
Systemverständnis Nebenelben

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

PROJEKTBERICHT 2

Hamburg, 19.04.2021

Systemverständnis Nebelben

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

PROJEKTBERICHT 2

BERICHTSZEITRAUM 04/2019 – 03/2021

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. (2021): Systemverständnis Nebelben - Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelben als Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe. Projektbericht Nr. 2. Technische Universität Hamburg - Institut für Wasserbau. Hamburg.

Technische Universität Hamburg

Institut für Wasserbau

Denickestraße 22

D 21073 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung und Konzeption	3
2.1	Teilziel 1: Verbesserte Einschätzung der Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelnelben auf der Grundlage von bestehenden Daten (AP 1)	4
2.2	Teilziel 2: Detaillierte Beschreibung der Morphologie sowie der morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelnelben auf der Grundlage von neu erhobenen Daten mit bestmöglicher Datenqualität (AP 2)	8
2.3	Teilziel 3: Numerische Modelluntersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses von hydrodynamischen und morphologischen Prozessen und deren Veränderungen infolge wasserbaulicher Maßnahmen (AP 3 und AP4)	12
3	Untersuchungsgebiet Nebelnelben	16
3.1	Hintergrund zur Entstehung der Nebelnelben	18
3.1.1	Entwicklung des Hochwasserschutzes	18
3.1.2	Entwicklung des Strombaus	19
3.2	Hahnöfer Nebelnelbe	23
3.2.1	Lage	23
3.2.2	Entstehung	23
3.2.3	Morphometrie	26
3.2.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	26
3.2.5	Morphologische Entwicklung	27
3.2.6	Unterhaltung	31
3.2.7	Ufersicherung	31
3.2.8	Naturschutzfachliche Bewertung	32
3.3	Lühesander Süderelbe	33
3.3.1	Lage	33
3.3.2	Entstehung	33
3.3.3	Morphometrie	34
3.3.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	34
3.3.5	Morphologische Entwicklung	35

3.3.6	Unterhaltung	38
3.3.7	Ufersicherung	38
3.3.8	Naturschutzfachliche Bewertung	39
3.4	Haseldorfer Binnenelbe	40
3.4.1	Lage	40
3.4.2	Entstehung	40
3.4.3	Morphometrie	43
3.4.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	43
3.4.5	Morphologische Entwicklung	43
3.4.6	Unterhaltung	47
3.4.7	Ufersicherung	47
3.4.8	Naturschutzfachliche Bewertung	47
3.5	Pagensander Nebenelbe	48
3.5.1	Lage	48
3.5.2	Entstehung	48
3.5.3	Morphometrie (Länge, Breite, Tiefe, Sohlsedimente)	54
3.5.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	54
3.5.5	Morphologische Entwicklung	55
3.5.6	Unterhaltung	60
3.5.7	Ufersicherung	60
3.5.8	Naturschutzfachliche Bewertung	61
3.6	Schwarztonnensander Nebenelbe	61
3.6.1	Lage	61
3.6.2	Entstehung	62
3.6.3	Morphometrie	63
3.6.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	64
3.6.5	Morphologische Entwicklung	64
3.6.6	Unterhaltung	68
3.6.7	Ufersicherung	68
3.7	Glückstädter Nebenelbe	69

3.7.1	Lage	69
3.7.2	Entstehung	70
3.7.3	Morphometrie	70
3.7.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	70
3.7.5	Morphologische Entwicklung	71
3.7.6	Unterhaltung	75
3.7.7	Ufersicherung	75
3.7.8	Naturschutzfachliche Bewertung	76
3.8	Wischhafener Nebelnelbe / Wischhafener Fahrwasser	76
3.8.1	Lage	76
3.8.2	Entstehung	77
3.8.3	Morphometrie	78
3.8.4	Hydrodynamik und Sedimenttransport	78
3.8.5	Morphologische Entwicklung	79
3.8.6	Unterhaltung	83
4	Beschreibung des aktuellen morphologischen Zustands ausgewählter Nebelnelben anhand von neu erhobenen Messdaten	84
4.1	Messkonzept zur Erhebung zusätzlicher Messdaten	84
4.1.1	Fächerecholotpeilungen	84
4.1.2	Sedimentbeprobungen	88
4.1.3	Strömungsmessungen	91
4.2	Jahrestopographien	93
4.2.1	Hahnöfer Nebelnelbe	94
4.2.2	Lühesander Süderelbe	96
4.2.3	Haseldorfer Binnenelbe	98
4.2.4	Pagensander Nebelnelbe	99
4.3	Morphologische Entwicklung	101
4.3.1	Hahnöfer Nebelnelbe	102
4.3.2	Lühesander Süderelbe	110
4.3.3	Haseldorfer Binnenelbe	115

4.3.4	Pagensander Nebenebe	118
4.3.5	Zusammenfassung	123
5	Stand der Arbeiten nach dem zweiten Projektjahr	127
5.1	Grundlagen und Konzeption (AP 1)	131
5.1.1	Konzeption (AP 1.1)	131
5.1.2	Stand des Wissens und Bestandsdaten (AP 1.2)	131
5.1.3	Datenqualität (AP 1.3)	146
5.2	Messkonzept und Durchführung der Messungen (AP2)	163
5.2.1	Messkonzept (AP 2.1)	163
5.2.2	Fächerecholotpeilungen (AP 2.2)	163
5.2.3	Datenauswertung und –Analyse (AP 2.3)	163
5.3	Modellaufbau und Modellierung Pagensander Nebenebe (AP 3)	163
6	Ausblick auf geplante Arbeiten im dritten Projektjahr	164
6.1	Datenqualität (AP 1.3)	164
6.2	Fächerecholotpeilungen (AP 2.2)	164
6.3	Datenauswertung und -Analyse (AP 2.3)	165
6.4	Modellaufbau und Modellierung (AP 3)	165
7	Zusammenfassung	167
	Literaturverzeichnis	170
	Abbildungsverzeichnis	175
	Tabellenverzeichnis	183

1 Einleitung

Das Institut für Wasserbau (IWB) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) führt im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee (WSA EN) seit dem 15.04.2019 das Vorhaben „Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelben als Beitrag für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe“ (kurz: Systemverständnis Nebelben) durch. Grundlage bildet ein Kooperationsvertrag vom 15.04.2019, die gesamte Projektlaufzeit beträgt vier Jahre. Ziel des Vorhabens ist es, die hydrodynamischen und morphologischen Prozesse in den Nebelben-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 Nebelbe, die Lühesander Süderelbe, die Haseldorfer Binnenelbe, die Pagensander Nebelbe, die Schwarztonnensander Nebelbe, die Glückstädter Nebelbe und das Wischhafener Fahrwasser. Im Vorhaben wurden drei Teilziele definiert:

- 1 Verbesserte Einschätzung der Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelben auf der Grundlage von bestehenden Daten
- 2 Detaillierte Beschreibung der Morphologie sowie der morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelben auf der Grundlage von neu erhobenen Daten mit bestmöglicher Datenqualität
- 3 Numerische Modelluntersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses von hydrodynamischen und morphologischen Prozessen und deren Veränderungen infolge waserbaulicher Maßnahmen

Diese sind den Arbeitspaketen AP1 (Grundlagen und Konzeption) und AP 2 (Messkonzept und Durchführung der Messungen) sowie den Arbeitspaketen AP3 (Modellaufbau und Modellierung) + AP4 (Untersuchung und Bewertung von Maßnahmen) der Vorhabenbeschreibung zugeordnet, die Inhalt des Kooperationsvertrages ist.

Im vorliegenden fortgeschriebenen Bericht sind die in den beiden ersten Jahren des Vorhabens (April 2019 – März 2021) erzielten Ergebnisse sowie der Fortschritt der Arbeiten dokumentiert. Die Inhalte des ersten Statusberichts (September 2019), des ersten Projektberichts (April 2020) und des zweiten Statusberichts (September 2020) sind ebenfalls in diesem Bericht enthalten.

Der Bericht gliedert sich neben der Einleitung in 6 Kapitel. In Kapitel 2 wird die Konzeption des Vorhabens vorgestellt. Es folgt eine eingehende Beschreibung des Untersuchungsgebietes in Kapitel 3. Dabei wird jede Nebelbe anhand von ausgewerteten Bestandinformationen (Daten, Schrifttum) im Detail dargestellt. Der derzeitige morphologische Zustand

wird in Kapitel 4 auf Grundlage aktueller Vermessungsdaten beschrieben. Der Projektfortschritt wird in Kapitel 5 separat für jedes Arbeitspaket vorgestellt. Es folgen ein Ausblick auf die Arbeiten im dritten Projektjahr (Kapitel 6) sowie eine Zusammenfassung (Kapitel 7).

2 Zielsetzung und Konzeption

Ziel des Vorhabens ist es, die hydrodynamischen und morphologischen Prozesse in den Nebelbensystemen der Tideelbe besser zu verstehen und damit einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses des Gesamtsystems Tideelbe zu leisten. Wie dieses Ziel erreicht werden soll, welche Anforderungen dabei zu erfüllen sind und welche Arbeitsschritte zur Erreichung des Ziels konkret umgesetzt werden, wird in der Konzeption des Vorhabens beschrieben. Die in der Vorhabenbeschreibung dargestellte Rohfassung der Konzeption dient dabei als Grundgerüst, das im Folgenden inhaltlich weiter ausgebaut und konkretisiert wird. Dabei werden zum einen vom WSA Elbe-Nordsee spezifizierte sowie im Forum Tideelbe diskutierte Anforderungen berücksichtigt, die im Kern auf dem Leitgedanken der Vereinbarkeit von Strombau und Naturschutz basieren. Die diesbezüglichen Details wurden im Rahmen der Arbeitstreffen im ersten Projektjahr ermittelt und festgelegt. Zum anderen sind die Ergebnisse der durchgeführten Analysen des Schrifttums und der Bestandsdaten sowie die Erkenntnisse aus den durchgeführten Messungen in die Konzeption eingeflossen.

Im Ergebnis werden drei separate Teilziele definiert, die im Wesentlichen den einzelnen Arbeitspaketen AP1 und AP 2 sowie AP3+AP4 der Vorhabenbeschreibung zugeordnet werden können. Darauf aufbauend erfolgt in AP5 eine Synthese bei der die gewonnenen Erkenntnisse zu den Teilzielen in einen übergeordneten Zusammenhang – das Gesamtsystem Nebelben – gebracht werden. Eine Übersicht zu den Teilzielen, auf die in den folgenden Abschnitten im Detail eingegangen wird, gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Überblick zur verfeinerten Zielsetzung des Vorhabens

Nr.	(Teil-) Ziel	AP
1	Verbesserte Einschätzung der Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelben auf der Grundlage von bestehenden Daten (AP 1)	AP 1
2	Detaillierte Beschreibung der Morphologie sowie der morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelben auf der Grundlage von neu erhobenen, hochgenauen Daten	AP 2
3	Numerischen Modelluntersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses von hydrodynamischen und morphologischen Prozessen und deren Veränderungen infolge wasserbaulicher Maßnahmen	AP 3 und AP 4
Gesamt	Synthese der Ergebnisse: Verbesserung des Systemverständnisses der Hydrodynamik und Morphologie in den Nebelbensystemen als Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses für das Gesamtsystem Tideelbe	AP 5

2.1 Teilziel 1: Verbesserte Einschätzung der Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelnelben auf der Grundlage von bestehenden Daten (AP 1)

Einführung:

Für das Untersuchungsgebiet stehen bereits einige Datensätze zur Verfügung. Ältere Datensätze stehen dabei meist als gescannte Karten, z.B. Seekarten, zur Verfügung, während jüngere Datensätze als digitale (Geo-)Daten vorliegen, z.B. als Shapefiles oder Raster. Diese liefern u.a. Informationen zur Sedimentzusammensetzung der Sohle, örtlichen Strömungen, Baumaßnahmen, Morphozonen, Vegetation und Bathymetrie.

Die Bathymetrie-Datensätze, die für unterschiedliche Jahre zur Verfügung stehen, bilden die wichtigste Grundlage für eine Analyse der morphologischen Entwicklung. Die weiteren genannten Daten liefern zusätzliche Informationen, die in die Analyse und Bewertung einbezogen werden. In der Vergangenheit wurden für ausgewählte Nebelnelben bereits Analysen der Tiefenverteilung und deren Änderung durchgeführt (Lange 1993; Fräßdorf 1995; Entelmann 25.09.18, 12.02.19a). Die Untersuchungen basieren in der Regel auf Daten aus Punkt- bzw. Linienpeilungen, die räumlich interpoliert wurden. Das gilt uneingeschränkt für die beiden genannten Untersuchungen von Lange (ebd.) und Fräßdorf (ebd.) und größtenteils für die Untersuchungen von Entelmann (ebd.). In der jüngeren Vergangenheit wurden einige Abschnitte, wie z.B. die Rinne der Pagensander Nebelnelbe per Fächerlot vermessen. Hieraus kann ein deutlich genaueres räumliches Abbild der Bathymetrie abgeleitet werden. Allerdings standen auch Entelmann (ebd.) keine flächendeckenden Fächerlotdaten zur Verfügung. Dementsprechend basieren auch seine Untersuchungen hauptsächlich auf interpolierten Linienpeildaten, die die Topographie im unmittelbar vermessenen Bereich sehr gut abbilden, mit zunehmender Entfernung von der vermessenen Linie jedoch deutliche Abweichungen von der realen Topographie aufweisen können. Dementsprechend sind die bisherigen quantitativen Auswertungen der Tiefenverteilung und deren Änderung mit größeren Unsicherheiten behaftet und belastbare Aussagen können nur innerhalb gewisser Grenzen getroffen werden. Beispielsweise verwendet Entelmann einen pauschalen Unschärfebereich von ± 30 cm (Entelmann 12.02.19a). Aussagen zu Sohlformen und Transportkörpern konnten aufgrund der Datenqualität bislang nicht getroffen werden.

Neben der räumlichen Auflösung spielt auch die zeitliche Auflösung, in der die Daten zur Verfügung stehen, eine Rolle. Stehen für einen längeren Zeitraum, z.B. mehrere Jahre, nur zwei Datensätze (am Anfang und am Ende) zur Verfügung, kann die Änderung der Tiefenverteilung nur integriert über diesen Zeitraum angegeben werden.

Das erste Teilziel des Vorhabens ist es Aussagen zur morphologischen Entwicklung von Nebelnelben auf der Grundlage von bestehenden Daten zu treffen. Dies soll unter Ausnutzung aller verfügbaren bzw. zu ermittelnden Informationen bezüglich der Unsicherheiten der Bestandsdaten erfolgen.

Anforderungen:

- Alle verfügbaren Daten und gesamte verfügbare Literatur) sind zusammen zu tragen, zu sichten und kritisch zu durchleuchten
- Möglichst präzise Beschreibung des aktuellen Zustands sowie der aktuellen und historischen morphologischen Entwicklung der Nebelben auf der Grundlage von Bestandsdaten
- Aufzeigen von Verbesserungspotential: Wie kann die Aussagekraft der auf Bestandsdaten basierenden Analysen durch die Einbeziehung aller Informationen zu Unsicherheiten erhöht werden?

Umsetzung:

Die konkreten Arbeitsschritte lauten wie folgt:

1. Bestandsdaten (AP 1.2)

Recherche, Zusammenstellung und Auswertung bestehender Datensätze

2. Aufarbeitung Stand des Wissens (AP 1.2)

Bestehende Literatur in Form von Veröffentlichungen, Berichten und Präsentationen wird zusammengestellt und ausgewertet.

3. Recherche und Aufbereitung von Bestandsdaten (AP 1.2)

Die ermittelten Datensätze werden zunächst in gleicher Art und Weise aufbereitet und analysiert. Mit den DGMWs Tideelbe der Jahre 2006, 2010 und 2016 stehen bereits räumlich und zeitlich konsistente Informationen zur Bathymetrie bereit. Hier geht es darum nachzuvollziehen, an welcher Stelle welche Informationen (Höhendaten aus Linienpeilung, Fächerlotung, Laserscan etc.) in welcher Form (Rohdaten, Geländemodelle...) eingeflossen sind. Diese Erkenntnisse sind bei der Bewertung der Analysen zu berücksichtigen.

4. Analyse und Bewertung von Bestandsdaten (AP 1.2)

Die Aussagekraft von Messdaten, wie. z.B. bathymetrischen Daten, hängt stark von deren Qualität ab. Die Qualität der Daten wird u.a. bestimmt durch die räumliche und zeitliche Auflösung, in der die Daten zur Verfügung stehen, das Messverfahren, mit dem sie erhoben wurden, der Art wie die Daten aufbereitet wurden und der Dokumentation der Daten, d.h. der Verfügbarkeit von Metadaten. Ein zentraler Aspekt ist das Messverfahren. Zum einen ist das Verfahren an sich mit Ungenauigkeiten behaftet (Lage- und Höhenungenauigkeiten, Einbautoleranzen, Korrektur-Ungenauigkeiten, Eindringtiefen...). Zum anderen entstehen weitere Ungenauigkeiten durch die Aufbereitung der Messdaten. Hier sind stellvertretend die Glättung der Messwerte oder die Ausreißerfilterung anzuführen. Schließlich verursacht die Interpolation der Daten einen weiteren Genauigkeitsverlust. Je größer der Abstand zwischen den Informationen

(Punkt- oder Linienlotung), desto größer ist der Fehler in der Fläche, der durch die Interpolation entsteht. In dieser Hinsicht haben Fächerlotungen einen entscheidenden Vorteil gegenüber Punkt- und Linienlotungen.

5. Beschreibung der Entwicklung der Messtechnik mit Fokus auf die Genauigkeit von Messverfahren (AP 1.3)

Die eingesetzte Messtechnik hat sich im Laufe der Zeit stetig weiterentwickelt. Es erfolgt eine Zusammenstellung der Entwicklung der Technik zur Unterwasserhöhenvermessung mit besonderem Schwerpunkt auf die erzielbaren Messgenauigkeiten. Dies ermöglicht bei Kenntnis der zur Vermessung eingesetzten Technik - unabhängig von den konkret verfügbaren Informationen und Metadaten zu den vorliegenden bathymetrischen Daten - eine Abschätzung der (technischen) Messungenauigkeit. Insbesondere für ältere und historische bathymetrische Daten/Karten, für die keine Angaben zur Vermessung mehr vorliegen, kann so eine grundlegende Abschätzung der zu erwartenden Datenqualität und Genauigkeit erfolgen.

6. Versuche und Untersuchungen zur Ermittlung der tatsächlichen Messungenauigkeiten bei der bathymetrischen Vermessung (AP 1.3)

Die Messunsicherheit ist ein dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte. Sie setzt sich zusammen aus zufälligen Messabweichungen und der unvollständigen Korrektur bezüglich der systematischen Einflussparameter (Internationale Organisation für Normung 1995). Das Ergebnis der Arbeiten soll eine konzeptuelle Beschreibung des Gesamtablaufes der Datenerhebung und -aufbereitung sein. Die Relevanz verschiedener Einflussgrößen auf (systematische) Messabweichungen wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht und dargestellt. Im Hinblick auf die zufälligen Messabweichungen der Vermessung werden die Teil- und Gesamtunsicherheiten ermittelt und für das im Vorhaben eingesetzte Messsystem dargestellt. Abschließend erfolgen eine Überprüfung der theoretisch abgeleiteten Messgenauigkeit anhand von gemessenen Daten sowie eine Bewertung der erzielten Messgenauigkeit in Bezug auf die Verwendung der Vermessungsdaten zur Untersuchung und Beschreibung morphologischer Veränderungen. Neben den theoretischen Untersuchungen zu Messunsicherheiten werden praktische Tests durchgeführt, um die Qualität der Messwerte quantitativ beschreiben zu können. Konkret handelt es sich dabei um die Kalibrierung des Messsystems anhand eines Patch-Tests und eines Bar-Tests und um Kontrollmessungen im Bereich bekannter Tiefen am Beispiel von Drempeln der Sturmflutsperrwerke an Elbnebenflüssen.

7. Untersuchungen zum Einfluss der Aufbereitungsverfahren (manuelle und statistische Filterung der Rohdaten) (AP 1.3)

Bei der Aufbereitung von Rohdaten aus einer bathymetrischen Vermessung entstehen weitere Ungenauigkeiten. Bei der Fächerlotvermessung werden vergleichsweise viele

Punkte pro Fläche aufgenommen. Aufgrund vielfältiger Einflussfaktoren, wie z.B. die Eindringtiefe in das Sohlmaterial, Bewuchs, Einfallwinkel, Luftbläschen oder Schwebstoffe in der Wassersäule, Nebenkeulen, Mehrfachreflexionen etc. weisen auch sehr dicht beieinander liegende Messwerte nicht exakt dieselbe Tiefe auf, obwohl die vermessenen Punkte tatsächlich dieselbe Höhe aufweisen. Im Rahmen der Aufbereitung wird versucht Ausreißer zu identifizieren und zu eliminieren. Offensichtliche Ausreißer, die auf ein bestimmtes Event zurückzuführen sind, werden in der Regel manuell entfernt. In der zweiten Stufe erfolgt eine statistische Filterung der Ausreißer. Auch nach der Ausreißerbereinigung verbleibt eine Vielzahl von Punkten pro Fläche, die genutzt werden, um ein digitales Geländemodell mit einer definierten Rasterauflösung zu erstellen. Im Rahmen des Vorhabens werden daher anhand von Beispieldatensätzen Untersuchungen zum Einfluss der Datenaufbereitung auf die durchgeführten Analysen vorgenommen, um die Größenordnung des möglichen Fehlers besser einschätzen zu können.

8. Beschreibung des aktuellen Zustands sowie der aktuellen und historischen morphologischen Entwicklung der Nebelnelben auf der Grundlage von Bestandsdaten und Bewertung der Aussagekraft (AP 1 gesamt)

Auf Grundlage der analysierten Bestandsdaten und den Erkenntnissen zur Datenqualität erfolgt eine Beschreibung des aktuellen morphologischen Zustands sowie der aktuellen und historischen morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelnelben. In Abhängigkeit der Datenqualität wird bei der Beschreibung zwischen qualitativen (bei hoher Datenqualität) und quantitativen (bei geringerer Datenqualität) Aussagen unterschieden. Qualitative Aussagen ermöglichen ein generelles Verständnis. Es werden Muster und Trends erkannt und beschrieben sowie qualitative Zusammenhänge identifiziert. Quantitative Aussagen ermöglichen Erklärungen von (Teil-)Prozessen. Es können kausale Beziehungen identifiziert und zahlenmäßige Zusammenhänge dargestellt werden.

9. Ableitung von Kriterien bzw. Methoden für die Vermessung, Datenaufbereitung und Datenauswertung zur Erhöhung der Aussagekraft der auf Bestandsdaten basierenden Analysen (AP 1 gesamt)

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den zuvor beschriebenen Arbeitsschwerpunkten werden Anforderungen an die Vermessung, Datenaufbereitung und Datenauswertung formuliert, die erfüllt werden sollten, um eine möglichst präzise Datengrundlage zu schaffen. Des Weiteren werden für die Datenaufbereitung und Datenauswertung Methoden erprobt, um die Fehler bei der Weiterverarbeitung der Datengrundlage möglichst klein zu halten. Alles zusammen soll möglichst präzise Aussagen zur Tiefenverteilung und deren zeitlichen Änderung ermöglichen.

Produkte:

1. Konzeption des Vorhabens (Produkt P1)
2. Des Weiteren wird ein Kriterienkatalog erstellt, in dem Anforderungen an die bathymetrische Vermessung und die anschließende Datenaufbereitung zusammengestellt sind. Dieser dient der Erhöhung der Qualität von bathymetrischen Daten (Produkt P2).
3. Die historische morphologische Entwicklung der ausgewählten Nebelnelben wird dargestellt und analysiert. Neben der Änderung der Tiefenverteilung und den damit verknüpften Auswertungen (Flächen und Volumina) werden soweit möglich auch weitere Aspekte, wie z.B. Sohlformen, untersucht. Die Aussagekraft der abgeleiteten Erkenntnisse wird unter Berücksichtigung der ermittelten Fehlertoleranzen bewertet. Dabei wird zwischen qualitativen und quantitativen Aussagen unterschieden (Produkt P9).

2.2 Teilziel 2: Detaillierte Beschreibung der Morphologie sowie der morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelnelben auf der Grundlage von neu erhobenen Daten mit bestmöglicher Datenqualität (AP 2)

Einführung:

Um die aktuelle Morphologie und die morphologische Entwicklung ausgewählter Nebelnelben präzise beschreiben zu können, wird im Rahmen des AP 2 "Messkonzept und Messungen" die bestehende Datengrundlage erweitert. Hierzu wird zunächst ein Messkonzept erarbeitet, auf dessen Grundlage im Rahmen dieses Vorhabens und auch darüber hinaus Daten zur Analyse und Bewertung der morphologischen Entwicklung und der damit einhergehenden Sedimentations- und Erosionsprozesse in den Nebelnelben erfasst werden. Basierend auf den Erkenntnissen aus AP 1 legt das Messkonzept zunächst fest, welche Parameter neben der Bathymetrie zu erfassen sind, um zu einer fundierten Bewertung zu ermöglichen.

Im Kern des AP steht die Erhebung von bathymetrischen Daten unter Anwendung möglichst präziser Mess- und Auswerteverfahren. Anhand von flächenhaften (Erst-) Aufnahmen der Bathymetrie in den ausgewählten Nebelnelbensystemen (Pagensander Nebelnelbe, Haseldorfer Binnenelbe, Lühesander Süderelbe, Hahnöfer Nebelnelbe) mittels Fächerecholot wird die Morphologie im Detail, z.B. Tiefenvariationen und Sohlstrukturen, beschrieben, analysiert und bewertet. Auf der Grundlage wiederholter Aufnahmen in den Folgejahren mit derselben Methodik erfolgt eine Beurteilung der kurz- bis mittelfristigen morphologischen Entwicklung der betrachteten Nebelnelbensysteme. Beispielsweise werden Veränderungen der Tiefenvariation und der Sohlstrukturen sowie die morphologische Aktivität untersucht.

Ein wesentlicher Aspekt, der die Genauigkeit der bathymetrischen Daten und somit auch die Analyseergebnisse beeinflussen kann, ist das Verfahren nach dem die gemessenen

Rohdaten aufbereitet werden. Hier existieren unterschiedliche Methoden mit denen u.a. die manuelle und statistische Filterung, Interpolation, Korrekturen, z.B. über die Schallgeschwindigkeit, durchgeführt werden. Die Bestimmung der Auswirkungen der gewählten Methoden bzw. der vorhandenen Spielräume bei deren praktischer Umsetzung werden im Rahmen von AP 1 untersucht und soweit möglich quantifiziert. Im Rahmen von AP 2 wird untersucht, welche Unsicherheiten bei der Weiterverarbeitung (DGM-Erzeugung) bzw. der Auswertung der DGM entstehen können, bzw. wie die gewählten Methoden die Ergebnisse beeinflussen. Ziel ist es, die Qualität der Analyseergebnisse durch Eingrenzung der Unsicherheiten aus der Datenweiterverarbeitung (Rasterinterpolation, Differenzen zwischen Rastern) zu erhöhen.

Im Verlauf des Vorhabens wird geprüft, inwiefern auch flachere Bereiche der Nebelnelben, die aus technischen Gründen nicht per Fächerlot erfasst werden können (Sohlhöhen oberhalb -0,5 m NHN), zeitlich enger erfasst werden und damit stärker in die Untersuchungen zur morphologischen Entwicklung einbezogen werden können. Nutzbar sind aktuell hier Befliegungsdaten aus Laserscan-Befliegungen, die im 5-6-Jahres Rhythmus im Auftrag der WSV durchgeführt werden. Diese Befliegungen erfolgen um den Zeitpunkt des Tnw herum, um auch weite Teile der Wattflächen erfassen zu können. Über die Nutzung der Befliegungsdaten hinaus wird angestrebt, weitere Verfahren, z.B. drohnengestützte Vermessungen oder kombinierte Laser- und Fächerlotvermessungen, einzusetzen und die Eignung solcher Verfahren für die Wattbereiche der Nebelnelben zu erproben. Ziel dieses Vorgehens ist es, Ansätze zu finden, um die Qualität der Geländemodelle insbesondere am Übergang vom Flachwasser zu den Wattbereichen zu verbessern und Höhengsprünge im Übergangsbereich, die auf unterschiedliche Mess- und Auswerteverfahren (z.B. Peilung, LiDAR) zurückzuführen sind, zu vermeiden.

Anforderungen:

- Detaillierte Beschreibung des aktuellen Zustands sowie der aktuellen morphologischen Entwicklung der Nebelnelben auf der Grundlage von speziell zu diesem Zweck zu erhebenden, möglichst präzisen Daten
- Möglichst weitreichende Abdeckung der untersuchten Bereiche, d.h. auch Einbeziehung von Flachwasserzonen und der unteren Wattbereiche
- Aufzeigen von Verbesserungspotential: Wie kann eine hohe Qualität bei der Auswertung und Analyse von Vermessungsdaten gewährleistet werden? In diesem Zusammenhang ist auch ein Kriterienkatalog zu entwickeln und zu erproben, der im Rahmen der WSV-internen Aufgaben angewendet werden kann.

Umsetzung:

Die konkreten Arbeitsschritte lauten wie folgt:

1. Erstellung eines Messkonzepts (AP 2.1)

Auf der Grundlage einer Analyse der Bestandsdaten und einer Auswertung des zusammengetragenen Wissens bezüglich der morphologischen Entwicklung und der damit einhergehenden Sedimentations- und Erosionsprozesse in den Nebelnelben wird der Erweiterungsbedarf des Datenbestands identifiziert. Gemeinsam mit dem WSA EN wird festgelegt, welche Parameter zusätzlich zur Bathymetrie erhoben werden sollen. Es folgen die Planung und Konzipierung von Messungen in Form von kampagnenbasierten Naturmessungen in Abstimmung mit dem WSA EN. In diesem Zusammenhang werden u.a. folgende Festlegungen getroffen: zu erfassende Parameter, eingesetztes Messverfahren, eingesetzte Messgeräte, Standorte der Messungen, Zeiträume in denen gemessen wird, Ausbringung, Einholung und Wartung der Messgeräte. Für das Jahr 2021 ist die Durchführung von ADCP-Strömungs- und Durchflussmessungen im Bereich Steinloch (stromaufseitiges Ende der Pagensander NE) geplant. Es ist eine Kombination aus punktuellen Dauermessungen (mehrere Tage) (durchgeführt vom WSA EN) und temporären (über eine Tide) Querprofilmessungen (durchgeführt vom IWB) vorgesehen.

2. Jährliche Vermessung (Fächerlotung) von ausgewählten Nebelnelben (derzeit: Pagensander NE, Haseldorfer BE, Lühesander NE, Hahnöfer NE) (AP 2.2)

Die Fächerlotpeilungen werden mit dem institutseigenen IWB-Messboot „Nekton“ durchgeführt. Pro Jahr sind 4 Messkampagnen geplant, die insgesamt 16 Messtage umfassen. Im ersten und zweiten Projektjahr wurden 4 Nebelnelben (Pagensander NE, Haseldorfer BE, Lühesander NE, Hahnöfer NE) vermessen. Dieselben Bereiche sollen auch im dritten Projektjahr vermessen werden. Auf Grundlage neuer Erkenntnisse im weiteren Verlauf des Vorhabens ist eine Anpassung der zu vermessenden Bereiche unter Beibehaltung des Aufwands möglich.

3. Konsistente Aufbereitung der erhobenen Daten (manuelle und stat. Ausreißerbereinigung, Rasterinterpolation) zu digitalen Geländemodellen (AP 2.2)

Der vermessenen Rohdaten werden nach einem definierten Verfahren konsistent aufbereitet. Die eingesetzten Methoden zur manuellen und statistischen Filterung, Interpolation und Korrekturen, z.B. über die Schallgeschwindigkeit sowie die verwendeten Parameter werden dokumentiert.

4. Recherche und Tests von Verfahren und Systemen zur Vermessung der höhergelegenen (oberhalb NHN+0,5m) Wattbereiche (AP 2.2)

Diese Bereiche werden derzeit im Regelfall alle 5-6 Jahre per ALS (Airborne Laserscanning) vermessen. Der Auftrag hierzu wird durch die WSV vergeben und die Daten fließen in die im selben Rhythmus erstellten DGMW ein. Im Rahmen dieses Vorhabens wird nach Möglichkeiten gesucht, diese Flächen häufiger zu vermessen, um einerseits auch kurz- bis mittelfristige Änderungen identifizieren zu können und andererseits einen kontinuierlichen Verlauf der vermessenen Höhen im Übergangsbereich sicherzustellen. Idealerweise werden hierzu die Wattbereiche zumindest teilweise

mit zwei Messsystemen vermessen, deren Messergebnisse miteinander verglichen und gegeneinander validiert werden. Mit der Fächerlotung, durch die bei Thw zumindest die tiefergelegenen Wattbereiche erfasst werden, ist bereits ein Datensatz in diesem Bereich vorhanden. Dazu bietet es sich an, bei Tnw mit einem anderen Verfahren, z.B. einer (luftgestützten) Laservermessung, die höherliegenden Wattbereiche zu vermessen, wobei auf einen ausreichenden Überlappungsbereich geachtet wird. Während der Laufzeit des Vorhabens wird nach praktikablen und effizienten Lösungen gesucht um dies umzusetzen. Soweit möglich wird die Eignung von identifizierten Messsystemen getestet.

5. Weitere Messungen (Strömung, Trübung, Korngrößenverteilung) (AP 2.2)

Die im Rahmen des Messkonzepts definierten kampagnenbasierten Naturmessungen werden in Kooperation mit dem WSA EN durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgt im Rahmen des Vorhabens durch das IWB.

6. Auswertung der digitalen Geländemodelle und Durchführung von Analysen (AP 2.3)

Die Morphologie der vermessenen Nebelnelben wird im Detail beschrieben, u.a. werden die Tiefenvariation und Sohlstrukturen in Detail betrachtet und beschrieben. Auf dieser Grundlage werden Analysen, wie z.B. die Verteilung der Tiefen (Tiefwasser, Flachwasser, Wattbereiche), durchgeführt. Die Analyseergebnisse werden schließlich ausgewertet. Auf der Grundlage wiederholter Aufnahmen in den Folgejahren unter Anwendung derselben Messtechnik und derselben Methoden erfolgt eine Analyse der kurz- bis mittelfristigen morphologischen Entwicklung der betrachteten Nebelnelbensysteme.

7. Untersuchungen zur Quantifizierung der Unsicherheiten aus der Datenweiterverarbeitung (AP 2.3)

Aus den aufbereiteten Fächerlotdaten werden in der Regel digitale Geländemodelle erstellt. Je nachdem wie der Wert für jede einzelne Rasterzelle ermittelt wird (Mittelwert, Median, oberes Quantil unteres Quantil) entsteht ein Fehler. Es gibt keine allgemeinen Vorgaben bei der Erstellung digitaler Geländemodelle, stattdessen ist die Sichtweise auf die Daten ausschlaggebend. Beispielsweise ist es aus nautischer Sicht zielführender den Rasterwert aus einem Quantil der höherliegenden Messwerte zu ermitteln, um auf der sicheren Seite zu liegen. Bei der Analyse der Änderung der Tiefenverteilung können insbesondere dann größere Ungenauigkeiten entstehen, wenn Geländemodelle verglichen werden, deren Rasterzellenwerte auf unterschiedliche Art und Weise ermittelt wurden. Es werden Untersuchungen zum Einfluss der Methoden bzw. der vorhandenen Spielräume bei deren praktischer Umsetzung auf die Analyseergebnisse durchgeführt. Beispielsweise werden die Raster untersucht, die aus den Vermessungsdaten interpoliert werden. Potentielle Einflussfaktoren auf Ergebnisse der Analysen sind u.a. die gewählte Interpolationsmethode, die Rasterauflösung und die Lage der Zellmitten. Die Auswirkungen dieser Parameter werden unter Berücksichtigung der

zu analysierenden Strukturen (z.B. kleinräumige Strukturen wie Riffel, Prielsysteme) untersucht.

Produkte:

4. Messkonzept: Planung und Konzipierung von Messungen in Form von kampagnenbasierten Naturmessungen in Abstimmung mit dem WSA EN (Produkt P3).
5. Jährliche konsistente Bathymetrien (Sammelprodukt P4)
6. Die aktuelle Morphologie ausgewählter Nebelben wird inklusive kleinräumiger Strukturen, wie z.B. Sohlformen und kleinere Rinnensysteme) detailliert dargestellt. Die mittelfristigen (d.h. innerhalb eines Jahres) Veränderungen der Morphologie von ausgewählten Nebelben werden dargestellt, analysiert und bewertet. Insbesondere fließen hier auch die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu möglichen Unsicherheiten ein (Produkt P10).
7. Ein weiteres Produkt ist ein Kriterienkatalog, in dem Anforderungen zur Sicherstellung einer hohen Qualität bei der Auswertung und Analyse von aufbereiteten Vermessungsdaten definiert werden. Diese dienen der Erhöhung der Qualität von Analyseergebnissen bei bathymetrischen Untersuchungen in den Nebelben (Produkt P5).

2.3 Teilziel 3: Numerische Modelluntersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses von hydrodynamischen und morphologischen Prozessen und deren Veränderungen infolge wasserbaulicher Maßnahmen (AP 3 und AP4)

Einführung:

Die Strömungsverhältnisse in den Nebelbensystemen sind sehr vielfältig und weisen einige Besonderheiten auf. Innerhalb der Nebelben wirkt eine Vielzahl von Einflüssen auf die Strömung ein. Dazu gehören u.a. eine im Verlauf der Nebelbe variierende Rinnengeometrie mit deutlich geringeren Wassertiefen als in der Hauptelbe, Flachwasserbereiche, Wattflächen mit Prielen, einmündende Gewässer (z.B. Krückau und Pinnau in die Pagensander NE oder die Este in die Hahnöfer NE), Sohlstrukturen, Bewuchs im Uferbereich, Bauwerke (z.B. Leitdämme, Ufersicherungen) und Geometrieänderungen infolge Baggerungen. Ein besonderes Phänomen ist die Strömungssituation kurz nach Einsetzen des Flutstroms am stromaufseitigen Ende der Nebelben. Da die Strömung in der Hauptrinne (Elbe) schneller fließt als in der Nebenrinne (Nebelbe) entsteht ein Gradient, der durch einströmendes Wasser am stromaufseitigen Ende in die Nebelbe ausgeglichen wird.

Um die Strömungsverhältnisse in den Nebelbensystemen insgesamt besser zu verstehen und die Wirkungen einzelner Einflussfaktoren zu analysieren und zu bewerten, werden im Rahmen von AP 3 „Modellierung Pagensander Nebelbe“ numerische Modelluntersu-

chungen durchgeführt. Dies geschieht am Beispiel der Pagensander NE, für die ein detailliertes, hochaufgelöstes Modell aufgestellt wird, dass insbesondere in der Lage ist auch die z.T. kleinräumigen Strömungsprozesse abzubilden. Mit dem Modell werden zunächst die Strömungsvorgänge und Strömungsmuster im Ist-Zustand für unterschiedliche hydrologische Situationen (Spring-/Nipptiden, Sturmfluten, variierendes Oberwasser der Elbe sowie der Elbnebenflüsse) untersucht. Auf Grundlage der Modellergebnisse erfolgen in Kombination mit den verfügbaren Messdaten eine Analyse und eine Bewertung der Strömungsmuster. Dabei wird ein besonderer Fokus gelegt auf i) die Dynamik in den Rinnen der Nebelben, ii) die strömungsberuhigten Zonen in den Flachwasserbereichen, iii) die Interaktion zwischen Rinnen und Flachwasserbereichen und iv) die Interaktion zwischen der Pagensander NE und den Flüssen Krückau und Pinnau. Die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der hydrodynamischen Prozesse fließen zudem in die Analysen und Bewertungen der morphologischen Prozesse ein.

Neben der Verbesserung des Systemverständnisses für den Ist-Zustand wird das Modell im Rahmen von AP 4 „Untersuchung und Bewertung von Maßnahmen“ außerdem eingesetzt, um die Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen zu untersuchen und die Ausgestaltung der Maßnahmen gegebenenfalls zu optimieren. Es werden vor allem naturnahe Maßnahmen untersucht, die nicht nur aus strombaulicher Sicht vorteilhaft sind, sondern auch aus naturschutzfachlicher Sicht. Hier kommen insbesondere Maßnahmen in Frage wie die Schaffung von Flachwasserbereichen, die Schaffung von Wattbereichen, Uferverlegungen, Deckwerksaufbrüche und eine Verfeinerung der Rinnengeometrie.

Anforderungen:

- Das Modell der Pagensander Nebelbe muss dazu in der Lage sein, die relevanten kleinräumigen und großräumigen Strömungsmuster abzubilden. Hierzu ist folgendes zu beachten
 - Die relevanten Geometrien sind im Berechnungsnetz aufzulösen
 - Die Modelldimension ist entsprechend zu wählen (zweidimensional, sofern erforderlich dreidimensional)
- Die Güte des Modells ist anhand vorhandener Messdaten (Wasserstand, Fließgeschwindigkeit, Abfluss) nachzuweisen
- Wasserbauliche Maßnahmen sind in angemessener Auflösung zu integrieren

Umsetzung:

Die konkreten Arbeitsschritte lauten wie folgt:

1. Aufsetzen eines hochaufgelösten hydrodynamisch-numerischen Modells vom System Pagensander Nebelbe zur detaillierten Abbildung der Strömungsverhältnisse (AP 3.1)

Auf Grundlage der Bestandsdaten sowie der erhobenen Bathymetriedaten wird ein detailliertes Berechnungsgitter generiert. Kleinräumige Strukturen (Bauwerke, Transportkörper) werden über Bruchkanten und Polygone (z.B. Rauigkeitspolygone) integriert. Die Unterläufe von Pinnau und Krückau werden ebenfalls abgebildet. Das Detailmodell des Systems Pagensander Nebeneibe ist gekoppelt an ein übergeordnetes Elbmodell, welches am nordseeseitigen Rand über Wasserstände und am oberstromigen Rand über Abflüsse angetrieben wird.

2. Kalibrierung und Validierung des Modells anhand von Messdaten (AP 3.1)

Die Kalibrierung und die Validierung des Modells erfolgt anhand von gemessenen Wasserständen, Fließgeschwindigkeiten und Abflüssen. Es stehen folgende Daten zur Verfügung: i) punktuelle Strömungsdaten des WSA EN am stromabseitigen Ende der Pagensander NE seit 2006 und ii) punktuelle Wasserstände an mehreren Pegeln im Bereich der Pagensander NE (Krückau-Sperrwerk, Pinnau-Sperrwerk, Kollmar, Grauerort, Stadersand). Direkt im Bereich der Pagensander NE stehen keine Messwerte zur Verfügung. Daher ist für das Jahr 2021 die Durchführung von ADCP-Strömungs- und Durchflussmessungen im Bereich Steinloch (stromaufseitiges Ende der Pagensander NE) geplant. In diesem Bereich tritt das eingangs beschriebene Phänomen der Strömungsumkehr kurz nach Einsetzen des Flutstrom auf. Die erhobenen Daten werden auch zur Validierung des Modells verwendet.

3. Analyse und Bewertung der Strömungsverhältnisse für den Ist-Zustand (AP 3.2)

Mit Hilfe des kalibrierten und validierten Strömungsmodells werden Simulationen von unterschiedlichen hydrologischen Situationen, wie Spring-/ Nipptiden, Sturmfluten, variierendes Oberwasser der Elbe sowie der Elbnebenflüsse, simuliert. Auf Grundlage der Ergebnisse werden die lokalen Strömungsverhältnisse für den Ist-Zustand der Pagensander NE analysiert und bewertet. Ein besonderer Fokus wird auf den lokalen Strömungsverhältnissen liegen, wie i) die Dynamik in den Rinnen, ii) die strömungsberuhigten Zonen in den Flachwasserbereichen, iii) die Interaktion zwischen Rinnen und Flachwasserbereichen und iv) die Interaktion zwischen der Pagensander NE und den Flüssen Krückau und Pinnau. Außerdem werden Wasserstände für unterschiedliche charakteristische Tidewasserstände (Thw, Tnw) mit der Bathymetrie verschnitten und auf diese Weise Watt- und Flachwasserbereiche identifiziert.

4. Untersuchung der Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen auf die Strömungsverhältnisse (AP 3.3)

Es wurde bereits im Rahmen des Forum Tideelbe darüber beraten, mit welchen Maßnahmen die Pagensander Nebeneibe reaktiviert werden könnte. Im Ergebnis wurde eine Variante, die eine Stärkung der Rinne der Pagensander NE vorsieht, von der Bundesanstalt für Wasserbau untersucht. Die Auswirkungen wurden bestimmt und dargestellt. Im Rahmen dieses Vorhabens ist u.a. vorgesehen diese Maßnahme sowie abge-

wandelte Varianten weiter im Detail zu untersuchen mit dem Schwerpunkt der Auswertung auf die lokalen Strömungsverhältnisse. Darüber hinaus werden auch weitere Maßnahmen untersucht, die die Schaffung von zusätzlichen Flachwasser- und/oder Wattbereichen, Uferverlegungen, Deckwerksaufbrüchen oder Verfeinerungen der Rinnen-geometrie vorsehen. Die Auswirkungen werden über den Vergleich mit den Ergebnissen für den Ist-Zustand ermittelt und anschließend bewertet.

5. Optimierung von Maßnahmen im Hinblick auf die bestmögliche Erzeugung von Synergien zwischen Strombau und Naturschutz (AP 4)

Auf Grundlage der Ergebnisse des vorangegangenen Arbeitsschrittes werden Maßnahmen identifiziert, die vertieft untersucht werden. Für diese Maßnahmen werden mit dem numerischen Modell Variationsrechnungen durchgeführt. Dabei wird die konkrete Ausgestaltung der Maßnahmen (z.B. die Geometrie) variiert. Ziel ist es, durch die Gestaltung der Maßnahme eine günstige Wirkung sowohl aus strombaulicher als auch aus naturschutzfachlicher Sicht zu erzielen.

Produkte:

1. Detaillierte Beschreibung und Bewertung der Strömungsverhältnisse (kleinräumige Strömungsmuster) im System Pagensander Nebelbe für unterschiedliche Strömungssituationen (Spring-/Nipptiden, Sturmfluten, variierendes Oberwasser der Elbe und der Elbnebenflüsse) (Produkt P6).
2. Detaillierte Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen von wasserbaulichen Maßnahmen auf die Strömungsverhältnisse im System Pagensander Nebelbe. Optimierte Ausgestaltung von ausgewählten wasserbaulichen Maßnahmen im Hinblick auf die Erzeugung von Synergien zwischen Strombau und Naturschutz. (Produkt P7)
3. Abschlussbericht (Produkt P8)

3 Untersuchungsgebiet Nebenelben

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

Die Nebenelben 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 Binnenelbe, die Pagensander NE, die Schwarztonnensander NE sowie die Glückstädter NE. Im Fall der Wischhafener Nebenelbe bzw. des Wischhafener Fahrwassers handelt es sich gegenwärtig nicht um eine Nebenelbe 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.

