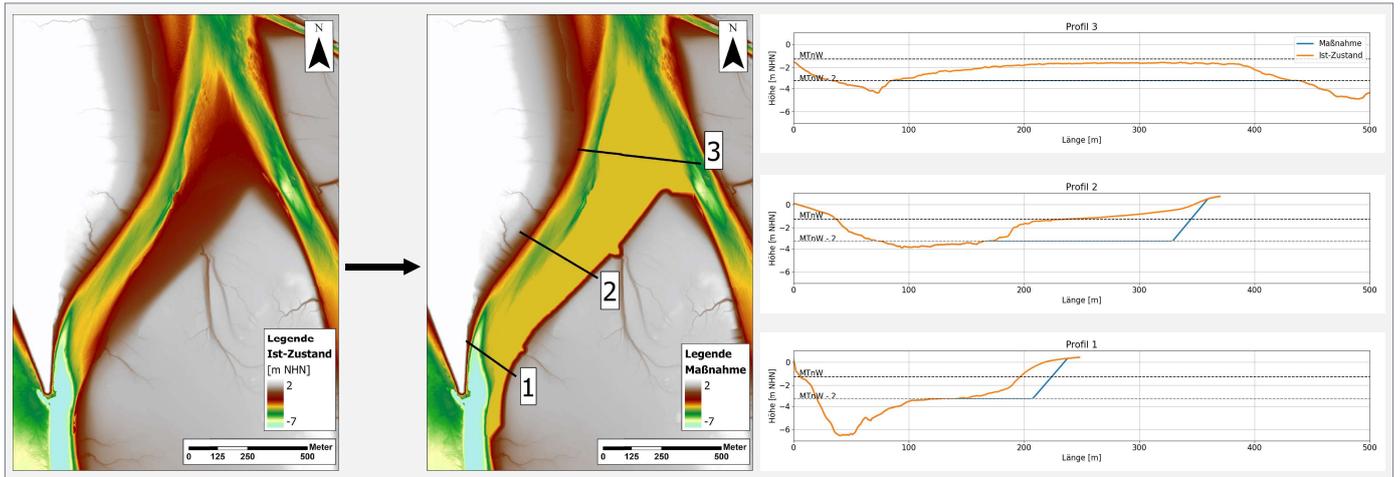


Stauwasserdauer

- Zunahme der Dauer des Stauwassers im Norden von Pagensander NE, am Kanal und einem kleinen Bereich neben dem Leitdamm
- Verkürzung der Dauer an flachen Stellen neben dem Leitdamm, an Uferseiten der Pagensander NE und im Süden der Haseldorfer BE. Starke Verkürzung der Dauer am Steinloch

Maßnahme b)

Steinloch – Aufweitung (klein)

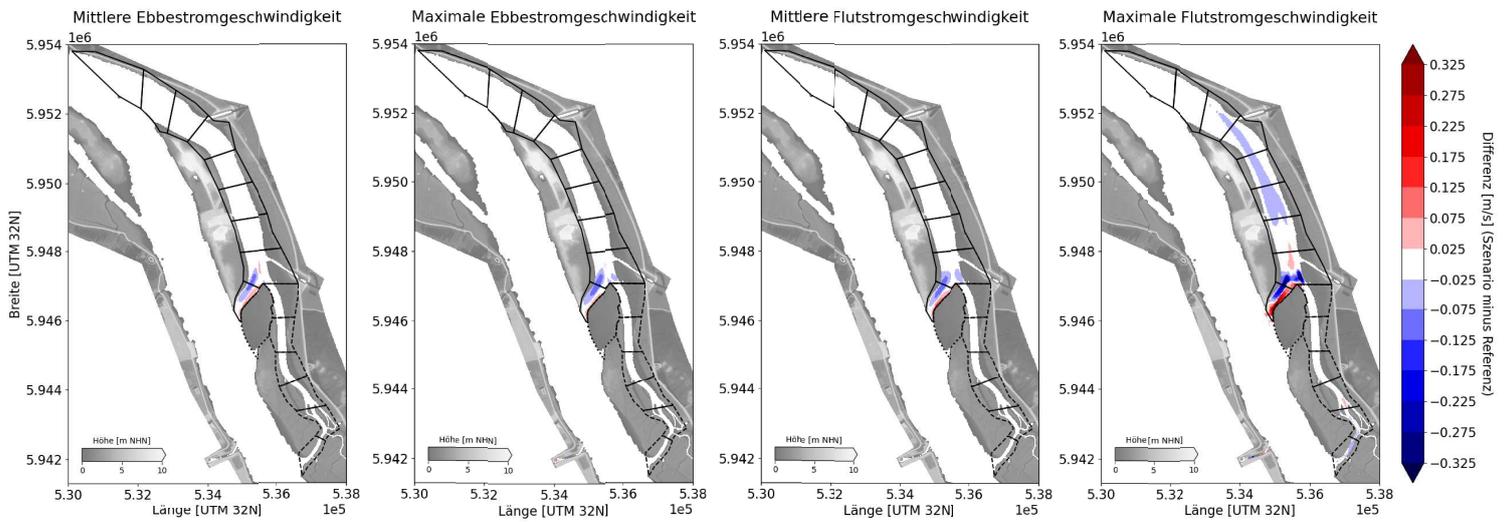


Maßnahme: Vergrößerung des Querschnitts im Steinloch um ca. 30-50 %, ohne Verlust von Flachwasserbereichen

Volumenänderung [Tsd. m³]: -480

Flächenänderung [Tsd. m²]: Watt: -104 / Flachwasser: 104 / Tiefwasser 2: 0

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



Strömungsgeschwindigkeit

- Abnahme von Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Steinloch-Rinne und Zunahme im Bereich der Steinloch-Ufer
- Geringfügige Abnahme der max. Flutstromgeschwindigkeit in der zentralen Pagensander NE
- Homogenere Strömungsmuster im gesamten Tideverlauf im Bereich Steinloch



Fischfauna

- Beeinflussung der Lebensbedingungen für rheophile Arten durch homogenere Strömungsmuster im Bereich Steinloch