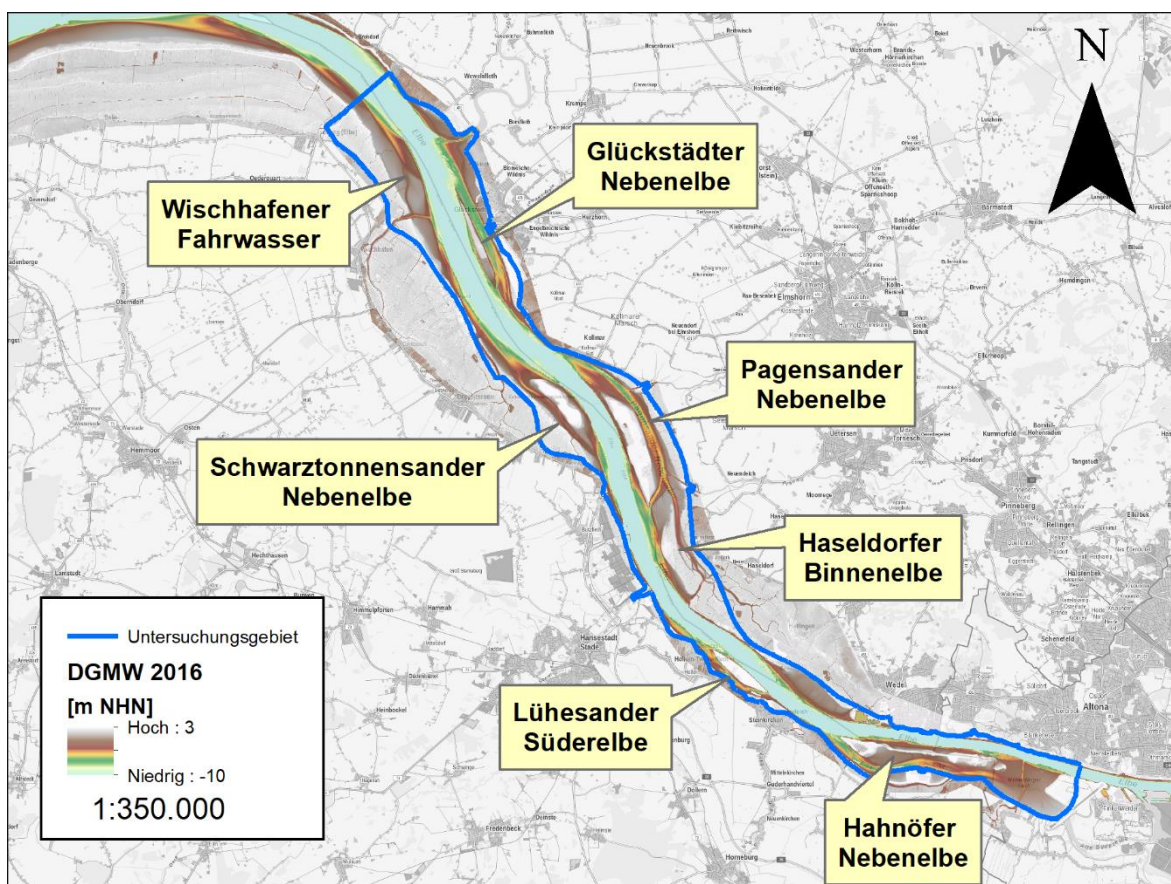


Abbildung 1: Karte zum Untersuchungsgebiet zwischen Elbe-Km 632 und 683 (Blau; entspricht in etwa MThw-Linie bzw. der Deichlinie) mit Benennung (gelbe Textfelder) der berücksichtigten Nebenelben und Seitenbereichen (Quelle DGMW: WSA EN).

Alle Nebelnelben weisen neben der namensgebenden Eigenschaft, dass deren Nebenrinne durch eine Insel vom Hauptstrom getrennt ist, weitere Gemeinsamkeiten auf. Der Fließquerschnitt der Nebenrinne ist 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 3.4 und 3.5).

Neben den Gemeinsamkeiten gibt es Unterschiede zwischen den Nebelnelben, z.B. in der Morphologie (Länge, Breite, Tiefenverteilung, Sohlstruktur) und der Sedimentologie (Zusammensetzung Sohlmaterial). Im Rahmen des Vorhabens werden alle NE betrachtet, wobei sich im Vorhaben durchgeführten Untersuchungen auf ausgewählte NE konzentrieren (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Übersicht zur Untersuchung ausgewählter Nebelnelben (NE) im Vorhaben

AP	Arbeiten	Betrachtete Nebelnelben
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

3.1 Hintergrund zur Entstehung der Nebelnelben

Die heutige Gestalt der Tideelbe mit einer Hauptrinne und abschnittsweise abzweigenden Nebenrinnen ist in vor allem aufgrund strombaulicher Maßnahmen in der Tideelbe, aber auch aufgrund von 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 Nebelnelben, beziehungsweise auf den Stromabschnitten, in denen die Nebelnelben entstanden sind, liegt.

3.1.1 Entwicklung des Hochwasserschutzes

Erste Deichbauten im Gebiet der Tideelbe gehen auf das 11. Jahrhundert zurück (Kappenberg und Fanger 2007). 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 Nebelnelben bzw. die Stromabschnitte, in denen die Nebelnelben 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 Nebelnelbe (s. Kapitel 3.5). 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 Nebelnelben beeinflusst, indem durch die Maßnahmen vor allem Auenfläche bzw. Tidevolumen verloren ging. 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 (Abbildung 2). Auch der Sedimenteintrag in die Aue nahm durch den Deichbau 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 Nebelnelbensystemen durch Maßnahmen des Hochwasserschutzes sind die Hahnöfer Nebelnelbe, die durch den Bau des Estesperperrwerks und die Abdämmung der Alten Süderelbe beeinflusst wurde, sowie das System Pagensander Nebelnelbe / Haseldorfer Binnenelbe, das durch den Bau der Mündungssperrwerke an der Pinnau und der Krückau, die Abdämmung von Teilen der Haseldorfer Binnenelbe und die Entnahme von Material für den Deichbau deutlich verändert wurde (Details siehe Kapitel 3.2, 3.4 und 3.5).

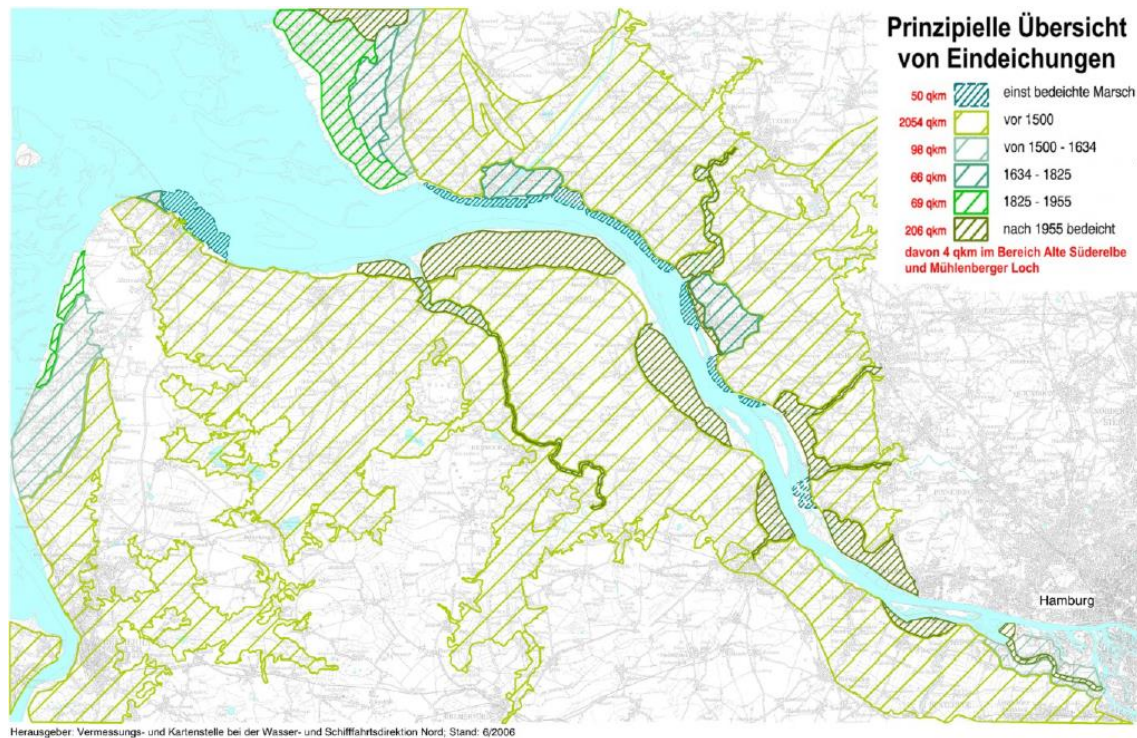


Abbildung 2: Verlust von Überschwemmungsflächen durch den Deichbau seit dem Jahr 1500 n. Chr. (Quelle: Boehlich und Strotmann (2019))

3.1.2 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 Nebelben in der heutigen Form nicht geben würden.

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.

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. zu diesem Absatz Schätzler und Meisel 1937).

Basierend auf der Erkenntnis, dass zur dauerhaften Verbesserung der Schiffbarkeit 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 (Fahrinnen-)Breite von 400m herzustellen. Die Staatsverträge mit Preußen waren erforderlich, da beide Elbufer seit dem Jahr 1866 unter preußischer Zuständigkeit waren wurden (vgl. zu diesem Absatz 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 Buhnen 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 Hanksalbsand und Neßsand entstanden war und fortan die Hahnöfer Nebenelbe von der Hauptrinne trennte. In diesem Abschnitt wurde die Strömung im Hauptstrom spürbar gestärkt (vgl. zu diesem Abschnitt Keil 1985).

Als die territoriale Zuständigkeit für die Elbe im Jahr 1921 auf Grund der Weimarer Verfassung in die Verwaltung der Reiches übergang, war das 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 Osterbank (Abschnitt Brunsbüttel - Ostermündung) (ebd.).

Die Arbeiten zur Stromregulierung in diesen beiden Abschnitten wurden zwischen 1922 und 1938 durch die Reichwasserstraßenverwaltung durchgeführt (Keil 1985).



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

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 Nebenelben offen zu halten, obwohl man sich durch deren Abdämmung eine Verbesserung der Strömungsverhältnisse im Hauptfahrwasser erwartete (vgl. zu diesem Abschnitt 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 Nebenelben 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 3.6).

Diese Ausgleichsmaßnahme verdeutlicht 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).

3.2 Hahnöfer Nebenelbe

3.2.1 Lage

Die Hahnöfer Nebenelbe erstreckt sich linksseitig der Hauptrinne zwischen Elbe-km 633 und Elbe-km 644 (Abbildung 4) und ist damit die am weitesten stromauf gelegene Nebenelbe. 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.

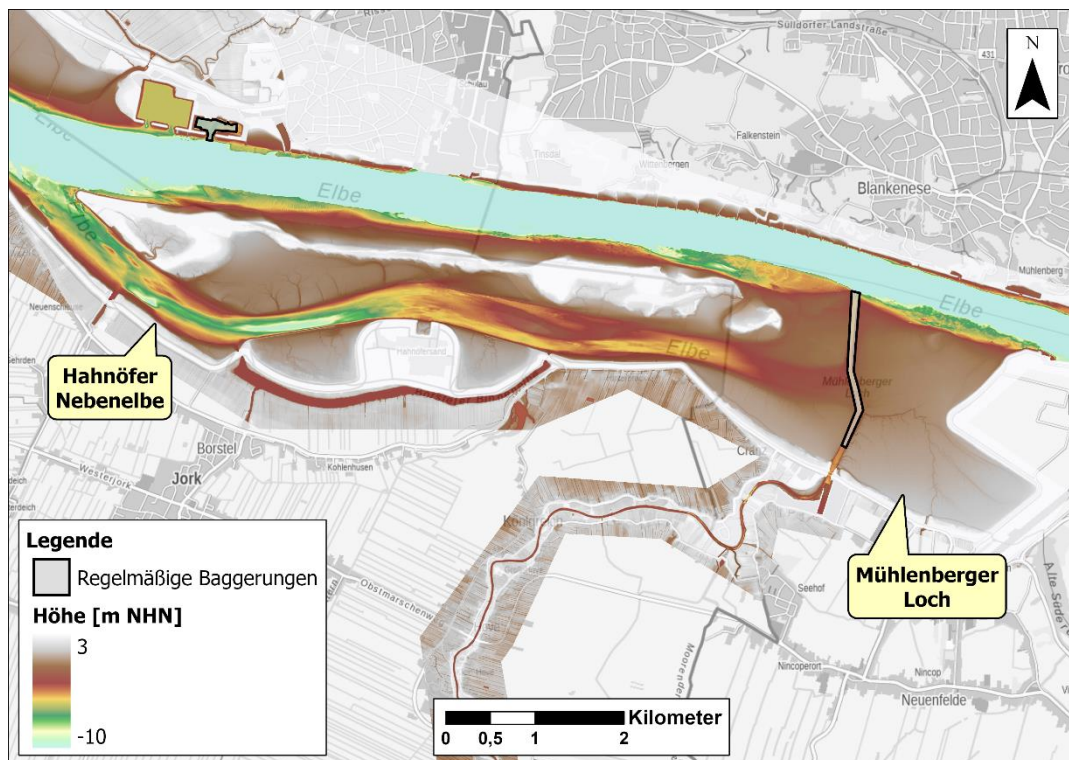


Abbildung 4: Bathymetrie der Hahnöfer Nebenelbe und des Mühlenberger Lochs und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)

3.2.2 Entstehung

Die Inselkette, die heute die Hahnöfer Nebenelbe 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 Nebenelbe ist zu finden in Marnitz 1995; Boehlich 2003; Boehlich und Strotmann 2008; Boehlich und Strotmann 2019.

Boehlich und Strotmann schreiben hierzu:

„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 Fahrrinnenausbauten 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 Nebenelbe.“ (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).

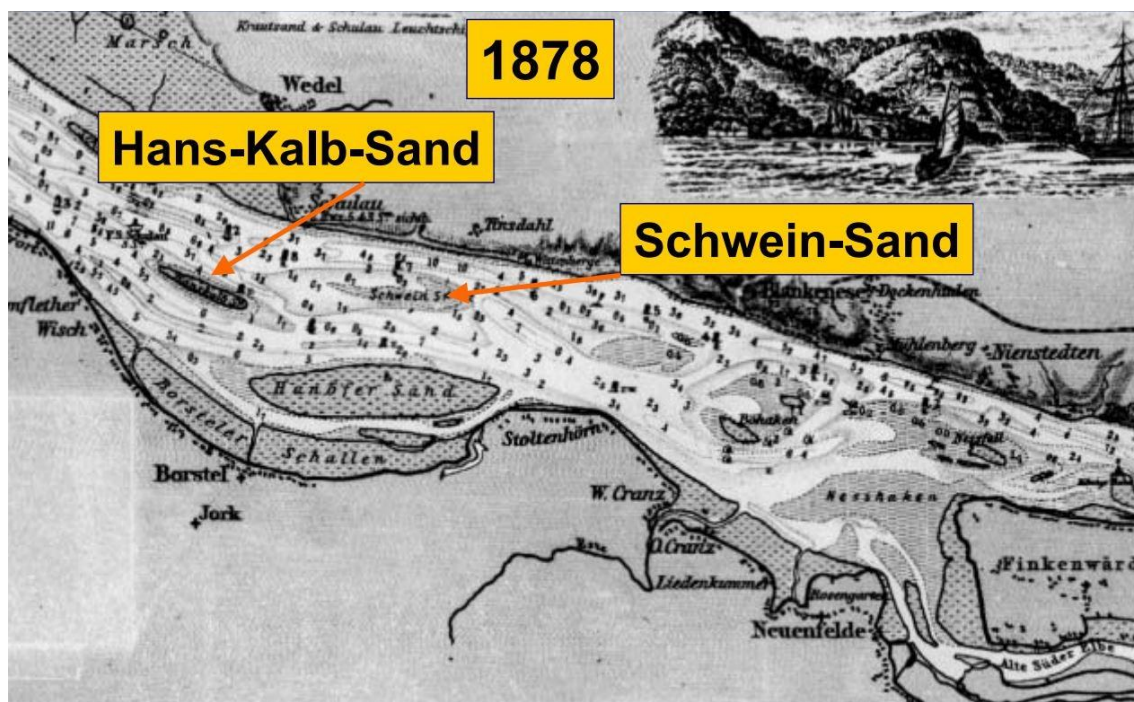


Abbildung 5: Abschnitt der Tideelbe im Bereich der heutigen Hahnöfer Nebenelbe wie 1878 (Quelle: Boehlich 2003)

Das Mühlenberger Loch am östlichen Ende der Hahnöfer Nebenelbe wurde in den Jahren 1940/41 als Landebahn für Wasserflugzeuge angelegt. Es handelt sich um ein Süßwassergebiet, 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. zu diesem Absatz Marnitz 1995). Ab 2001 fand eine Teilverfüllung des Mühlenberger Lochs statt, um eine Flugzeug-Landebahn auszubauen (IBP Arbeitsgruppe 2011a) .

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. zu diesem Absatz (BfG 2002a; WSA HH und HPA 2005; WSV 2008)).

Das angestrebte Kompensationsziel wurde jedoch nicht erreicht und die Rinne wurde auch nicht mehr unterhalten (IBP Arbeitsgruppe 2011a). 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 3.

Tabelle 3: Ausgewählte Baumaßnahmen im Bereich der Hahnöfer Nebelbe (aus (Marnitz 1995) modifiziert und erweitert um Informationen aus (BfG 2002a; WSA HH und HPA 2005))

Jahr	Maßnahme
1939	Großflächige Baggerung im Bereich des heutigen Mühlenberger Lochs
1959	Bau des (Inneren) Estesperrewerks (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) Estesperrewerks (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 Neßsandes
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 Schlick in das Mühlenberger Loch

1980	Ufer der Hahnöfer Nebelnelbe ca. 20 m breit vorgespült
2000 - 03	Bau einer 125 m breiten und 2,5 m tiefen Rinne im Übergangsbereich zwischen Hahnöfer Nebelnelbe und Mühlenberger Loch.
2001 - 03	Verfüllung von ca. 170 ha (1/5 der Gesamtfläche) im Nordosten des Mühlenberger Lochs

3.2.3 Morphometrie

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

Die Breite im sublitoralen Bereich beträgt etwa 100 – 500 m. Die Hahnöfer Nebelnelbe 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. zu diesem Absatz BfG 2002b).

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

3.2.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Vor allem aufgrund der unterschiedlichen Geometrien von Hauptrinne und Nebelnelbe 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 Nebelnelbe 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 Nebelnelbe 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 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 Nebelnelbe zu den besser durchströmten Nebelnelben. Der Vergleich der oberflächennahen Schwebstoffkonzentration (aus Hubschrauberlängsprofilen der ARGE ELBE) zwischen Hahnöfer Ne-

belbe 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 (vgl. zu diesem Absatz BfG 2008).

Kerner hat in seiner verfügbare Datensätze zu Strömungsgeschwindigkeiten ausgewertet (Kerner 2007). Dabei handelte es sich um punktuelle Kurzzeitmessungen (2-3 Tage) im Bereich der Hauptrinne und im Bereich der Hahnöfer Nebelbe und Lühesander Südelbe für Zeiträume von und nach der Fahrrinnenanpassung 1999/2000. Im Ergebnis kommt der Autor für die Hahnöfer Nebelbe 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 jedoch wenig fundiert (s.a. Erläuterungen in Kapitel 3.3.4).

3.2.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Hahnöfer Nebelbe (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.

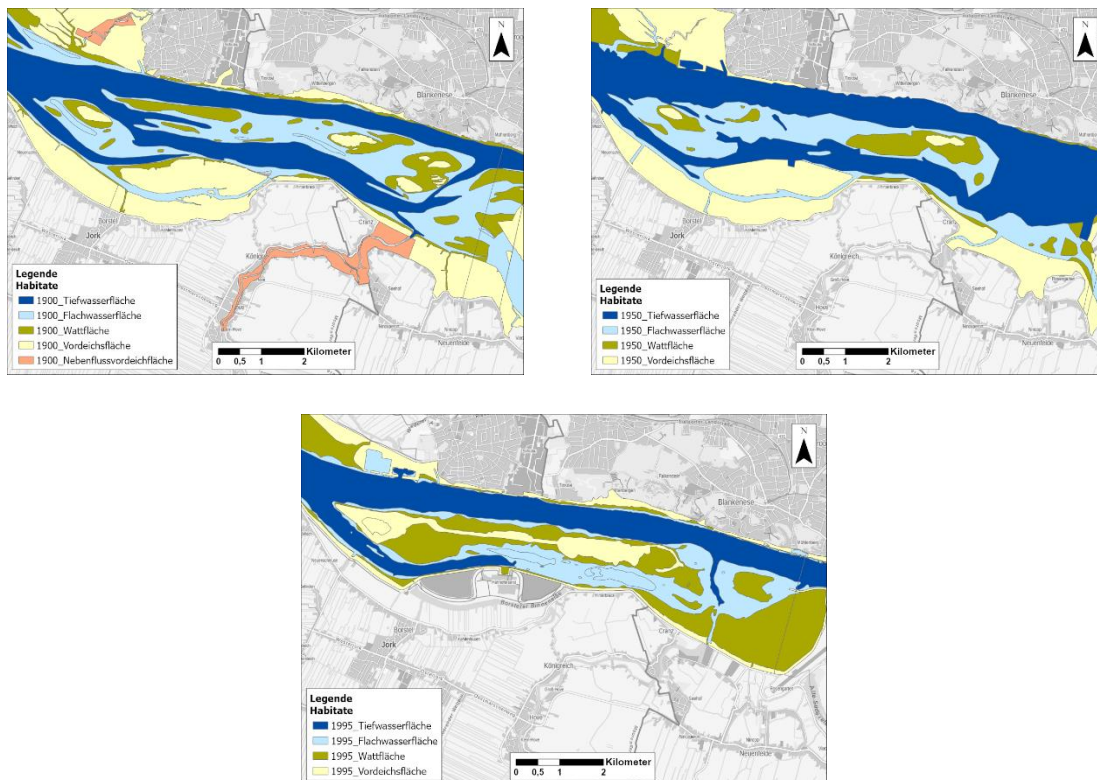


Abbildung 6: Morphologische Einheiten im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe und des Mühlenberger Lochs im 20. Jahrhundert (Quelle: WSA EN 2019)

Bei der Betrachtung der 3 Zeitscheiben 1900, 1950 und 1995 fällt auf, dass insbesondere zwischen 1950 und 1995 deutliche Änderungen stattgefunden haben. In diesem Zeitraum hat die Tiefwasserfläche in der Hahnöfer Nebenelbe 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 Vordeichfläche 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.

Fräßdorf hat für verschiedene Zeitpunkte eine volumetrische Auswertung für den Bereich der Hahnöfer Nebenelbe durchgeführt (Fräßdorf 1995). Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. 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 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 identifizierte fortwährende Verlandungstendenz zwischen 1956 und 1992 die Erkenntnisse aus dem qualitativen Vergleich der morphologischen Einheiten.

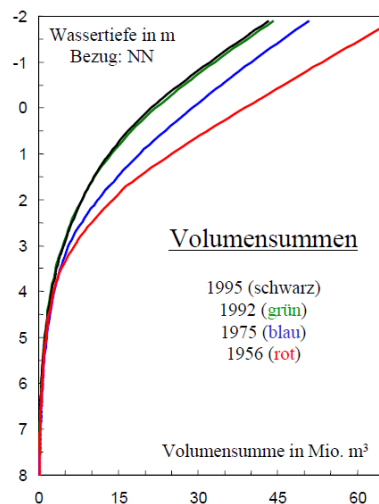


Abbildung 7: Volumenverteilung in der Hahnöfer Nebelbe und des Mühlenberger Lochs für die Jahre 1956, 1975, 1992 und 1995 (Quelle: Fräßdorf 1995)

Zwischen 1995 und 2004 wurden in der Hahnöfer Nebelbe 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 Nebelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten (vgl. zu diesem Absatz BfG 2006).

Zusätzlich zu den Längspeilungen wurden für die Hahnöfer Nebelbe auch jährliche Differenzmodelle auf Basis der Jahreshauptpeilungen erstellt. Aus diesen ging ebenfalls hervor, dass eine ausbaubedingte Verlandung der Hahnöfer Nebelbe 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 Nebelbe 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. zu diesem Absatz BfG 2006).

Für die Jahre 2006, 2010 und 2016 existieren flächendeckende DGMWs für die Elbe, die auf Grundlage von Vermessungsdaten generiert wurden (s. Kapitel 5.1.2). Abbildung 8 (oben) zeigt, analog zu Abbildung 6, die morphologischen Einheiten für die Jahre 2010 und

2016, die auf Grundlage der DGMWs ermittelt wurden. Die Einteilung erfolgte auf Grundlage der von der IBP Arbeitsgruppe definierten Klassen (IBP Arbeitsgruppe 2011a), 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 DGMWs 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 DGMW im Bereich der Hahnöfer Nebelbe 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 Nebelbe 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 Nebelbe überwiegen jedoch die Flächen mit Verlandungstrend.

Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Hahnöfer Nebelbe (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.

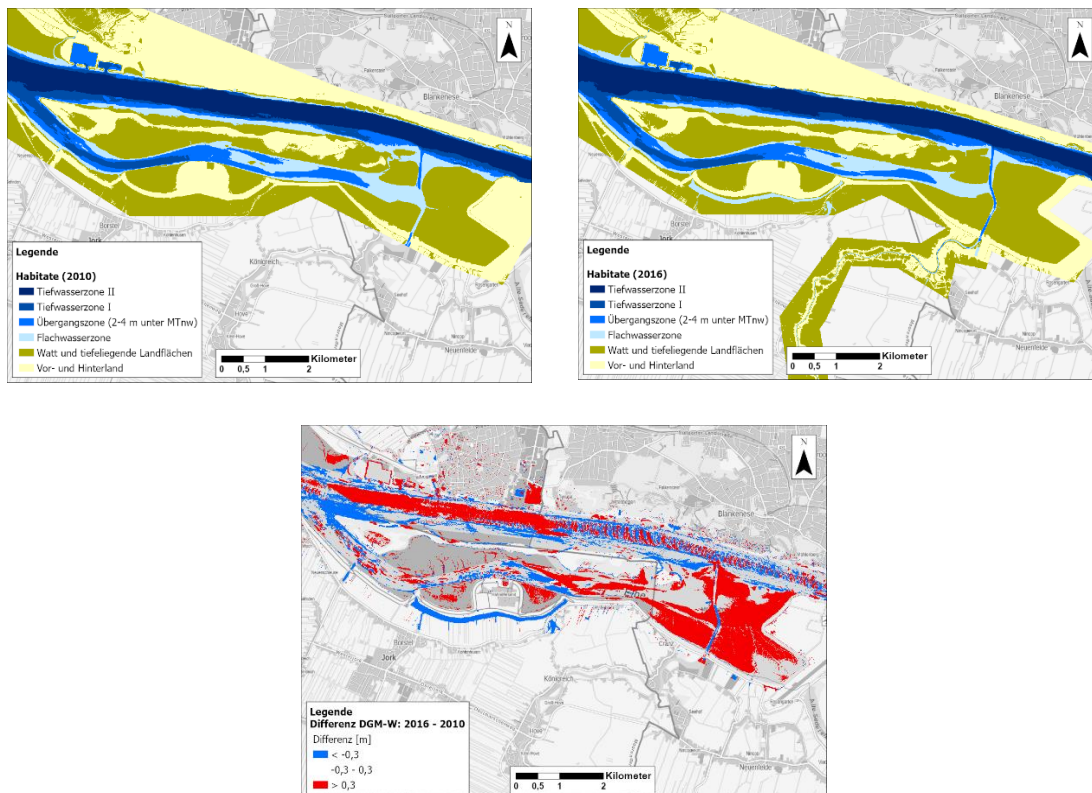


Abbildung 8: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe und des Mühlenberger Lochs (Quelle: WSA EN 2019)

3.2.6 Unterhaltung

Aktuell finden in der Hahnöfer Nebelnelbe und dem Mühlenberger Loch keine Unterhaltungsarbeiten statt mit Ausnahme des Este-Fahrwassers, wo regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Abbildung 4).

3.2.7 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 Prieldurchbruch am westlichen Ende der Inselkette zu einem Binnensee wurde seitens des WSA EN 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 Inselfspitze, erprobt.

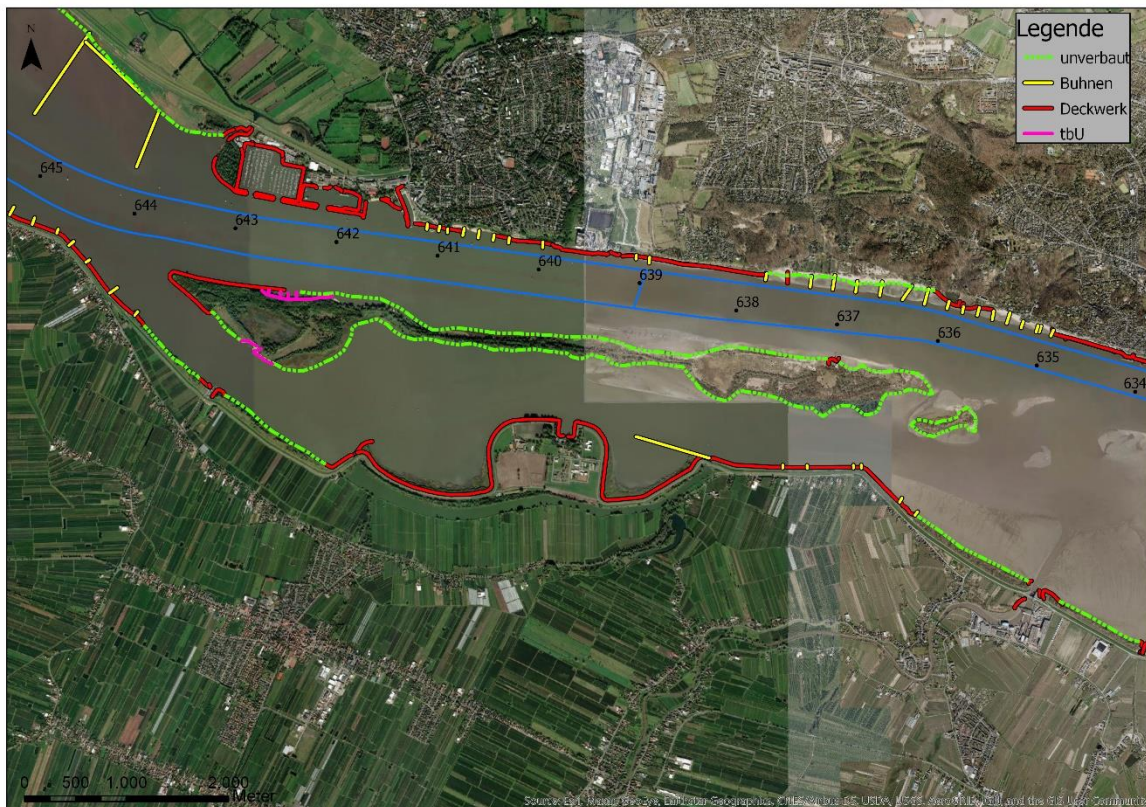


Abbildung 9: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021)

3.2.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Hahnöfer Nebelnelbe wird trotz der zahlreichen Eingriffe als naturnah beschrieben. Sie ist wie die Lühesander Nebelnelbe dem Funktionsraum 3 zugeordnet. IBP und Entelmann 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 Untersuchungsbedarfs „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 3 (B3 4.2.3): „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).

3.3 Lühesander Süderelbe

3.3.1 Lage

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

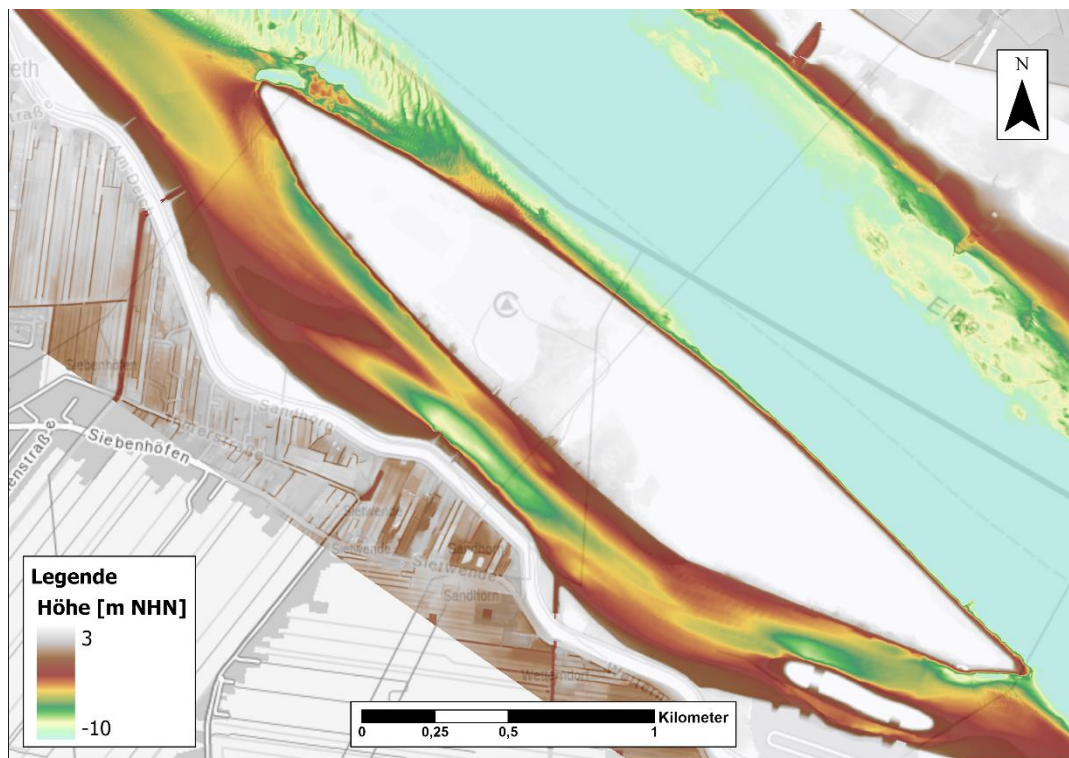


Abbildung 10: Bathymetrie in der Lühesander Süderelbe, derzeit keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)

3.3.2 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 auf 1914-1920 datiert (Kappenberg und Fanger 2007). 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 2011a), die zwischen 1970 und 1974 befestigt und aufgespült wurde (Kappenberg und Fanger 2007).

3.3.3 Morphometrie

Mit einer Länge von etwa 4 km gehört die Lühesander Süderelbe zu den kürzeren Nebenelben. 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 steilen 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 Nebenelben, wie z.B. die Pagensander Nebenelbe (BfG 2008).

3.3.4 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 Nebenelben 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 der BfG auch für die im Rahmen der Beweissicherung zur Fahrrinnenanpassung 1999/2000 in den Nebenelben erhobenen Daten zur Strömungsgeschwindigkeit, die ebenfalls nur den zeitlichen Umfang eines Spring-/Nipp-Zyklus haben (BfG 2008). Diese Daten wurden beispielhaft für die Pagensander Nebenelbe 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 verfügbare Datensätze zu Strömungsgeschwindigkeiten ausgewertet (Kerner 2007). Dabei handelte es sich um punktuelle Kurzzeitmessungen (2-3 Tage) im Bereich der Hauptrinne und im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe und Lühesander Süderelbe für Zeiträume von 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.

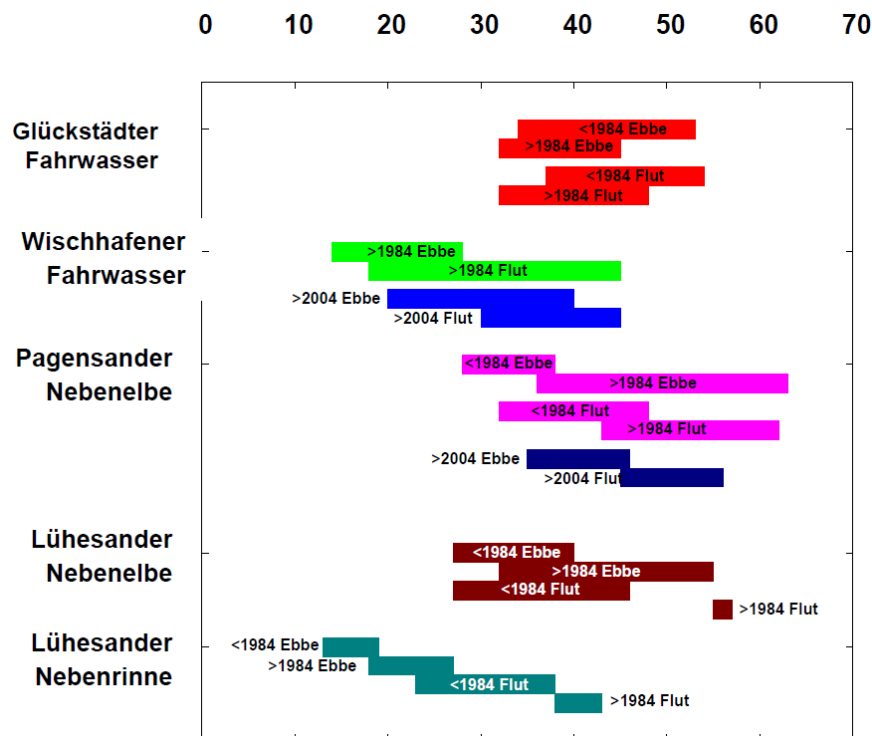


Abbildung 11: Strömungsgeschwindigkeiten in ausgewählten Nebenelben vor und nach anthropogenen Eingriffen in der Elbfahrinne, (Quelle der Daten vor und nach 1984: Bund-Länder-Arbeitsgruppe Beweissicherung 1995), Quelle der Daten vor und nach 2004: WSA HH und HPA 2005)

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 der BfG (die vermutlich auf Teilen der genannten Datenreihe basiert) ergab ein Verhältnis von maximal 0,1 bei Ebbe und bei Flut (BfG 2008).

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

3.3.5 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 3.2.5 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.

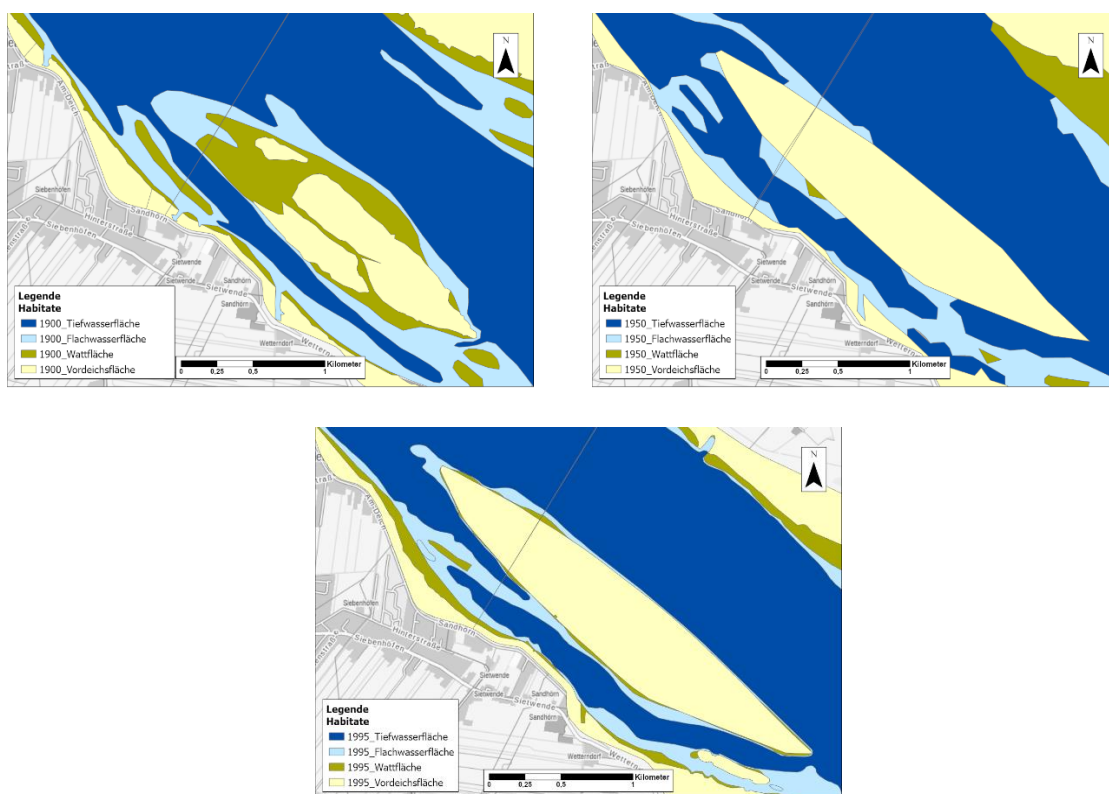


Abbildung 12 Morphologische Einheiten im Bereich der Lühesander Süderelbe im 20. Jahrhundert
(Quelle: WSA EN 2019)

Die volumetrische Auswertung von Fräßdorf (Abbildung 13) zeigt für den Zeitraum 1950-1991 eine weitgehend stabile Morphologie, was den Eindruck aus dem qualitativen Ver-

gleich der morphologischen Einheiten bestätigt. Die in Kapitel 3.2.5 beschriebenen Einschränkungen bei der Bewertung und Interpretation der volumetrischen Auswertungen von Fräßdorf gelten auch hier.

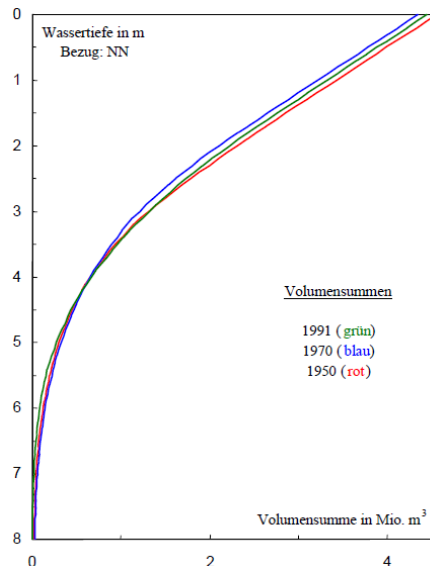


Abbildung 13: Volumenverteilung in der Lühesander Süderelbe für die Jahre 1950, 1970 und 1991
(Quelle: Fräßdorf 1995)

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 Nebelbe war anhand der Längsprofilen nicht zu beobachten (vgl. zu diesem Absatz (BfG 2006, 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 3.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der quantitativen Aussagekraft der volumetrischen Auswertungen von Fräßdorf 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.

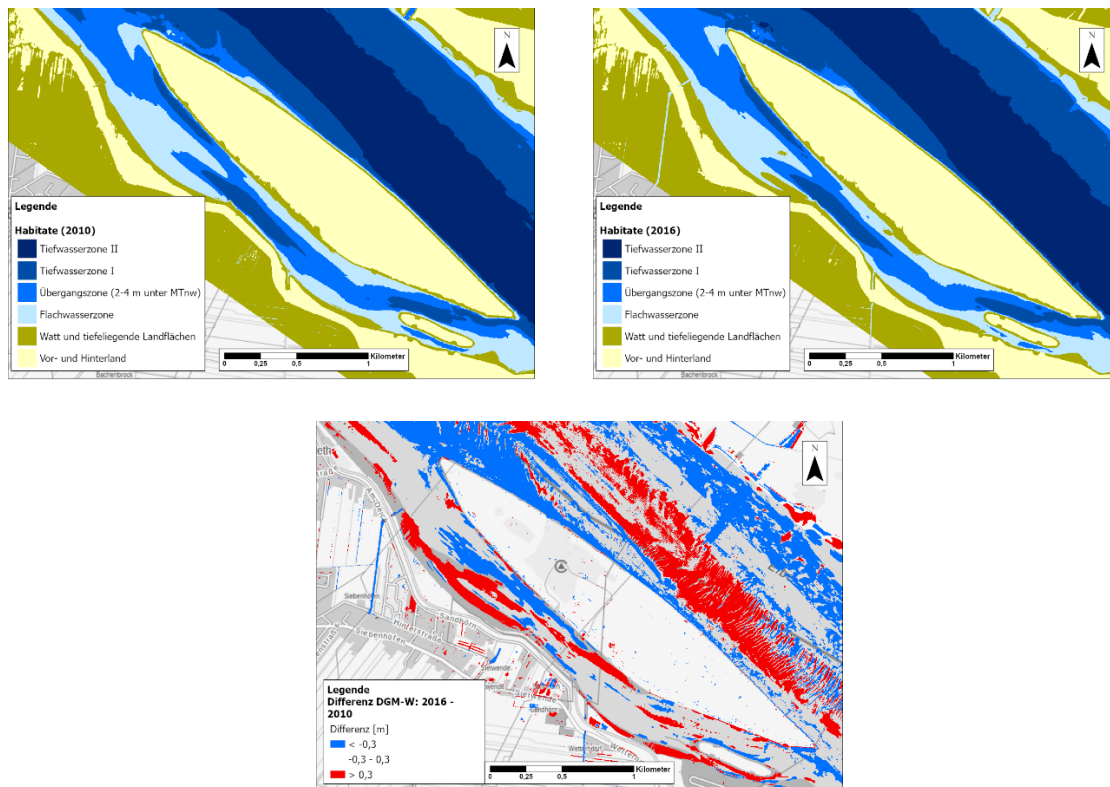


Abbildung 14: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Lühesander Süderelbe (Quelle: WSA EN 2019)

3.3.6 Unterhaltung

Regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen finden in der Lühesander Süderelbe aktuell nicht statt.

3.3.7 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)

3.3.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Lühesander Nebenelbe ist wie die Hahnöfer Nebenelbe dem Funktionsraum 3 zugeordnet. IBP und Entelmann schreiben hierzu:

„Lühesand und die Lühesander Nebenelbe tragen zur Strukturvielfalt der Unterelbe bei. [...] Insgesamt wird jedoch nicht die Ausdehnung und der naturnahen Charakter des Abschnittes Neßsand / Hanskalsand / 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): „Beobachtung der Entwicklung des hydrologischen und morphologischen Verhaltens der Stromelbe, der Nebenelben und der Seitenbuchten“ sowie „Beobachtung der Entwicklung der Sauerstoffgehalte und Nährstoffgehalte [...]“ beigemessen (ebd.).

3.4 Haseldorfer Binnenelbe

3.4.1 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 Nebanelbe an, wodurch die Haseldorfer Binnenelbe mit dem stromaufgelegenen Dwarsloch nur eine Öffnung zum Hauptstrom (bei km 653) aufweist. Das Dwarsloch zweigt in etwa senkrecht zur Hauptströmungsrichtung der Elbe ab und verläuft zwischen dem Twielenflether Sand (stromauf) und der Elbinsel Drommel (stromab).