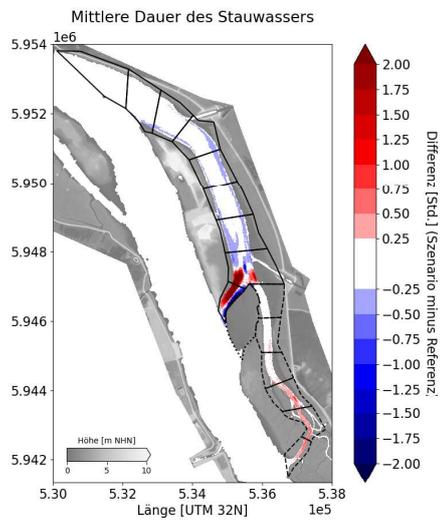
Morphologie

- Verlust eines kleinen Teils der Wattflächen zugunsten der Flachwasserflächen im Steinloch
- Verlandungstendenz insbesondere in vertieften Bereich zu erwarten

Maßnahme b)

Steinloch – Aufweitung (klein)

Einflüsse auf die Stauwasserdauer

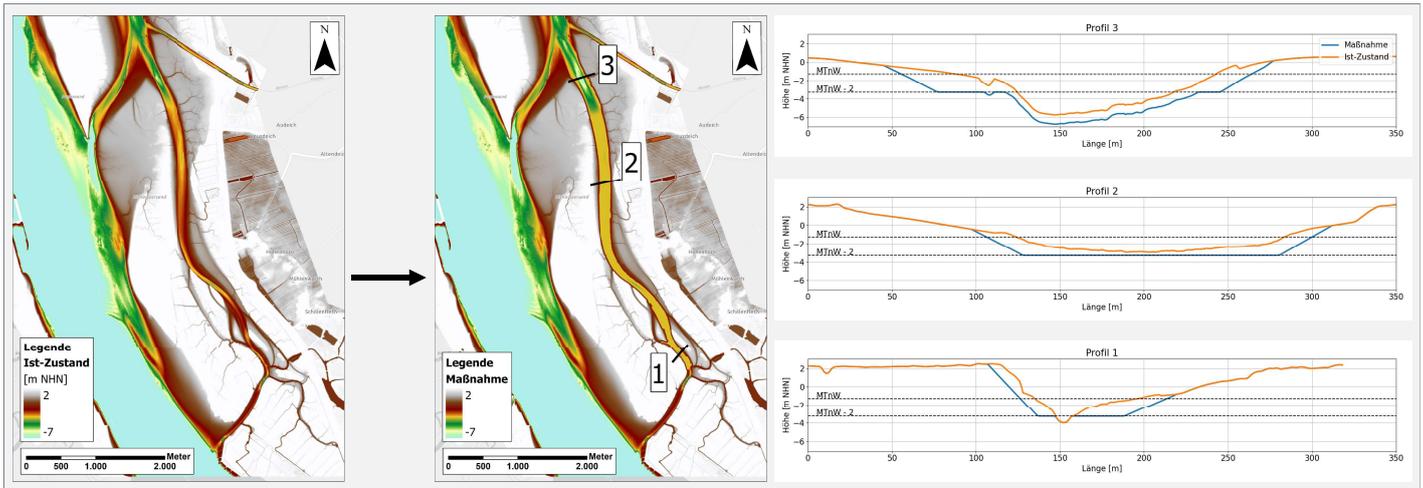


Stauwasserdauer

- Zunahme der Stauwasserdauer am Steinlochrinne und am Übergang zwischen dem Pagensander NE und der Haseldorfer BE. Geringere Zunahme der Dauer im südlichen Teil der Haseldorfer BE
- Abnahme der Dauer an den Uferseiten der Pagensander NE und am Steinloch neben dem Bishoster Sand

Maßnahme c)

Haseldorfer BE - Aufweitung

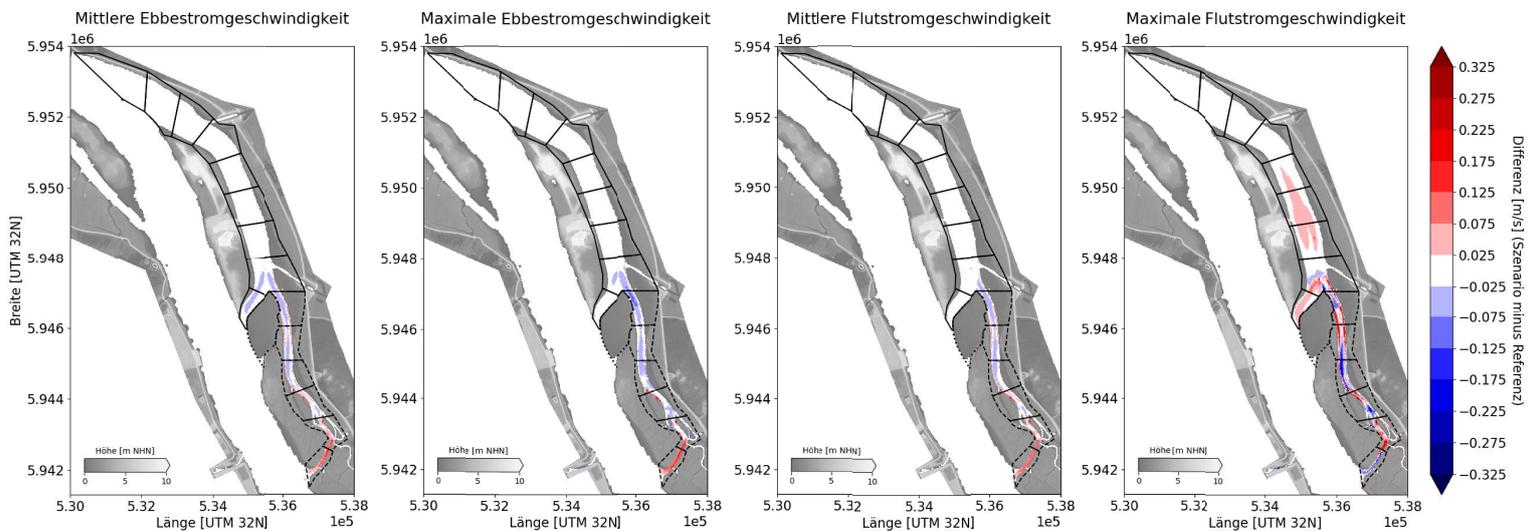


Maßnahme: Vergrößerung des Querschnitts um ca. 50 % in der gesamten Haseldorfer BE, Vertiefung um ca. 1 m im nördlichen Bereich