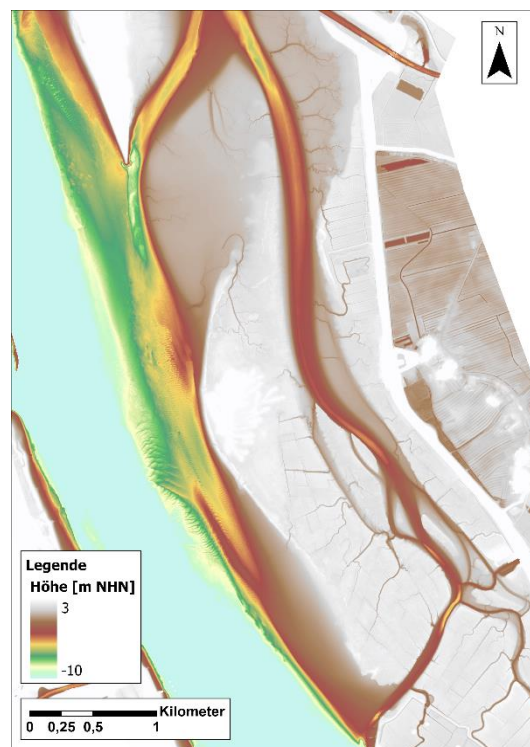


Abbildung 16: Bathymetrie der Haseldorfer Binnenelbe, keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)

3.4.2 Entstehung

Die historische Entwicklung der Haseldorfer Binnenelbe wurde von Netz und Hartmann beschrieben (Netz und Hartmann 2010). 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 als Quelle genannt werden.

Es wird vermutet, dass die heutige Haseldorfer Binnenelbe bis in das Mittelalter hinein die Hauptrinne 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 Hauptrinne 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, Buhnenberg 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 Buhnen 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, Buhnenberg und Bishorster Sand aufgespült. Mit dieser Sandaufspülung wurde die Form der Insel Auberg-Drommel bestimmt, die bis heute erhalten ist (vgl. zu diesem Absatz (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.

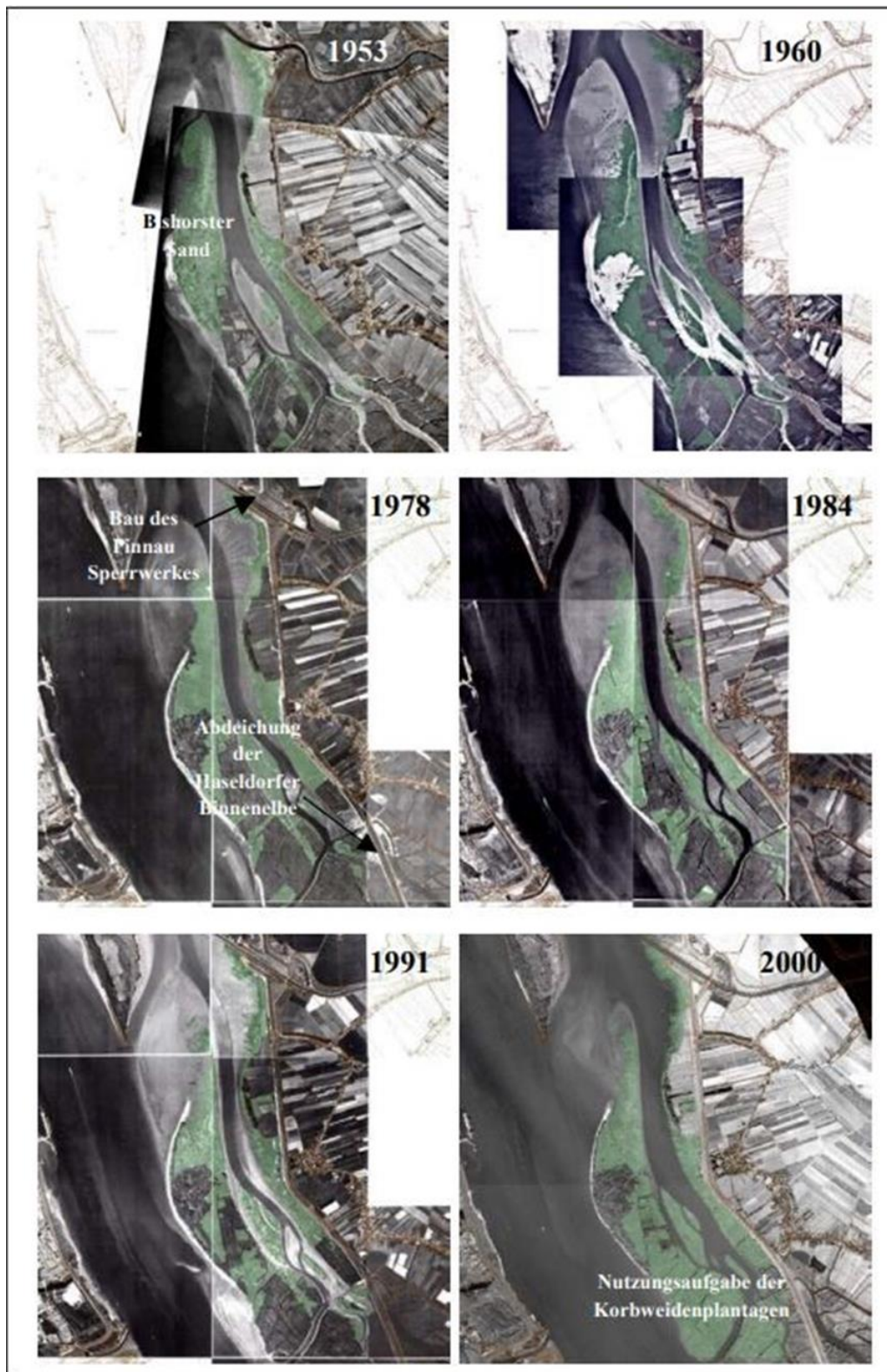


Abbildung 17: Orthofotos zur Beschreibung der Entwicklung der Haseldorfer Binnenelbe zwischen 1958-2000 (Quelle: BfG 2004)

3.4.3 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.

3.4.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Der resultierende Stromauftransport aller Fraktionen im Bereich der Pagensander Nebelbe 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.

3.4.5 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 3.2.5 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 Nebelbe ausgehen, ist es im Jahr 1950 nur noch eine tiefere Rinne. 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 Insel (Bishorster Sand), entlang des Festlandufers und im Süden der Insel (strom- und landseitig).

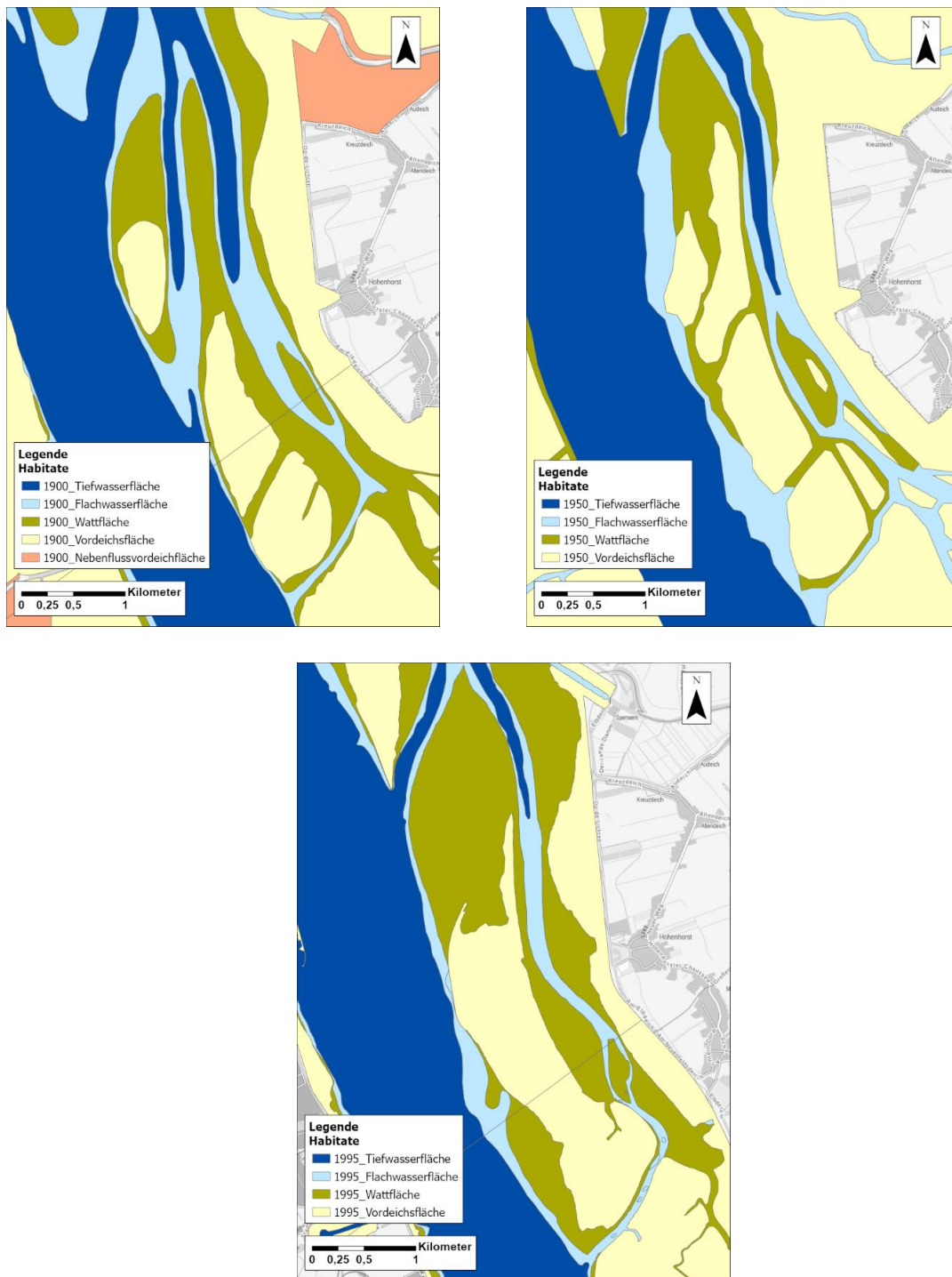


Abbildung 18: Morphologische Einheiten im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN 2019)

Die volumetrische Auswertung von Fräßdorf (Abbildung 19) deutet qualitativ 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 3.2.5 beschriebenen Einschränkungen.

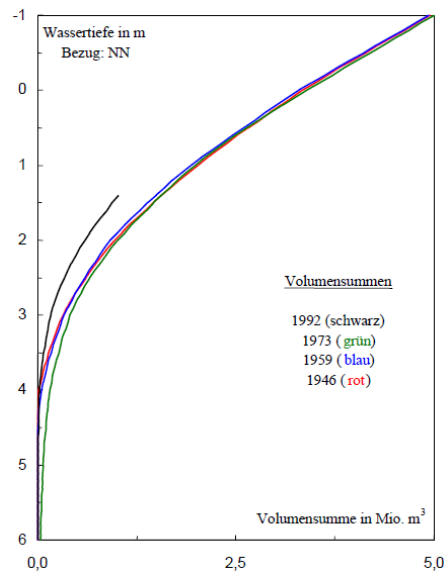


Abbildung 19: Volumenverteilung in der Haseldorfer Binnenelbe für die Jahre 1946, 1959, 1973 und 1992, (Quelle: Fräßdorf 1995)

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 Nebenelbe und endend im Bereich Dwarsloch. 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 3.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der quantitativen Aussagekraft der volumetrischen Auswertungen von Fräßdorf 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.

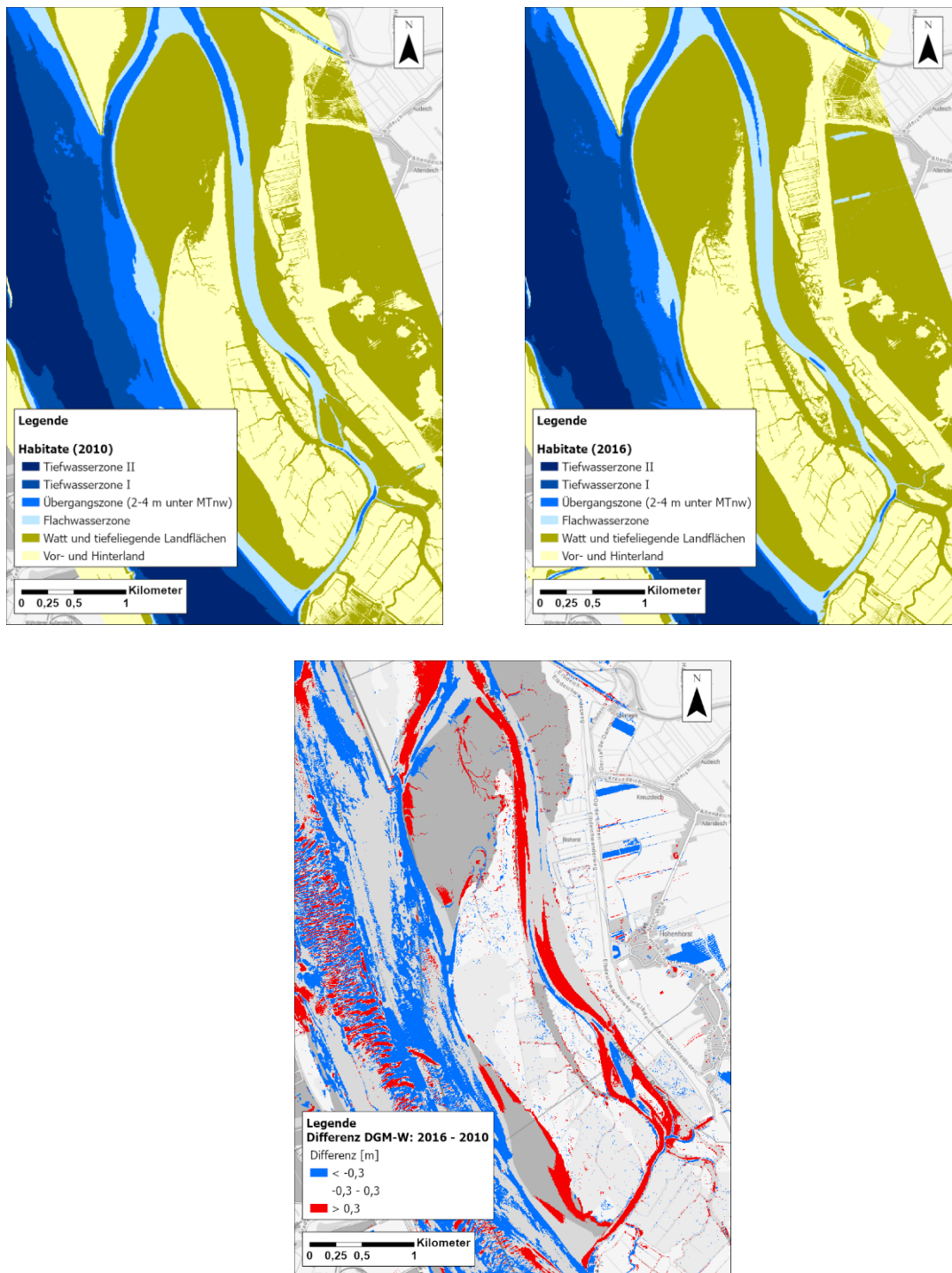


Abbildung 20: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Haseldorfer Binneneibe, (Quelle: WSA EN 2019)

3.4.6 Unterhaltung

Regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen finden in der Haseldorfer Binnenelbe aktuell nicht statt.

3.4.7 Ufersicherung

Die Ufer der Inseln sind wie auch fast das gesamte nördliche Festlandufer unverbaut (Abbildung 21).



Abbildung 21: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021)

3.4.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Haseldorfer Binnenelbe liegt wie die Pagensander Nebenelbe, die Schwarztonnensander Nebenelbe und die Glückstädter Nebenelbe im Funktionsraum 4. IBP und Entelmann 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 Untersuchungsbedarfs „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3): „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).

3.5 Pagensander Nebenelbe

3.5.1 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).

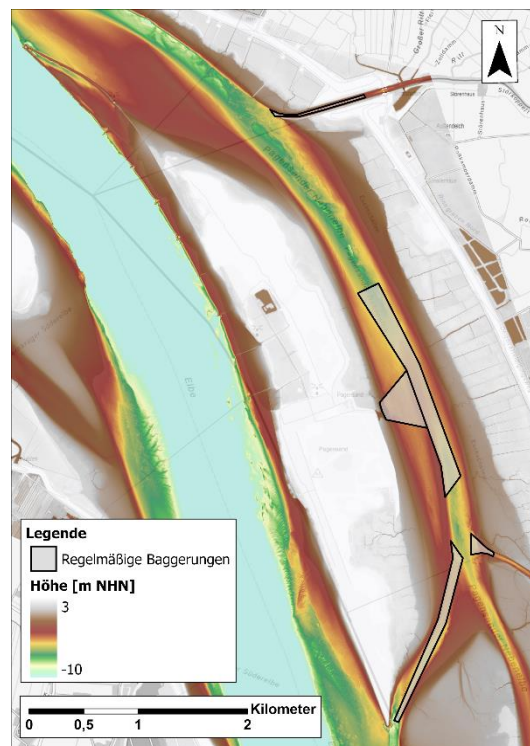


Abbildung 22: Bathymetrie der Pagensander Nebenelbe und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)

3.5.2 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 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 (Bohn 2005). 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, Schwarztunnensand und den Asseler-Sand in vier Arme gespalten, in denen die Wassertiefen weniger als acht Meter betrugen. Durch diese Stromspaltung änderten sich die Wassertiefen und Strömungen laufend, was zur Verwilderung des Strombettes führte. Zwischen Schwarztunnensand 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 Schwarztunnensand 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 Hung- rige 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 Nebelben-Inseln, von der bekannt ist, dass zu dieser Zeit eine landwirtschaftliche Nutzung stattfand (Bohn 2005).

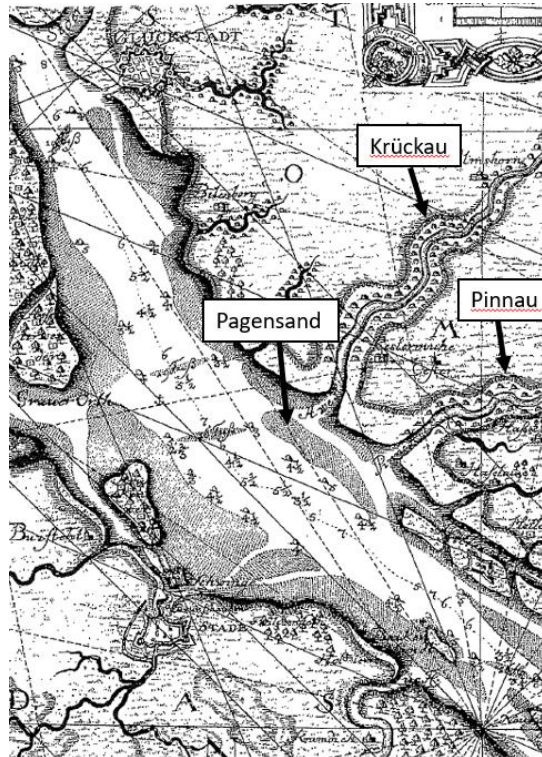


Abbildung 23 Unterelbe-Schnittkarte von 1721 (modifiziert von Bohn (2005) auf Grundlage einer Karte von Zimmermann/Hansebach, ohne Datum)

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

dien Anforderungen der Schifffahrt genüge leisten würde (vgl. zu diesem Absatz Schätzler und Meisel 1937).

Um der 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 6m unter MTnw abdämmte. Im selben Zeitraum wurde am stromaufgelegenen Ende ein 1700m 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 Nebelnelbe 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. zu diesem Absatz 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 Nebelnelbe) 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 Fahrinne transportieren (Schätzler und Meisel 1937; Visscher und Wolf 1987).

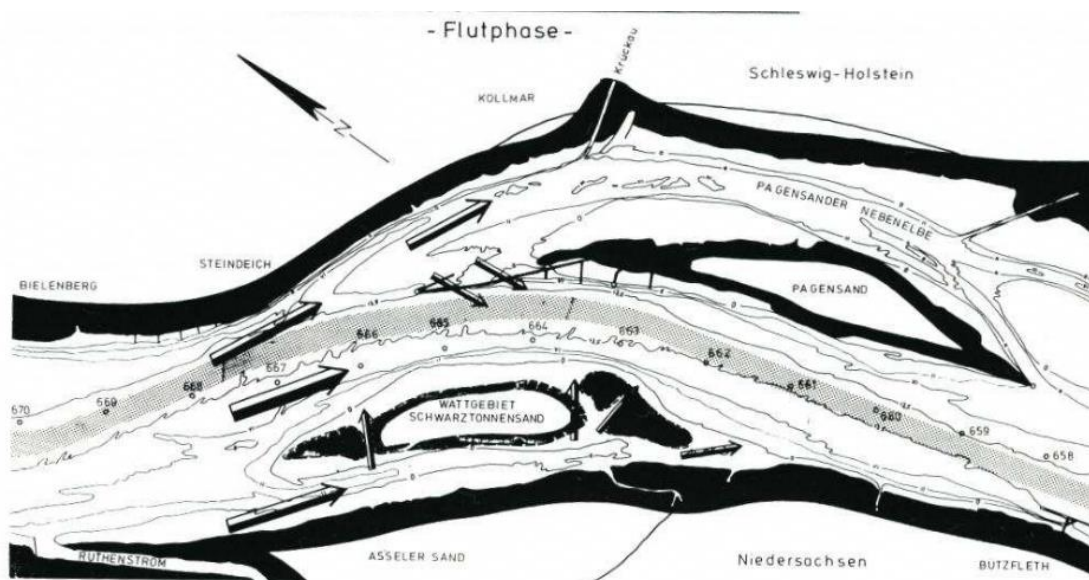


Abbildung 25: Abschnitt der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand, Zustand zu Beginn der 1970er Jahre nach dem 12m Ausbau (Quelle: Visscher und Wolf 1987)

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.3.1.1) 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 eine regionale Sandentnahme zum Bau des Deiches statt, der 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 Nebelnelbe (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 Nebelbe gibt Tabelle 4.

Tabelle 4: Ausgewählte Baumaßnahmen im Bereich Pagensander Nebelbe, (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)

3.5.3 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).

3.5.4 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 Fahrrinnenvertiefung 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 Verlandungstendenzen 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).

3.5.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Pagensander Nebelnelbe 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 3.2.5 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 Binnenelbe 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 Vordeichsfläche 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 Binnenelbe und der Hauptelbe (das Steinloch) weiter abgenommen.

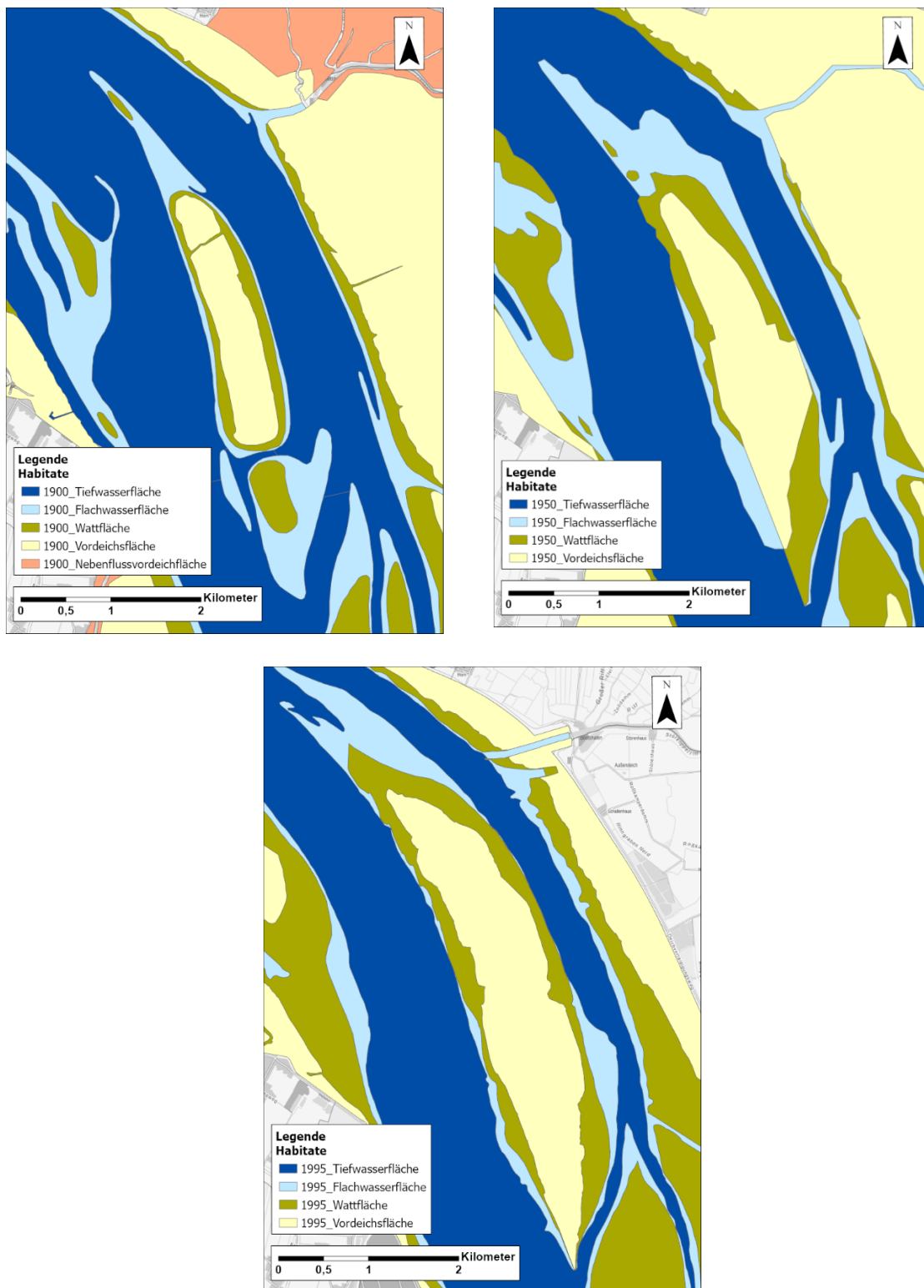


Abbildung 26: Morphologische Einheiten im Bereich der Pagensander Nebelben im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN 1919)

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 3.2.5 beschriebenen Einschränkungen hinsichtlich der quantitativen Aussagekraft der volumetrischen Auswertungen von Fräßdorf sind auch hier bei der Bewertung und Interpretation zu beachten.

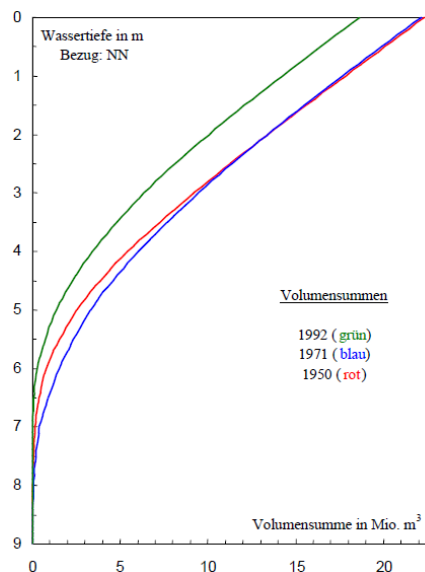


Abbildung 27: Volumenverteilung in der Pagensander Nebelnelbe für die Jahre 1950, 1971 und 1992 (Quelle: Fräßdorf 1995)

Zwischen 1995 und 2004 waren in der Pagensander Nebelnelbe 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 Nebelnelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten (BfG 2006). In einigen Bereichen der Pagensander Nebelnelbe waren jedoch Verlandungstendenzen zu beobachten. Dazu zählen der mittlere und südliche Abschnitt mit dem Steinloch sowie der nördliche Bereich (Folge der Umgestaltung des Leitdammes Pagensand Nord 1987-1989) (BfG 2008). Ansonsten kann diese Nebelnelbe als morphologisch stabil bezeichnet werden (ebd.).

Die morphologische Entwicklung im Bereich der Pagensander Nebelnelbe in der jüngeren Vergangenheit ist in Abbildung 28 dargestellt. Die Differenzendarstellung (unten) zeigt mehrere größere zusammenhängende Bereiche mit Verlandungstrend. Inselseitig 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. Im Steinloch sowie in

Teilen der südlichen Pagensander Nebelnelbe werden Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Entelmann 25.09.18). Der ebenfalls verlandende Bereich am Übergang zur Haseldorfer Binnenelbe wird in Kapitel 3.4.5 behandelt.

Der nördliche Teil der Pagensander Nebelnelbe verlandet weniger stark als der südliche Teil. Neben ausgedehnten Flächen in denen eine Verlandungstendenz herrscht, sind hier auch Flächen mit abnehmenden Sohlhöhen zu erkennen, wie z.B. nahe dem landseitigen Ufer.

Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Pagensander Nebelnelbe im Zeitraum 1971 bis 1992 einen deutlichen Verlandungstrend, der insbesondere in den Jahren nach der Abdämmung der Haseldorfer Binnenelbe 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.

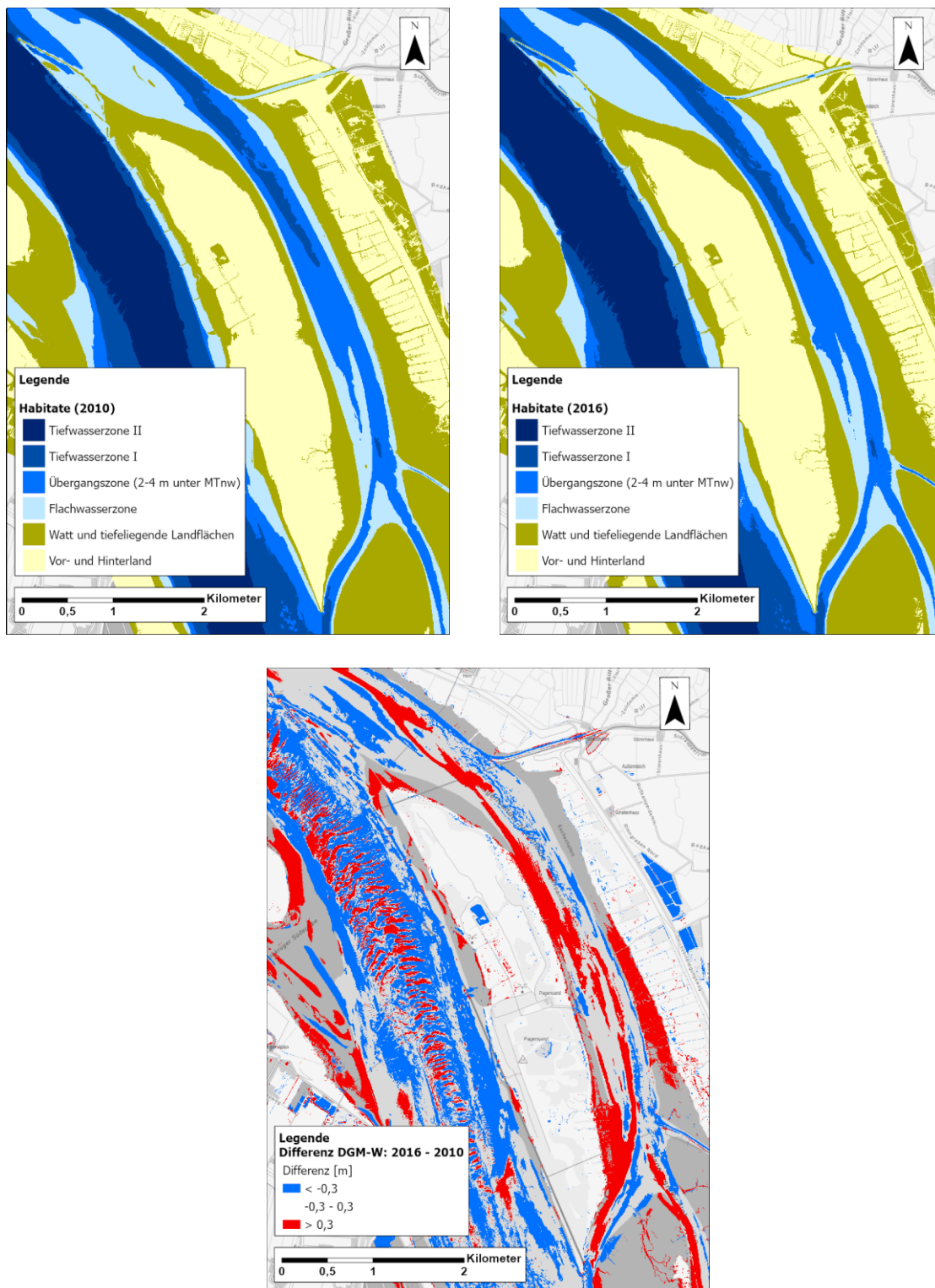


Abbildung 28: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Pagensander Nebelbe, (Quelle: WSA EN 2019)

3.5.6 Unterhaltung

Aktuell werden in der Mitte der Pagensander Nebelalbe, im Steinloch sowie an den Mündungen von Pinnau und Krückau regelmäßig Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt (Abbildung 22).

3.5.7 Ufersicherung

Die Ufer der Insel Pagensand sind teilweise verbaut, u.a. die Nord- und Südspitze sowie die mittleren Abschnitte elb- und binnenseitig. Zudem erstrecken sich entlang der nördlichen Hälfte elbseitig Buhnenfelder (Abbildung 36). Am elbseitigen Ufer von Pagensand erfolgt im Rahmen des Bundesprogrammes Blaues Band derzeit eine Umsetzung des Renaturierungsprojektes „Wilde Insel Pagensand“. Hierzu haben Stiftung Lebensraum Elbe und die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) einen Kooperationsvertrag geschlossen. Die Stiftung Lebensraum Elbe erhält für die Gesamtplanung des Projekts sowie die Umsetzung von Maßnahmen im Hochwassereinflussbereich Fördermittel aus dem Förderprogramm Auen. Die Umsetzung von Maßnahmen in der Uferzone und dem ufernahen Marschland erfolgt durch das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee in eigener Zuständigkeit.

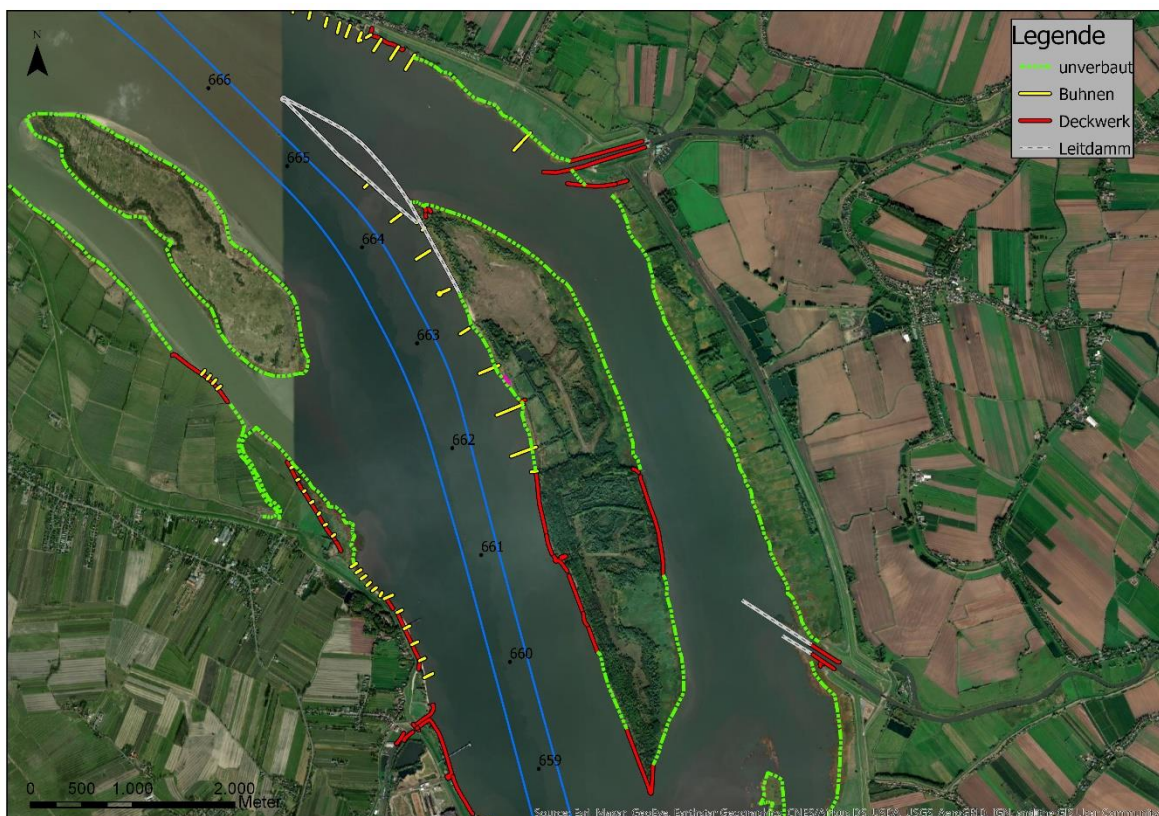


Abbildung 29: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Pagensander Nebelalbe, (Quelle WSA Elbe-Nordsee 2021)

3.5.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Pagensander Nebenelbe liegt wie die Haseldorfer Binnenelbe, die Schwarztonnensander Nebenelbe und die Glückstädter Nebenelbe im Funktionsraum 4. IBP und Entelmann 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 Untersuchungsbedarfs „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3): „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).

3.6 Schwarztonnensander Nebenelbe

3.6.1 Lage

Die Schwarztonnensander Nebenelbe erstreckt sich süd-westlich des Hauptstroms zwischen Elbe-km 663 und Elbe-km 667. Abbildung 30 zeigt die Bathymetrie der relativ flachen Nebenelbe vor Umsetzung des Fahrrinnenausbaues 2019 – 2021, in dessen Zuge hier eine aquatische Ausgleichsmaßnahme umgesetzt wurde.

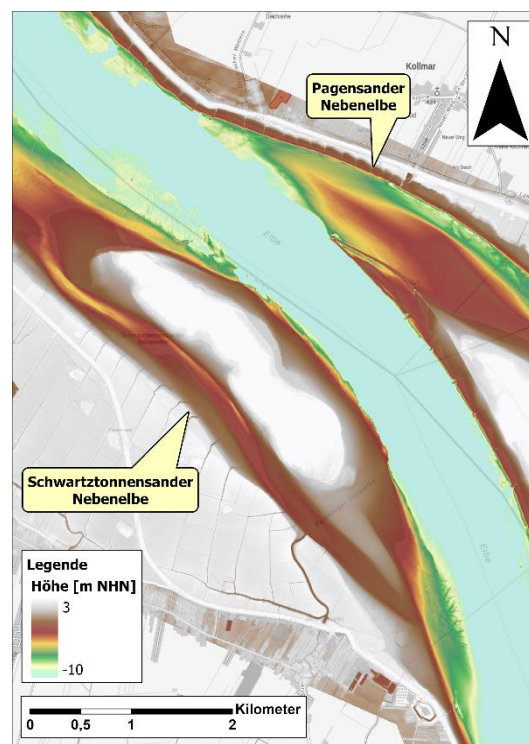


Abbildung 30: Bathymetrie der Schwarztonnensander Nebenelbe, derzeit keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)

3.6.2 Entstehung

Die Entwicklung der Schwarztonnensander Nebelbe ist eng mit der Entwicklung der Pagensander Nebelbe verbunden. Wie bereits in Kapitel 3.5.2 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 Situation erfolgte der Ausbau der Insel Pagensand zum Leitwerk (s. Kapitel 3.5.2). Strömungsmessungen, die im Jahr 1936 nach dessen Fertigstellung durchgeführt wurden, ergaben weiterhin eine 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 3.5.5) wurden mehrere Baggerkampagnen im Bereich des Schwarztonnensander Ufers zur Fahrrinne durchgeführt, um dessen Vorrücken in Richtung Fahrrinne zu verhindern und die Fahrrinnenkurve 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 Fahrrinnenvertiefung auf 13,5 m SKN "hochwasserfrei", d.h. über MThw, aufgespült (BfG 2002b). 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 (ebd.).

In den Jahren 1970/71 wurde der stromabseitige Einlaufbereich durch Verklappung von Baggergut aus der Unterhaltung um durchschnittlich 1,5 m aufgehöhht (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 dauerhaft über dem Meeresspiegel liegt. 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. zu diesem Abschnitt 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).

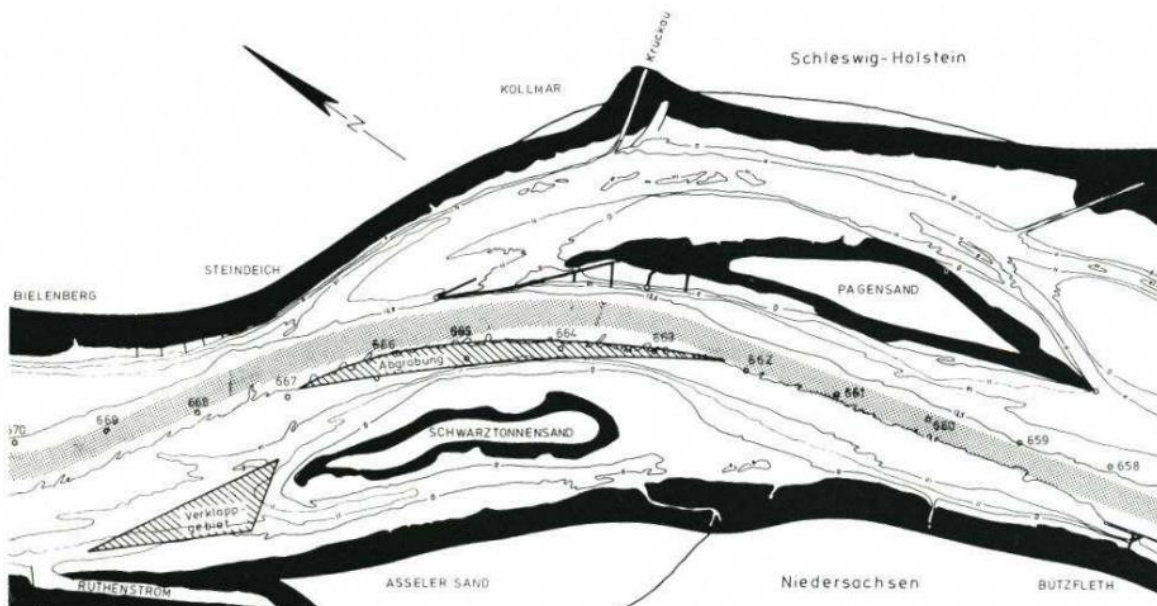


Abbildung 31: Abschnitt der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand, Zustand zu Beginn der 1970er Jahre nach dem 12m Ausbau, die schraffierten Flächen zeigen die durchgeführten Maßnahmen, (Quelle: Visscher und Wolf 1987)

3.6.3 Morphometrie

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

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

3.6.4 Hydrodynamik und Sedimenttransport

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Schwarztonnensander Nebelnelbe 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 Nebelnelbe im Vergleich zur Stauwasserdauer in der Hauptrinne deutlich verlängert; sie beträgt bis zu 2,5 h, was auf die Geometrie (geringe Wassertiefen) zurückgeführt wird (BfG 2008).

3.6.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Schwarztonnensander Nebelnelbe 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 3.2.5 erläutert. Der Vergleich der Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt eine deutliche Zunahme der Wattfläche, die nach wie in mehrere Teile gegliedert 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 in 1995 keine Rinne mehr, sondern eine Wattfläche. Das bedeutet, dass an diesem Ende um das Tideniedrigwasser herum keine hydraulische Anbindung mehr gegeben war. Aktuell ist hier wieder ein Anschluss an das Hauptgerinne der Elbe erfolgt (Herstellung Rinne bis 2m unter MTnw).

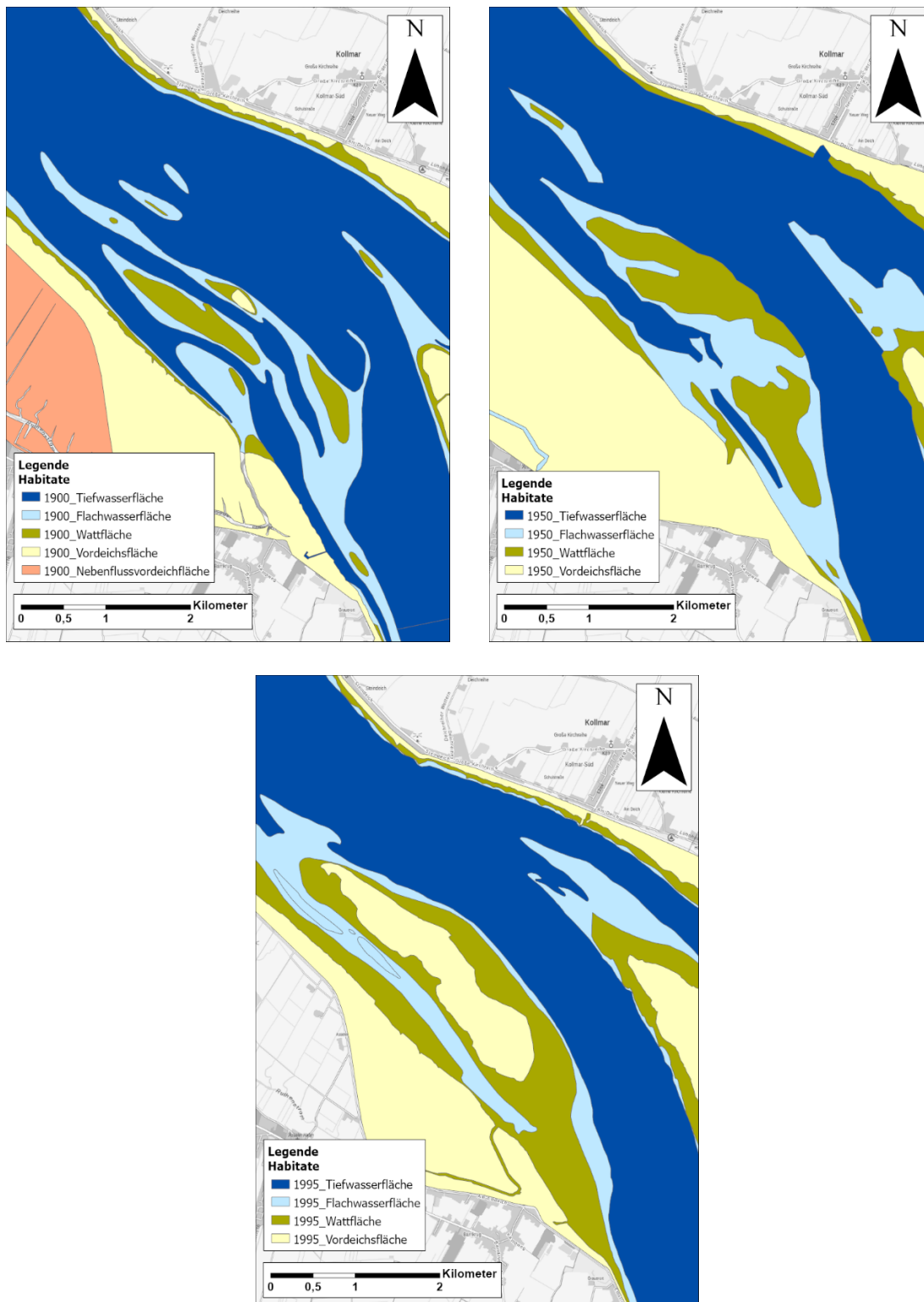


Abbildung 32: Morphologische Einheiten im Bereich der Schwarztonnensander Nebelnelbe im 20. Jahrhundert (Quelle: WSA EN 2019)

Die volumetrische Auswertung von Fräßdorf (Abbildung 33) 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 3.2.5).