Volumenänderung [Tsd. m³]: -1.000

Flächenänderung [Tsd. m²]: Watt: -167 / Flachwasser: 100 / Tiefwasser 2: 67

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



Strömungsgeschwindigkeit

- Abnahme von Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Rinne und Zunahme im Bereich der Ufer der Haseld. BE sowie im Dwarsloch
- Vielfältigere Strömungsmuster im gesamten Tideverlauf im Bereich Dwarsloch



Fischfauna

- Tendenzielle Verbesserung für rheophile Arten durch vielfältigere Strömungsmuster im Bereich Dwarsloch



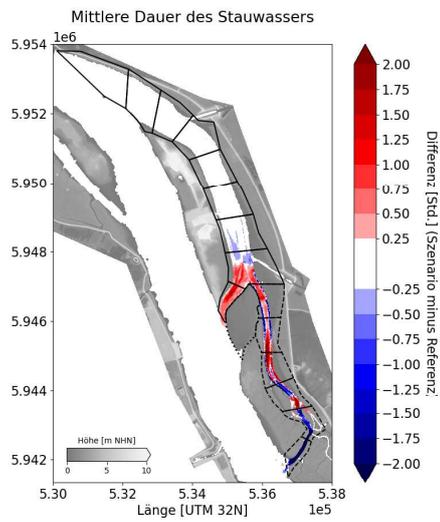
Morphologie

- Verlust eines kleinen Teils der Wattflächen zugunsten der Flachwasserflächen in der Haseld. BE
- Tiefere Rinne am nördlichen Ende der Haseld. BE
- Verlandungstendenz insbesondere in vertieften Bereichen zu erwarten

Maßnahme c)

Haseldorfer BE - Aufweitung

Einflüsse auf die Stauwasserdauer

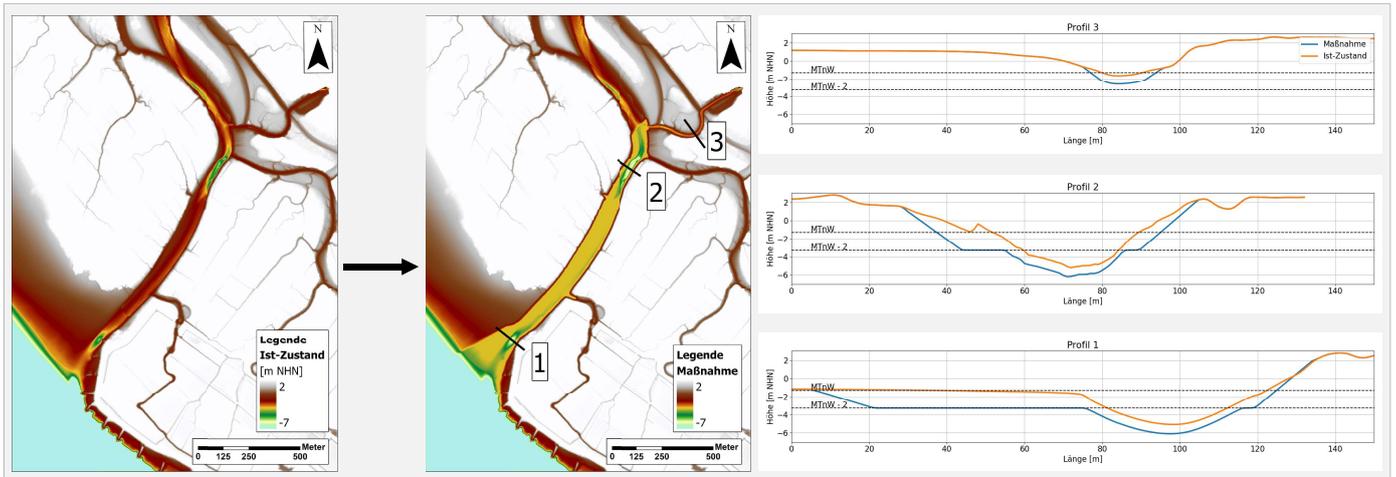


Stauwasserdauer

- Zunahme der Stauwasserdauer im Steinloch und in der nördlichen Hälfte der Haseldorfer BE, einschließlich des Übergangs zum Pagensander NE
- Abnahme der Dauer in der südlichen Hälfte der Haseldorfer BE und in kleinen Gebieten in der Nähe der Pinnau-Mündung

Maßnahme d)

Dwarsloch - Aufweitung

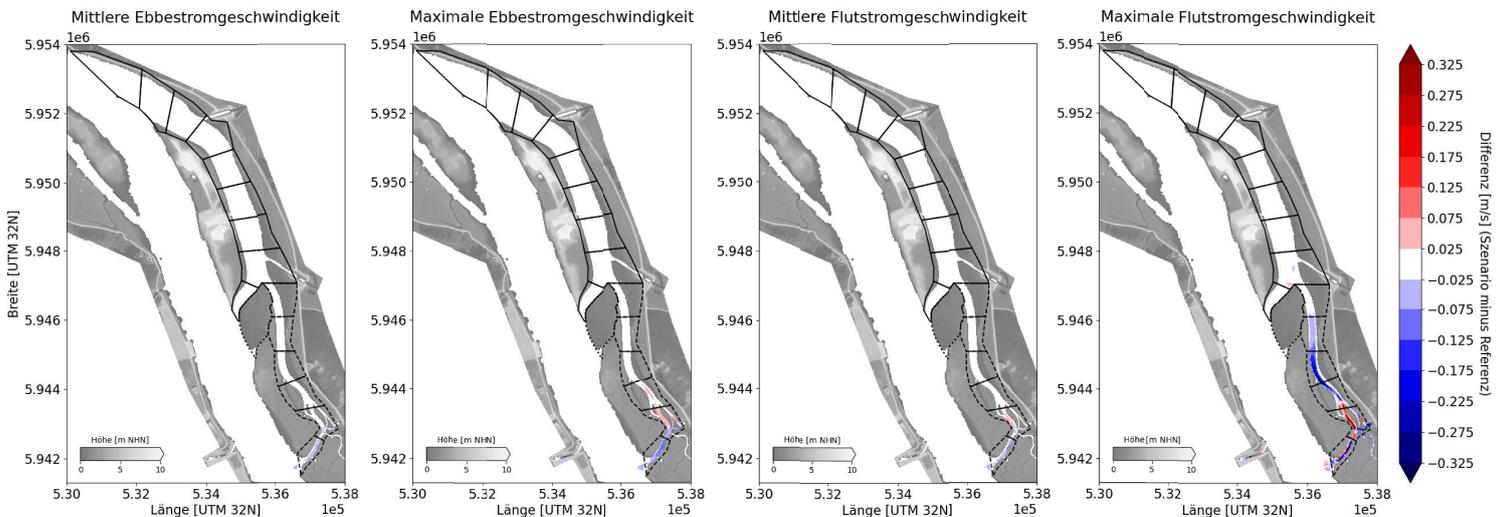


Maßnahme: Vergrößerung des Querschnitts um ca. 30 % und Vertiefung um ca. 1 m im gesamten Dwarsloch

Volumenänderung [Tsd. m³]: -260

Flächenänderung [Tsd. m²]: Watt: -38,5 / Flachwasser: 0,5 / Tiefwasser 2: 38

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



Strömungsgeschwindigkeit

- Abnahme von Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten im südl. Bereich, Zunahme im nördl. Bereich des Dwarslochs
- Homogenere Strömungsmuster im gesamten Tideverlauf im Bereich Dwarsloch



Fischfauna

- Beeinflussung der Lebensbedingungen für rheophile Arten durch homogenere Strömungsmuster im Bereich Dwarsloch



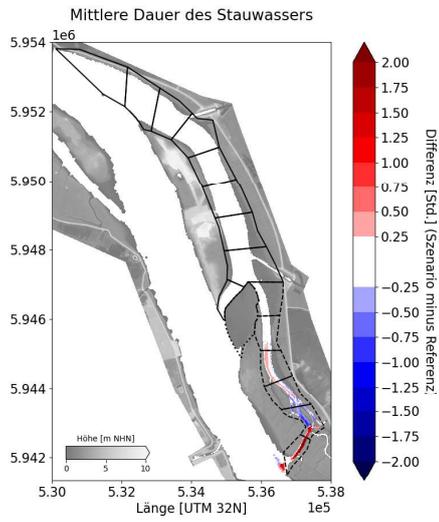
Morphologie

- Verlust eines kleinen Teils der Wattflächen zugunsten der Flachwasserflächen im Dwarsloch
- Tiefere Rinne im Dwarsloch
- Verlandungstendenz insbesondere in vertieften Bereichen zu erwarten

Maßnahme d)

Dwarsloch - Aufweitung

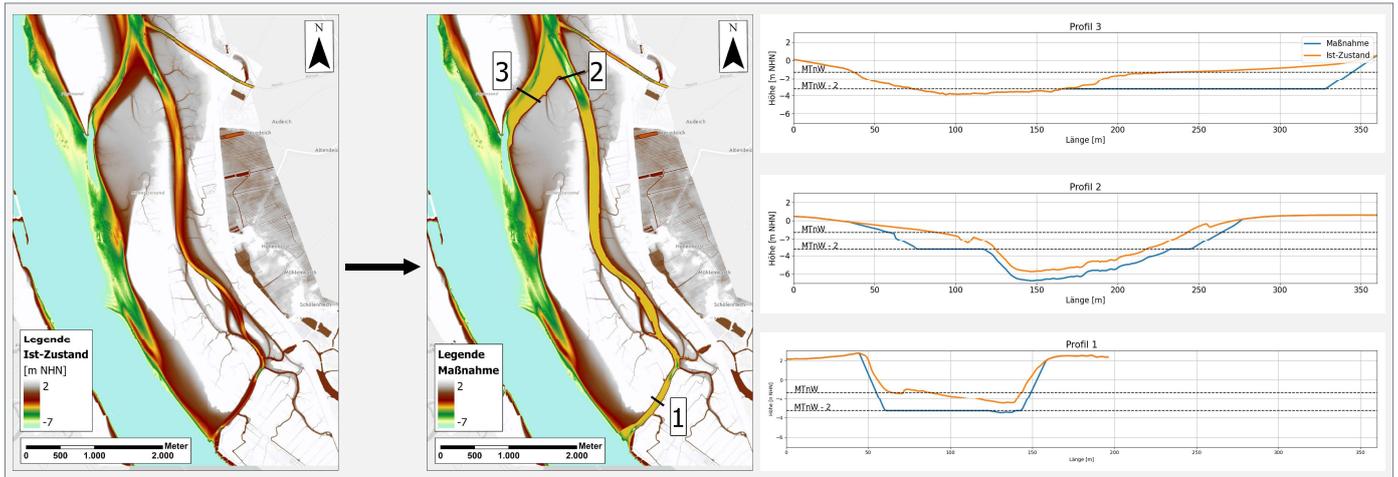
Einflüsse auf die Stauwasserdauer



Stauwasserdauer

- Zunahme der Dauer des Stauwassers im Dwarsloch und in der mittleren Haseldorfer BE
- Abnahme der Laufzeit in einem kleinen Bereich in der Nähe des Haseldorfer Hafens

Maßnahme e) Kombination b) + c) + d)