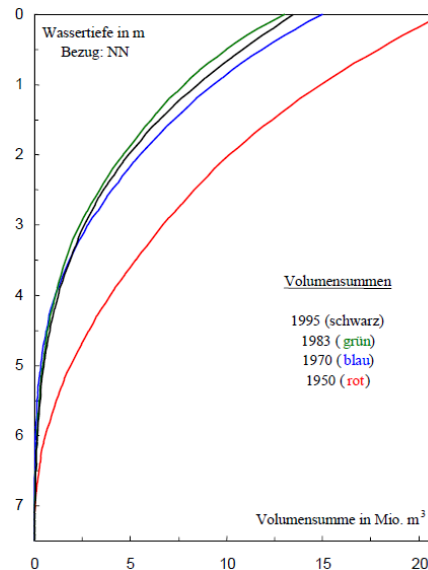


Abbildung 33: Volumenverteilung in der Schwarztonnensander Nebelnelbe für die Jahre 1950, 1970, 1983 und 1995, (Quelle: Fräßdorf 1995)

Eine Auswertung für den Zeitraum 1995-2004 durch die BfG 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 Nebelnelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten (BfG 2006).

Die morphologische Entwicklung im Bereich der Schwarztonnensander Nebelnelbe bis 2016 (d.h. vor Realisierung der Ausgleichsmaßnahme Schwarztonnensand) 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.

Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Schwarztonnensander Nebelnelbe 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 vorgelagerten Ufer die Bereiche mit Verlandungstendenz, wobei lokal auch Bereiche mit Erosionstendenz vorhanden sind.

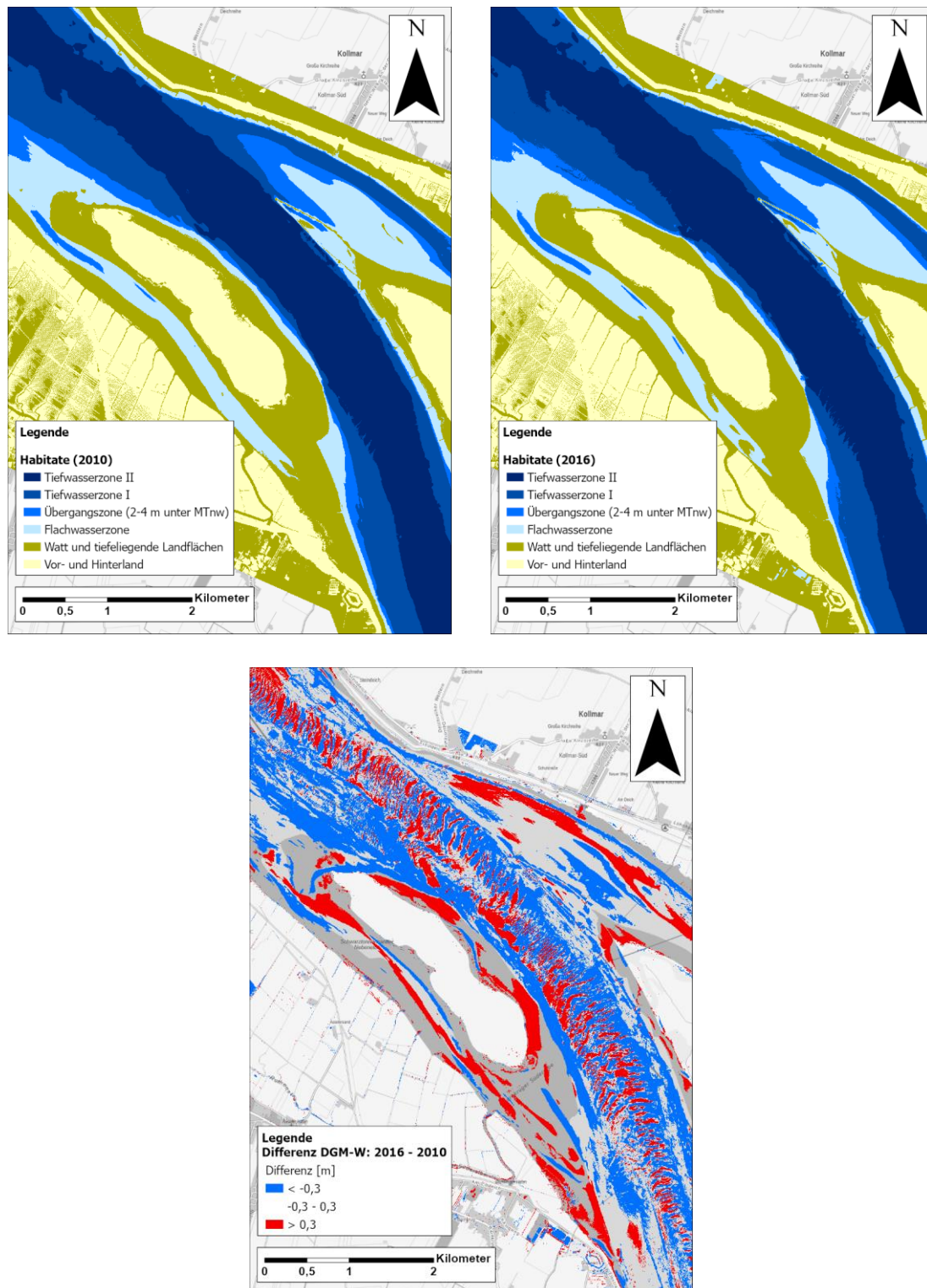


Abbildung 34 : Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Schwarztonnensander Nebelalbe, (Quelle: WSA EN 2019)

3.6.6 Unterhaltung

In der Schwarztonnensander Nebelnelbe 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 Nebelnelbe 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.

3.6.7 Ufersicherung

Die Ufer der Insel Schwarztonnensand sind wie auch das gesamte südliche Festlandufer unverbaut (Abbildung 35). Letzte Deckwerksabschnitte sowie Buhnenbereiche wurden im Zuge der vorgenannten (Kapitel 3.6.6) Ausgleichsmaßnahme zurückgebaut.



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

Die Schwarztonnensander Nebenelbe liegt wie die Pagensander Nebenelbe, die Haseldorfer Binnenelbe und die Glückstädter Nebenelbe im Funktionsraum 4. IBP und Entelmann 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 Untersuchungsbedarfs „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3): „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).

3.7 Glückstädter Nebenelbe

3.7.1 Lage

Die Glückstädter Nebenelbe erstreckt sich rechtsseitig des Hauptstroms zwischen Elbe-km 670 und Elbe-km 680. Abbildung 36 zeigt die Bathymetrie der nahezu parallel zur Hauptrinne verlaufenden Nebenelbe.

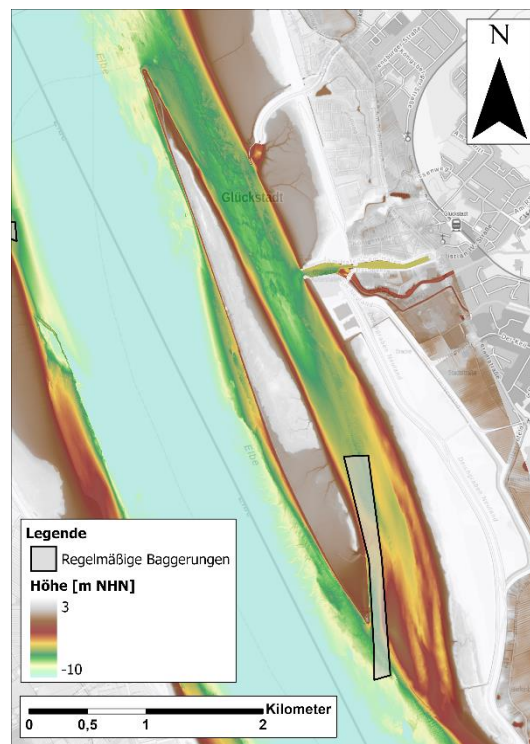


Abbildung 36: Bathymetrie der Glückstädter Nebenelbe und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden, (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)

3.7.2 Entstehung

Die Glückstädter Nebenelbe wird durch die Rhinplatte von der Hauptrinne der Tideelbe getrennt. Die Rhinplatte 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 Rhinplatte Flügeldämme errichtet, um die Bewegung der Sandbank zu verhindern und die Strömung auf die Fahrrinne zu konzentrieren (ebd.).

Ein Aspekt, auf den Kappenberg und Fanger unter Verwendung der Daten von (Rolinski und Eichweber 2000) hinweisen, ist, dass der Knotenpunkt der höherharmonischen M10-Partialtide am stromaufwärts gelegenen Ende der Rhinplatte (Elbe-km 670) liegt (Kappenberg und Fanger 2007). Dies macht das Gebiet nach Aussage von Rolinski und Eichweber zu einer wichtigen Senke für Sedimente, was sich in einem Baggerschwerpunkt in diesem Gebiet widerspiegelt (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).

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

3.7.3 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 unterbinden (BAW 1996). Im stromabgelegenen Teil der Glückstädter Nebenelbe sind ausschließlich Schlicke mit einem Schluffanteil von mehr als 80% zu finden (BfG 2008).

3.7.4 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 (als Glückstädter Fahrwasser bezeichnet) und anderen Nebenelben 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. Die Auswertungen für die Glückstädter Nebelnelbe 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 3.3.4 genannten Einschränkungen zu berücksichtigen.

Das Verhältnis der Durchflussmengen zwischen Glückstädter Nebelnelbe 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 der BfG ergibt ebenfalls ein Verhältnis von 0,16 bei Flut (BfG 2008). Mit den vergleichsweise großen Abflussanteilen bei Flut und Ebbe gehört die Glückstädter Nebelnelbe zu den besser durchströmten Nebelnelben (ebd.). Der Vergleich der oberflächennahen Schwebstoffkonzentration (aus Hubschrauberlängsprofilen der ARGE ELBE) zwischen Glückstädter Nebelnelbe 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 stromauf gelegenen Ende der Glückstädter Nebelnelbe zu erhöhten Stauwasserdauern und günstigen Sedimentationsbedingungen (Entelmann 25.09.18).

3.7.5 Morphologische Entwicklung

Die morphologischen Veränderungen im Bereich der Glückstädter Nebelnelbe 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 3.2.5 erläutert.

Der Vergleich der Darstellungen für die Jahre 1900 und 1950 zeigt für die Rhinplatte tendenziell ein Rückgang der Watt- und Vordeichsflächen zugunsten von Flachwasser- und Tiefwasserfläche. 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.

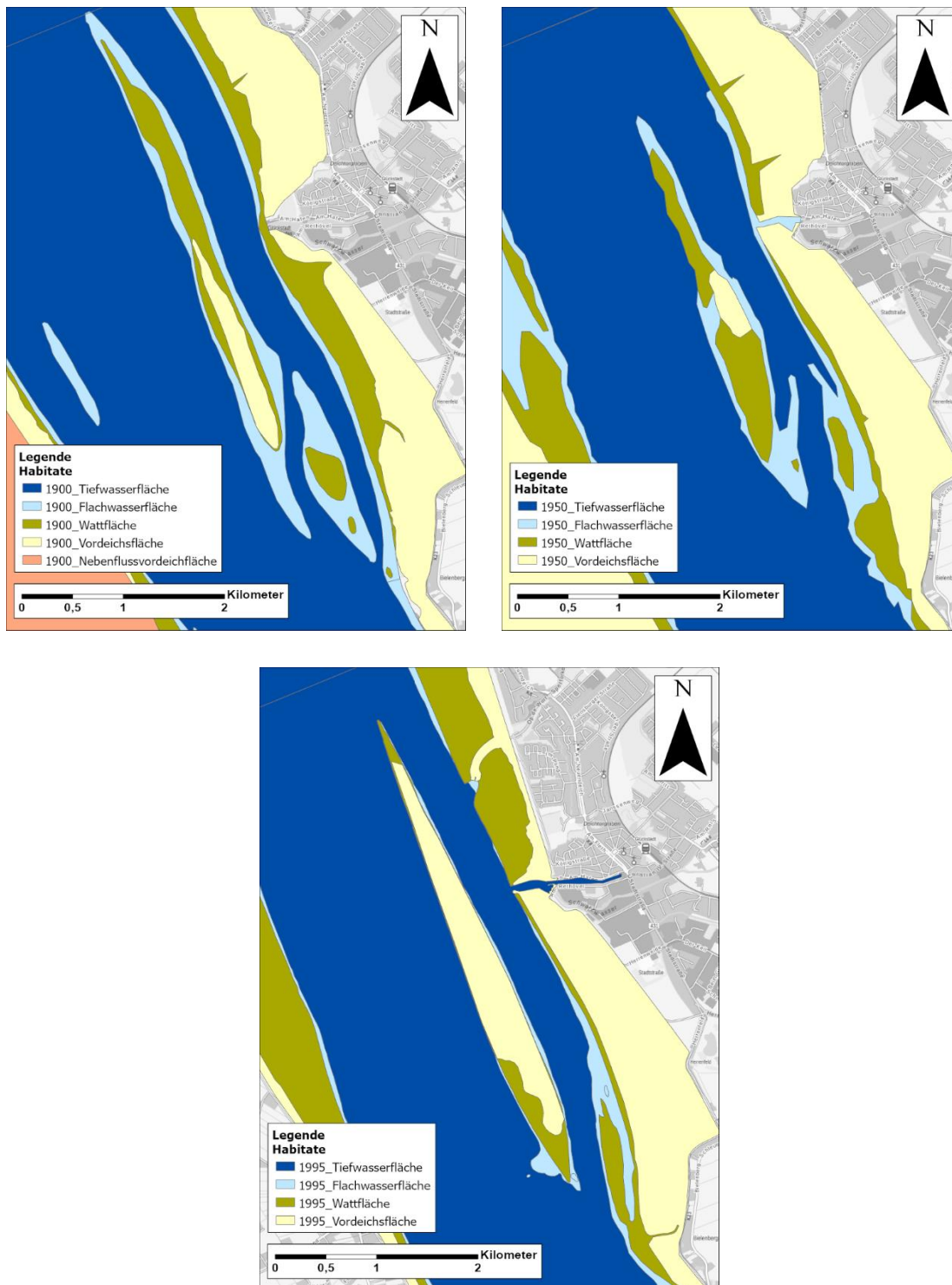


Abbildung 37: Morphologische Einheiten im Bereich der Glückstädter Nebelnelbe im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN 2019)

Die volumetrische Auswertung von Fräßdorf (Abbildung 38) zeigt für den Zeitraum 1950-1961 eine Verlandungstendenz, die im Vergleich zu anderen Nebelnelben (Pagensander

Nebenelbe, Hahnöfer Nebenelbe oder Schwarztonnensander Nebenelbe) 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 3.2.5).

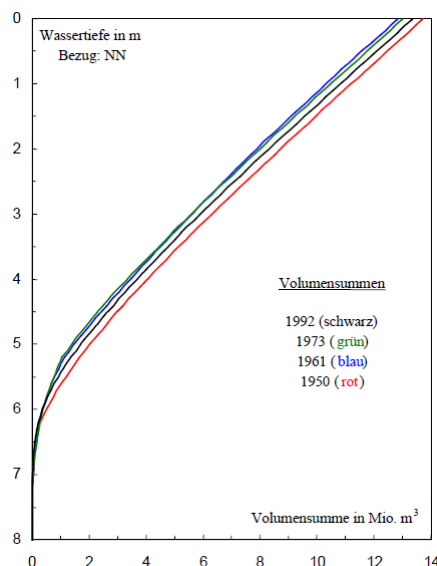


Abbildung 38: Volumenverteilung des Glückstädter Nebenelbe für die Jahre 1950, 1961, 1973 und 1992, (Quelle: Fräßdorf 1995)

Eine Auswertung für den Zeitraum 1995-2004 durch die BfG 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 Nebenelbe war anhand der Längspeilungen nicht zu beobachten (BfG 2006). Im Rahmen späterer Analysen wurde bis auf eine geringfügige Aufhöhung an der stromaufgelegenen Spitze der Rhinplatte eine indifferente Sohlentwicklung festgestellt (BfG 2008).

Die morphologische Entwicklung im Bereich der Glückstädter Nebenelbe 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.

Insgesamt zeigen die Auswertungen für die Glückstädter Nebenelbe im Zeitraum 1950 bis 1973 eine Volumenabnahme. Für den Zeitraum 1973 bis 2016 wurde kein eindeutiger Trend identifiziert, was auf eine stabile Morphologie hindeutet.

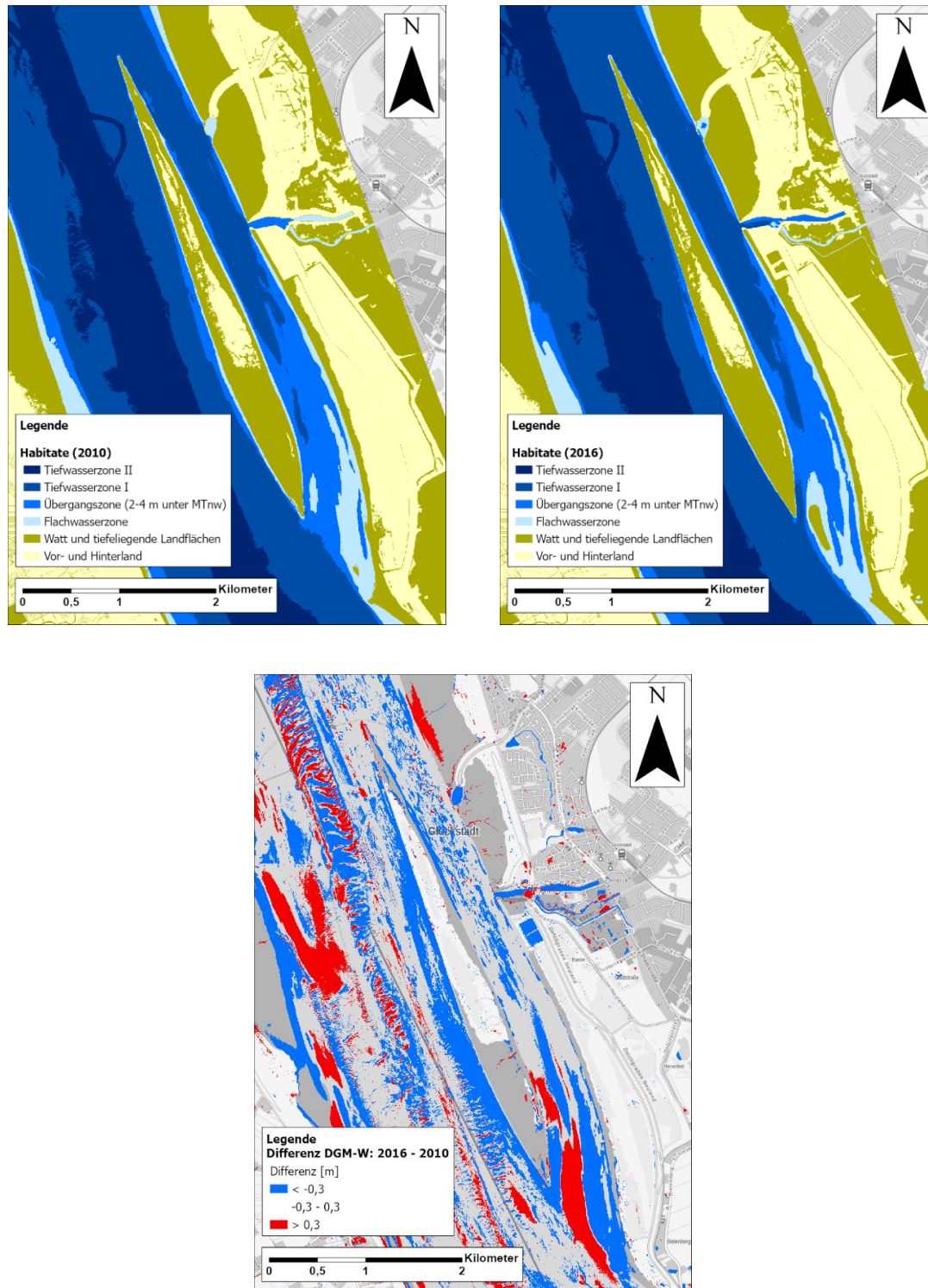


Abbildung 39: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Glückstädter Nebenelbe, (Quelle: WSA EN 2019)

3.7.6 Unterhaltung

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

3.7.7 Ufersicherung

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

Im zur Hauptrinne gelegenen Uferbereich wurden seitens des WSA Elbe-Nordsee in 2015/2016 fünf Deckswerksabsenkungen 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.

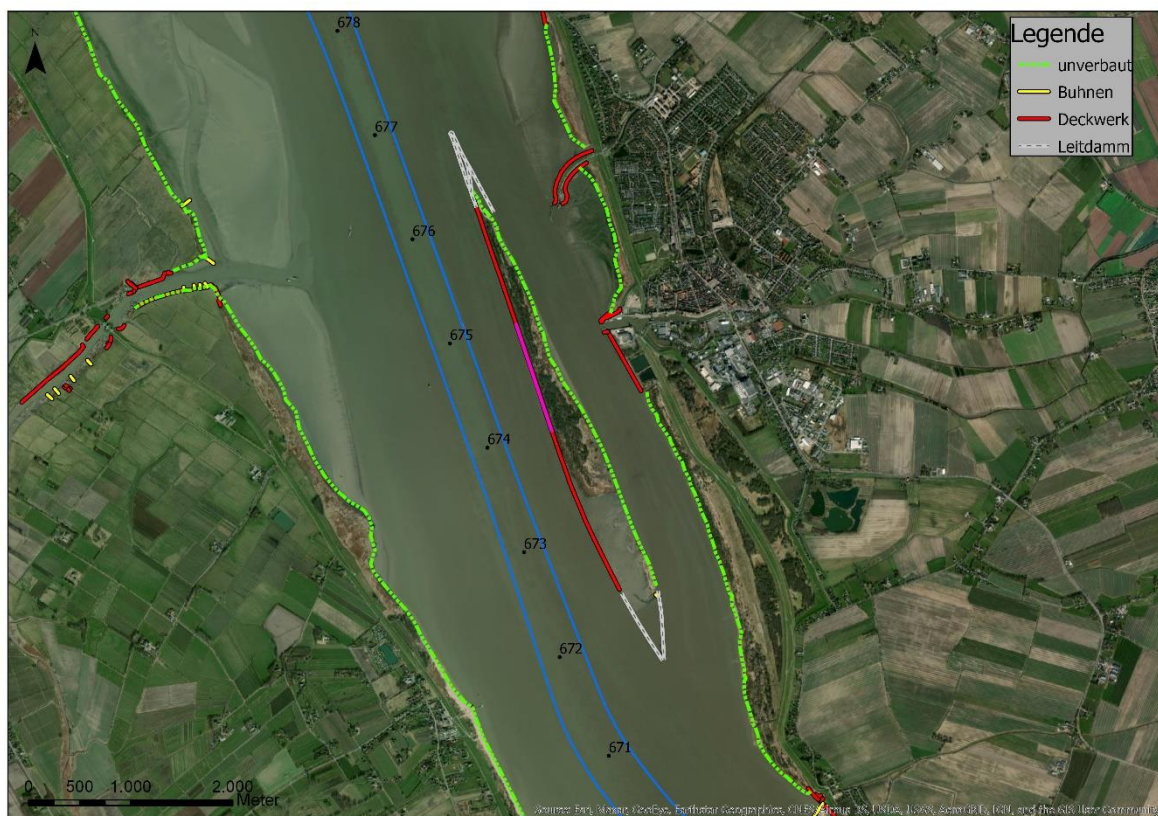


Abbildung 40: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Glückstädter Nebenelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021)

3.7.8 Naturschutzfachliche Bewertung

Die Glückstädter Nebenelbe liegt wie die Pagensander Nebenelbe, die Haseldorfer Binnenelbe und die Schwarztonnensander Nebenelbe im Funktionsraum 4. IBP und Entelmann 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 Untersuchungsbedarfs „besondere Bedeutung“ im Funktionsraum 4 (B3 4.2.3): „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).

3.8 Wischhafener Nebenelbe / Wischhafener Fahrwasser

3.8.1 Lage

Das System Wischhafener Nebenelbe / 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 angrenzenden Sande (Brammer Bank im Norden und Krautsander Watt im Süden) 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 Nebenelbe“ (vgl. Abbildung 42). Die ehemalige Wischhafener Nebenelbe 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 Nebenelbe / Wischhafener Fahrwasser“) stark verlandet sind, erfüllt das System nicht mehr die Kriterien einer Nebenelbe.

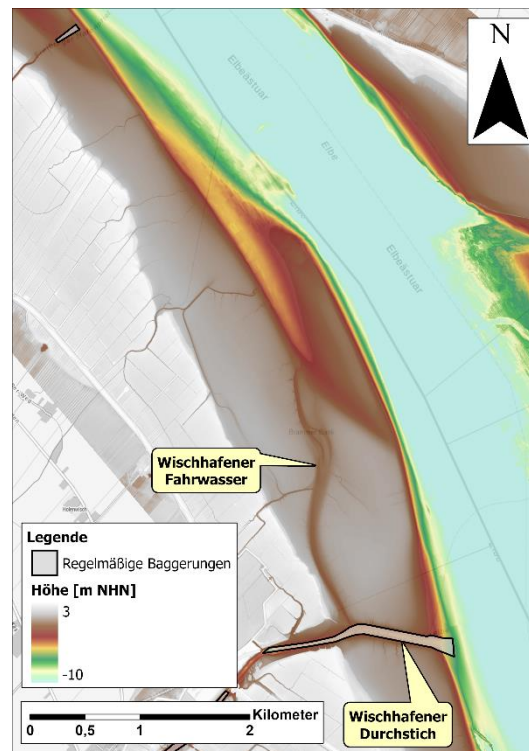


Abbildung 41: Bathymetrie im Bereich des Wischhafener Fahrwassers und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden, (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)

3.8.2 Entstehung

Die Wattflächen Brammer Bank und Krautsander Watt sind in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch Materialanlagerung nahe des niedersächsischen Ufers entstanden. Die Entstehung in genau diesem Abschnitt wird von Samu durch den topographisch breiten Querschnitt begründet (Samu 1987). Dabei bezieht er sich auf Hensen, der die Bildung von Sandbänken in breiten Querschnitten von Tideflüssen auf die Rechtsablenkung der Strömung infolge der Corioliskraft zurückführt (Hensen 1939). 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 1500m 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. zu diesem Abschnitt 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 Nebelbe / 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.

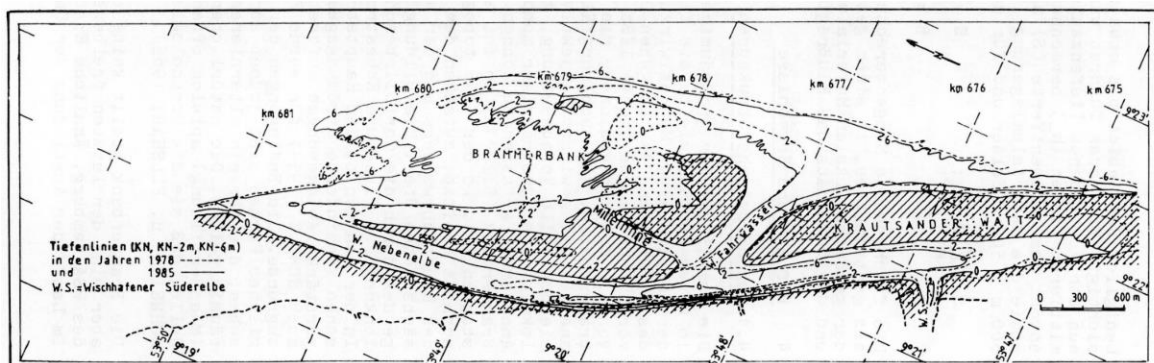


Abbildung 42: System Wischhafener Nebelbe / Wischhafener Fahrwasser, Zustand 1978 und 1985, die Linien (gestrichelt 1978, durchgezogen 1985) zeigen die Tiefenlinien der Jahre an (Quelle: Samu 1987)

3.8.3 Morphometrie

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

Das Sediment am 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).

3.8.4 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 3.3.4 genannten Einschränkungen und zum anderen die starken morphologischen Veränderungen (siehe Kapitel 3.8.5) zu berücksichtigen. Aufgrund der massiven Verlandungen, die bis zum Jahr 2016 stattgefunden haben, haben die Messergebnisse keinerlei Aussagekraft für den heutigen Zustand.

3.8.5 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 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 3.2.5 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.

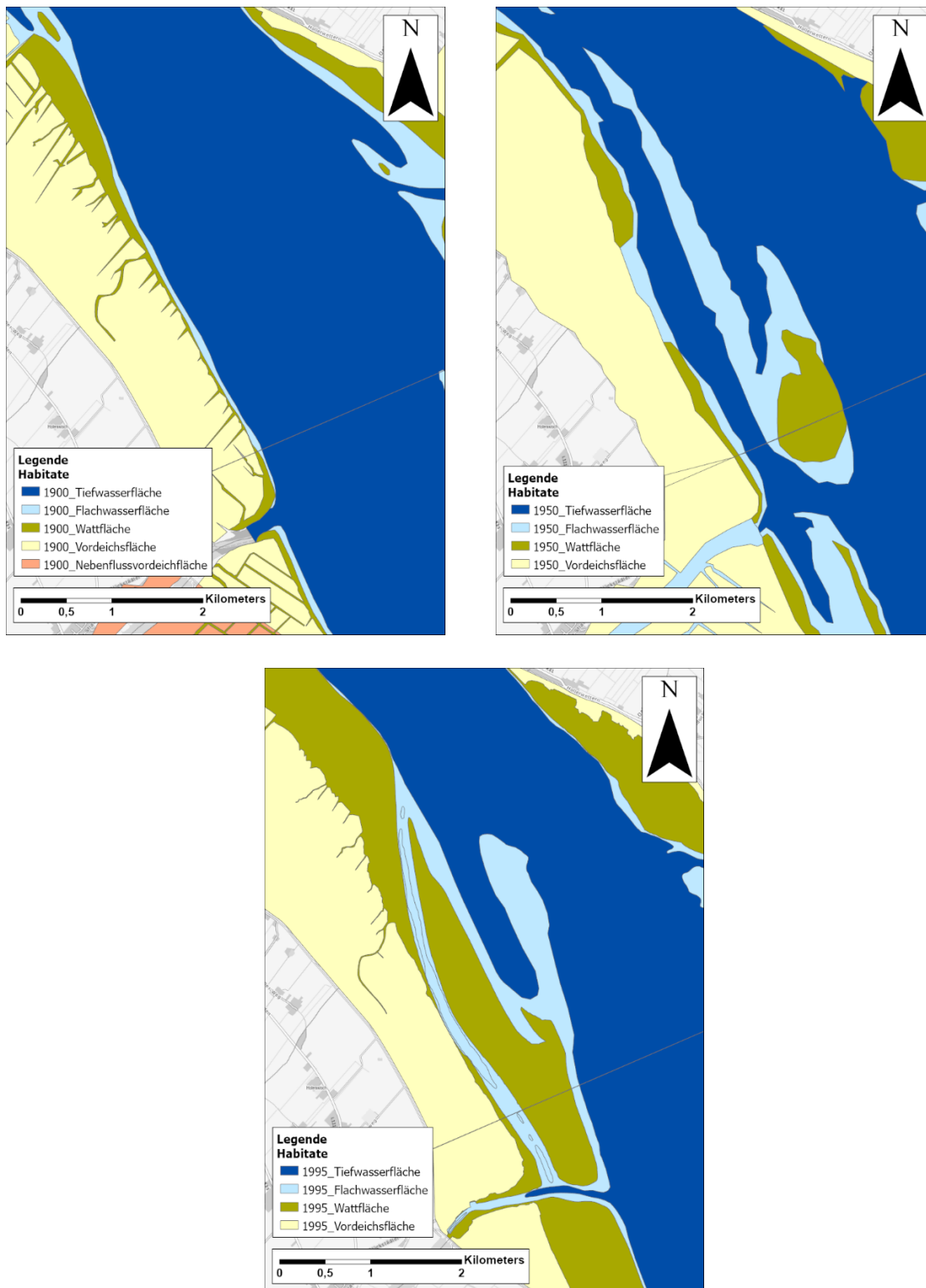


Abbildung 43: Morphologische Einheiten im Bereich des Wischhafener Fahrwassers im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN, 2019)

Die volumetrische Auswertung von Fräßdorf (Abbildung 44) 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 3.2.5 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 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).

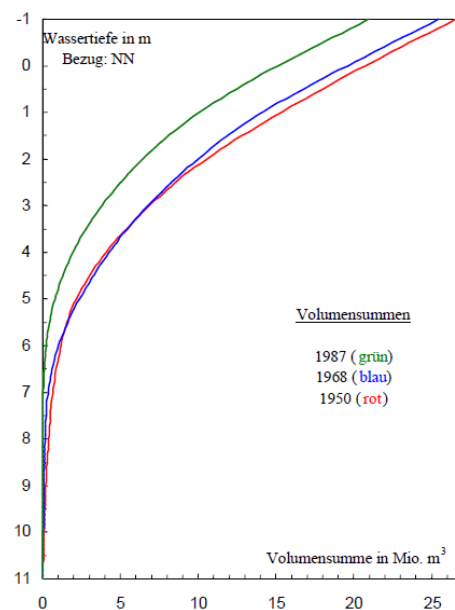


Abbildung 44 Volumenverteilung des Wischhafener Fahrwassers für die Jahre 1950, 1968 und 1987, (Quelle: Fräßdorf 1995)

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.

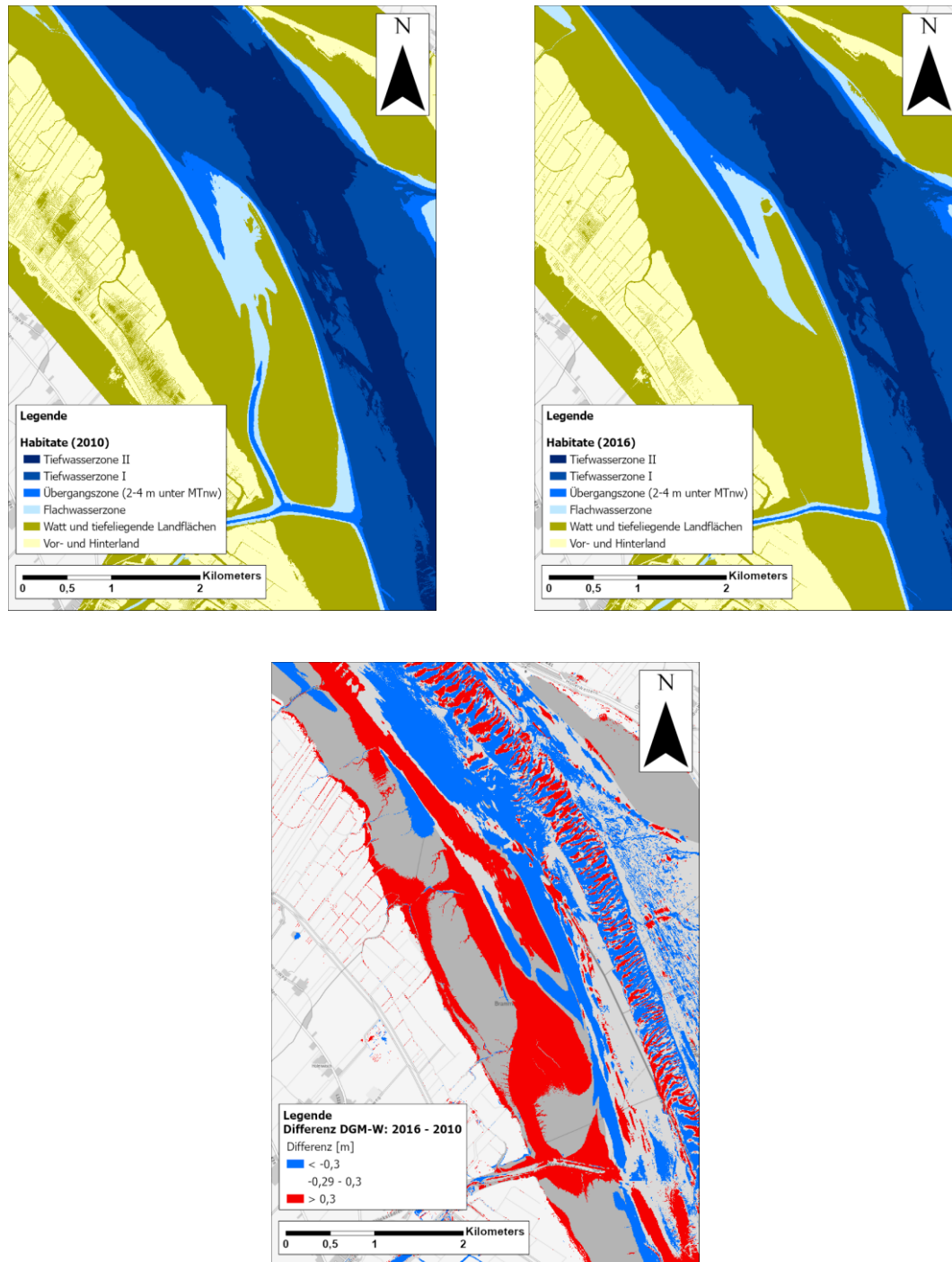


Abbildung 45: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich des Wischhafener Fahrwassers, (Quelle: WSA EN 2019)

3.8.6 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 im Bereich seit 2013 hat sich der Aufwand für die Unterhaltungsbaggerungen zuletzt deutlich erhöht (vgl. zu diesem Abschnitt Entelmann 25.09.18).

4 Beschreibung des aktuellen morphologischen Zustands ausgewählter Nebelben anhand von neu erhobenen Messdaten

4.1 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. Für ein besseres Verständnis von Sedimentations- und Erosionsprozessen sind darüber hinaus auch die Sedimentverteilung und die Strömungsverhältnisse förderlich. Basierend auf einer Analyse der bestehenden Daten und Informationen (AP 1) wurde ein zusätzlicher Bedarf an hochaufgelösten Bathymetriedaten, Sedimentbeprobungen und Strömungsmessungen identifiziert. Zur Erhebung der Daten wurde ein Messkonzept erstellt, das neben den zu messenden Parametern auch Messverfahren, Standorte sowie Zeiträume bzw. Häufigkeiten der Messungen 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
Fächerlotpeilungen (Messboot Nekton, IWB)	Sohlhöhen in der Pagensander Nebelbe, Haseldorfer Binnenelbe, Hahnöfer Nebelbe, Lühesander Süderelbe	Jährlich
Sedimentbeprobungen (WSA)	Korngrößenverteilung in der Pagensander Nebelbe und Hahnöfer Nebelbe	Punktuelle Beprobungen ergänzend zum Sedimentkataster Tideelbe des WSA
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

4.1.1 Fächerecholotpeilungen

Gemeinsam mit dem WSA EN wurde abgestimmt, dass in den ersten beiden 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 und 2020 durchgeführten Messkampagnen. Die Messungen fanden wie geplant im Frühjahr bzw. Sommer statt. Pandemiebedingt konnten ein Abstand von genau 12 Monaten nicht immer eingehalten werden.

Tabelle 6: Übersicht zu erfolgten Fächerlotpeilungen auf den Nebelnelbe (NE) und Stand der Aufbereitung der Daten (Stand April 2021)

Nebelnelbe	Zeitraum	Messtage	Beschreibung
Pagensander	16.04.2019 – 26.04.2019	7	Fächerlotpeilung
	17.06.2020 – 03.07.2020	8	
Hahnöfer	13.05.2019 – 16.05.2019	4	Fächerlotpeilung
	25.08.2020 – 09.09.2020	6	
Haseldorfer	25.06.2019 – 26.06.2019	2	Fächerlotpeilung und Testen Laservermessung
	15.06.2020 – 16.06.2020	2	
Lühesander	24.06.2019	1	
	28.08.2020	1	

Die erhobenen Peildaten wurden 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
- Lage- und Höhenkorrekturen aus den RTK-Korrekturdaten

Nach der Prüfung der Korrekturparameter erfolgt die Korrektur der Rohdaten der Vermessung. 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 Filterung 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 Höhengenaugkeit, minimale und maximale Tiefe, maximale und minimale Ab-

strahlungswinkel 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; 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 der längeren zurückgelegten Wegs und des flacheren Aufprallwinkels, viele Ausreißer enthalten) • 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

Neben der beauftragten Fächerecholotpeilung wurde als weiteres potentiell Messverfahren die Laser-basierte Vermessung von Wattflächen getestet, die im Rahmen der Peilung aufgrund zu geringer Wassertiefen nicht vermessen werden können. Abbildung 46 zeigt als Skizze die Konzeption der Laservermessung.

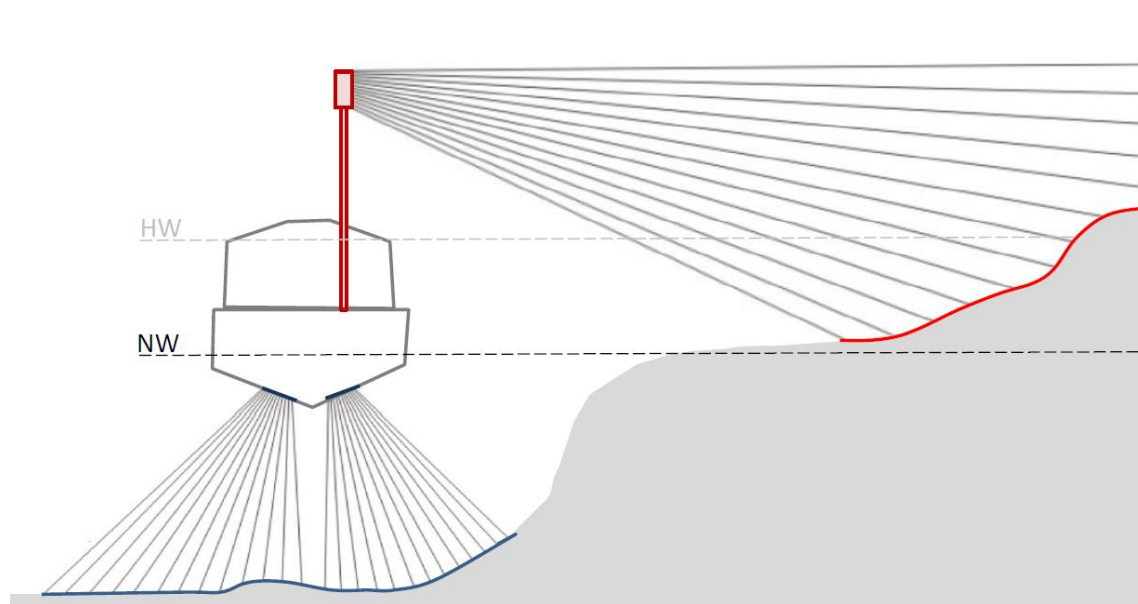


Abbildung 46: Skizze zur geplanten Laservermessung. Klassische Fächerecholotvermessung (blau) sowie zusätzliche, neu konzipierte Laservermessung der flachen, trockengefallenen Seitenbereiche (rot) vom Bootsmast

Der grundsätzliche Vorteil dieser zusätzlichen Laservermessung liegt in der zusätzlichen Vermessung von trockenfallenden Bereichen, die der Fächerecholotvermessung nicht zugänglich sind sowie in der redundanten Vermessung der Wasserwechselzone (zwischen Tidehoch- und Tideniedrigwasser) mit beiden Verfahren bei verschiedenen Wasserständen. Dies erlaubt die gegenseitige Verifikation der Verfahren. Dieser Übergang wurde im Rahmen des Projektes als kritisch für die Erstellung von konsistenten Geländemodellen identifiziert, da dies ebenfalls die Grenze verschiedenen Messverfahren darstellt. Demgemäß wird einer zusätzlichen und zudem redundanten Vermessung dieses Bereiches insbesondere mit zwei Messverfahren eine große Bedeutung beigemessen.

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. Abschnitt 5.1.1). 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)

Für die praktische Durchführung wurde die Installation eines Lasermesssystems an einem Mast, der am Messboot befestigt ist, als sinnvollste Umsetzung identifiziert. Andere diskutierte Umsetzungen (z.B. Drohnen-basierte Vermessung) wurden im Rahmen des Projektes auf Grund des Aufwands und der Genehmigungsfähigkeit (Naturschutzgebiete, Flughafen, Privatgrund) zunächst verworfen.

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 mit am für Einschätzung erforderliche Kompensation bzw. Anforderung an eine inertielle Messeinheit.

Die Tests und der bisherige Fachaustausch zeigten, dass der Aufbau eines eigenständigen Lasermesssystems im Rahmen des Projektes sehr aufwändig ist. Im Rahmen der Recherche nach vorkonfigurierten Lösungen wurde jedoch mit dem Hypack Payload² ein Messsystem identifiziert, das potentiell für das geplante Vorgehen infrage kommt. Laut Auskunft des Herstellers sollte das Gerät noch im Jahr 2020 in Europa verfügbar sein. Ein Test des Geräts auf dem Messboot Nekton wurde vom Hersteller in Aussicht gestellt. Pandemiebedingt sind Verzögerungen aufgetreten, so dass das Gerät auch im Jahr 2021 noch nicht in Europa verfügbar ist.

4.1.2 Sedimentbeprobungen

Das Sedimentkataster Tideelbe des WSA EN beinhaltet punktuelle Informationen zur Korngrößenzusammensetzung aus der Vergangenheit. Auch für einige Bereiche der Nebenel-

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

² Laservermessungssystem: Lidar Payload (Hersteller: Hypack): <http://www.hypack.com/product/id-HYPACK-LiDAR-Payload/HYPACK-LiDAR-Payload> (Stand 17.02.2020)

ben liegen Informationen vor, die die Grundlage zur Beschreibung der flächigen Sedimentverteilung bilden. Zur präziseren Beschreibung der Sedimentverteilung (Verdichtung der Informationen) sowie zur Beurteilung der zeitlichen Veränderung der Korngrößenzusammensetzung werden im Rahmen des Vorhabens in ausgewählten Nebelben 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 (Abbildung 47 und Abbildung 48) wurden zudem entsprechend ihrer Wichtigkeit klassifiziert für den Fall, dass aus technischen oder pandemiebedingten Gründen nur eingeschränkte Messungen durchgeführt werden können. Derzeit ist geplant, dass die Sedimentproben durch das WSA EN mit einem Van-Veen-Greifer entnommen und anschließend im Labor analysiert werden. Die voraussichtlichen Messtermine sind in Tabelle 9 dargestellt.