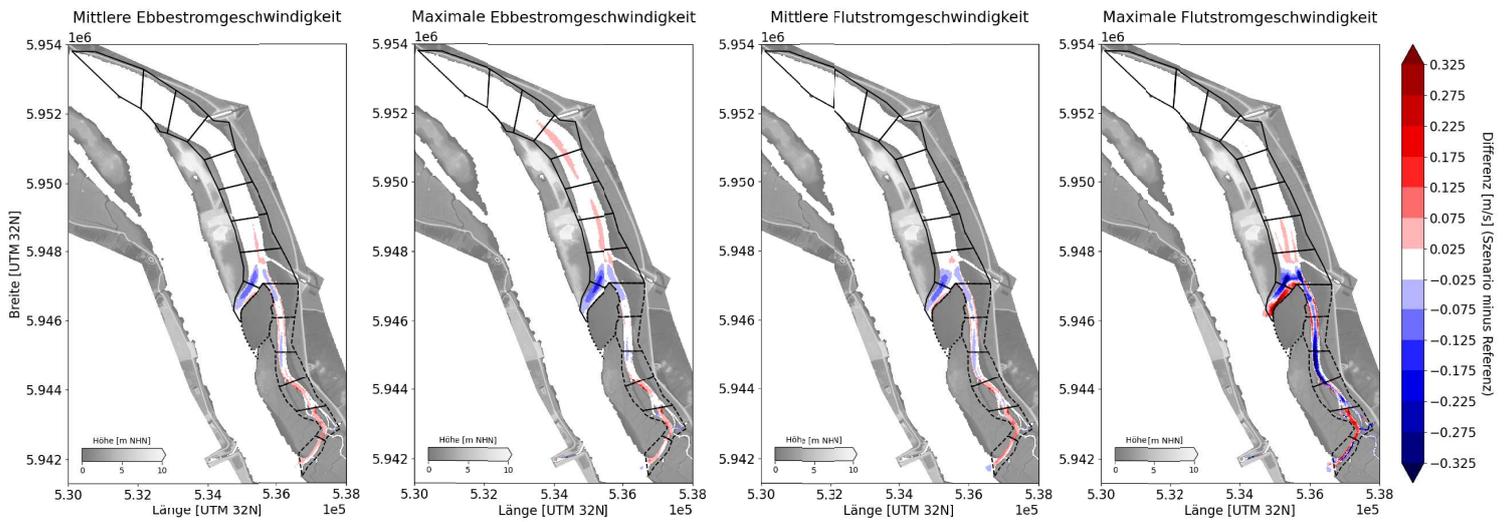


Maßnahme: Vergrößerung des Querschnitts im Steinloch, der Haseldorfer BE und im Dwar sloch, kein Verlust von Flachwasserbereichen

Volumenänderung [Tsd. m³]: -1.700

Flächenänderung [Tsd. m²]: Watt: -300 / Flachwasser: 200 / Tiefwasser 2: 100

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



Strömungsgeschwindigkeit

- Abnahme von Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Rinne und Zunahme im Bereich den Ufer der Haseld. BE sowie im Dwar sloch
- Vielfältigere Strömungsmuster im Bereich Steinloch und Dwar sloch



Fischfauna

- Tendenzielle Verbesserung für rheophile Arten durch vielfältigere Strömungsmuster im Bereich in den Bereichen Steinloch und Dwar sloch



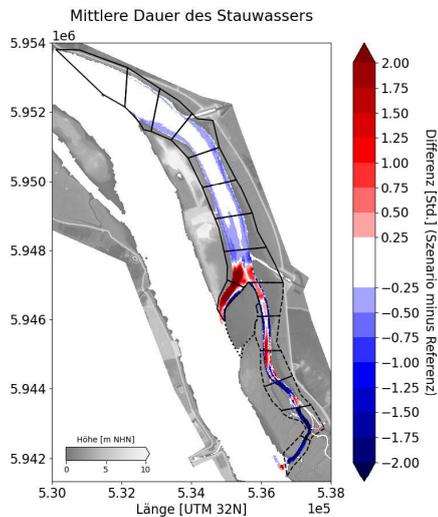
Morphologie

- Verlust eines kleinen Teils der Wattflächen zugunsten der Flachwasserflächen
- Tiefere Rinne in der nördlichen Haseldorfer BE und im Dwar sloch
- Verlandungstendenz insbesondere in vertieften Bereichen zu erwarten

Maßnahme e)

Kombination b) + c) + d)

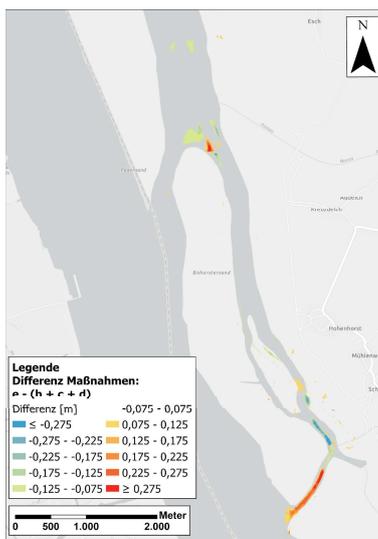
Einflüsse auf die Stauwasserdauer



Stauwasserdauer

- Zunahme der Stauwasserdauer im Steinloch, am Übergang zwischen Pagensander NE und der Haseldorfer BE sowie im Norden der Haseldorfer BE
- Abnahme der Dauer an den Uferseiten der Pagensander NE und des südlichen Teils der Haseldorfer BE

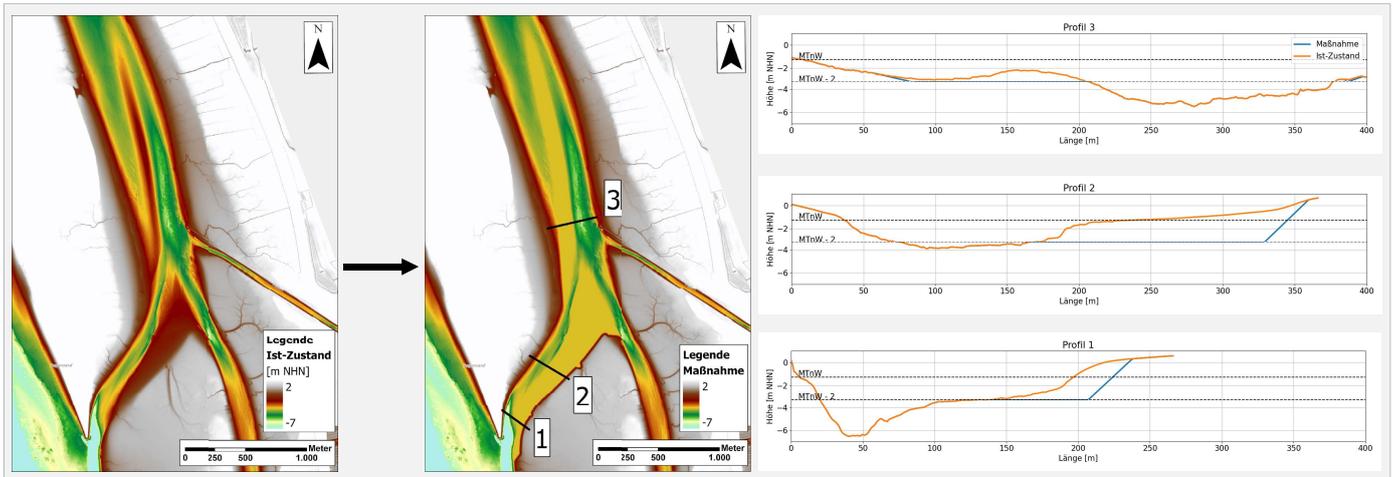
Einfluss der Kombination von Maßnahmen



Vergleich der für die Gesamtmaßnahme simulierten Auswirkungen mit der Überlagerung der für die Einzelmaßnahmen b), c) und d) simulierten Änderungen. Es ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse für viele Bereiche ähneln. Allerdings sind lokal, insbesondere im Bereich Dwarsoch auch deutliche Unterschiede zu erkennen, woran deutlich wird, dass sich die Maßnahmen auch gegenseitig beeinflussen und eine Überlagerung der Ergebnisse von Einzelmaßnahmen mit großer Vorsicht zu interpretieren ist.

Maßnahme f)

BAW (2020) – Modifiziert

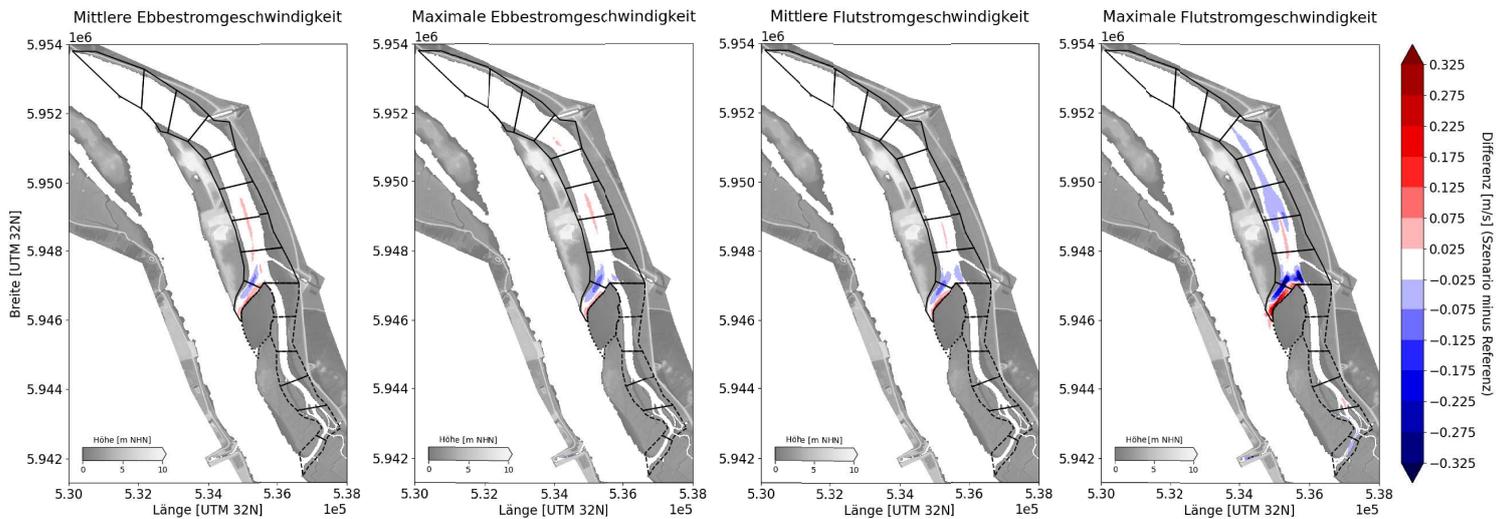


Maßnahme: Ähnlich wie BAW (2020), jedoch ohne Verlust von Flachwasserflächen. Vergrößerung des Querschnitts im Steinloch um ca. 30-50 %.

Volumenänderung [Tsd. m³]: -650

Flächenänderung [Tsd. m²]: Watt: -105 / Flachwasser: 105 / Tiefwasser 2: 0

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



- Strömungsgeschwindigkeit**
- Abnahme von Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten in der Steinloch-Rinne und Zunahme im Bereich der Ufer
 - Homogenere Strömungsmuster im gesamten Tideverlauf im Bereich Steinloch

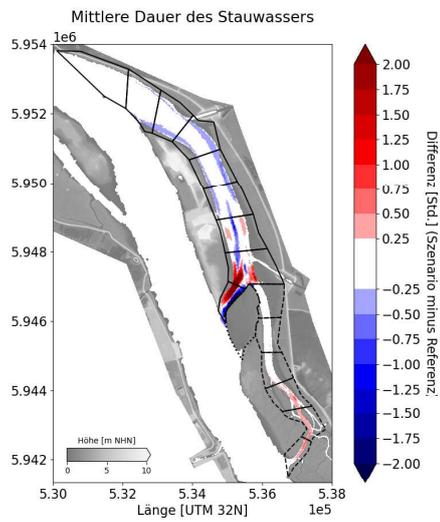
- Fischfauna**
- Beeinflussung der Lebensbedingungen für rheophile Arten durch homogenere Strömungsmuster im Bereich Steinloch

- Morphologie**
- Verlust eines kleinen Teils der Wattflächen zugunsten den Flachwasserflächen
 - Verlandungstendenz insbesondere in vertieften Bereichen zu erwarten

Maßnahme f)

BAW (2020) – Modifiziert

Einflüsse auf die Stauwasserdauer

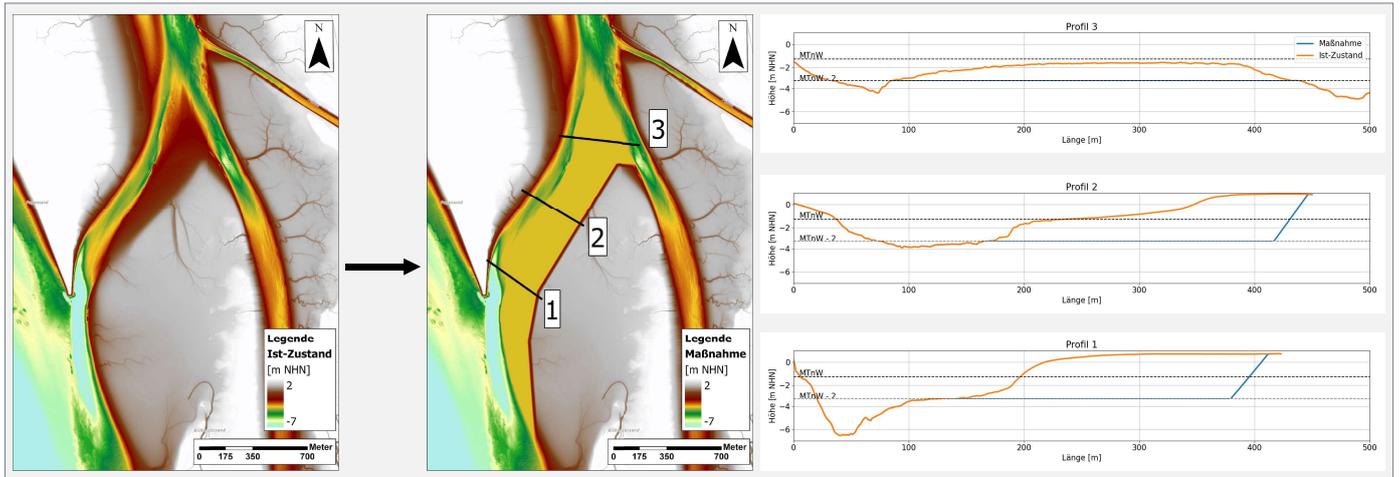


Stauwasserdauer

- Zunahme der Stauwasserdauer im Steinloch, am Übergang zwischen Pagensander NE und der Haseldorfer BE sowie im Süden der Haseldorfer BE
- Abnahme der Dauer an den Uferseiten des Pagensander NE und neben dem Bishoster Sand