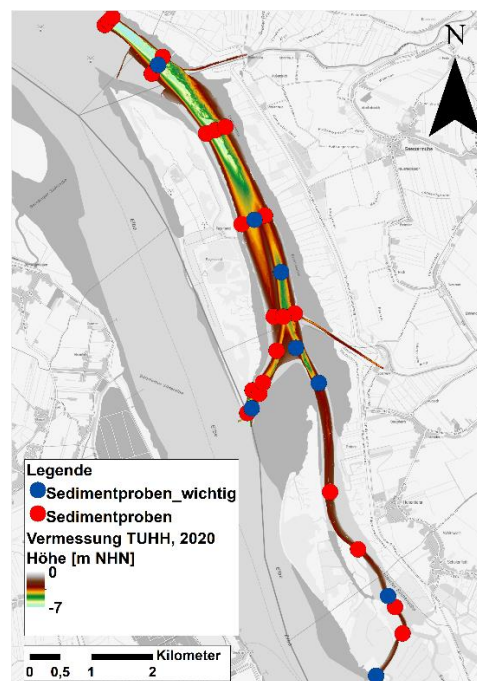
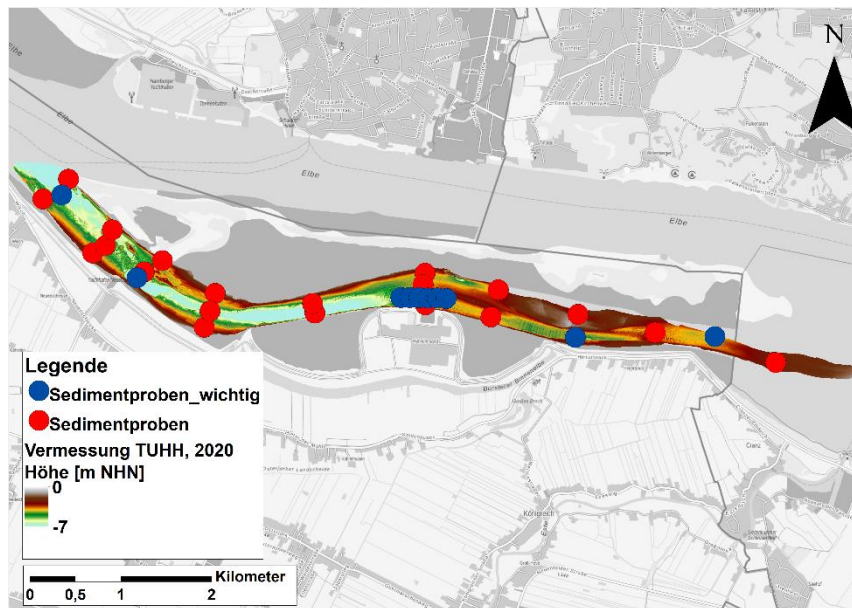


Abbildung 47: Standorte der vom IWB vorgeschlagenen Sedimentproben für Pagensander Nebelbe + Haseldorfer Binnenelbe

a)



b)

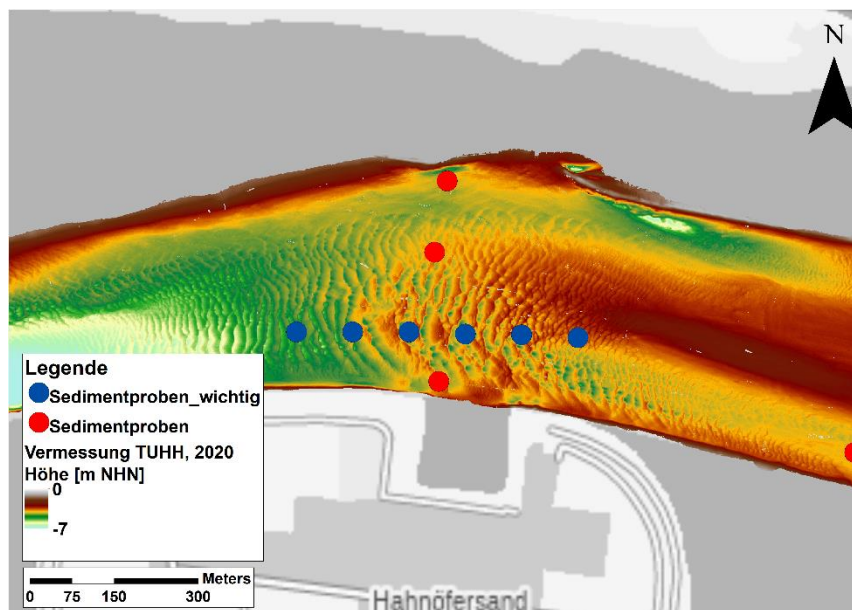


Abbildung 48: Vorgeschlagene Standorte für Sedimentbeprobungen a) in der gesamten Hahnöfer Nebenelbe und b) im zentralen Dünenfeld mit 100m Punktabstand

Tabelle 9: Übersicht geplante Sedimentprobenmessung am Pagensander NE + Haseldorfer BE und Hahnöfer NE

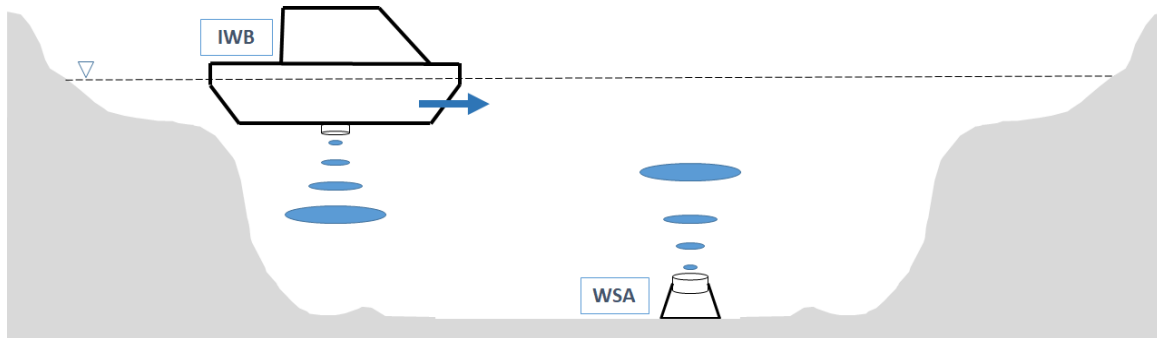
Nebelbe	Zeitraum	Beschreibung
Pagensander NE + Haseldorfer BE	16.08.2021 – 18.08.2021	Sedimentproben
Hahnöfer NE	30.08.2021 – 01.09.2021	Sedimentproben

4.1.3 Strömungsmessungen

Zur verbesserten Beschreibung der Strömungsverhältnisse bzw. der Abflussaufteilung im System Pagensander NE/Haseldorfer BE sowie zur Kalibrierung des numerischen Modells der Pagensander NE (AP3) sind Strömungsmessungen geplant. Als Standorte für die Messungen sind der südliche Anschluss der Pagensander NE an den Hauptstrom (Bereich Steinloch) und der Übergang der Pagensander NE an die Haseldorfer BE vorgesehen. In Abbildung 49 b) sind Bereiche gekennzeichnet, in denen bevorzugt gemessen werden sollte. Die genauen Standorte der Messungen sind derzeit noch in Abstimmung, da hier neben messtechnischen (geeignetes Messprofil) auch nautische Aspekte (Verkehrssicherheit) zu berücksichtigen sind.

Es werden kombinierte Messungen durchgeführt, zum einen wird punktuell die Strömung über mehrere Tiden erfasst, zum anderen werden an diesen Standorten über eine Tide mehrere Querprofilmessungen durchgeführt. Abbildung 49 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 werden in Kooperation zwischen dem WSA EN (punktuell Strömungsmessungen) und dem IWB (bootgestützte ADCP-Querprofilmessungen) durchgeführt. Aus logistischen und nautischen Gründen können die Messungen von Montag bis Donnerstag in Wochen durchgeführt werden, in denen das Niedrigwasser vormittags eintritt. Basierend auf diesen Anforderungen wurden zwei geeignete Wochen für die Messungen ausgewählt (Tabelle 9).

a)



b)

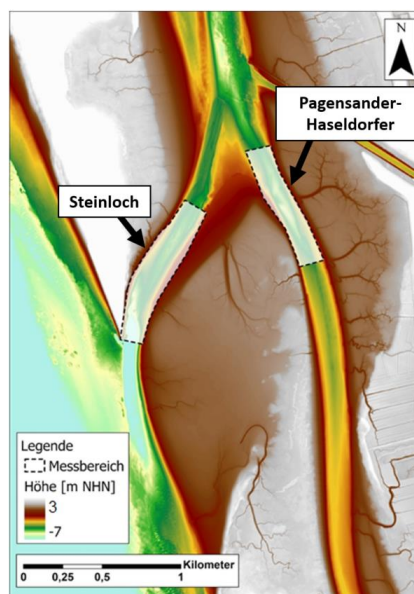


Abbildung 49: a) Prinzip der kombinierten Strömungsmessungen b) vorgesehene Messbereiche Steinloch und der Verbindung Pagensander NE - Haseldorfer BE

Tabelle 10: Geeignete Zeiträume für die geplanten Strömungsmessungen

Optionen	Zeitraum	Beschreibung
1. Wahl	06.09.2021 – 09.09.2021	Strömungsmessung
Ersatztermin	20.09.2021 – 23.09.2021	Strömungsmessung

4.2 Jahrestopographien

Auf Grundlage der im Vorhaben jahresweise neu erhobenen Peildaten werden digitale Geländemodelle in Form von Rastern mit der Auflösung 1x1m interpoliert. Die Raster-Stützpunkte befinden sich in Analogie zu den DGM-W auf den ganzzahligen UTM-Koordinaten. Bei der Interpolation auf das Raster wird der Mittelwert aller sich in der Rasterzelle befindlichen Einzelwerte berechnet und als Zellwert übernommen. Die digitalen Geländemodelle erlauben eine detaillierte Beschreibung der Bathymetrie und der Sohleigenschaften der betrachteten Nebelseen. Durch Differenzenbildung können Veränderungen detektiert und morphologische Parameter, wie z.B. 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. In Abstimmung mit dem WSA werden als Produkte die generierten digitalen Geländemodelle sowie die Punktwolken der aufbereiteten Messdaten übergeben.

Eine Übersicht über die erstellten digitalen Geländemodelle (hier: 2020) für die vier vermessenen Nebelälben ist in Abbildung 50 gegeben. Abbildung 51 ff zeigen die Ergebnisse für die einzelnen Nebelälben für die Messjahre 2019 und 2020.

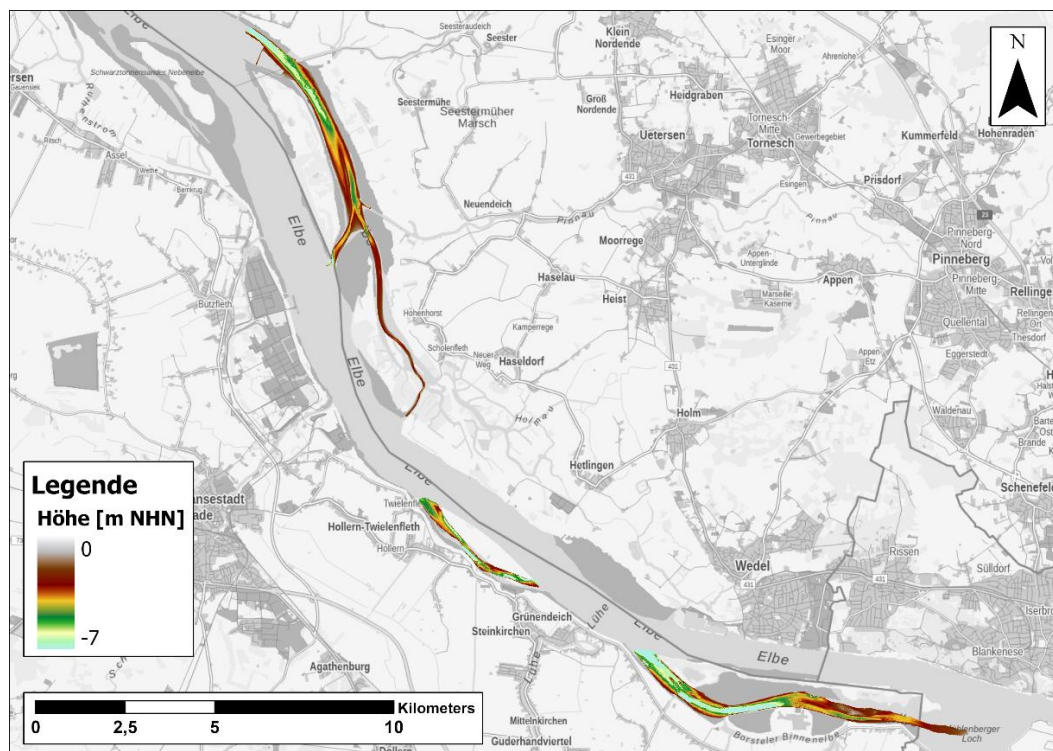


Abbildung 50 Übersicht über gesamte Fächerecholotteilungen für 2020

Die digitalen Geländemodelle enthalten Sohlhöhen von NHN+0 m und darunter. Die obere Begrenzung ergibt sich aus der Mindestwassertiefe bei der Vermessung von etwa 2m.

Diese ist einerseits technisch bedingt und andererseits aus Gründen der nautischen Sicherheit einzuhalten.

Die IBP Arbeitsgruppe definiert folgende Tiefenbereiche (IBP Arbeitsgruppe 2011b):

- Watten → MTnw bis MThw
- Flachwasser → MTnw -2m bis MTnw
- Tiefwasser 2 → von 10 m bis MTnw-2m
- Tiefwasser 1 → tiefer als MTnw-10m

Entsprechend dieser Definition sind die Zonen Tiefwasser 1 und Tiefwasser 2 sowie der Übergang vom Tiefwasser 2 zum Flachwasser (gestrichelte Linie in Abbildung 51ff) 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 Bereiche Pagensander NE und Haseldorfer BE auf, dass die generierten DGM 2019 teilweise sehr lückenhaft sind. 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 Messung, 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. Im Jahr 2020 wurden dieselben Nebenelben vermessen wie in 2019. Durch Verbesserungen im Messablauf wurde die Datendichte und –qualität gegenüber 2019 jedoch verbessert, wodurch die digitalen Geländemodelle deutlich weniger Lücken aufweisen und in einigen Fällen (v.a. Lühesander Süderelbe) größere Bereiche abdecken.

4.2.1 Hahnöfer Nebenelbe

Die beiden digitalen Geländemodelle (Abbildung 51f) der Hahnöfer NE weisen in der stromabseitigen Hälfte deutlich größere Tiefen (NHN-6 m und tiefer) auf, als in der stromaufseitigen Hälfte (NHN-5m und höher). Eine tiefere Rinne erstreckt sich zwischen Neuenschleuse und der Halbinsel Hahnöfersand (hellblau in Abbildung 51). Die größten Tiefen (NHN-12 m) befinden sich östlich des Hafens Neuenschleuse. In der stromabseitigen Hälfte der Hahnöfer NE befinden sich zudem mehrere Dünenfelder. 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.

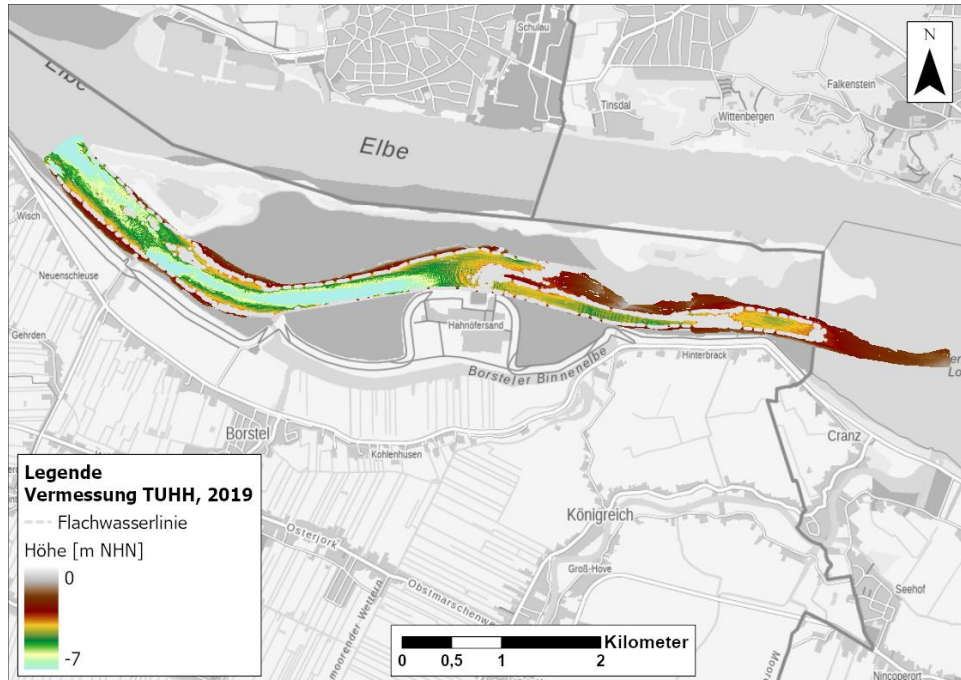


Abbildung 51: Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebelnelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 13.05.-16.05.2019

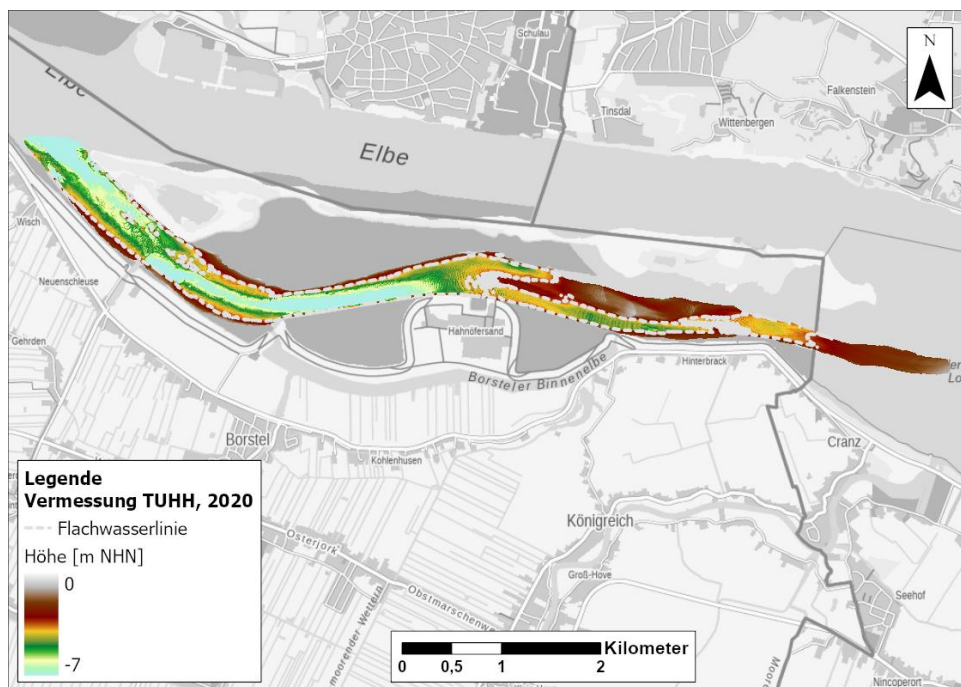


Abbildung 52: Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 25.08.-09.09.2020

4.2.2 Lühesander Süderelbe

Die Lühesander Süderelbe ist eine der kürzeren Nebenelben. In den beiden digitalen Geländemodellen (Abbildung 53f) 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 Jahrestopographie 2020 der Lühesander Süderelbe (Abbildung 54) weist eine deutlich bessere Abdeckung als 2019 (Abbildung 53) auf, wodurch die morphologischen Merkmale deutlicher zu erkennen sind. Das digitale Geländemodell 2020 deckt 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 der Lühesander Süderelbe.

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 flacher wird. 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.

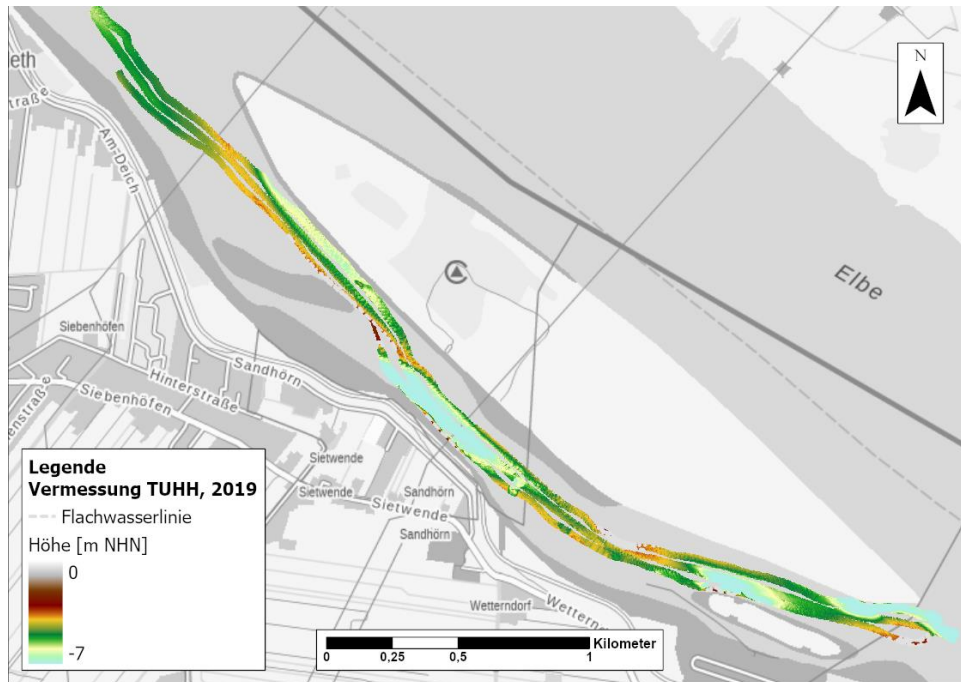


Abbildung 53: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 24.06.2019

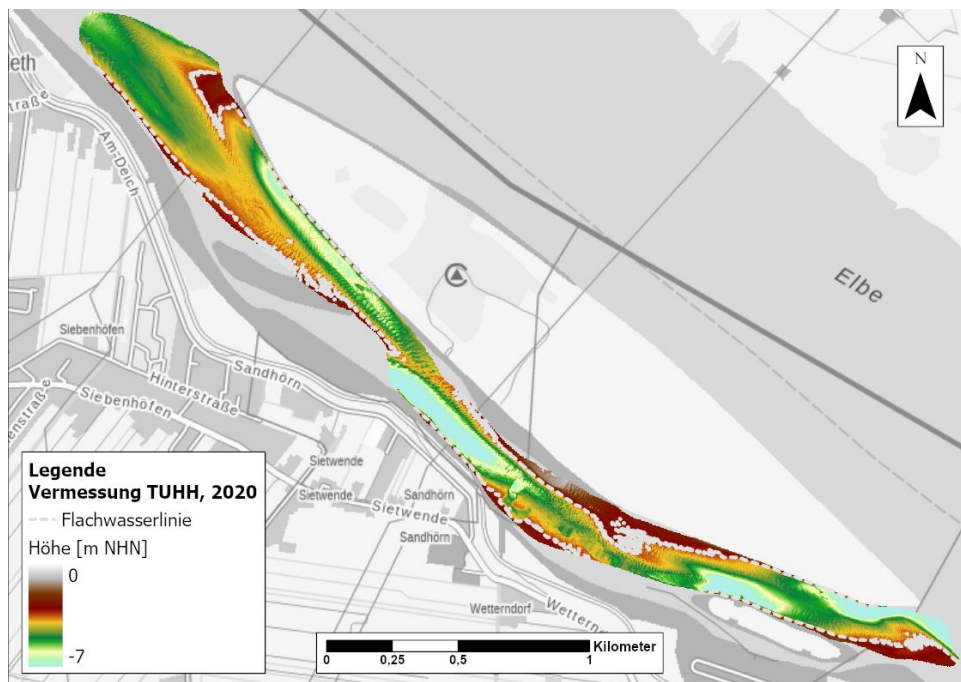


Abbildung 54: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 28.08.2020

4.2.3 Haseldorfer Binnenelbe

Die Haseldorfer Binnenelbe schließt stromaufseitig an die Pagensander Nebenelbe an und ist insgesamt sehr flach (Abbildung 55f). In diesem Übergangsbereich befindet sich eine Rinne mit Tiefen von ca. NHN-4 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 (Dwarsloch), die mit einer Ausnahme am Übergang zum Bauernloch (bis NHN-5 m) in etwa eine Tiefe von NHN-2 bis NHN-3 m aufweist.

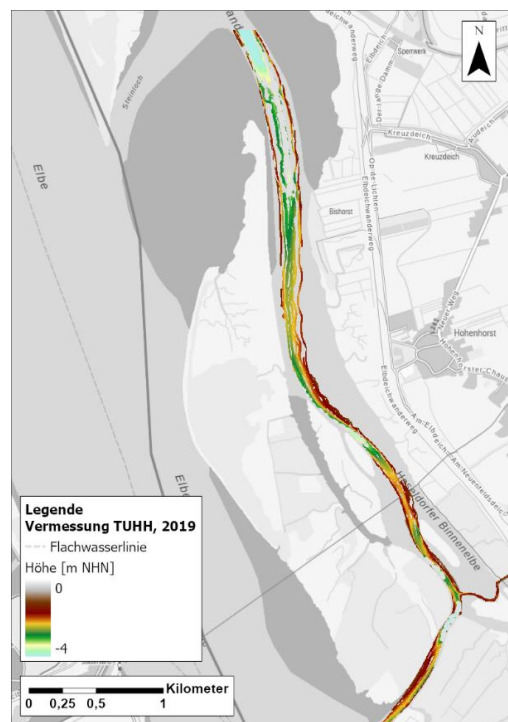


Abbildung 55: Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 24.06. – 30.06.2019

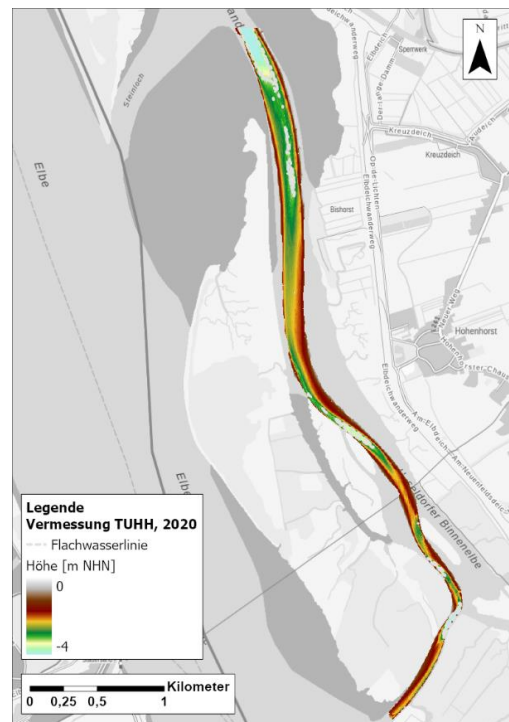


Abbildung 56: Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 15.06.-16.06..2020

4.2.4 Pagensander Nebelbe

Die Pagensander NE weist, wie die Hahnöfer NE, in der stromabseitigen Hälfte deutlich größere Tiefen auf als in der stromaufseitigen Hälfte (Abbildung 57f). Im Vergleich zur Hahnöfer NE sind die Sohlhöhen in der stromabseitigen Hälfte mit NHN-7 m und darüber 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 Elbnebenflüsse Krückau und Pinnau. Im Mündungsbereich der beiden Flüsse sind im DGM kleine Rinnen mit Tiefen bis zu NHN-3 m vorhanden.

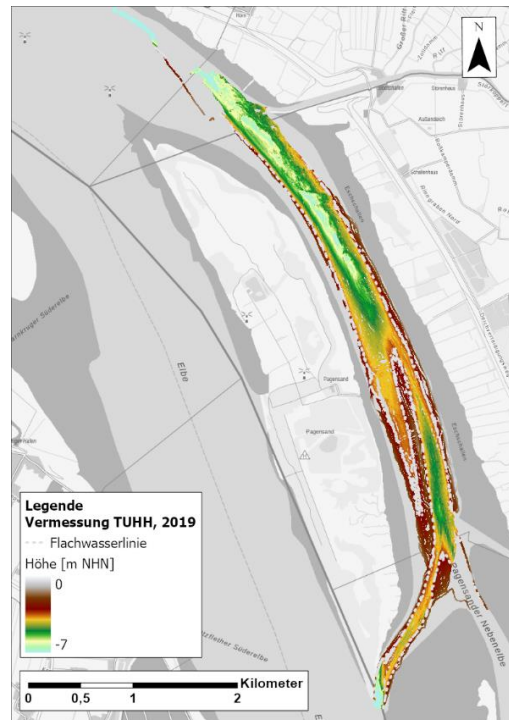


Abbildung 57: Digitales Geländemodell der Pagensander Nebelnelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 16.04. - 26.04.2019

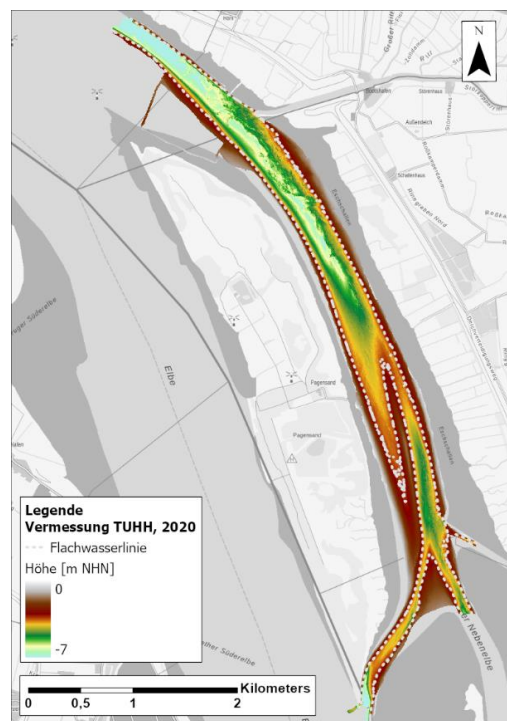


Abbildung 58: Digitales Geländemodell der Pagensander Nebelnelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 17.06.-03.07.2020

4.3 Morphologische Entwicklung

Anhand der im Vorhaben erzeugten digitalen Geländemodelle der Jahre 2019 und 2020 sowie anhand des DGMW2016 ist es möglich, die Morphologie sowie rezente morphologische Entwicklung der Nebelnelben zu analysieren. Hierzu kommen im Vorhaben sowohl räumliche als auch statistische Analysemethoden zum Einsatz 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 Nebelnelbensystem zu analysieren, ohne dabei den Fokus auf einzelne Sohlformen oder Erosions- bzw. Depositionszonen zu setzen, werden die Einzelwerte der Tiefen als Histogramm aufgetragen.

Dabei werden die in Kapitel 4.1 definierten Tiefenbereiche nach (IBP Arbeitsgruppe 2011b) 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 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 Nebelnelben bzw. der Korngrößenverteilung an unterschiedlichen Standorten zur Analyse herangezogen. Hier liefert zunächst das Sedimentkataster Tideelbe, das auf der Küstendaten-Website der WSV verfügbar ist, erste Informationen. Die Daten wurden ausgewertet und sowohl als Karten mit den Standorten der Sedimentproben mit der vorherrschenden Sedimentklasse und dem Entnahmehjahr dargestellt, als auch als Histogramme mit der Anzahl der Proben jede Klasse in jedem Entnahmehjahr. Hieraus ergeben sich Hinweise auf eine mögliche Änderung der vorherrschenden Sedimentklassen, wobei natürlich zu berücksichtigen ist, dass die Proben nur an bestimmten Standorten entnommen wurden.

sichtigen ist, dass sowohl die Probenanzahl je Jahr als auch die Entnahmeorte unterschiedlich sein können. Die Bodengruppe mit ihren jeweiligen Korngrößen wurde in Anlehnung an den Vorschlag in den Metadaten des Sedimentkatasters Tideelbe definiert. Die Klassifizierung ist in den Metadaten dem Parametersatz der Sedimentdaten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zugeordnet und wird im Folgenden wiedergegeben:

Schluffkorn $\rightarrow < 0,063 \text{ mm}$

Feinsand $\rightarrow 0,063 - 0,2 \text{ mm}$

Mittelsand $\rightarrow 0,2 - 0,63 \text{ mm}$

Grobsand $\rightarrow 0,63 - 2 \text{ mm}$

Kies $\rightarrow 2 - 63 \text{ mm}$

4.3.1 Hahnöfer Nebelbe

Die für die Hahnöfer NE berechneten räumlichen Differenzen zeigen Abbildung 59 und Abbildung 62. In allen Darstellungen sind räumliche Muster bestehend aus gelblich (Betrag des Differenz kleiner als 10 cm Unterschied), bläulich (Erosion) und rötlich (Deposition) eingefärbten Flächen. Systematische Unterschiede sind insgesamt nicht auszumachen, was auf einen korrekten absoluten Höhenbezug der Datensätze hinweist.

In der Darstellung für die Entwicklung zwischen 2016 und 2019 (vgl. Abbildung 59) überwiegen insgesamt gelbliche Farben (Betrag der Differenz kleiner als 10 cm Unterschied). In der stromauf gelegenen Hälfte fallen je ein größeres zusammenhängendes Erosionsgebiet (schräg von Nordwest nach Südost verlaufend) und ein Depositionsgebiet (weiter stromauf, ebenfalls schräg von Nordwest nach Südost verlaufend) auf. Ansonsten dominieren kleinere Cluster mit wechselnden Tendenzen, die z.B. auf Transportkörper hindeuten (vgl. Abbildung 60).

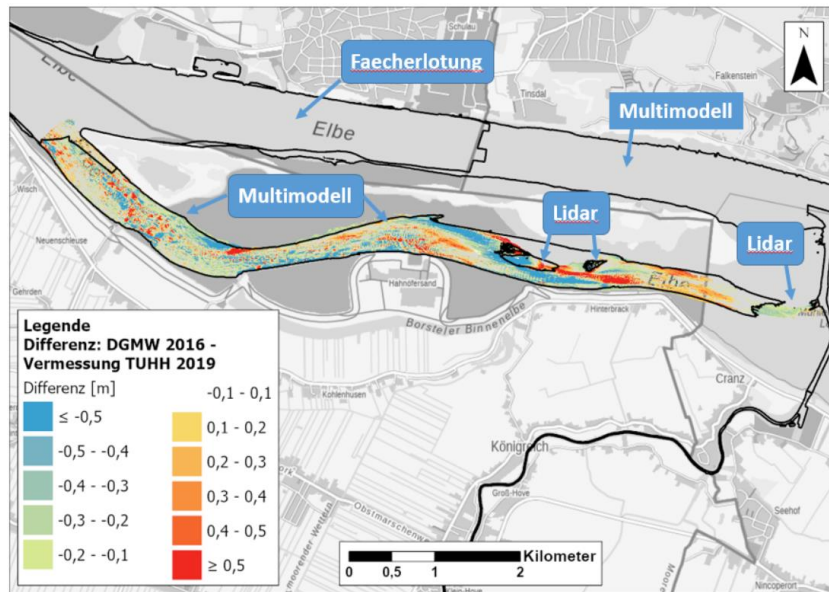


Abbildung 59: Differenzen zwischen dem DGMW 2016 und dem DGM 2019 der TUHH im Bereich der Hahnöfer Nebel (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an

Diese sind im Längsschnitt (Abbildung 61) deutlich im hochauflösenden Datensatz für 2019 erkennbar. Da diese im DGMW 2016 nicht abgebildet sind, ergeben sie in der Differenzendarstellung die typischen Muster. Der höhere Detaillierungsgrad des DGM 2019 liegt im zugrundeliegenden Vermessungsverfahren (Fächerecholotung). Die Höhe der Transportkörper (Dünen) beträgt in den betrachteten Abschnitten einige Dezimeter bis zu einem Meter bei einer Wellenlänge von 10 bis 40 m.

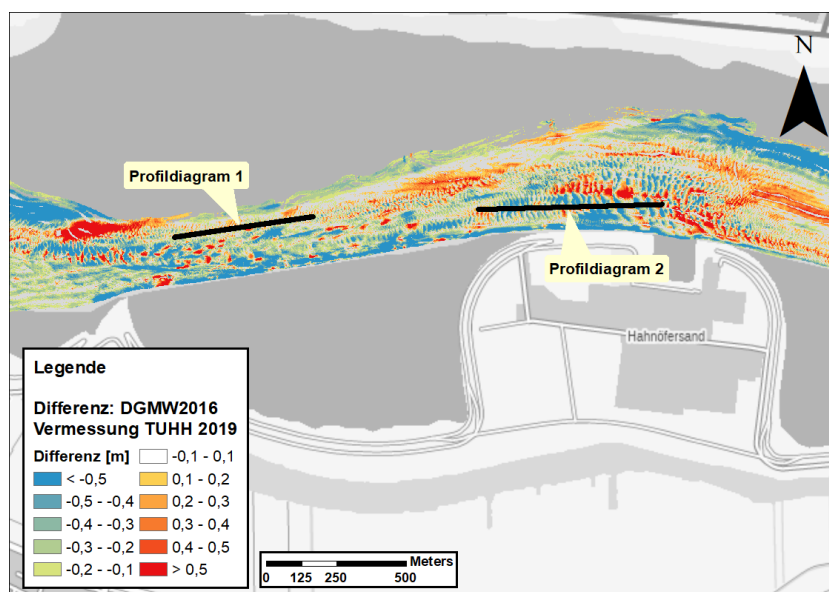


Abbildung 60: Differenzen zwischen dem DGMW 2016 und dem DGM 2019 der TUHH im Zentrum der Hahnöfer NE und Lage der Längsschnitte (Profildigramme)

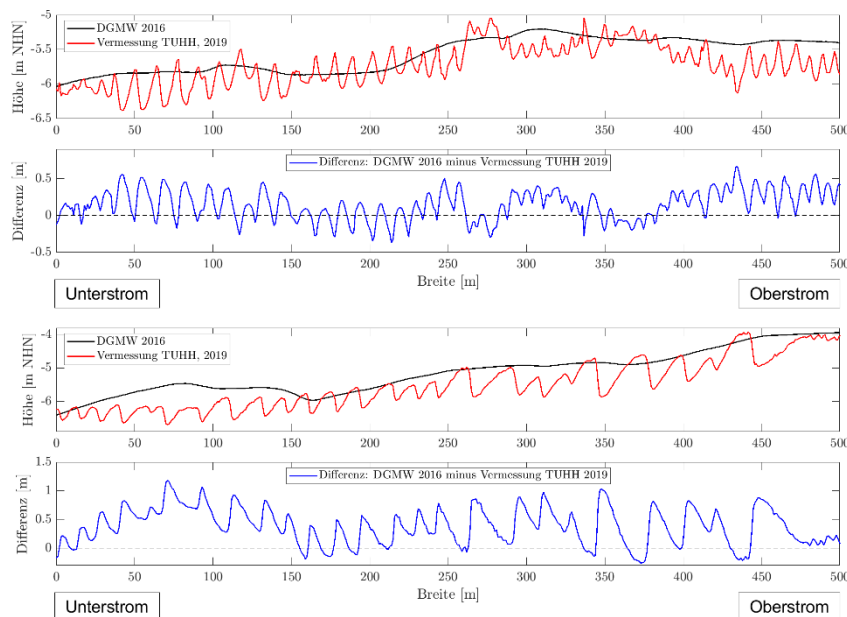
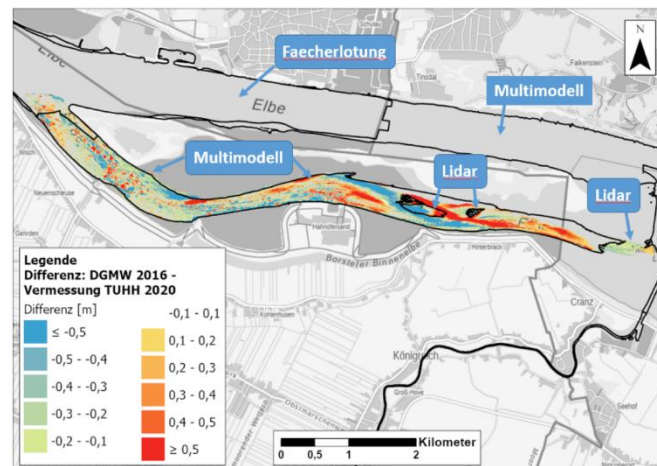


Abbildung 61: Beispielhafte Längsschnitte (Profildigramme) im Zentrum der Hahnöfer NE, oben: Profildigramm 1, unten Profildigramm 2

Die Differenzendarstellung für 2016-2020 (Abbildung 62a) ähnelt vom räumlichen Muster her stark der Differenzendarstellung für 2016-2019 (Abbildung 59). Die Unterschiede gehen aus Abbildung 63a hervor, in der die Differenzen 2019-2020 dargestellt sind. Hier fällt auf, dass sowohl das größere Depositionsgebiet als auch das Erosionsgebiet nicht zu erkennen ist, d.h. diese Veränderungen fanden im Zeitraum 2016-2019 statt. Bei der Bewertung ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Grundlage für das DGMW 2016 im Bereich der Hahnöfer NE hauptsächlich aus dem Multimodell stammt, während das DGM 2019 und 2020 auf einer Fächerlotung basieren.

Der Vergleich zwischen den hochauflösenden Datensätzen aus 2019 und 2020 ermöglicht eine Analyse der vorhandenen Dünenfelder. Wie in Abbildung 63b zu erkennen, weisen die Sanddünen im Zentrum der Nebelbe in beiden Messjahren vergleichbare Höhen, Formen und Wellenlängen auf. In den 15 Monaten zwischen den Messungen sind die Dünen im betrachteten Abschnitt in etwa 15 m in Richtung stromauf gewandert. Die Bewegung in Richtung Oberstrom lässt auf einen dominierenden Flutstrom in diesem Bereich der Hahnöfer Nebelbe schließen, der residueller Geschiebetransport erfolgt hier in Richtung des Mühlenberger Lochs.

a)



b)

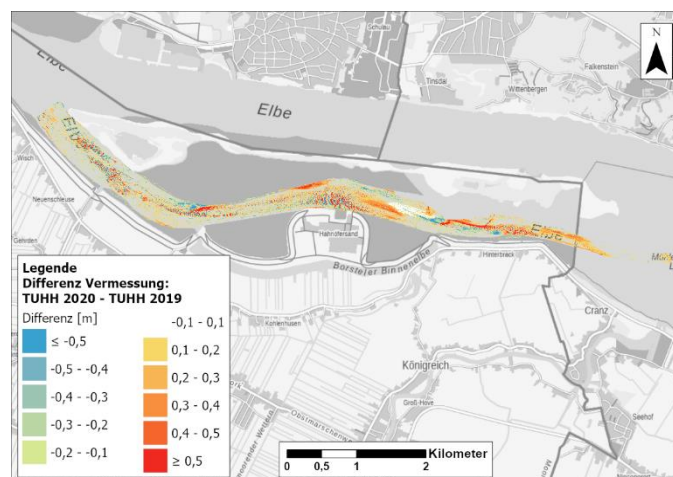
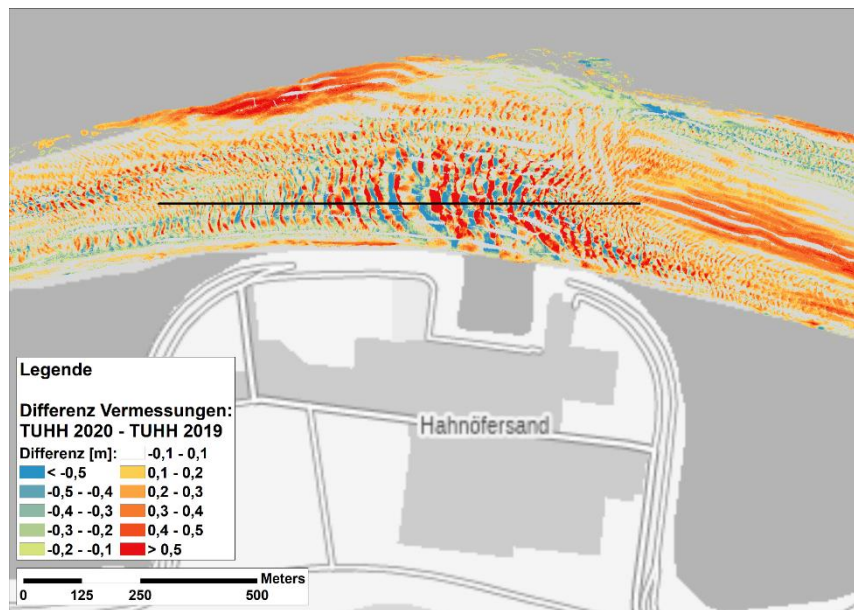


Abbildung 62: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Hahnöfer Nebelnelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an.

a)



b)

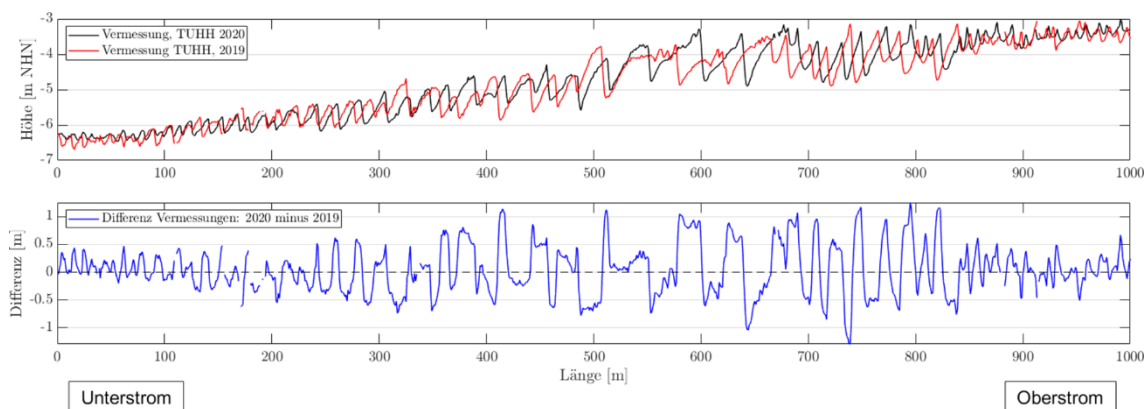


Abbildung 63: a) Differenzen zwischen dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Zentrum der Hahnöfer NE und Lage der Längsschnitte (Profildigramme); b) Beispielhafte Längsschnitte im Bereich der Hahnöfer NE, Lage des Längsschnitts wie in a) markiert

In Abbildung 64 sind die Tiefenwerte der Jahrestopographien als Histogramme aufgetragen. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen 3 Geländemodellen Werte vorliegen. Die Darstellung c) (Summenkurve) und d) (Dichtefunktion) basieren auf dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Der Vergleich der jahresweisen Summenkurven untereinander (Darstellungen a) und c)) zeigt geringe Abweichungen, was auf ein konstantes Gesamtvolumen hindeutet. Aus dem Vergleich der Dichtefunktionen b) und d) geht hervor, dass Rasterzellen mit Höhen um NHN-4m und NHN-2 m im DGMW 2016 häufiger vorkommen als in den DGM 2019 und 2020. Dafür treten in den Jahren 2019 und 2020 Zellen mit Werten im Bereich NHN-5 m häufiger

auf. Im Flachwasser ist zwischen 2016 und 2019 bzw. 2020 eine Verschiebung von geringeren Tiefen (NHN-2m) zu den größeren Tiefen (NHN-3) auszumachen.