Maßnahme g)

Steinloch – Aufweitung (groß)

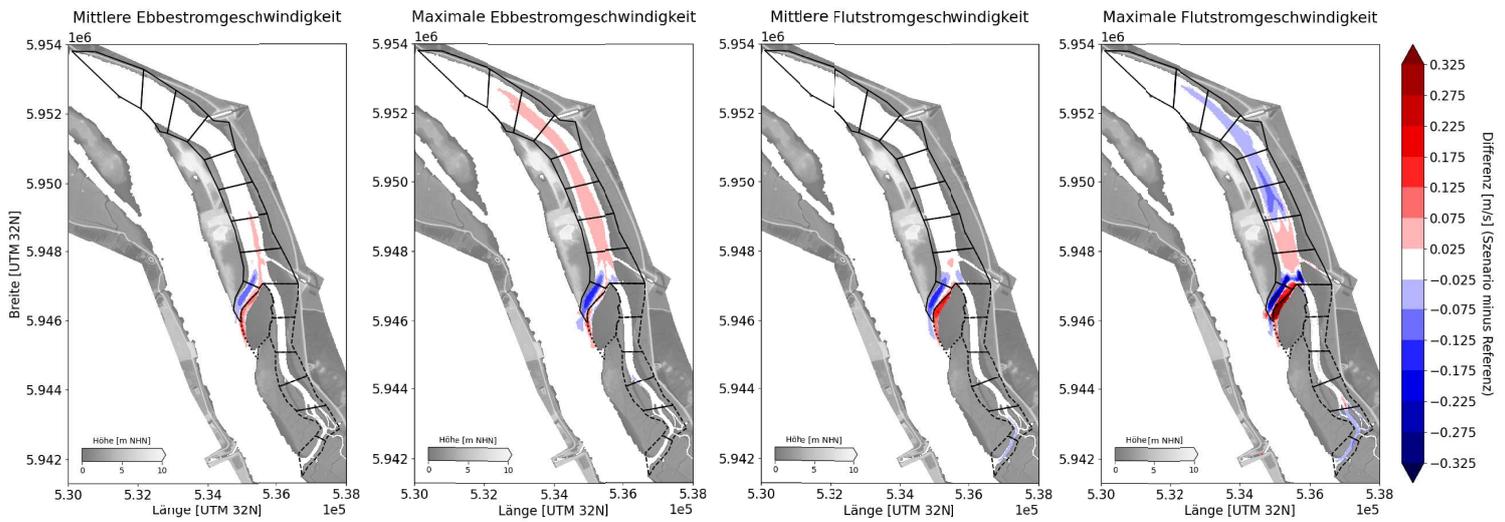


Maßnahme: Vergrößerung des Querschnitts im Steinloch um ca. 50-100 %, ohne Verlust von Flachwasserbereichen

Volumenänderung [Tsd. m²]: -1.200

Flächenänderung [Tsd. m³]: Watt: -300 / Flachwasser: 300 / Tiefwasser 2: 0

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



Strömungsgeschwindigkeit

- Abnahme von Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Steinloch-Rinne und Zunahme im Bereich der Steinloch-Ufer
- Geringfügige Änderungen der max. Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in der zentr. Pagensander NE
- Geringfügige Abnahme der Flutstromgeschwindigkeiten im Dwarzloch
- Homogenere Strömungsmuster im gesamten Tideverlauf im Bereich Steinloch

Fischfauna

- Beeinflussung der Lebensbedingungen für rheophile Arten durch homogenere Strömungsmuster im Bereich Steinloch

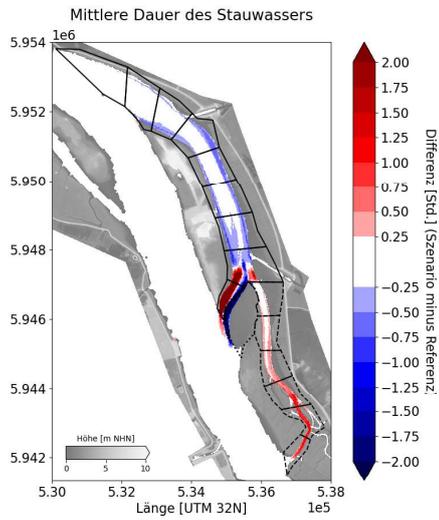
Morphologie

- Verlust eines größeren Teils der Wattflächen zugunsten der Flachwasserflächen
- Verlandungstendenz insbesondere in vertieften Bereichen zu erwarten

Maßnahme g)

Steinloch – Aufweitung (groß)