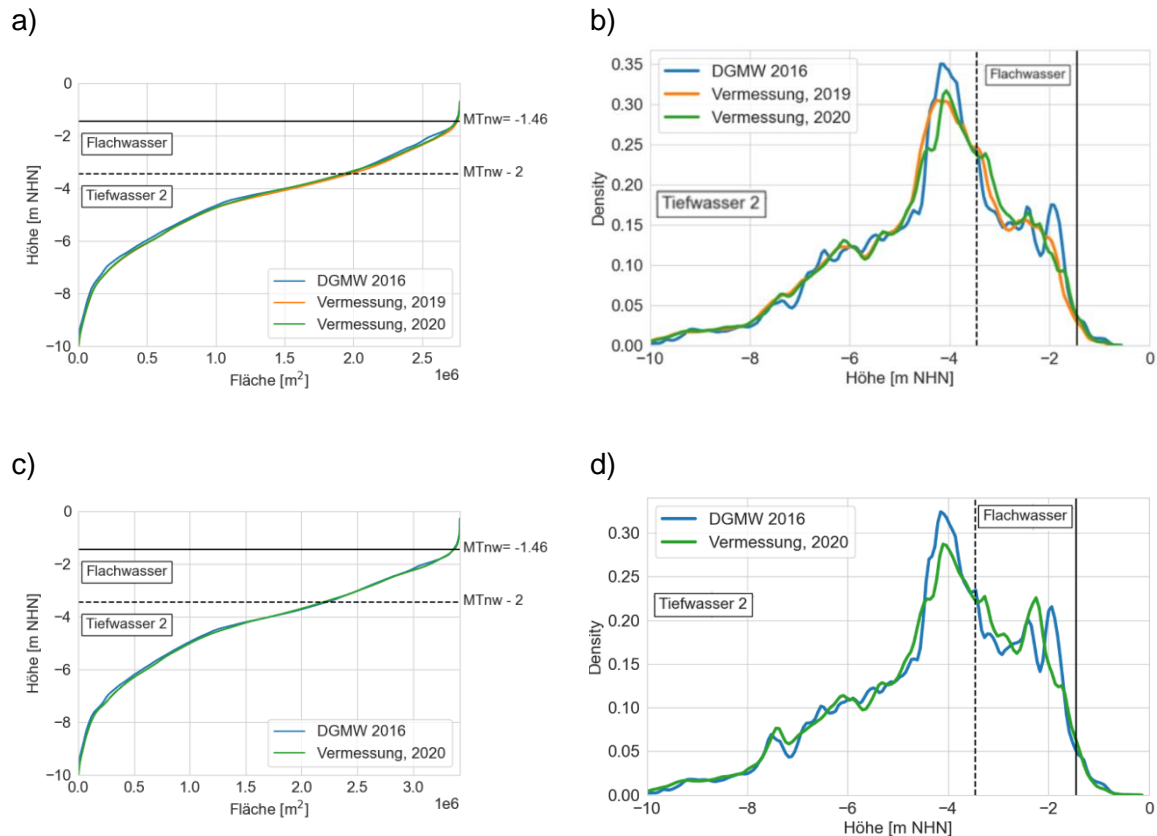


Abbildung 64: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Hahnöfer NE a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie c) und d) auf dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegel­daten Schulau für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

Tabelle 11 zeigt die relativen Änderungen für die Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser in den Jahren 2016-2020. Es fällt auf, dass sich die Tiefwasserzone 2 zwischen 2016 und 2019 leicht vergrößert (+2,2%), während die Flachwasserzone kleiner wird (-5,5%). Für den Zeitraum 2016-2020 ist allerdings ein entgegengesetzter Trend festzustellen. Das Tiefwasser 2 nimmt um 0,3% ab, das Flachwasser nimmt um 1,5% zu. Zwischen den Jahren 2019 und 2020 wird das Tiefwasser 2 um etwa 2,5% kleiner, während sich das Flachwasser um 7,4% vergrößert.

Bei der Interpretation und Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Auswertung nur für die Flächen erfolgt ist, in denen in allen 3 Datensätzen Werte vorliegen. Das DGM 2019 und das DGM 2020 decken vor allem das Tiefwasser 1 und Tiefwasser 2 sowie den Übergang vom Tiefwasser 2 zum Flachwasser ab. Der obere Bereich des Flachwassers sowie die Watten sind hingegen nur teilweise enthalten. Wird der etwas lückenhaftere

Datensatz von 2019 vernachlässigt, vergrößert sich die betrachtete Fläche. Die bestimmte Tendenz aus Tabelle 11 bleibt allerdings mit leicht veränderten Werten (Tiefwasser 2: -0,7% statt -0,3%, Flachwasser +2,1% statt +1,5%) erhalten. Dies lässt darauf schließen, dass auch Auswertungen auf Grundlage der etwas geringeren Fläche in der Tendenz und Größenordnung aussagekräftig sind.

Tabelle 11: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Hahnöfer NE, bestimmt auf Grundlage der Raster des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)

Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2019	2,23%	- 5,48%
2016 – 2020	- 0,3%	1,5%
2019 – 2020	- 2,5%	7,4%

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

Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2020	- 0,7%	2,1%

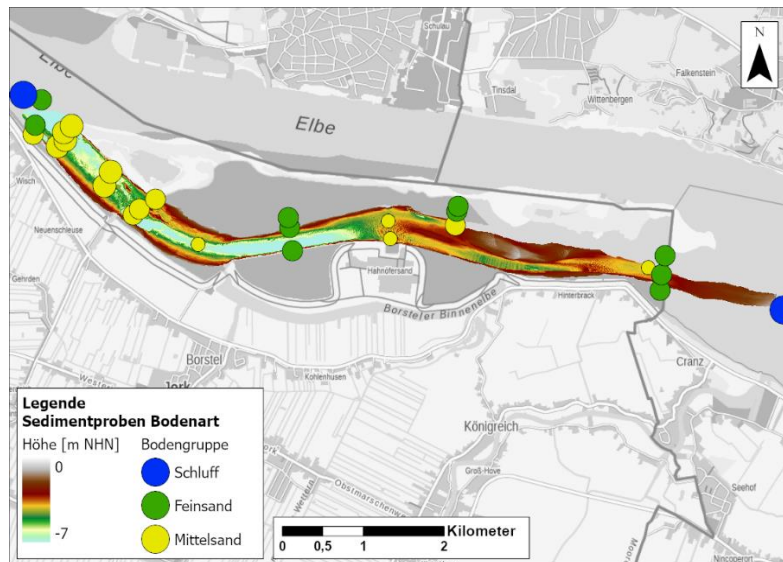
Die ältesten Proben des Sedimentkatasters im Bereich der Hahnöfer NE stammen aus dem Jahr 1994, wobei die höchste Probenzahl im Jahr 2005 erreicht wurde. In der überwiegenden Anzahl der Proben dominieren entweder der Mittelsand- oder der Feinsandanteil (Abbildung 65b). Diese Häufung kann allerdings auch daraus resultieren, dass ein bestimmtes Gebiet intensiv beprobt wurde.

Die räumliche Auswertung der Daten des Sedimentkatasters für die Hahnöfer Nebelbe (Abbildung 65a) zeigt, dass die im stromabgelegenen Drittel entnommenen Bodenproben einen dominierenden Mittelsandanteil aufweisen. In diesem Bereich sind im DGM Sohlformen wie Dünen bzw. vergleichsweise steile Sohlgradienten zu erkennen. Im mittleren sowie im stromaufgelegenen Drittel weisen die Bodenproben sowohl dominierende Fein- als auch Mittelsandanteile auf. Die Proben mit dominierendem Feinsandanteil stammen dabei meist aus flacheren Bereichen. 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 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. Um weitere Aussagen zur Verteilung und Entwicklung der Sedimente in der Hahnöfer NE treffen

zu können, sind weitere Sohlbeprobungen erforderlich und im Rahmen des Vorhabens geplant (s. Kapitel 5.2.1).

a)



b)

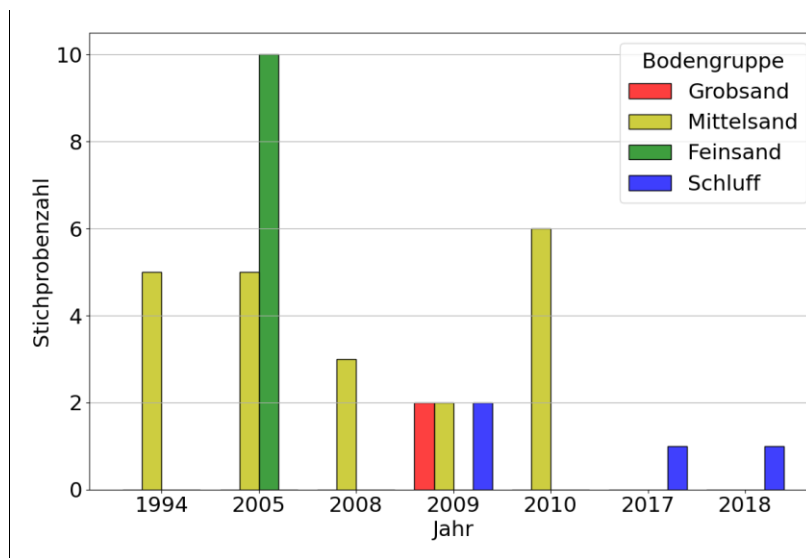


Abbildung 65: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Hahnöfer Nebelnelbe (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe) und b) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee).

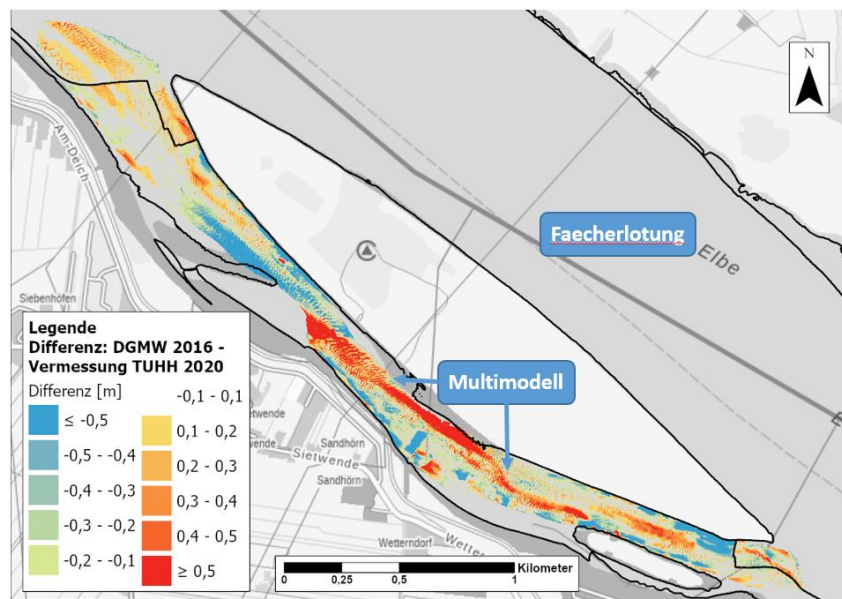
4.3.2 Lühesander Süderelbe

Die für die Lühesander Süderelbe berechneten räumlichen Differenzen sind in Abbildung 66 dargestellt. Insbesondere für den Zeitraum 2016-2020 (Abbildung 66a) werden ausgeprägte Erosions- sowie Depositionsmuster deutlich. Zwischen dem stromaufgelegenen Ende und dem zentralen Bereich erstreckt sich mittig ein langgezogenes Depositionsgebiet, an das sich seitlich (Ufer Lühesand und Ufer Pionierinsel) zum Teil Erosionsgebiete anschließen. Im stromabgelegenen Drittel fällt mittig ein größerer zusammenhängender Erosionsbereich auf. Am stromabseitigen Ende ist tendenziell eine geringe Verlandungstendenz zu erkennen.

Bei der Interpretation und Bewertung ist zu berücksichtigen, dass die Höhen im DGMW 2016 Lühesander Süderelbe fast vollständig aus dem Multimodell stammen. Nur die Anschlussbereiche an die Hauptrinne wurden im DGMW per Fächerlotung erfasst. Der Übergang zwischen Multimodell und Fächerlotung zeichnet sich insbesondere am stromaufseitigen Ende in der Differenzendarstellung (Abbildung 66a) deutlich ab. Ein geschlossener blauer Bereich (Multimodell) geht abrupt über in einen gelblichen Bereich (Fächerlotung). Die Bathymetrie in diesem Bereich (Abbildung 54) weist lokal Tiefen größer als 7 m mit steilen Gradienten auf und wird vom Multimodell vermutlich nicht ausreichend genau approximiert.

In der Differenz 2019-2020 (Abbildung 66b) zeichnet sich zumindest im zentralen Drittel vom Trend her ein ähnliches Muster ab wie in Abbildung 66a. Die Größenordnung ist geringer und aufgrund der weniger guten Abdeckung des DGM 2019 ist die Darstellung ziemlich lückenhaft.

a)



b)

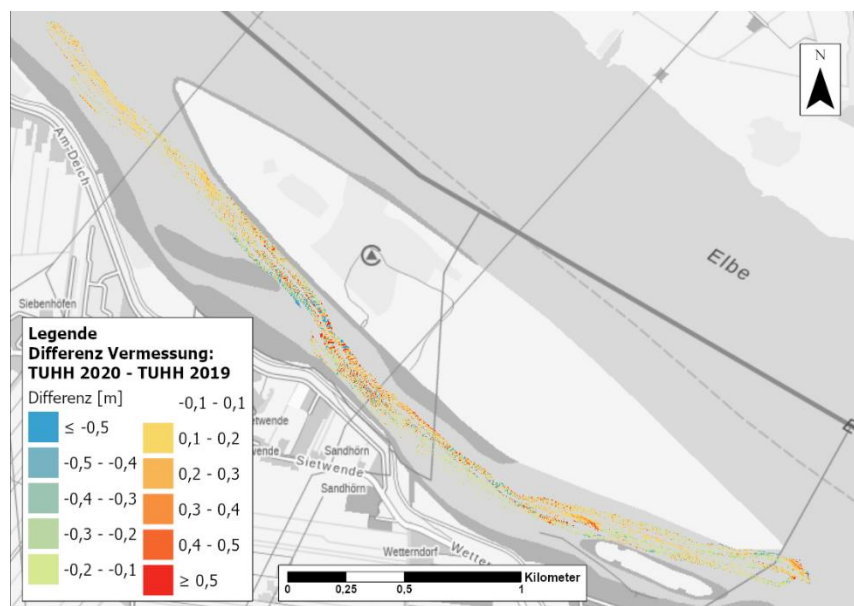


Abbildung 66: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Lühesander Süderelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an.

In Abbildung 67 sind die Sohlhöhen der Jahrestopographien als Histogramme aufgetragen. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen 3 Geländemodellen Werte vorliegen. Die Darstellung c) (Summenkurve)

und d)(Dichtefunktion) basieren auf dem Raster des DGM 2020 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 67 b) als auch auf dem dichteren Raster der DGM 2020 einen sehr ähnlichen Verlauf. Allerdings ist der Anteil des Flachwassers 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 47,6% berechnet, auf dem dichteren Raster des DGM 2020 (Tabelle 14) beträgt die Abnahme hingegen nur 8,5%. Der große Unterschied ist begründet durch die von den Vermessungsdaten abgedeckte Fläche, die im DGM 2020 deutlich größer ist.

Somit lässt sich anhand des Rasters des DGMW 2020 insbesondere für das Flachwasser ein deutlich realistischeres Bild der morphologischen Entwicklung ableiten. Allerdings ist zu beachten, dass auch in diesem Raster nicht der gesamte Anteil des Flachwasserbereichs erfasst ist. Für das Tiefwasser 2, das insgesamt in allen Datensätzen einen deutlich größeren Anteil ausmacht, bleiben für beide Raster (2019,2020) sowohl Trend (Zunahme) als auch Größenordnung (ca. 1%) erhalten, was die Robustheit der Aussage deutlich macht.

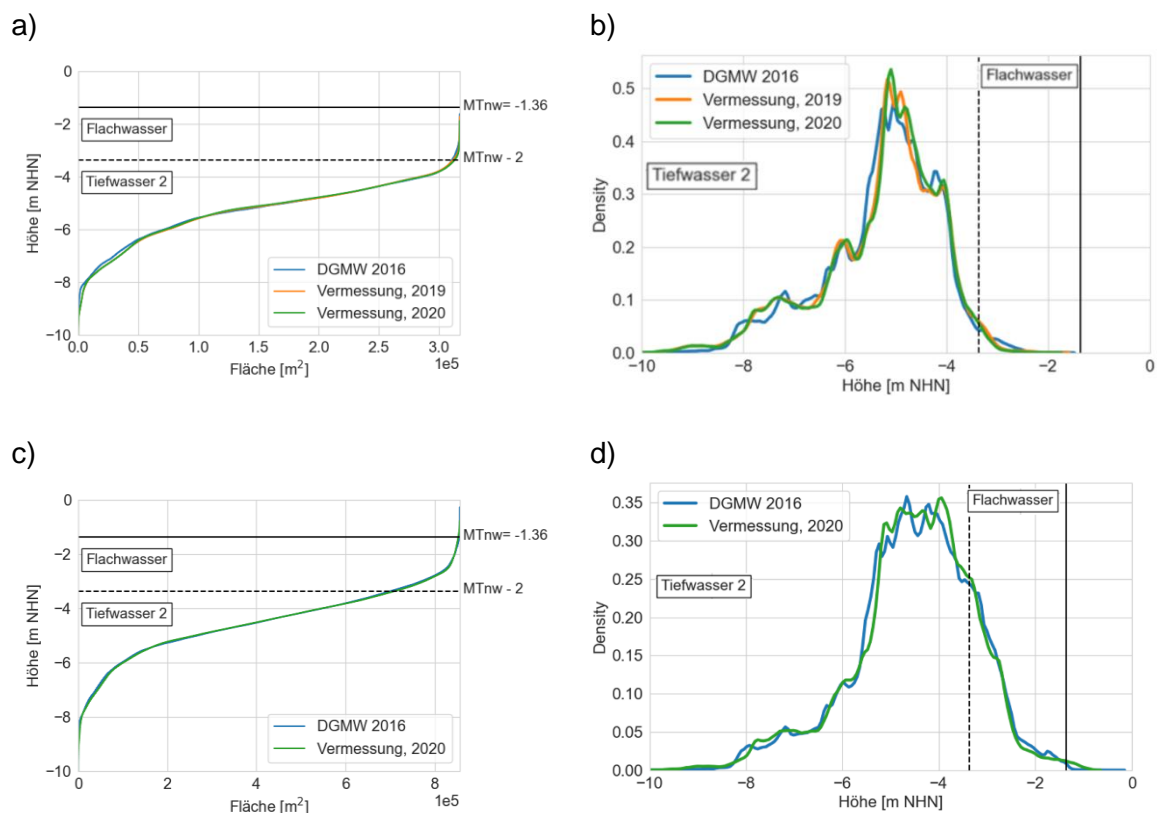


Abbildung 67: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Lühesander Süderelbe a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH

sowie c) und d) auf dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Hetlingen für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

Tabelle 13: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Lühesander Süderelbe, bestimmt auf Grundlage der Raster des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)

Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2019	0,4%	- 24,8%
2016 – 2020	0,8%	- 47,6%
2019 – 2020	0,4%	- 30,3%

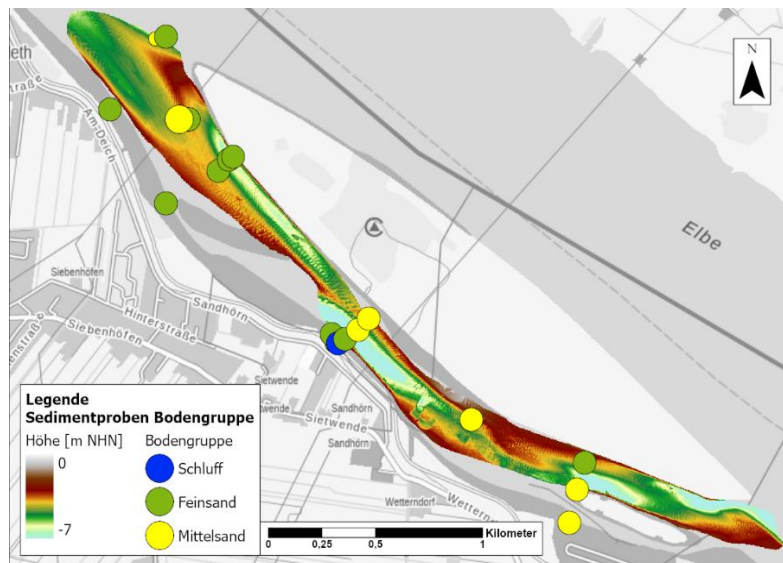
Tabelle 14: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Lühesander Süderelbe, bestimmt auf Grundlage der Raster des DGM 2020 TUHH

Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2020	1,3%	- 8,5%

Die dominierenden Sohlensedimente der Lühesander Nebelbe sind hauptsächlich Fein- und Mittelsand (Abbildung 68a). Im stromabgelegenen Drittel der Nebelbe, der durch flachere Gradienten und weniger Sohlformen gekennzeichnet ist, zeigt sich mit Ausnahme einer Probe (Mittelsand) aus dem Dünenfeld an der Inseleite ein dominierender Feinsandanteil in den Proben. Im zentralen und stromauf gelegenen Drittel, die durch steilere Gradienten und Sohlformen geprägt sind, dominieren Mittelsandanteile in den Proben.

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

a)



b)

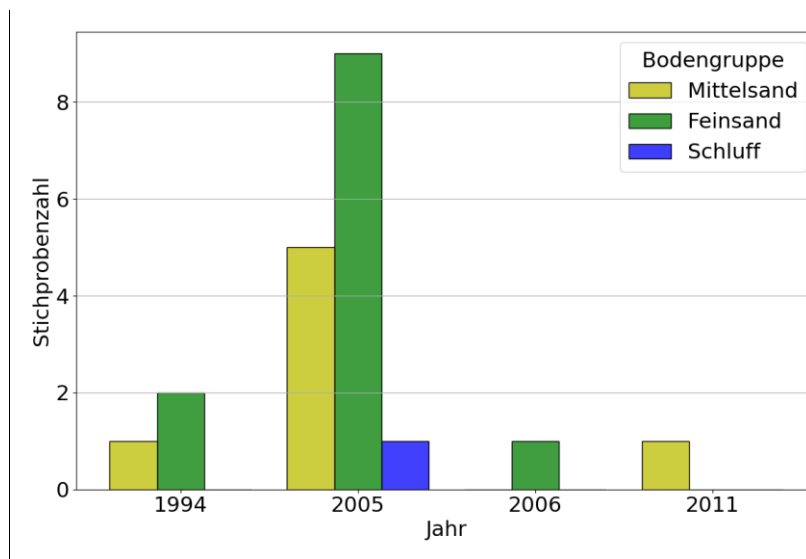


Abbildung 68: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Lühesander Süderelbe (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe) und b) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee)

4.3.3 Haseldorfer Binnenelbe

Die für die Haseldorfer BE berechneten räumlichen Differenzen sind in Abbildung 69 dargestellt. Sowohl für den Zeitraum 2016-2020 als auch den Zeitraum 2019-2020 dominieren Bereiche mit Verlandungstendenz (rote Farben). Größere zusammenhängende Bereiche mit Verlandungstendenz befinden sich am Übergang zur Pagensander NE sowie auf der Innenseite der Krümmung in der Mitte der Haseldorfer BE. In der Gesamtschau ähneln sich die Muster der Tendenzen für die Zeiträume 2016-2020 und 2019-2020, wobei sich die Größenordnungen aufgrund des unterschiedlichen zeitlichen Abstands unterscheiden. In der südlichen Hälfte fällt in Abbildung 69a) ein größerer Bereich mit abnehmenden Sohlhöhen auf. Hier könnte es sich entweder tatsächlich um einen Erosionsbereich handeln oder der Unterschied ist auf die Verwendung unterschiedlicher Vermessungsmethoden (Lidar, Ersatzsystem im DGMW 2016 vs. Fächerlotung DGM 2020) zurückzuführen. Aufgrund der fehlenden Abdeckung im DGM 2019 können hierzu in Abbildung 69b) keine Aussagen gemacht werden.

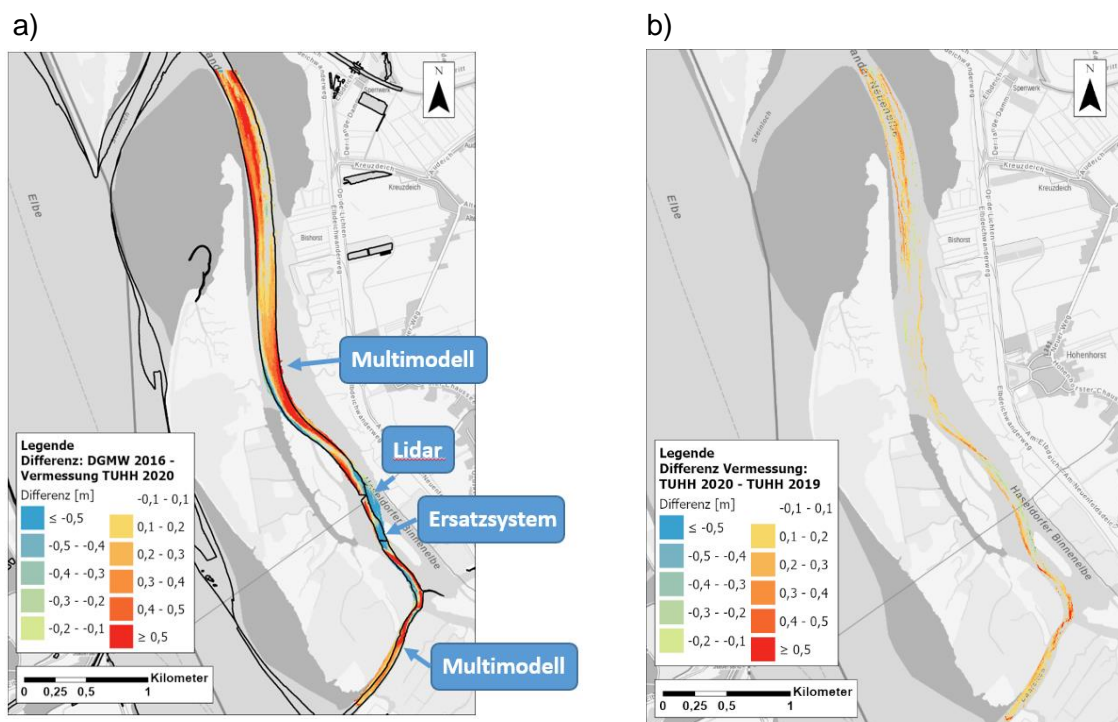


Abbildung 69: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an

In Abbildung 70 sind die Tiefenwerte der Jahrestopographien als Histogramme aufgetragen. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen 3 Geländemodellen Werte vorliegen. Die Darstellung c) (Summenkurve) und d) (Dichtefunktion) basieren auf dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Der

Vergleich der jahresweisen Summenkurven untereinander zeigt eine Volumenabnahme zwischen 2016-2019, die sich auch zwischen 2019-2020 fortsetzt. Der Großteil der Rasterzellen 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 69 bestätigt. Konkret nehmen die Rasterzellen mit Werten zwischen NHN-5m und NHN-3,5m über die Zeit ab und die Rasterzellen mit Werten zwischen NHN-3,5m und NHN-3m sowie zwischen NHN-2m und NHN+0m zu. Zudem flacht der klare Peak für das DGMW 2016 bei NHN-2,5m in den Folgejahren deutlich ab.

Die relativen Änderungen sind in Tabelle 15 für das weniger dichte Raster des DGM 2019 und in Tabelle 16 für das dichtere Raster des DGM 2020 dargestellt. Für die Fläche des Raster 2020 wurde eine Abnahme des Tiefwassers 2 um 48,7% sowie eine Zunahme des Flachwassers um 6,6% bestimmt. Dieser grundsätzliche Trend zeigt sich in ähnlicher Größenordnung auch für die Fläche des Rasters 2019, was wiederum die Robustheit verdeutlicht. Die große relative Änderung des Tiefwassers 2 ist auf den vergleichsweise geringen absoluten Flächenanteil von etwa 10 ha zurückzuführen.

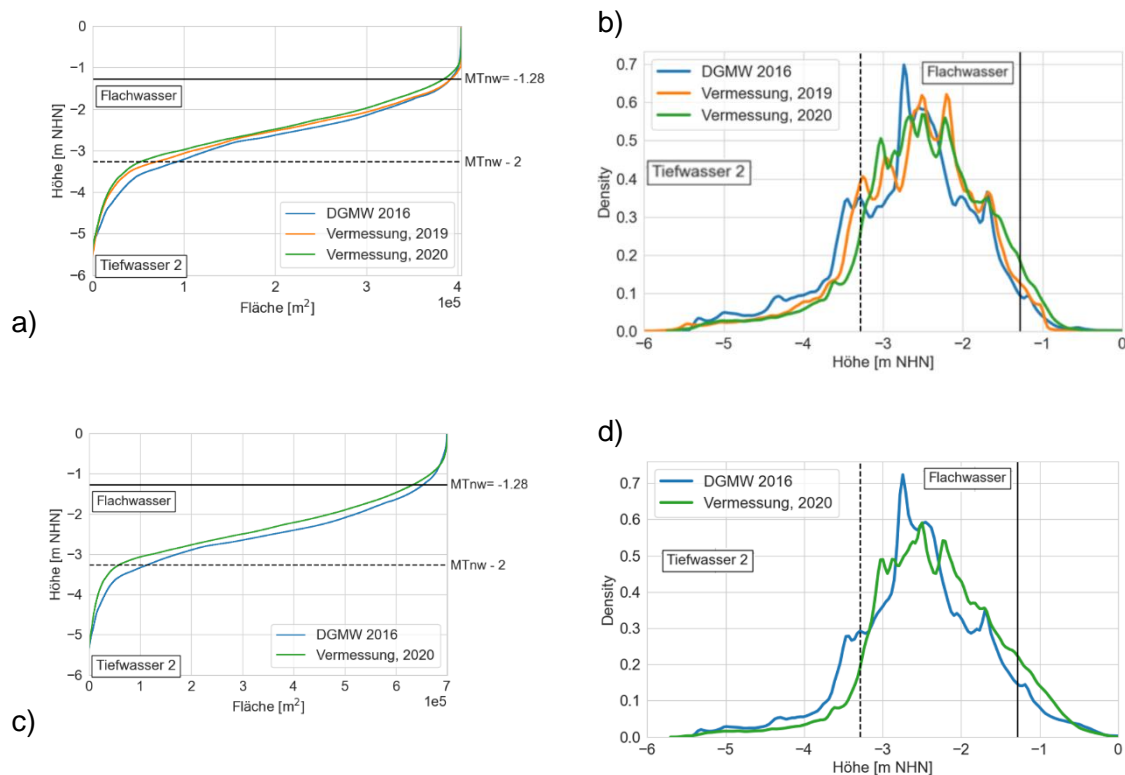


Abbildung 70: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Haseldorfer Binnenelbe a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie c) und d) auf dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Kollmar für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

Tabelle 15: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)

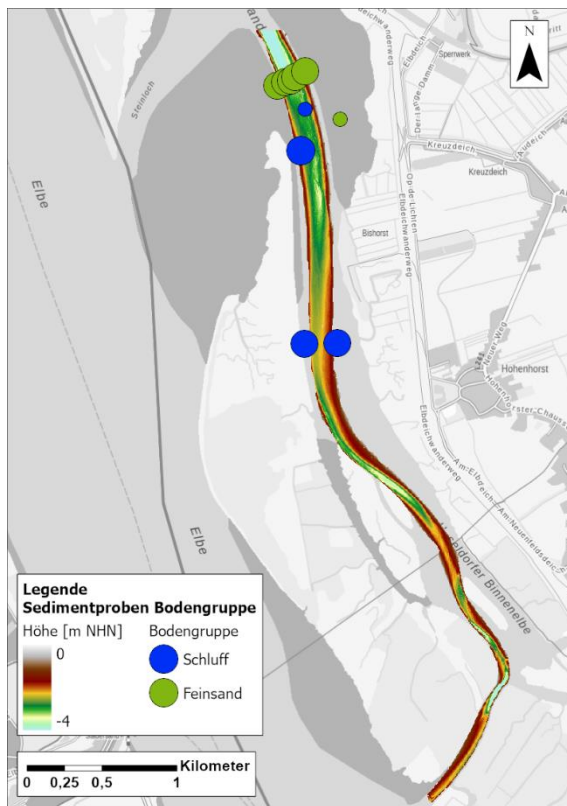
Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2019	- 24,7%	7,75%
2016 – 2020	- 43,4%	10,9%
2019 – 2020	- 24,8%	2,9%

Tabelle 16: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2020 TUHH

Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2020	- 48,7%	6,6%

Für die Haseldorfer BE liegen im Sedimentkataster nur sehr wenige Proben vor (Abbildung 71a). Von den insgesamt 10 Proben stammen 7 aus dem Jahr 2005, zwei aus 1994 und eine aus 2006. In allen Proben eines Querschnitts im Übergangsbereich zur Pagensander NE dominieren Feinsandanteile (Abbildung 71b). Weitere Proben aus den Böschungsbe- reichen weisen einen dominierenden Schluffanteil auf. Um weitere Aussagen zur Verteilung und Entwicklung der Sedimente in der Pagensander Nebelnelbe treffen zu können, sind weitere Sohlbeprobungen erforderlich.

a)



b)

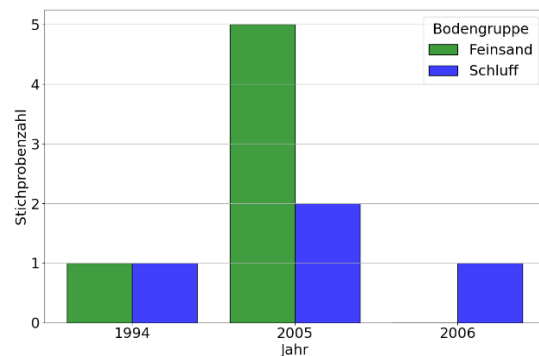


Abbildung 71: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Pagensander Nebelbe (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe) und b) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee)

4.3.4 Pagensander Nebelbe

Die für die Pagensander NE berechneten räumlichen Differenzen sind in Abbildung 72 dargestellt. Sowohl für den Zeitraum 2016-2020 als auch den Zeitraum 2019-2020 dominieren visuell Bereiche mit Verlandungstendenz (rote Farben). Die Muster aus Erosion und Deposition der beiden Differenzendarstellungen ähneln sich in Abbildung 72 a) und b), wobei die Größenordnung in b) aufgrund des kürzeren Zeitraums insgesamt kleiner ist.

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. Ein schmaler, zusammenhängender Bereich mit leichter Erosionstendenz ist mittig im Querprofil zu erkennen. Hinzu kommen zwei ufernahe Bereiche im Steinloch.

a)

b)

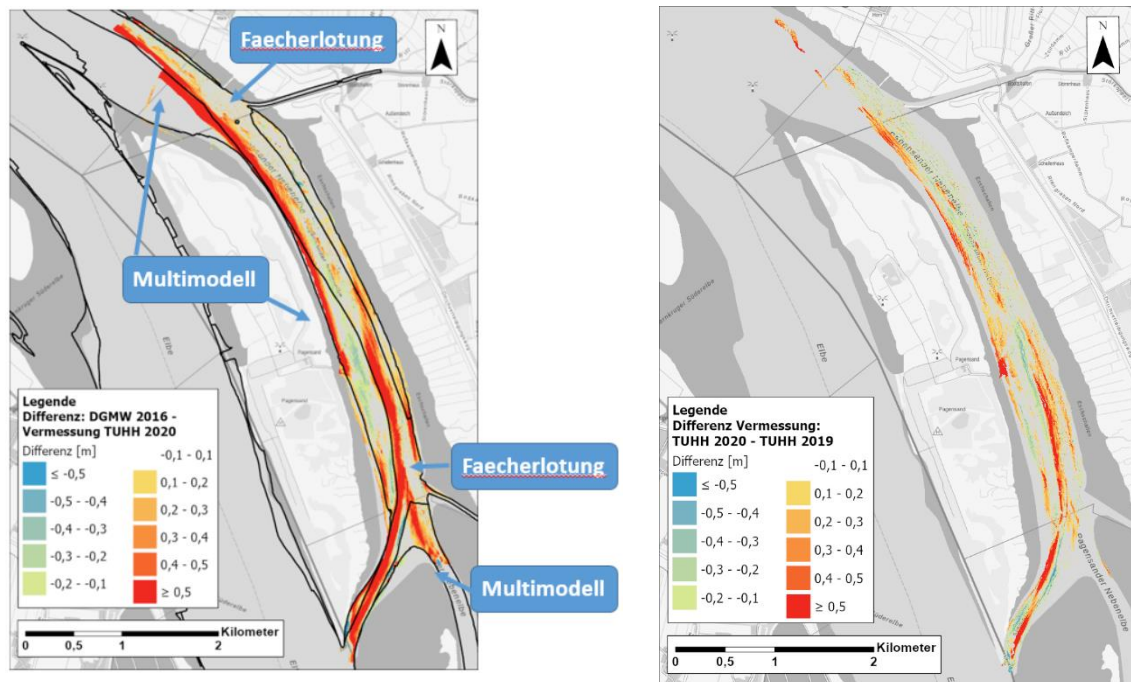


Abbildung 72: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Pagensander NE (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an

In Abbildung 73 sind die Tiefenwerte der Jahrestopographien als Histogramme aufgetragen. Die Darstellungen a) (Summenkurve) und b) (Dichtefunktion) basieren auf den Rasterzellen, für die in allen 3 Geländemodellen Werte vorliegen, d.h. dem Raster des DGM 2019. Die Darstellung c) (Summenkurve) und d) (Dichtefunktion) basieren auf dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Der Vergleich der jahresweisen Summenkurven untereinander zeigt eine deutliche Volumenabnahme zwischen 2016-2019, die sich auch zwischen 2019-2020 fortsetzt. Anhand der Dichtefunktionen ist zu erkennen, dass sich der Anteil von Rasterzellen mit Werten zwischen NHN-7m und NHN-3m verringert zu Gunsten der Rasterzellen mit Werten zwischen NHN-3m und NHN+0m, d.h. die Flachwasserzonen werden größer, die Zone Tiefwasser 2 wird kleiner. Die relativen Änderungen sind in Tabelle 17 für das weniger dichte Raster des DGM 2019 und in Tabelle 18 für das dichtere Raster des DGM 2020 dargestellt. Für letzteres wurde eine Abnahme des Tiefwassers 2 um 12,1% sowie eine Zunahme des Flachwassers um 25% bestimmt. Bei der Bewertung und Interpretation ist zu beachten, dass schwerpunktmäßig vor allem der untere Flachwasserbereich erfasst ist.

Tabelle 17: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Pagensander NE , bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)

Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2019	- 6,5%	23,6%
2016 – 2020	- 10,1%	36%
2019 – 2020	- 3,9%	10%

Tabelle 18: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Pagensander NE, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2020 TUHH

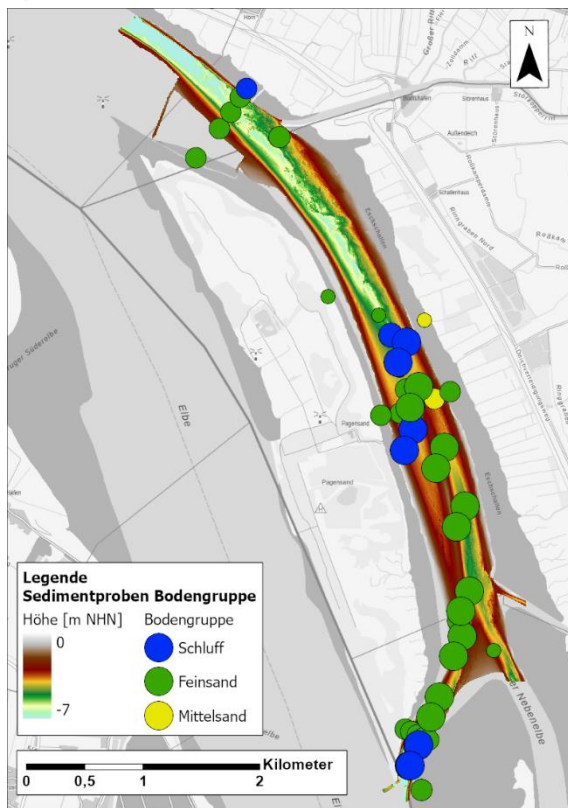
Zeitraum	Tiefwasser 2	Flachwasser
2016 – 2020	- 12,1%	25%

Die ältesten Proben des Sedimentkatasters im Bereich der Pagensander Nebelbe stammen aus dem Jahr 1994. Die meisten Proben stammen aus den Jahren 2005 und 2018 (Abbildung 73b). 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 73a) 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 Gradienten aufweist, wurde eine Probe entnommen in der der Feinsandanteil dominiert. Ansonsten sind in der nördlichen Hälfte nur wenige Proben vorhanden. 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).

Um weitere Aussagen zur Verteilung und Entwicklung der Sedimente in der Pagensander NE treffen zu können, sind weitere Sohlbeprobungen erforderlich und im Rahmen des Vorhabens geplant (s. Kapitel 5.2.1).

a)



b)

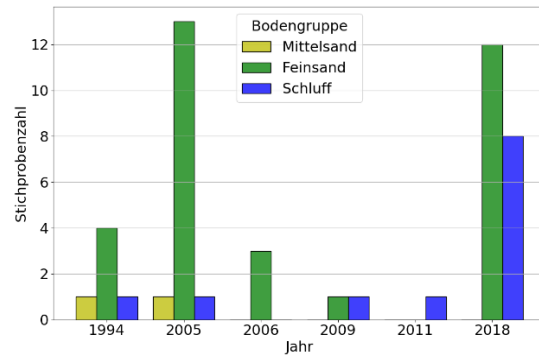


Abbildung 73: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Pagensander Nebelnebel (je größer der Kreis, desto aktueller ist die Probe) und b) der Anzahl der Sedimentproben und dominierende Bodengruppe über die Jahre (Quelle: Sedimentkataster 1992-2018 WSA Elbe-Nordsee)

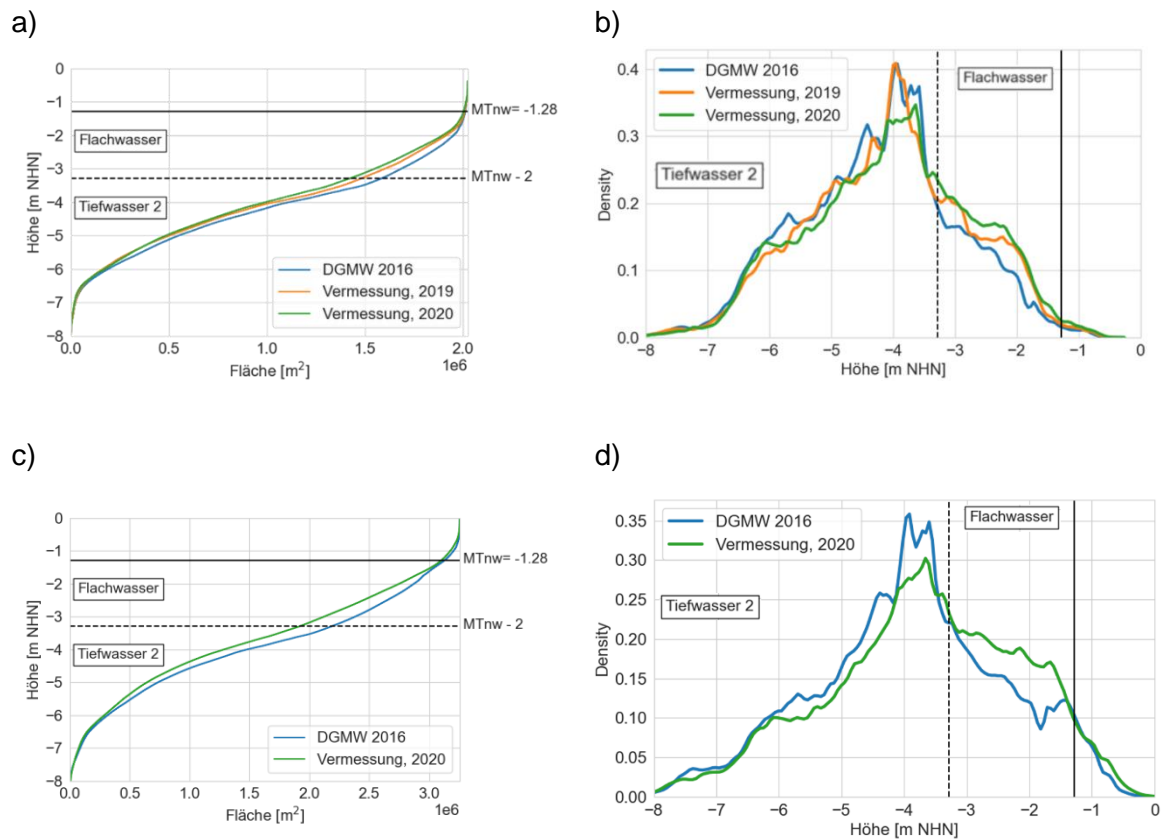


Abbildung 74: : Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Pagensander NE a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie c) und d) auf dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Kollmar für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet

4.3.5 Zusammenfassung

Für jede untersuchte Nebelbe sind in Tabelle 19ff zusammenfassende Übersichten zur Morphologie und zur aktuellen (2016-2020) morphologischen Entwicklung gegeben.