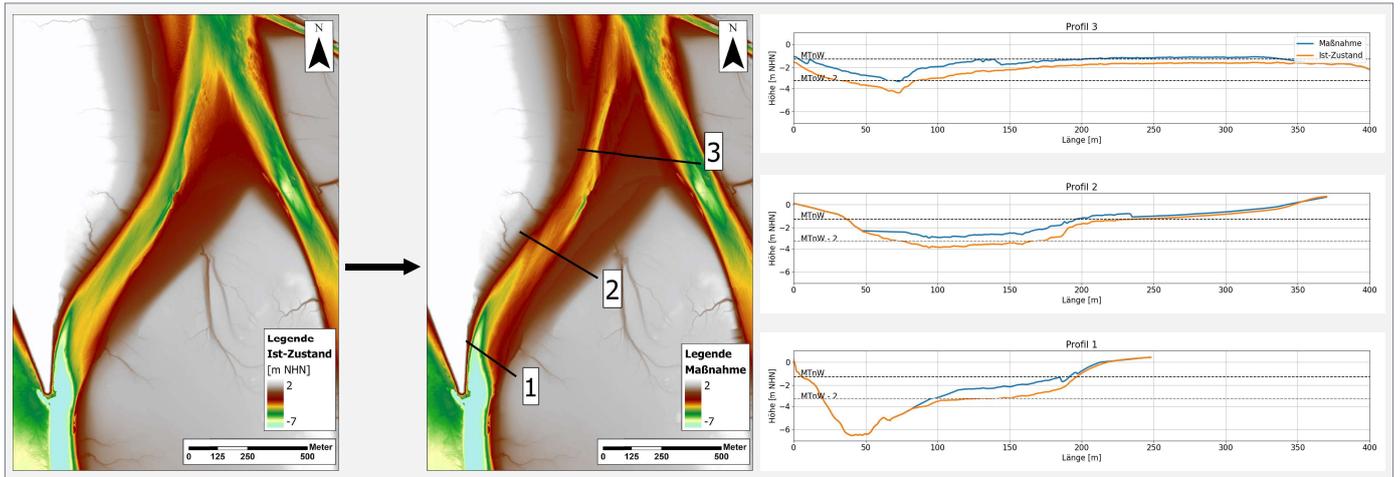
Einflüsse auf die Stauwasserdauer



Stauwasserdauer

- Zunahme der Dauer des Stauwassers im Steinloch, am Übergang zwischen Pagensander NE und der Haseldorfer BE sowie im größten Teil der Haseldorfer BE
- Abnahme der Dauer an den Uferseiten des Pagensander NE und neben dem Bishoster Sand

Maßnahme h) Steinloch - Einengung

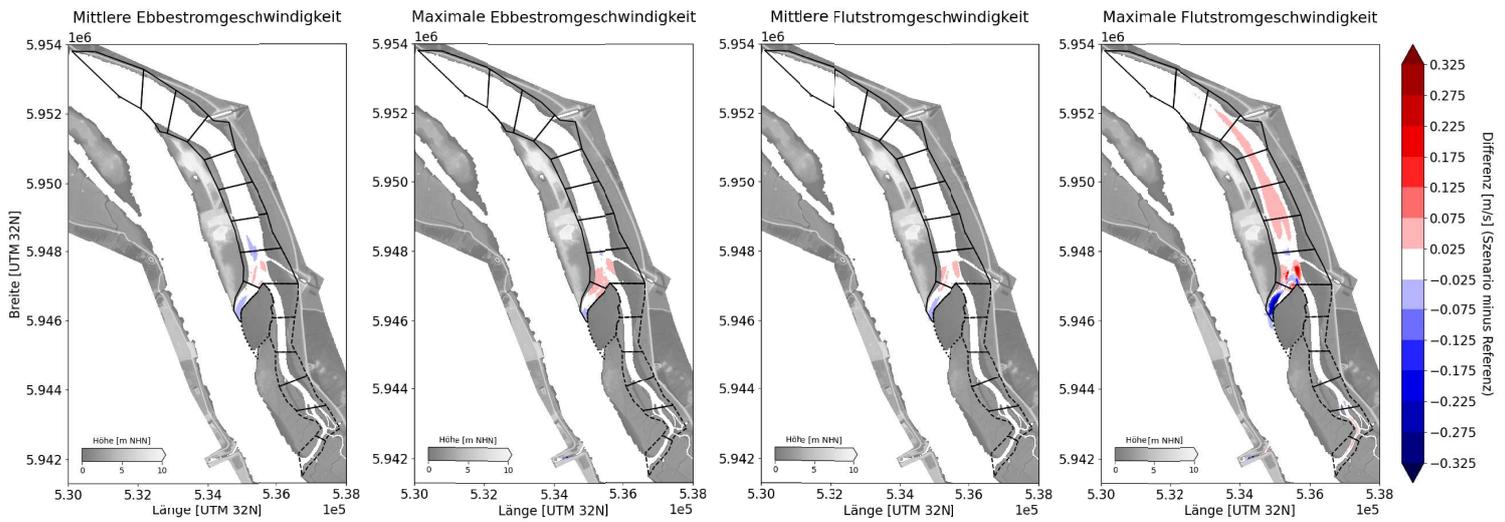


Maßnahme: Verringerter Querschnitt um ca. halbe Wassertiefe (Verlandung bei Einstellung der Unterhaltung)

Volumenänderung [Tsd. m³]: 290

Flächenänderung [Tsd. m²]: Watt: 75 / Flachwasser: 25 Tiefwasser 2: -100

Einflüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit



- Strömungsgeschwindigkeit**
- Geringfügige Abnahme von Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich der Steinloch-Rinne und leichte Zunahme im Bereich der Pinnau-Mündung
 - Zunahme der max. Flutstromgeschwindigkeit in der zentralen Pagensander NE
 - Homogenere Strömungsmuster im gesamten Tideverlauf im Bereich Steinloch

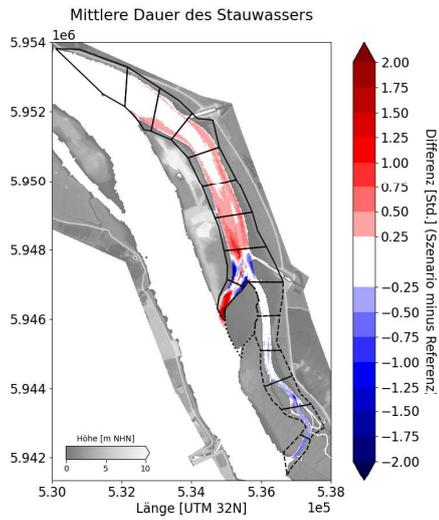
- Fischfauna**
- Beeinflussung der Lebensbedingungen für rheophile Arten durch homogenere Strömungsmuster im Bereich Steinloch

- Morphologie**
- Zunahme der Watt- und Flachwasserflächen im Bereich Steinloch zulasten der Tiefwasserflächen
 - Abgeschwächte Verlandungstendenz im Bereich Steinloch

Maßnahme h)

Steinloch - Einengung

Einflüsse auf die Stauwasserdauer



Stauwasserdauer

- Zunahme der Dauer des Stauwassers im Steinloch, im mittleren Pagensander NE sowie an seinen nördlichen Uferseiten
- Abnahme der Dauer auf dem zweiten südlichsten Kilometer der Pagensander NE und der südlichen Hälfte der Haseldorfer BE