Tabelle 19: Morphologie und aktuelle (2016-2020) morphologische Entwicklung der Hahnöfer NE

Hahnöfer NE	Stromaufseitige Hälfte	Stromabseitige Hälfte
Topographie	Flacher als stromabseitige Hälfte (NHN-5m und höher, ansteigend bis zum Mühlenberger Loch auf NHN-2,5m, im Mühlenberger Loch NHN+0m und darüber)	Tiefer als stromaufseitige Hälfte (NHN-6 m und darunter) Tiefe Rinne zwischen Hafen Neuschleuse 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. 1m, Wellenlänge 10-40m, Verlagerung in Richtung stromauf um ca. 10-15m/Jahr
Morphologische Entwicklung 2016-2020	Größere zusammenhängende Erosionsbereiche Größere zusammenhängende Depositionsbereiche	Räumliche variierende Cluster aus kleineren Erosionsbereichen und Depositionsbereichen
	Geringer Rückgang der Tiefwasser ² - Fläche Geringe Zunahme der Flachwasserfläche Insgesamt schwache Verlandungstendenz im Bereich der Rinne, starke Verlandungstendenz im Bereich Mühlenberger Loch	
Morphologische Entwicklung 2019-2020	Ähnlich 2016-2019	Ähnlich 2016-2019
Sohlsedimente (d_m)	Hauptsächlich Feinsand, Schluff im Mühlenberger Loch	Hauptsächlich Mittelsand, Feinsand und Schluff im Anschluss zur Elbe

Tabelle 20: Morphologie und aktuelle (2016-2020) morphologische Entwicklung der Lühesander SE

Lühesander Süd- relbe	Stromaufseitiges Drittel	Mittleres Drittel	Stromabseitiges Drittel
Topographie	Größte Tiefen, räumliche variabel, steile Gradienten Tiefere Bereiche, räumlich begrenzt nahe der Südspitze Lühesand und nördlich der Pionierinsel	Größere Tiefen Tieferer Bereich, räumlich begrenzt im Bereich des vorge-deichten Abschnitts Flacherer Bereich nahe Festlandufer und nahe Ufer Lühesand	Geringste Tiefen Tieferer Bereich, räumlich begrenzt entlang Ufer Lühesand
Sohlformen	Kleinere Dünenfelder	Größeres Dünenfeld	Kleinere Dünenfelder
Morphologische Entwicklung 2016-2020	Größeres zusammenhängendes Depositionsgebiet Erosionsgebiete nahe Inselufer Lühesand Pionierinsel	Größeres zusammenhängendes Depositionsgebiet	Größerer, zusammenhängender Erosionsbereich
	Gesamtvolumen tendenziell stabil		
Sohlsedimente (d_m)	Mittelsand	Mittelsand	Feinsand

Tabelle 21: Morphologie und aktuelle (2016-2020) morphologische Entwicklung der Haseldorfer BE

Haseldorfer Binnen- elbe	Stromaufseitiges Drittel	Mittleres Drittel	Stromabseitiges Drittel
Topographie	Tiefen von max. NHN-3m, Ausnahme Übergang zum Bauerloch (NHN-5m)	Tiefen von max. NHN-3,5m, flacher werdend in Richtung stromauf	Größte Tiefen (bis NHN-5) in der Rinne am Übergang zur Pagensander NE in Richtung stromauf schnell flacher werdend
Sohlformen	keine	kleines Dünenfeld	keine
Morphologische Entwicklung 2016-2020	Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich Depositionsbereich (evtl. aufgrund unterschiedlicher Vermessungsmethoden)	Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich an der Innenseite der Krümmung (Festlandseitig) schmäler, zusammenhängender Erosionsbereich an der Außenseite der Krümmung (Inselseitig)	Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich
	Deutlicher relativer Rückgang der Tiefwasser2 - Fläche (Achtung: kleine absolute Fläche) Zunahme der Flachwasserfläche Insgesamt Verlandungstendenz		
Sohlsedimente (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 (2016-2020) morphologische Entwicklung der Pagensander NE

Pagensander Nebenelbe	Stromaufseitiges Drittel	Mittleres Drittel	Stromabseitiges Drittel
Topographie	<p>Tiefen von max. NHN-4m im Bereich Steinloch</p> <p>Ausgedehnte Flachwasser-/Wattbereiche an den Ufern zum Festland, zur Insel Pagensand und zum Bishorster Sand</p>	<p>Zwei Rinnen mit Tiefen bis NHN-5m</p> <p>Westliche Rinne läuft flach aus in Richtung stromauf</p> <p>Östliche Rinne läuft aus in Richtung Steinloch und Haseldorfer BE</p> <p>Flachwasser-/Wattbereiche an den Ufern zum Festland und zur Insel Pagensand</p>	<p>Größte Tiefen (bis NHN-7) am Übergang zur Hauptrinne der Elbe, flacher werdende Rinne in Richtung stromauf</p>
Sohlformen	keine	keine	keine
Morphologische Entwicklung 2016-2020	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich im Steinloch</p> <p>Kleinere Erosionsbereiche entlang der Ufer im Steinloch</p>	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich mittig in Richtung Steinloch und in Richtung Haseldorfer BE</p> <p>Schmalere Erosionsbereich mittig</p>	<p>Größerer, zusammenhängender Depositionsbereich entlang des Ufers Pagensand</p>
	<p>Rückgang der Tiefwasser 2 Fläche</p> <p>Zunahme der Flachwasserfläche</p> <p>Insgesamt Verlandungstendenz</p>		
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>Am Übergang zu Hauptrinne Schluff</p>

5 Stand der Arbeiten nach dem zweiten Projektjahr

Das Vorhaben ist in fünf Arbeitspakete untergliedert. Der Zeitplan zur Bearbeitung der Arbeitspakete wurde im Laufe des zweiten Projektjahres angepasst. Gründe hierfür waren zum einen neue Erkenntnisse im Projektverlauf und zum anderen pandemiebedingte Einschränkungen, die eine Verschiebung der ersten Messkampagne um etwa 3 Monate erforderlich machten. Hierdurch war es notwendig, die weiteren Messkampagnen sowie die Arbeiten zur Datenauswertung ebenfalls nach hinten zu verschieben. Der angepasste Zeit- und Arbeitsplan sowie die zeitliche Einordnung der Meilensteine und Produkte sind in Tabelle 23 dargestellt. Während es bei den Meilensteinen keine Abweichungen gegenüber der Vorhabenbeschreibung gibt, ist dies bei den Produkten der Fall. Die Fälligkeit wurde für einige Produkte angepasst, außerdem ist für mehrere Produkte zunächst ein Entwurf zu erstellen, der anschließend gemeinsam mit dem WSA Elbe-Nordsee weiterentwickelt und zu einem späteren Zeitpunkt fertiggestellt wird. Schließlich sind 2 neue Produkte hinzugekommen. Dabei handelt es sich um die Produkte P9 *Historische Entwicklung der NE auf Grundlage von Bestandsdaten + Literatur* und P10 *Aktueller Zustand der Nebelnelben und aktuelle morphologische Entwicklung ausgewählter NE auf Grundlage neu erhobener Daten*. Tabelle 24 zeigt den angepassten Produktplan.

Im ersten Projektjahr wurden gemäß Planung Arbeiten in den Arbeitspaketen AP 1.1 „Konzeption“, AP 1.2 „Bestandsdaten“ und AP 2.2 „Fächerlotpeilungen“ durchgeführt und wie geplant abgeschlossen. Darüber hinaus wurden Arbeiten aus AP 2.3 und AP 3.1 vorgezogen. Der erste Meilenstein M1 *Konzeption des Vorhabens abgeschlossen* wurde plangemäß erreicht. Das daraus resultierende Produkt P1 *Bericht zur Konzeption des Vorhabens*, wurde fertiggestellt und bildet seitdem das Kapitel 2 dieses Berichts. Die Arbeiten an AP 1.3 *Datenqualität* wurden ebenfalls begonnen, konnten aber nicht abgeschlossen werden, da sich im Laufe der Arbeiten herausstellte, dass zu diesem Zeitpunkt im Vorhaben kein sinnvoller Abschluss möglich ist. Hierzu bedarf es noch weiterer Informationen und Erkenntnisse, die erst im weiteren Verlauf des Vorhabens in ausreichendem Umfang (u.a. Erkenntnisse aus den Messungen) verfügbar sein werden. Die Verlängerung der Arbeiten in AP 1.3 wurde im Rahmen der Arbeitstreffen diskutiert und beschlossen. Diese Änderungen sind im Arbeitsplan (Tabelle 24) berücksichtigt.

Im zweiten Projektjahr wurden gemäß angepasstem Arbeitsplan die AP1.3 *Datenqualität* 2.1 *Messkonzept*, 2.2 *Fächerlotpeilungen* und 2.3 *Datenauswertung und –Analyse* bearbeitet. Folgende Produkte wurden plangemäß fertiggestellt:

- P2 *Kriterienkatalog zu Anforderungen an die bathymetrische Vermessung + Datenaufbereitung* im Entwurf (Kapitel 5.1.3)
- P3 *Messkonzept für die Nebelnelben* (Kapitel 4.1).
- P4 *Jährliche konsistente Bathymetrien (Sammelprodukt)* übergeben mit dem letzten Zwischenbericht

- P9 *Historische Entwicklung der Nebelben auf Grundlage von Bestandsdaten + Literatur* (Kapitel 3)
- P10 *Aktueller Zustand der Nebelben und aktuelle morphologische Entwicklung ausgewählter NE auf Grundlage neu erhobener Daten* im Entwurf (Kapitel 4.2 und 4.3)

In der Gesamtbetrachtung der Zeit- und Arbeitsplanung ist der Zeitplan am Ende des zweiten Projektjahres eingehalten.

Tabelle 23: Zeit- und Arbeitsplan Vorhaben Nebeneiben inklusive der Produkte und Meilensteine

[illegible]

Tabelle 24: Meilensteine im Vorhaben Systemverständnis Nebelben

Bez.	Beschreibung	Fälligkeit (alt) PM	Fälligkeit Entwurf (neu) PM	Fälligkeit Fertig (neu) PM
P1	Konzeption des Vorhabens	8		
P2	Kriterienkatalog zu Anforderungen an die bathymetrische Vermessung + Datenaufbereitung	12	30	42
P3	Messkonzept	16		24
P4	Jährliche konsistente Bathymetrien (Sammelprodukt)	24		18, 30, 42
P5	Kriterienkatalog zur Auswertung und Analyse von Vermessungsdaten	24	36	48
P6	Bewertung von Strömungsmustern in der Pagensander NE für unterschiedliche Strömungssituationen	36	36	42
P7	Analyse und Bewertung der Auswirkungen von Maßnahmen in der Pagensander NE	46		48
P8	Abschlussbericht	48		48
P9	Historische Entwicklung der NE auf Grundlage von Bestandsdaten + Literatur	-		24
P10	Aktueller Zustand der Nebelben und aktuelle morphologische Entwicklung ausgewählter NE auf Grundlage neu erhobener Daten	-	24, 36	48

5.1 Grundlagen und Konzeption (AP 1)

5.1.1 Konzeption (AP 1.1)

Im Rahmen der Konzeption erfolgt die konkrete Ausgestaltung des Vorhabens, d.h. die Verfeinerung der Zielsetzung und die Planung der konkret umzusetzenden Arbeiten zur Erreichung der Zielsetzung unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen. Das in der Vorhabenbeschreibung / im Kooperationsvertrag dargestellte Grundgerüst der Konzeption wird übernommen und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Aspekte weiter ausgebaut. Zum einen sind vom WSA Hamburg spezifizierte und im Rahmen des Forums Tideelbe diskutierte Anforderungen eingeflossen, die im Kern auf dem Leitgedanken der Vereinbarkeit von Strombau und Naturschutz basieren. Details wurden im Rahmen der Projektbesprechungen im ersten Projektjahr ermittelt und festgelegt. Zum anderen sind die Ergebnisse der in der ersten Projektphase durchgeführten Analysen des Schrifttums und der Bestandsdaten sowie die Erkenntnisse aus den durchgeführten Messungen in die Konzeption eingeflossen. Der erste Meilenstein M1 „Konzeption des Vorhabens abgeschlossen“ wurde plangemäß erreicht. Das daraus resultierende Produkt P1, der „Bericht zur Konzeption“, wurde fertiggestellt und bildet den Kapitel 2 dieses Berichts.

5.1.2 Stand des Wissens und Bestandsdaten (AP 1.2)

Stand des Wissens

Für die Ableitung bzw. Darstellung des gegenwärtigen Wissensstands zu den Nebelnelben 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) Nebelnelben explizit erwähnt werden, ii) auf Untersuchungen zu Aspekten im Bereich der Nebelnelben Bezug genommen wird und iii) auf die Entwicklung sowie auf Eingriffe in die Nebelnelben eingegangen wird. Tabelle 25 gibt einen Überblick über das identifizierte Schrifttum. Zum gegenwärtigen Stand der Literaturrecherche ist keine veröffentlichte Arbeit bekannt, die explizit die Nebelnelben bzw. das System der Nebelnelben 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) Nebelnelben beschrieben werden. Zudem wird, insbesondere in (Fach-) Berichten, auf die Bedeutung von Nebelnelben im Kontext übergreifender Themen und Fragestellungen eingegangen. Es existieren nur wenige wissenschaftliche Veröffentlichungen. In Abstimmung mit dem WSA EN werden demgemäß auch Vorträge und Berichte („graue Literatur“) in die Literaturrecherche und Zusammenstellung einbezogen.

Tabelle 25: Übersicht über zusammengestellte Literatur zu den Nebelnelben. 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 Nebelnelbe / Mühlenberger Loch	(Marnitz 1995)
1993	Lange	Veränderung der Morphologie von Nebelnelben (1970-1980)	(Lange 1993)
1987	Visscher und Wolf	Untersuchungen im hydraulischen Modell über die zweckmäßige Linienführung und Höhe des Leitdammsystems "Pagensand Nord" in der Unterelbe (BAW)	(Visscher und Wolf 1987)
1987	Samu	Geomorphologische Untersuchungen im Bereich der Brammerbank und des Krautsander Watts in der Unterelbe	(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 2014)

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 2011a, 2011b, 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 Nebelnelben 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 Hafenbautechnische Gesellschaft 1983/84	(Schwab und Becker 1985)

Recherche und Aufbereitung von Bestandsdaten

Im Rahmen des Vorhabens wurden umfangreiche Daten durch das WSA EN direkt an das Institut für Wasserbau für die Verwendung im Projekt übergeben. Die Daten wurden gesichtet und zur weiteren Nutzung im Vorhaben aufbereitet. Tabelle 26 gibt eine Übersicht über die übergebenen Daten.

Tabelle 26: Übersicht über die vom WSA EN 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	Nebelben_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.pd bauwerke_hh2.pdf	17.06.19	Zus. Information
<u>Geodaten (GIS)</u> Basisdaten DGMW Morphozonen/ Habitat/ Vegetation	Elbe_Fahrrinnen-km.shp Fahrrinne_1_Elbvertiefung_1999.shp DGMW2010.gdb DGMW2016.gdb Map 1900, 1950, 1995,2010 (<...>.shp)	17.06.19	Zus. Information Quantitative Auswertung (AP 1.3: Datengenauigkeit) sowie Modellierung (AP3: Modelaufbau) → Vgl. Abbildung 76 Qualitative Auswertung (AP 1: Stand des Wissens: Beschreibung der Entwicklung)
Datenquellenkarte	DGMWGREN.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)
------------------------------	---	--	--

Mit dieser Datengrundlage als Ausgangslage wurde nach weiteren verfügbaren Daten recherchiert. Folgende Quellen (Institution mit Kontaktperson sowie Internetquellen) wurden dabei berücksichtigt:

- Institutionen:
 - Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, (LLUR) einschließlich Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN)
 - Dezernat 42 - Hydrologie; Geographische Informationssysteme
Dezernatsleiter: Ramon Hiemcke
Tel.: 04347 704-454
E-Mail: ramon.hiemcke@llur.landsh.de
 - Integrierte Station Unterelbe
Edelgard Heim
Hauptstraße 26
25489 Haseldorf
Telefon: 04129 95549 -0
edelgard.heim@llur.landsh.de
 - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN),
 - Betriebsstelle Lüneburg
GB III Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement
Dezernentin: Frauke Köhne
Adolph-Kolping-Str. 6 * 21337 Lüneburg
Tel.: 04131/8545-244
frauke.koehne@nlwkn-lg.niedersachsen.de
 - Betriebsstelle Stade -

Geschäftsbereich III Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement

Geschäftsbereichsleiter: Bernhard Schürmann

Harsefelder Straße 2, 21680 Stade

Tel.: 04141 601-252

- Internetquellen/ Datensätze/ Produkte aus Forschungsprojekten:
 - Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht (AufMod: (Heyer und Schrottke 2013); vgl. Abbildung 75
 - <http://www.kfki.de/de/projekte/aufmod>
 - <ftp://ftp.bsh.de/outgoing/AufMod-Data>
 - Erstellung anwendungsorientierter synoptischer Referenzdaten zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der Deutschen Bucht (EasyGSH); Interner Austausch IWB
 - <https://www.tuhh.de/wb/forschung/aktuelle-projekte/easygsh.html>
 - <http://mdi-de.baw.de/easygsh/index.html>
 - Zentrales Datenmanagement (ZDM) Küstendaten
 - Tideelbe
 - https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Startseite/Startseite_Portal_Tideelbe_node.html
 - https://www.kuestendaten.de/Tideelbe/DE/Service/Kartenthemen/Kartenthemen_node.html

Aus den Rückmeldungen der per Email und telefonisch angefragten Institutionen kann zusammenfassend geschlossen werden, dass neben den vom WSA EN übergebenen Daten keine weiteren Daten existieren.

Die Sichtung der übrigen potentiellen Datenquellen (Forschungsvorhaben AufMod und EasyGSH) ergibt ebenfalls gegenwärtig keine zusätzlichen Daten oder Informationen für den betrachteten Untersuchungsraum. Ein interessanter Aspekt ist jedoch hervorzuheben: Im Rahmen des Vorhabens AufMod wurden ebenfalls bathymetrische Daten ausgewertet. Hier ist vor allem die verwendete Methodik interessant im Hinblick auf die im Vorhaben Nebenelben angestrebte Bewertung der Aussagekraft verfügbarer Daten. Der im Rahmen von AufMod ermittelte Datensatz des Parameters „Confidence“ (Abbildung 75) liegt jedoch leider nicht für das Untersuchungsgebiet vor. Die Methodik könnte allerdings durchaus als Vorbild/Beispiel für die geplanten Auswertungen im Projekt herangezogen werden.

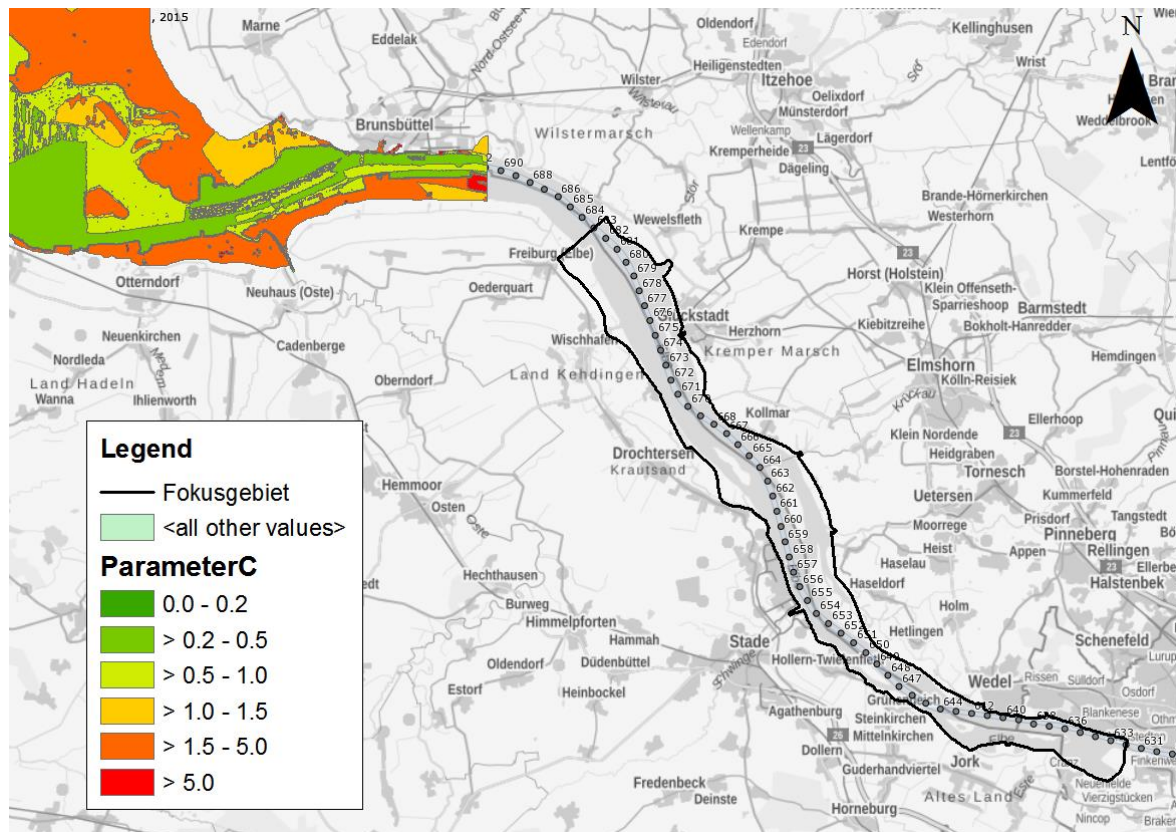


Abbildung 75: Abdeckung Bereich Tideelbe bzgl. des Datensatz für Parameter "Confidence" (Jahr 2012, Produkt des Projektes AufMod). „[...] Der Parameter Confidence [m] gibt die Vertrauenswürdigkeit der modellierten Bathymetrien an. Ausgehend von der Messgenauigkeit der zugrundeliegenden Vermessungsdaten (durchschnittlich +/- 20 cm) steigt die Confidence der interpolierten Daten mit zeitlicher und räumlicher Entfernung zum Messpunkt an. Niedrige Werte zeigen demnach eine hohe Vertrauenswürdigkeit der Modelldaten an, hohe Werte eine geringere.“ (Daten: Quelle AufMod)

Das Ergebnis der Datenrecherche zeigt, dass die als für die zu untersuchenden Fragestellungen im Projekt als relevant anzusehenden Daten bereits vom WSA EN übergebenen wurden. Diese sind im Wesentlichen identisch mit den unter den unter „Küstendaten“ (ZDM) verfügbaren Daten bzw. sind sogar teilweise weiter aufbereitet und umfassen bereits alle für das Projekt als relevant anzusehenden Daten in diesem Kontext.

Sollten im weiteren Projektverlauf weitere Bestandsdaten identifiziert werden, werden diese in die Untersuchungen einbezogen. Dasselbe gilt für die durch das IWB erhobenen Daten aus Peilungen oder sonstigen Messungen.

Analyse und Bewertung von Bestandsdaten

Die digitalen Geländemodelle (DGMW) der Jahre 2010 und 2016 stellen die wesentliche Grundlage zur Beschreibung der aktuellen Morphologie der Nebelnelben und deren Änderungen in der jüngeren Vergangenheit dar. Diese Geländemodelle wurden auf der Grundlage aller zu einem Stichtag verfügbaren und geeigneten Datensätze erzeugt und stellen ein räumlich konsistentes Abbild der Topographie bzw. Bathymetrie dar. Abbildung 76 zeigt

beispielhaft das DGMW 2016 der Tideelbe. Die zur Erstellung der DGMWs verwendeten Datensätze stammen aus unterschiedlichen Quellen bzw. wurden mit unterschiedlichen Messverfahren erhoben. Die Flächen unterhalb der Wasseroberfläche wurden i.d.R. per Fächerlotung oder Linienlotung vermessen. Die Flächen oberhalb der Wasseroberfläche wurden i.d.R. per Laserscan-Befliegung vermessen. Für die gegenwärtig verfügbaren DGMWs liegen die Informationen zum Vermessungsverfahren in Form einer Datenquellenkarte vor, die flächenscharf die Zuordnung der Vermessungsverfahren zu den entsprechenden vermessenen Bereichen zeigt. In Abbildung 77 ist die Datenquellenkarte des DGMW 2016 analog zu Abbildung 6 dargestellt.

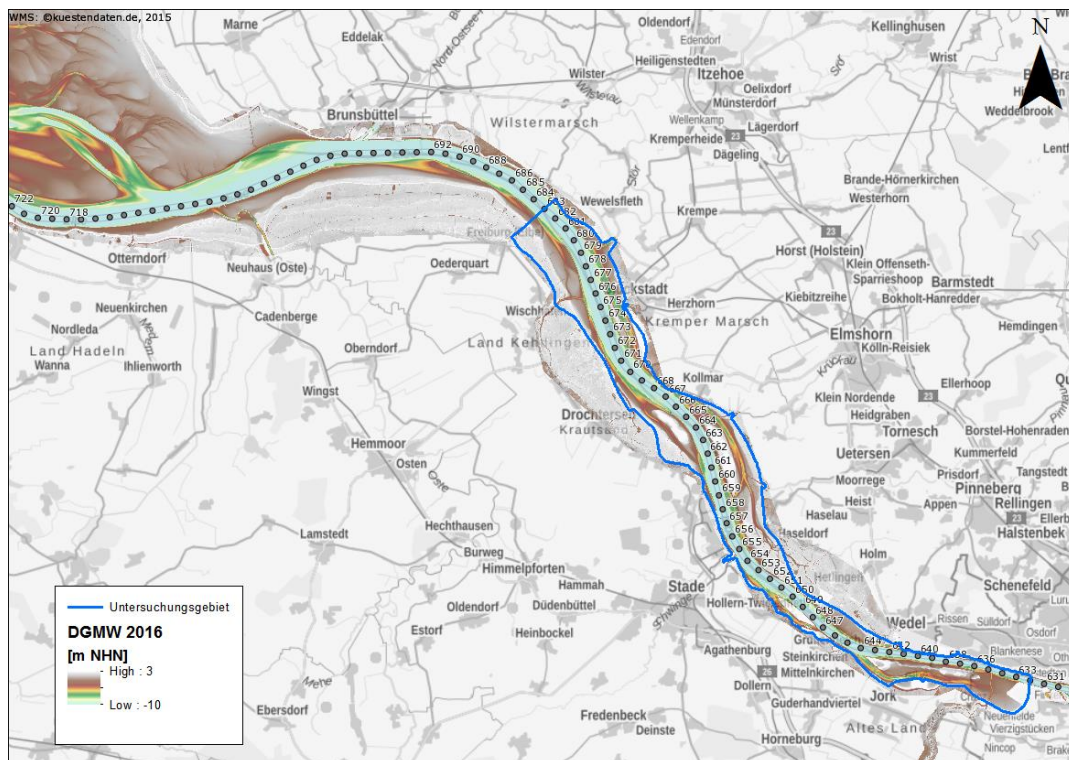


Abbildung 76: Exemplarische Darstellung eines Ausschnittes des DGMW 2016 (Datenquelle WSA EN) mit Untersuchungsgebiet als Referenz

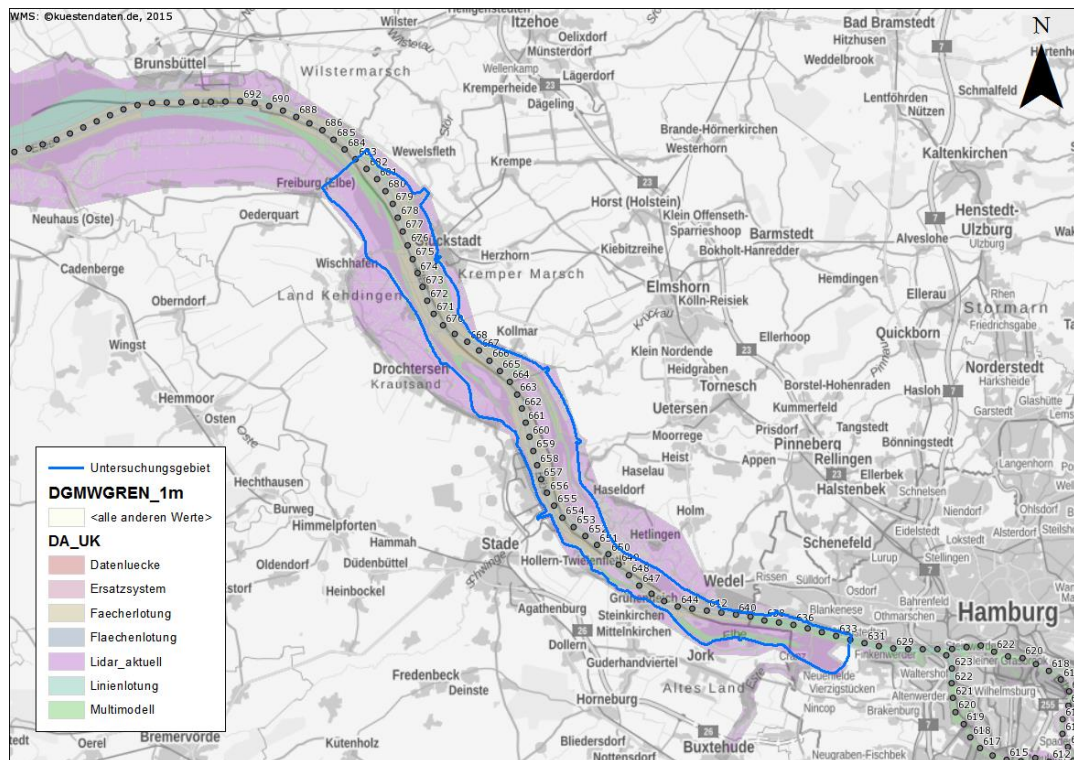


Abbildung 77: Datenquellenkarte des DGMW 2016 (ARGE smile consult 2018) für Tideelbe mit Untersuchungsgebiet als Referenz

Im Folgenden wird das DGMW 2016 für die Bereiche der Nebelnelben ausgewertet. Abbildung 78 und Abbildung 79 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.

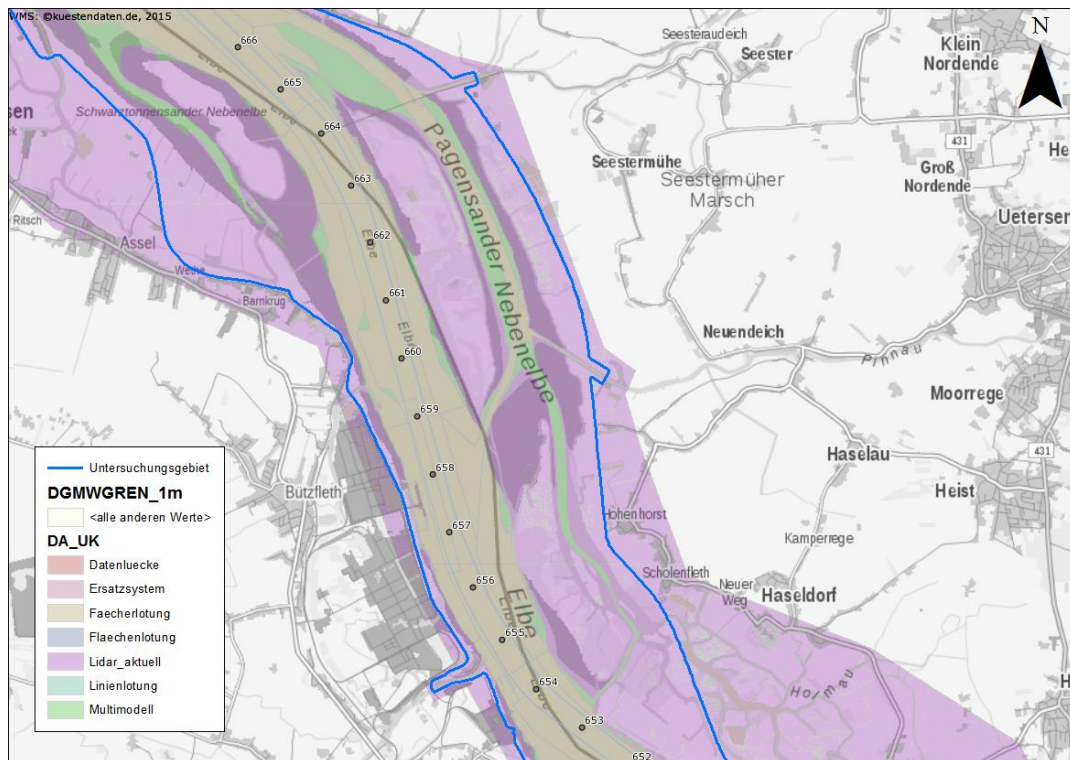


Abbildung 78: Ausschnitt des Bereiches Hahnöfer NE aus Datenquellenkarte für das DGMW 2016

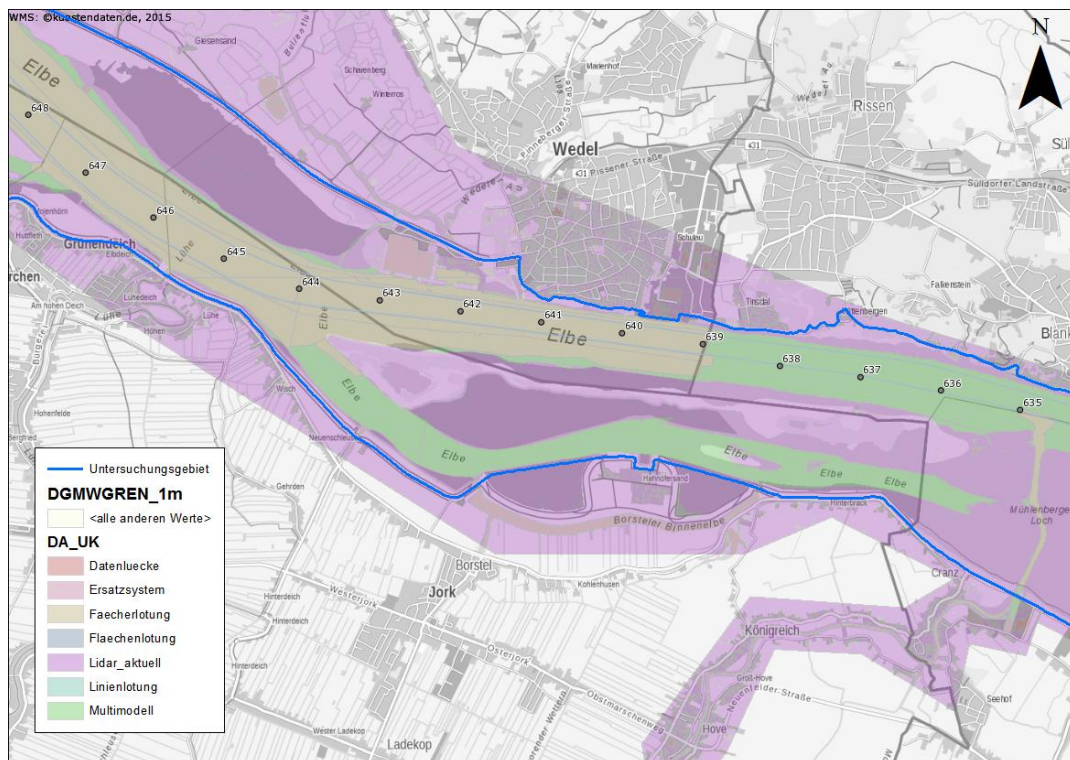


Abbildung 79: Ausschnitt des Bereiches Pagensander NE aus Datenquellenkarte für das DGMW 2016

Die Analyse von morphologischen Veränderungen erfolgt auf der Grundlage einer Differenzenbildung. In Abbildung 80 auf Seite 144 ist beispielhaft die Differenz zwischen DGMW 2016 und DGMW 2010 für den Bereich der Pagensander NE dargestellt. Zusätzlich liefert Abbildung 81 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 DGMW 2016 sind die Erfassungsgenauigkeiten für die genannten Messverfahren angegeben (Tabelle 27). 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 27: Erfassungsgenauigkeiten für Messverfahren, Quelle: Metadaten zum DGMW 2016, https://www.kuestendaten.de/media/zdm/portaltideelbe/Allgemeine_Informationen/Archiv/GIS/DGMW_Unterelbe_2016_1x1m/Metadaten_DGMW_2016_ETRS89UTM32N.pdf, abgerufen am 10.06.2020)

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

4. Räumliche Zuordnung der Messverfahren

Die räumliche Zuordnung der Messverfahren zu einzelnen Bereichen steht größtenteils fest (tiefergelegene Bereiche werden gepilt, 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 DGMW. 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 DGMW

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 einer 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 weit- aus größere Ungenauigkeit, die bislang noch nicht quantifiziert wurde.

Im Rahmen der Erstellung des DGMWs 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 DGMW 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.

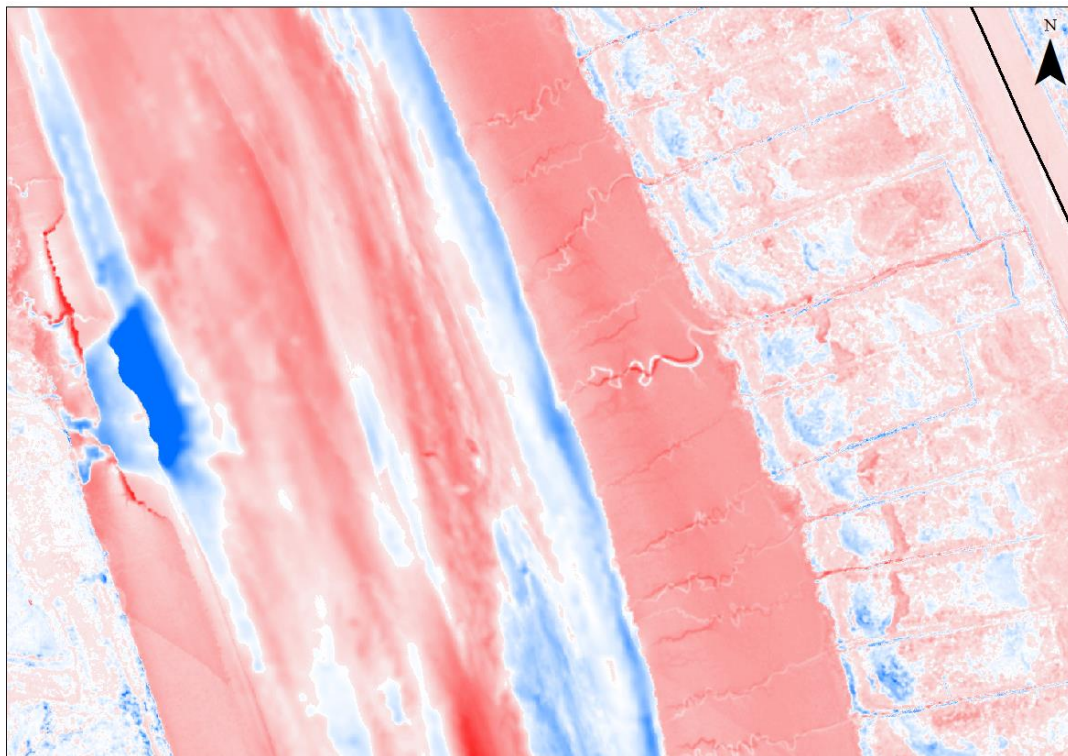


Abbildung 80: Exemplarische Darstellung der Höhendifferenz (± 1 m) des DGMW 2016 zu DGMW 2010 für einen Ausschnitt in der Mitte der Pagensander NE

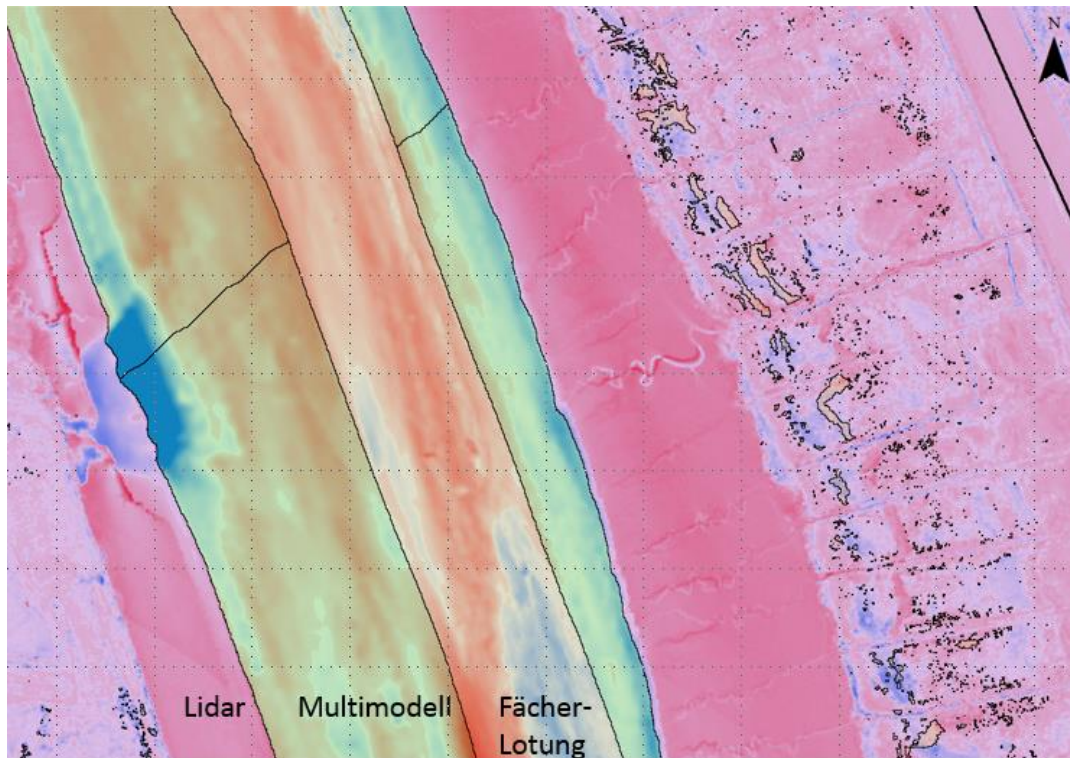


Abbildung 81: Exemplarische Darstellung der Datenquellen gemäß Datenquellenkarte DGMW 2016 für einen Ausschnitt in der Mitte der Pagensander NE

Auf das Vorhaben Nebelnelben bezogen lässt sich zusammenfassend sagen, dass in einem nächsten Schritt die DGMW anhand der verfügbaren Informationen auf folgende Aspekte hin zu untersuchen sind, um verbesserte, differenziertere Aussagen zur morphologischen Entwicklung der Nebelnelben zu erhalten.

- Zugrunde liegende Datenquelle/ Vermessungsverfahren
 - Zeitliche Referenz
 - Räumliche Auflösung / Tatsächliche Messdatenpunkte
 - Messgenauigkeit
- Aufbereitung der Daten
 - Einbezogene Daten
 - Filterung
 - Auflösung
 - Korrekturen
- Erstellung/ Verwendung im Geländemodell
 - Interpolation
 - Verschneidung mit anderen Daten

- Art der Zusammenstellung/ Einbezug

5.1.3 Datenqualität (AP 1.3)

Beschreibung der Entwicklung der Messtechnik mit Fokus auf die Genauigkeit von Messverfahren

Um unabhängig vom Vorliegen von Metadaten für Vermessungsdatensätze grundsätzliche Angaben zur Größenordnung der Erfassungsgenauigkeit bei der bathymetrischen Vermessung treffen zu können, sind Kenntnisse über die jeweils eingesetzte Messtechnik hilfreich. Im Rahmen einer Literaturstudie werden Dokumente zur Entwicklung der (historischen) Messtechnik im Hinblick auf die zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren und üblicherweise eingesetzten Messverfahren (Stand der Technik), deren erzielbare Messgenauigkeit, Auflösung und räumlichen Abdeckung zusammengestellt und ausgewertet. Insbesondere für ältere und historische bathymetrische Daten/Karten, für die keine Angaben zur Vermessung mehr vorliegen, kann so eine grundlegende Abschätzung der zu erwartenden Datenqualität und Genauigkeit erfolgen.

Untersuchungen und Versuche zur Ermittlung der tatsächlichen Messunsicherheit bei der bathymetrischen Vermessung

Theoretische Aufarbeitung der Messunsicherheiten

Abbildung 82 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.

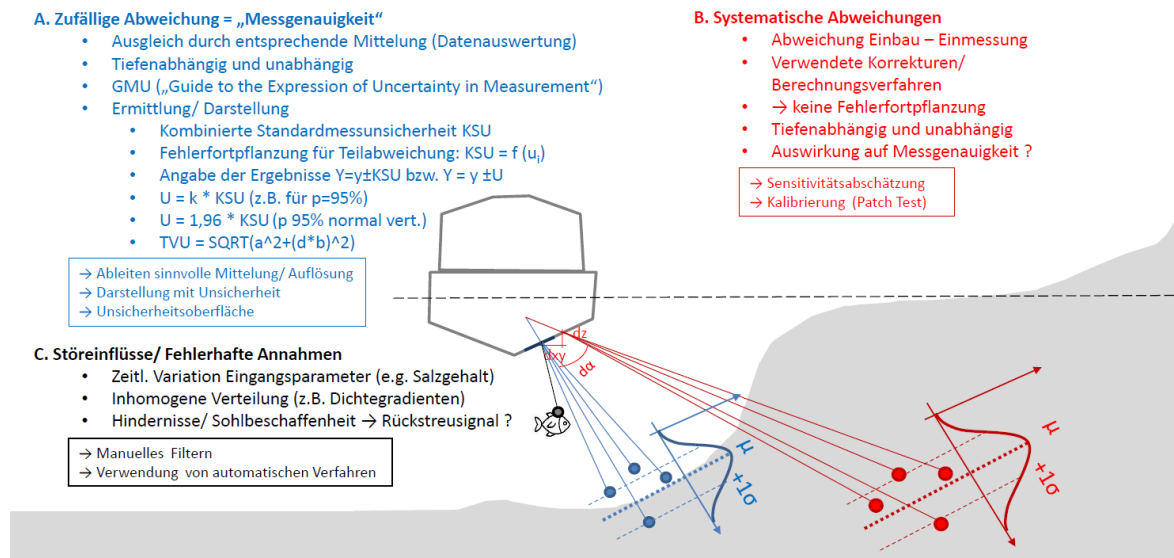


Abbildung 82: Skizze zur Zusammensetzung der Messabweichungen

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 Gesamtunsicherheit kann mittels Fehlerfortpflanzung einzelner Messkomponenten mit Teilunsicherheiten abgeleitet werden. Abbildung 82 zeigt exemplarisch die Fehlerfortpflanzung für die Komponenten und Teilunsicherheiten des verwendeten Fächerecholotssystem (Seabeam SB1185) für den gegenwärtigen Projektstand.

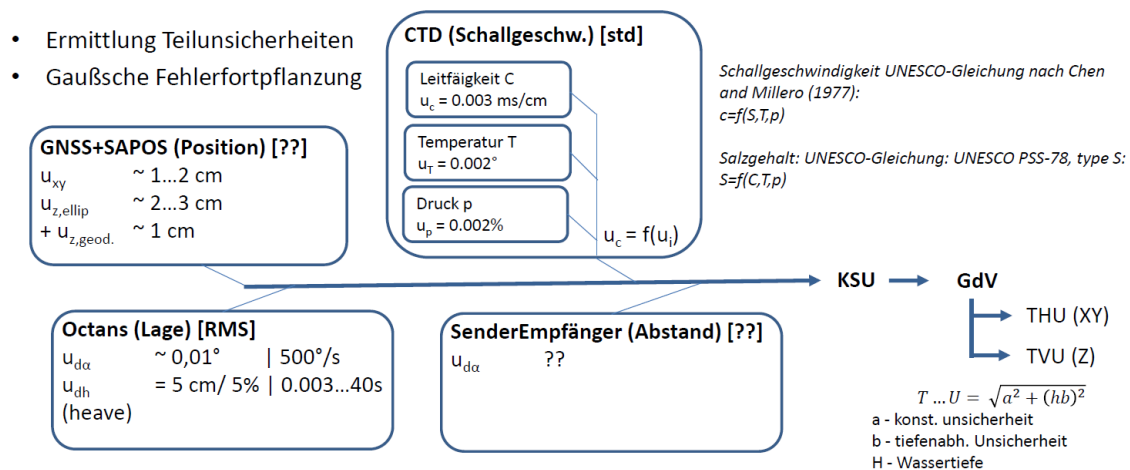


Abbildung 83: Korrekturdaten mit Teilunsicherheiten und Fehlerfortpflanzung für Fächerecholotmesssysteme

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-Empfangseinheit 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 EN zurückgegriffen. Hierzu ist ein Austausch mit der BfG angedacht.

Kalibrierung des Messsystems

Zur Überprüfung der Werte der Boots-Korrekturparameter für Latency, roll, pitch und yaw (Abbildung 86), die in der Hardware-Konfiguration verwendet werden, werden regelmäßige Kalibriermessungen (Patch-Tests) durchgeführt.

Der Patch-Test (Abbildung 86) 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 28). Kleinere Abweichungen können auch bei fest installierten Systemen wie dem der Nekton aufgrund der nicht optimalen Bedingungen (Sohlform und -beschaffenheit) auftreten.

Eine Studie, zur Untersuchung der Sensitivität der Messdaten und der daraus generierten Geländemodelle befindet sich in Kapitel 5.1.3.

Bar-Test

Eine Möglichkeit zur Quantifizierung der Absoluten Genauigkeit von Fächerlotsystemen ist der Bar-Test. Bei einem solchen Test wird ein Balken unter dem Fächerlot herabgelassen, dessen Abstand zur Wasseroberfläche bekannt ist. Dieser wird mit dem vom Fächerlot gemessenen Wert abgeglichen. Gegebenenfalls werden die Hardware-Einstellungen (z.B. vertikaler Offset) angepasst. Zur Durchführung eines solchen Tests sind ein ruhiges, ausreichend tiefes Gewässer sowie ein geeigneter Balken erforderlich, der unter dem Fächerlot herabgelassen werden kann. Der logistische Aufwand, den ein solcher Test verursacht ist sehr groß. Da die absolute Genauigkeit auch mit geringerem Aufwand, z.B. über Drempelfahrten im Bereich der Sperrwerke der Elbnebenflüsse ermittelt werden kann, werden diese im Rahmen des Vorhabens weiter verfolgt.

Drempelfahrt

Im Rahmen der Vermessung der Pagensander Nebelbe wurde der Bereich um den elbseitigen Drempel des Krückausperrwerks in den Jahren 2019 (Abbildung 84) und 2020 (Abbildung 85) 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 Drempel 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 Drempel hat gemäß Plan eine Höhe von NN-4,0 m. Der Betreiber des Sperrwerks LKN gibt als Drempelhöhe 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 84) zeigen in einigen Bereichen der Sperrwerkssohle deutliche Verlandungen. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2020 eine Drempelfahrt 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 85 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). Im Jahr 2021 ist vorgesehen, die Sohlhöhen im Anschluss an eine Grundräumung zusätzlich per Lotstab zu vermessen, um den Einfluss weiterer Faktoren, wie z.B. Einbautoleranzen oder Setzungen zu reduzieren.

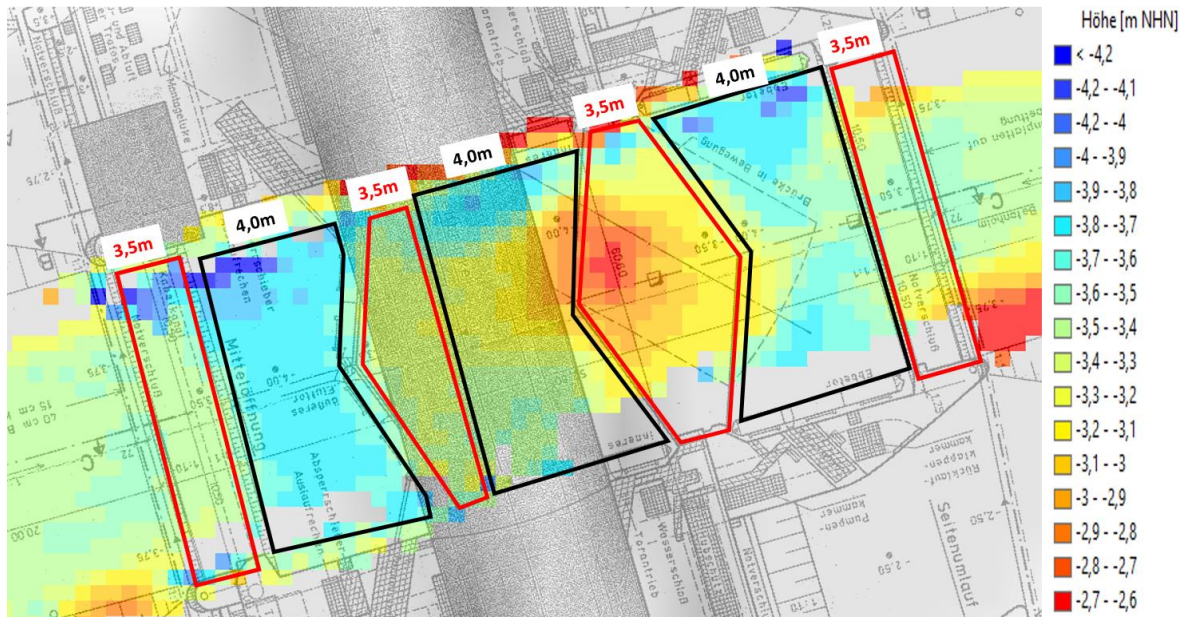


Abbildung 84: Ergebnisse der Vermessung des Drepfels im Bereich des Krückausperrwerks im Jahr 2019. Die Höhen aus den Bauplänen sind für unterschiedliche Bereiche angegeben

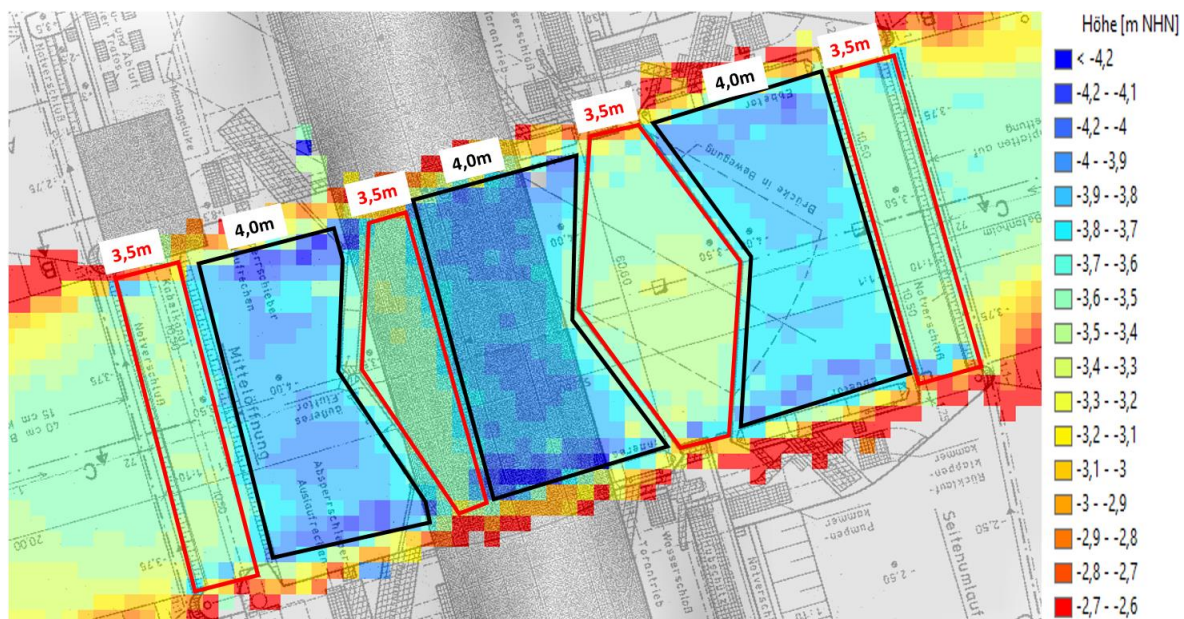


Abbildung 85: Ergebnisse der Vermessung des Drepfels im Bereich des Krückausperrwerks im Jahr 2020. Die Höhen aus den Bauplänen sind für unterschiedliche Bereiche angegeben

Kriterienkatalog zu Anforderungen an die bathymetrische Vermessung + Datenaufbereitung zur Sicherung der Datenqualität – Entwurf (Produkt P2)

Bathymetrische Daten liegen in der Regel in Form von digitalen Geländemodellen des Gewässerlaufs von (DGMW-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 DGMW 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).

Während die absolute Lage- und Höhengengenauigkeit durch den Positionierungsdienst angegeben wird, müssen die Bootskorrekturparameter individuell bestimmt werden. Hierzu werden sogenannte Patch-Tests durchgeführt. Da die Voraussetzungen für einen Patch-Test in der Natur nie optimal sind, können einige Korrekturparameter nicht exakt bestimmt werden, weshalb die Werte aus mehreren Patch-Tests innerhalb einer Bandbreite schwanken können. Dies gilt insbesondere für das rollen (roll) und das Gieren (yaw), weniger für das Stampfen (pitch).

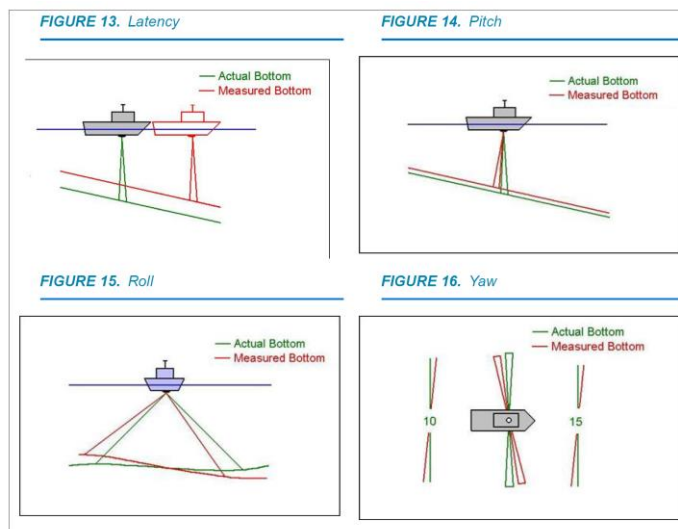
Auch die korrigierten Rohdaten enthalten Ausreißer, die z.B. aus einer unterschiedlichen Eindringtiefe in das Sohlmaterial, Bewuchs, Einfallwinkel, Luftbläschen oder Schwebstoffe in der Wassersäule, Nebenkeulen, Mehrfachreflexionen resultieren und herausgefiltert werden müssen. Dies geschieht in der Regel in zwei Stufen, einer manuellen Filterung und einer statistischen Filterung. Sowohl die manuelle Filterung (subjektive Entfernung von Ausreißern) als auch die statistische Filterung (Wahl der Filter) sind beeinflusst von individuellen Entscheidungen der Person, die die Filterung durchführt.

Ziel im Rahmen dieses Vorhabens ist es, Kriterien für die Ermittlung der Bootskorrekturparameter und die Ausreißerfilterung zu definieren. Als Grundlage hierfür werden Sensitivitätsstudien zum Einfluss der Bootskorrekturparameter (roll, yaw und pitch) und von Filterkriterien durchgeführt. Dies geschieht auf Grundlage der im Jahr 2020 für vier Nebenelben erhobenen Datensätze, wobei die Pagensander NE und die Haseldorfer BE als ein System betrachtet werden. Im Folgenden werden das grundsätzliche Vorgehen erläutert und die zentralen Ergebnisse dargestellt.

Einfluss der Boots-Korrekturparameter

Vor einer Vermessung mit einem Fächerecholotsystem sind die Werte der Boots-Korrekturparameter für Latency, roll, pitch und yaw (Abbildung 86) 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 Nektar 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 28). 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.



Multibeam offset adjustments are calculated with the PATCH TEST in the 32-bit HYSWEEP® EDITOR and the 64-bit HYSWEEP® EDITOR programs.

Abbildung 86: Schematische Darstellung von Bootskorrekturparametern (Quelle: Hypack user manual)

Tabelle 28: 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

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 Grad³ 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 87 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).

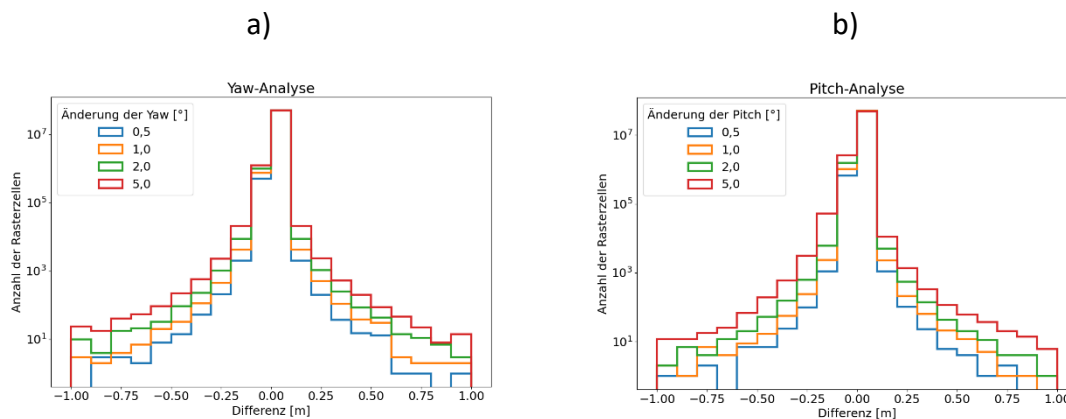


Abbildung 87: Sensitivitätsanalyse: Auswertung der Differenzenraster (Referenz - Szenario) für a) yaw-Variation und b) pitch-Variation, y-Achse in logarithmischer Skala

Eine detaillierte Betrachtung von einem strukturreichen Abschnitt (Dünen) der Hahnöfer Nebenelbe (Abbildung 88) zeigt jedoch größere Auswirkungen und stellt die Bedeutung des Parameters yaw im Fall von strukturreichen Sohlformen heraus. Durch die falschen yaw-

³ 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.

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.

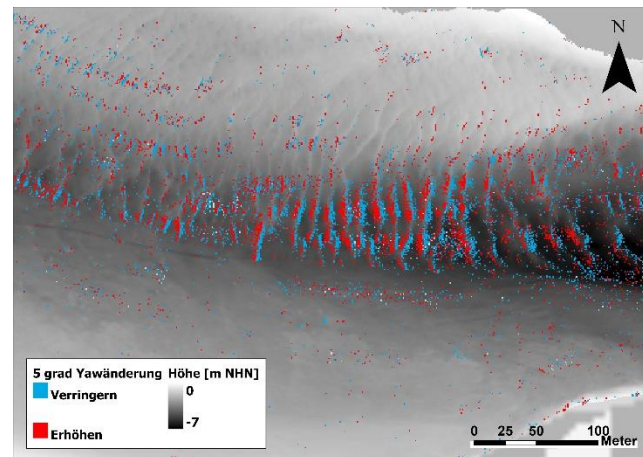


Abbildung 88 Auswirkung einer 5-Grad Änderung des yaw-Korrekturwerts auf die abgeleitete Bathymetrie in einem Sanddünenfeld in der Hahnöfer Nebelnelbe

Die Ergebnisse der Auswertung der Differenzenraster für die Variation des roll-Winkels sind in Abbildung 89 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 90 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.

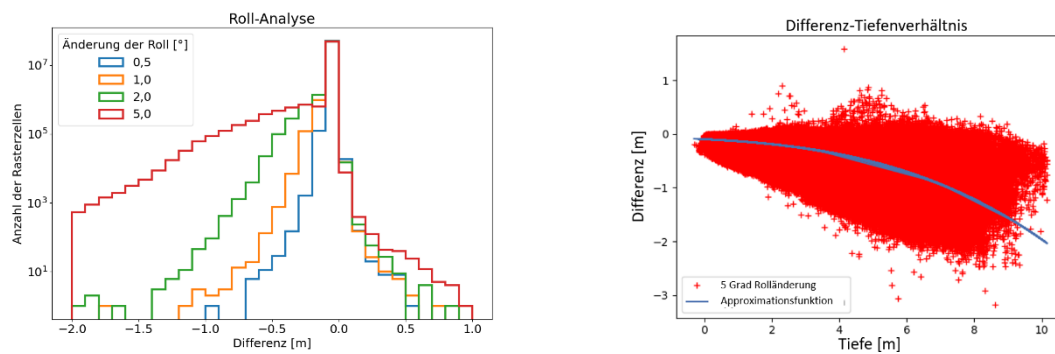


Abbildung 89: links: Sensitivitätsanalyse: Auswertung der Differenzenraster (Referenz - Szenario) für roll-Variationen, y-Achse in logarithmischer Skala; rechts: Tiefenabhängigkeit der Differenzen bei 5° Abweichung des roll-Winkels

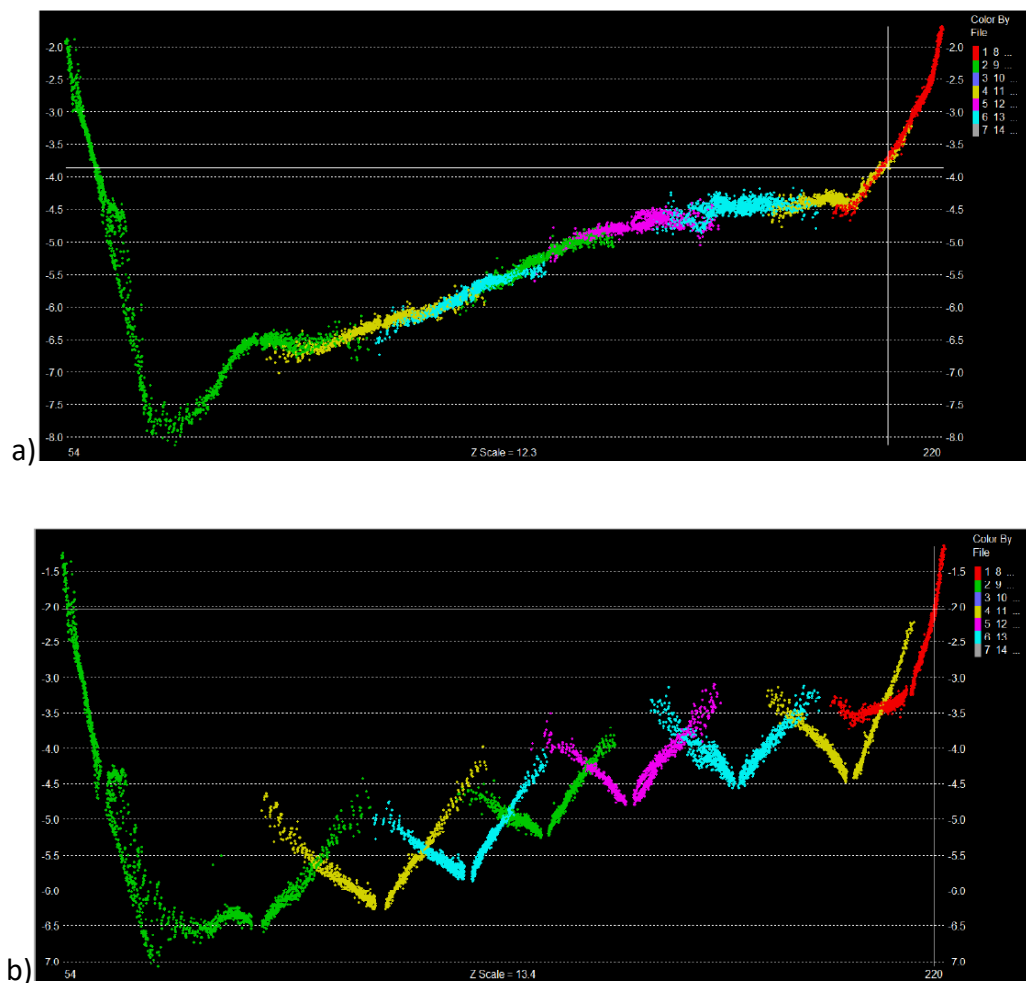


Abbildung 90: Querschnitt der gesammelten Daten der Lühesander Süderelbe mit a) korrekten roll-werten und b) 5 Grad Rolländerung

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 zur 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 einer strukturreichen Gewässersohle ist zudem der Korrekturwert 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.

Einfluss von manueller und automatischer Filterung bei der Datenaufbereitung

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 Einfallswinkel, 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 91 sowie die manuelle Filterung untersucht. Die Grundlage der Untersuchungen bildeten wiederum die im Jahr 2020 erhobenen Messdaten für die Nebenelben. 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.

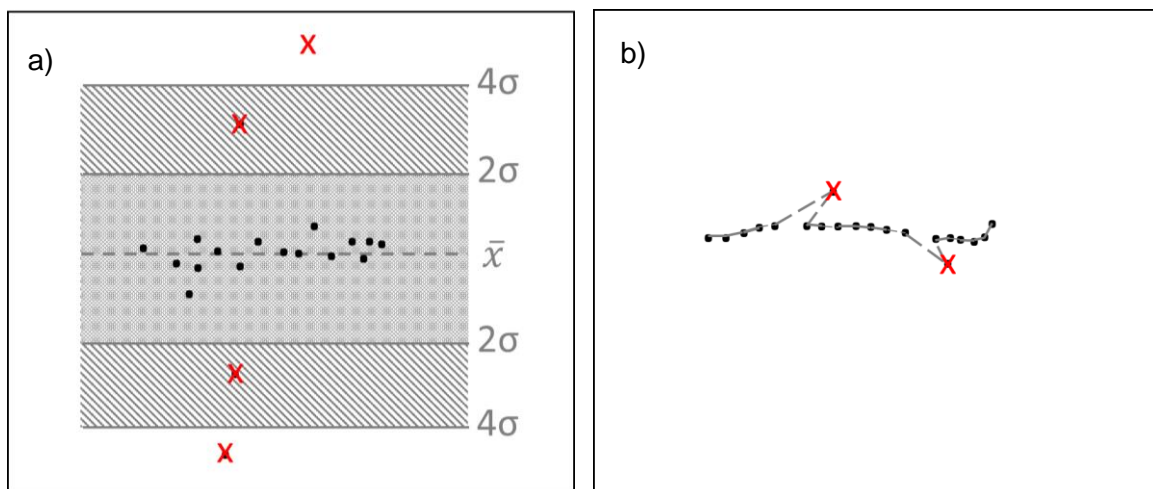


Abbildung 91: a) Wertebereiche des 2σ bzw. 4σ - Filters mit identifizierten Ausreißern, b) Überhang/Unterschneidung Filter mit identifizierten Ausreißern

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 92 dargestellt. Diese zeigt die Anzahl der Rasterzellen (y-Achse, logarithmisch) des Differenzenrasters für definierte Klassen (x-Achse). Für alle drei Nebelben bzw. Nebelbensysteme zeigt sich, dass vergleichsweise viele Rasterzellen des Differenzenrasters (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.

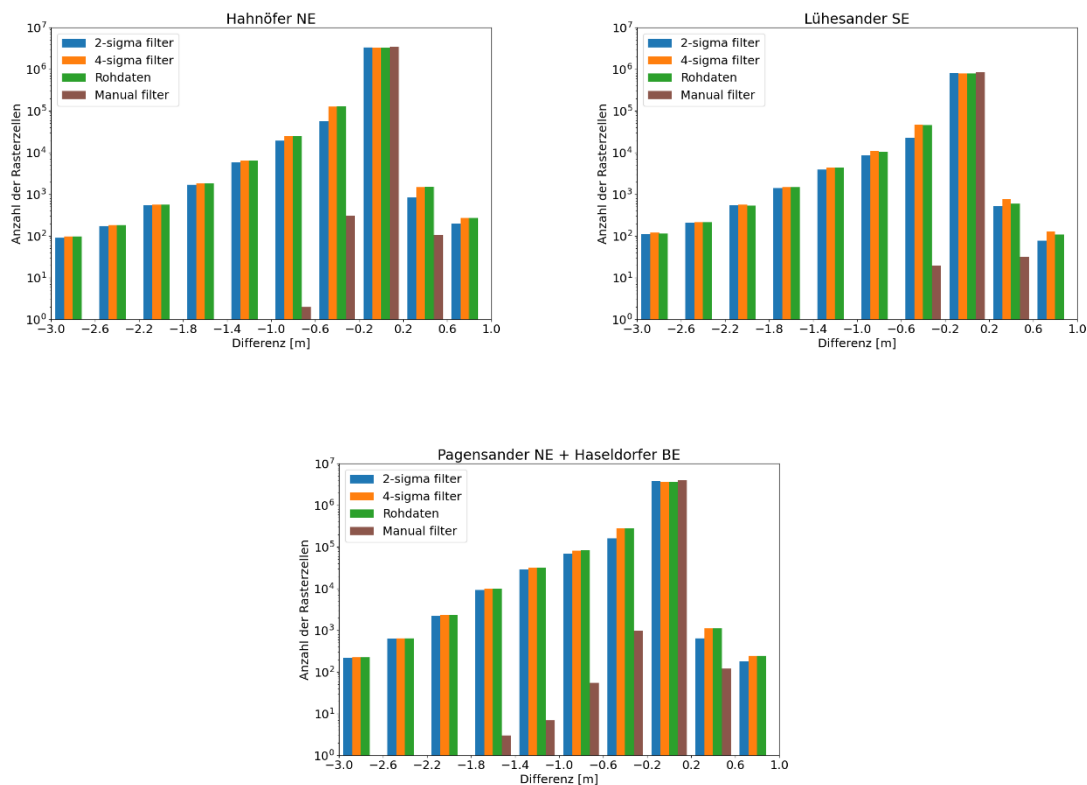


Abbildung 92: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie A (Erste Phase der Datenaufbereitung mit statistischen bzw. manuellen Filtern), dargestellt ist die Auswertung der jeweiligen Differenzenraster (Referenzraster – Szenario-Raster) für die Hahnöfer NE, die Lühesander SE und das System Pagensander NE/Haseldorfer BE

Die Ergebnisse von Studie B sind in Abbildung 93 dargestellt. Diese zeigt die Anzahl der Rasterzellen (y-Achse, logarithmisch) des Differenzenrasters 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 4σ Filter und dem Überhang/Unterschneidung Filter.

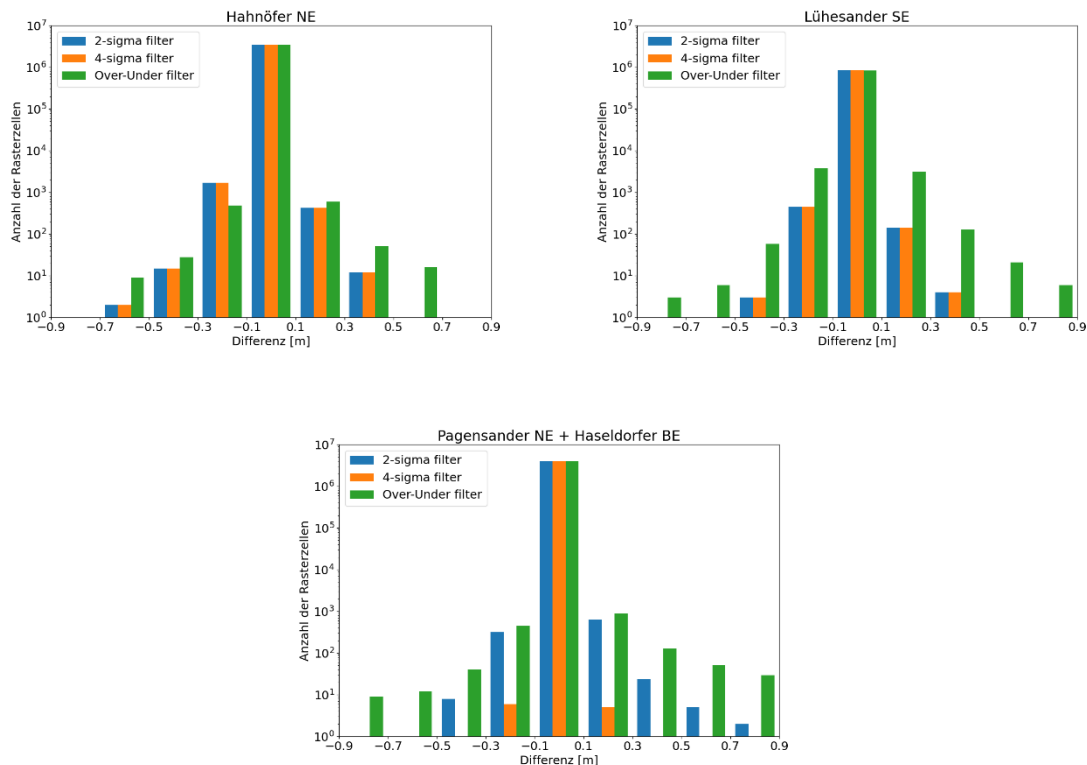


Abbildung 93: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie B (Zweite Phase der Datenaufbereitung mit statistischen Filtern), dargestellt ist die Auswertung der jeweiligen Differenzenraster (Referenzraster (= Raster aus manuell gefilterten Daten) – Szenario-Raster) für die Hahnöfer NE, die Lühesander SE und das System Pagensander NE/Haseldorfer BE

Aussagekraft verwendeter Bestandsdaten

Die Analyse der Bestandsdaten hat ergeben, dass die quantitative Aussagekraft von älteren Datensätzen (z.B. Seekarten) geringer ist als von Datensätzen, die in der jüngeren Vergangenheit entstanden sind, z.B. DGMWs. 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 Nebelnelben getroffen werden. Demgegenüber können auf Grundlage jüngerer Datensätze auch quantitative Aussagen getroffen

werden. Tabelle 29 gibt einen Überblick darüber, was qualitative und quantitative Aussagen im Rahmen der Analyse morphologischer Änderungen bedeuten.

Tabelle 29: Unterscheidung von qualitativen und quantitativen Aussagen im Rahmen der Analyse morphologischer Änderungen

Qualitative Aussagekraft	Quantitative Aussagekraft
<p>Änderungen verstehen</p> <p>Muster und Trends erkennen</p> <p>Qualitative Zusammenhänge identifizieren</p>	<p>Änderungen erklären</p> <p>Kausale Beziehungen identifizieren</p> <p>Zahlenmäßige Zusammenhänge darstellen</p>
<p>Historische Seekarten</p> <p>Bereiche im DGM-W, in denen die Höhen aus weit auseinanderliegenden Messwerten interpoliert werden, z.B. Multimodell</p> <p>Abgeleitete Daten, z.B. Morphozonen</p>	<p>Jahrestopographien auf Grundlage von Fächerecholotungen aus dem akt. Vorhaben Nebelnelben</p> <p>Bereiche im DGM-W, in denen die Höhen aus dicht beieinanderliegenden Messwerten interpoliert werden, z.B. Fächerecholotung, Laserscanning</p>

Die qualitative Beschreibung der historischen Entwicklung der Nebelnelben (vgl. Kapitel 3.2.5, 3.3.5, ... 3.8.5) erfolgte auf Grundlage des gegenwärtigen Stands des Wissens und der Auswertung von Bestandsdaten. Hier wurden u.a. abgeleitete Morphozonen (Abbildung 94) sowie Seekarten (Abbildung 95) ausgewertet.

Die quantitative Beschreibung des aktuellen Zustands sowie der aktuellen morphologischen Entwicklung (Kapitel 4) erfolgte auf Grundlage von topographischen und bathymetrischen Daten - insbesondere der DGMWs und dem in Vorhaben auf Grundlage von Fächerecholotungen erzeugten Jahrestopographien -, die in einem weiteren Schritt auch mit weiteren Datensätzen (z.B. Sedimentologie, Vegetation) verschnitten werden. Aus dem Vergleich der Bathymetrien ergeben sich, z.B. über Differenzenbildung, wichtige Indikatoren, wie Erosions- bzw. Depositionsbereiche, volumetrische Änderungen, morphologische Aktivität oder der morphologische Raum. Bei der Interpretation und Bewertung der erzeugten Datensätze wird zudem flächenscharf die Herkunft der Daten bzw. das Erhebungsverfahren und die damit verbundene Unsicherheit einbezogen. Des Weiteren wird über eine Klassenbildung die Verteilung der Höhen insgesamt, die räumliche Lage und – durch den Vergleich von Datensätzen für verschiedene Jahre – auch die Veränderung über die Zeit bestimmt. Durch die Verschneidung mit weiteren Daten, z.B. Sedimentologie oder Vegetation, werden komplexere Datensätze, wie Morphozonen generiert, die ebenfalls für unterschiedliche Nebelnelben analysiert und bewertet werden.

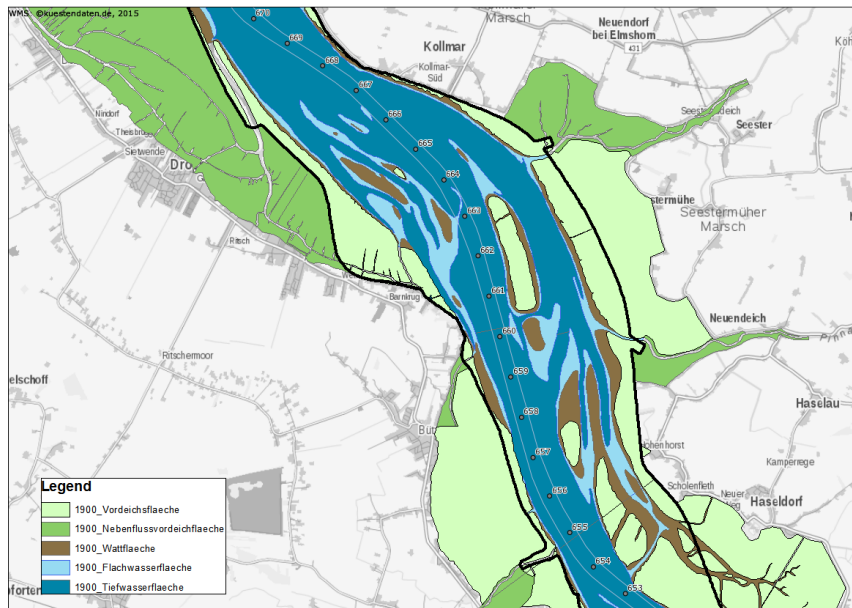


Abbildung 94: Abgeleitete Morphozonen der Tideelbe im Bereich Pagensand für das Jahr 1900 (WSA EN) mit zusätzlicher Darstellung des Untersuchungsgebiets des Projektes (schwarze Line) als Referenz



Abbildung 95: Ausschnitt aus historischer Seekarte der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand von 1905 (Quelle BSH)

5.2 Messkonzept und Durchführung der Messungen (AP2)

5.2.1 Messkonzept (AP 2.1)

Das im Vorhaben entwickelte Messkonzept in Kapitel 4.1 dargestellt.

5.2.2 Fächerecholotpeilungen (AP 2.2)

Die im Vorhaben durchgeführten Fächerecholotpeilungen sind in Kapitel 4.1.1 beschrieben.

5.2.3 Datenauswertung und –Analyse (AP 2.3)

Die Ergebnisse der Datenauswertung und –analyse sind in Kapitel 4.3 dargestellt.

5.3 Modellaufbau und Modellierung Pagensander Nebelbe (AP 3)

Dieses Arbeitspaket startet gemäß Zeit- und Arbeitsplan im dritten Projektjahr. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in der Konzeption (Kapitel 2.3) beschrieben.

In den ersten beiden Projektjahren wurden einige Voruntersuchungen durchgeführt, u.a. um den Workflow zu testen und um den Einfluss einer Erhöhung des Detaillierungsgrades (Netzauflösung) des am IWB vorhandenen numerischen Strömungsmodells zu untersuchen. Neben unterschiedlichen Modellanpassungen und Konvergenzstudien erfolgten bereits erste Untersuchungen zu potentiellen naturbasierten Maßnahmen. In diesem Rahmen wurden folgende studentische Arbeiten vergeben und erfolgreich abgeschlossen.

- Masterarbeit, Kevin Ketz, 2019, Titel: Wasserbauliche Auswirkungen von naturnahen Anpassungsoptionen für Nebenarme in Ästuaren - Modellbasierte Untersuchungen für die Pagensander Nebelbe
- Projektarbeit, Pia Kolb, 2019, Titel: Modellbasierte Untersuchung von spezifischen hydrodynamischen Prozessen in den Nebelben

Im Rahmen der Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine Verfeinerung der Gitternetzauflösung im Bereich der Nebelben zu einer verbesserten Abbildung der dortigen Strömungsverhältnisse führt. Dies wird deutlich in einer besseren Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit Strömungsmessdaten und in der Abbildung kleinräumiger Strömungsmuster.

6 Ausblick auf geplante Arbeiten im dritten Projektjahr

Für das dritte Projektjahr steht gemäß Zeit- und Arbeitsplan der Beginn der Arbeiten an in AP 3 „Modellaufbau und Modellierung“ an. Darüber hinaus werden die AP 1.3 „Datenqualität“, AP 2.2 „Fächerlotpeilungen“ und AP 2.3 „Datenauswertung- und Analyse“ weiter bearbeitet. Die folgenden Abschnitte geben einen Ausblick auf die anstehenden Arbeiten.

6.1 Datenqualität (AP 1.3)

In AP 1.3 „Datenqualität“ werden folgende Arbeiten fortgeführt:

- Beschreibung der Entwicklung der Messtechnik mit Fokus auf die Genauigkeit von Messverfahren
- Untersuchungen und Versuche zur Ermittlung der absoluten Messunsicherheit bei der bathymetrischen Vermessung
 - Theoretische Aufarbeitung der Messunsicherheiten
 - Drempelfahrt und Drempelvermessung per Lotstab
- Abschluss der Untersuchungen zum Einfluss der Bootskorrekturparameter auf die aufbereiteten Werte (P2)
- Abschluss der Untersuchungen zum Einfluss der Aufbereitungsverfahren (manuelle und statistische Filterung der Rohdaten) auf die aufbereiteten Werte (P2)

6.2 Fächerecholotpeilungen (AP 2.2)

Die Messkampagnen sind für die erste Hälfte des dritten Projektjahres geplant. Eine Übersicht über die geplanten Termine zur Durchführung der Messungen gibt Tabelle 30. Aufgrund der Einschränkungen durch die Bundes- bzw. Landesregierung als Reaktion auf die Ausbreitung des Corona-Virus müssen die für April geplanten Messfahrten entfallen. Zum aktuellen Zeitpunkt wird davon ausgegangen, dass die für Mitte Mai geplanten Messkampagnen stattfinden können. Die beiden Zeitfenster für die Messungen Pagensander NE + Haseldorfer BE und Hahnöfer NE + Lühesander SE beinhalten zusätzliche Reservetage für weitere Messungen. Zusätzlich kann eine Woche als Ersatztermin genutzt werden.

Die im zweiten Projektjahr vermessene Fläche dient als Referenz für die Messungen im dritten Projektjahr. Bei zeitlich und wettermäßig günstigen Bedingungen werden zusätzliche Flächen gemessen sofern die Anzahl der Messtage nicht erreicht ist. Zudem werden alle im Rahmen der Untersuchungen zur Datenqualität (AP 1.3) und zur Auswertung (AP 2.3) erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse bei der Durchführung weiterer Vermessungen berücksichtigt.

Tabelle 30: Übersicht geplante Vermessungen der Nebelnelben (Stand April 2021)

Datum	Messtage	Gebiet
19.04.2021 – 23.04.2021	40	Pagensander NE + Haseldorfer BE
17.05.2021 – 07.06.2021	10	Pagensander NE + Haseldorfer BE
21.06.2021 – 09.07.2021	6	Hahnöfer NE + Lühesander SE
19.07.2021 – 23.07.2021	5	Ersatztermin

6.3 Datenauswertung und -Analyse (AP 2.3)

Die bereits im ersten und zweiten Projektjahr begonnene Auswertung und Analyse der erhobenen Daten wird fortgeführt. Die in den ersten drei Projektjahren erhobenen und ausgewerteten Daten werden ausgewertet und analysiert. Dabei erfolgt insbesondere eine Betrachtung der Auswirkungen der verwendeten Korrektur- und Interpolationsmethoden auf die Ergebnisse (digitalen Geländemodelle) und der darauf basierenden weiterführenden Analysen, z.B. Differenzbildungen. Dabei fließen sowohl die bisherigen Erfahrungen zur Auswertung als auch die Ergebnisse der Untersuchungen Mess- und Datengenauigkeit (AP 1.3) mit ein.

Im Ergebnis wird ein Kriterienkatalog zur Sicherstellung einer hohen Qualität bei der Auswertung und Analyse von Vermessungsdaten erstellt (Meilenstein M3) und zunächst als Entwurf auf dem vierten Projektjahresbericht und als Endfassung auf dem letzten Projektbericht dokumentiert (Produkt P5). Dieser wird nach Erstellung bei den weiteren im Projekt durchgeführten Vermessungen angewendet, erprobt und ggf. verbessert.

6.4 Modellaufbau und Modellierung (AP 3)

Das Arbeitspaket 3 wird im dritten Projektjahr beginnen, dazu gehören die Teilarbeitspakete AP 3.1 Modellaufbau, AP 3.2 Simulationen und AP 3.3 Bewertung Strömungsmuster.

In diesem Arbeitspaket wird die räumliche Auflösung des zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells der Tideelbe, welches am IWB gepflegt wird, im Bereich der Pagensander Nebelnelbe und der Haseldorfer Binnenelbe deutlich erhöht, um insbesondere auch kleinräumige Strömungsprozesse abzubilden. Die Validierung des Modelles erfolgt anhand von Strömungsmessungen (vgl. Kapitel 4.1.3). Anschließend werden dann mit dem verfeinerten Modell die Strömungsvorgänge und Strömungsmuster im Bereich des Pagensander NE/Haseldorfer BE für den Ist-Zustand bei unterschiedlichen hydrologischen Situationen (Spring-/Nipptiden, Sturmfluten, variierendes Oberwasser der Elbe sowie der Elbenebenflüsse) untersucht. Auf Grundlage der Modellergebnisse erfolgt dann in Kombination mit den verfügbaren Messdaten eine Analyse und eine Bewertung der Strömungsmuster. Dabei wird ein besonderer Fokus gelegt auf i) die Dynamik in den Rinnen der Nebelnelben,

ii) die strömungsberuhigten Zonen in den Flachwasserbereichen, iii) die Interaktion zwischen Rinnen und Flachwasserbereichen und iv) die Interaktion zwischen der Pagensander NE und den Flüssen Krückau und Pinnau. Die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der hydrodynamischen Prozesse fließen zudem in die Analysen und Bewertungen der morphologischen Prozesse ein.

Mit dem Abschluss von AP 3 ist im April 2022 zu rechnen. Die Ergebnisse werden dann als Produkt P6 „Bewertung von Strömungsmustern in der Pagensander NE für unterschiedliche Strömungssituationen“ bei der nächsten Fortschreibung des Jahresberichts dargestellt.

7 Zusammenfassung

Das Institut für Wasserbau (IWB) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) führt im Rahmen der Kooperation mit dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe-Nordsee (WSA EN) seit dem 15.04.2019 das Forschungsvorhaben „Erweiterung des Systemverständnisses im Bereich der Nebelnelben als Grundlage für die Verbesserung des Verständnisses im Gesamtsystem Tideelbe“ (Systemverständnis Nebelnelben) durch. Die Grundlage für die Kooperation bildet der Kooperationsvertrag vom 15.04.2019.

Im vorliegenden fortgeschriebenen Bericht sind die in den ersten beiden Projektjahren (April 2019 – März 2021) erzielten Ergebnisse sowie der Fortschritt der Arbeiten des Arbeitsplans dokumentiert. Die Inhalte der Statusberichte vom September 2019 und September 2020 sowie des ersten Jahresberichts sind ebenfalls enthalten.

Ziel des Vorhabens ist es, die hydrodynamischen und morphologischen Prozesse in den Nebelnelben-Systemen besser zu verstehen und damit einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses des Gesamtsystems Tideelbe zu leisten. In Kapitel 2 dieses Berichts wird beschrieben, wie dieses Ziel erreicht werden soll, welche Anforderungen dabei zu erfüllen sind und welche Arbeitsschritte zu Erreichung des Ziels konkret umgesetzt werden. Bei der konkreten Ausgestaltung der Konzeption werden zum einen die vom WSA EN spezifizierten und im Forum Tideelbe diskutierten Anforderungen berücksichtigt, die im Kern auf dem Leitgedanken der Vereinbarkeit von Strombau und Naturschutz basieren. Zum anderen sind die Ergebnisse der in der ersten Projektphase durchgeführten Analysen des Schrifttums und der Bestandsdaten sowie die Erkenntnisse aus den durchgeführten Messungen in die Konzeption eingeflossen.

Der übergeordneten Zielsetzung folgend wurden im Vorhaben drei separate Teilziele definiert, die im Wesentlichen den einzelnen Arbeitspaketen AP1 und AP 2 sowie AP3+AP4 der Vorhabenbeschreibung / des Kooperationsvertrages zugeordnet werden können. Die definierten Teilziele lauten wie folgt:

- 1 Verbesserte Einschätzung der Ungenauigkeiten bzw. Unsicherheiten bei der Beurteilung der morphologischen Entwicklung von Nebelnelben auf der Grundlage von bestehenden Daten (AP 1)
- 2 Detaillierte Beschreibung der Morphologie sowie der morphologischen Entwicklung ausgewählter Nebelnelben auf der Grundlage von neu erhobenen Daten mit bestmöglicher Datenqualität (AP 2)
- 3 Numerische Modelluntersuchungen zur Verbesserung des Verständnisses von hydrodynamischen und morphologischen Prozessen und deren Veränderungen infolge wasserbaulicher Maßnahmen (AP 3+4)

Die Synthese, die die Ergebnisse in einen übergeordneten Zusammenhang – das Gesamtsystem Nebelnelben – bringt, erfolgt in AP5.

Die Nebelnelben (abgekürzt: NE) befinden sich im Abschnitt zwischen Elbe-km 632 und Elbe-km 683, weshalb dieser Raum als Untersuchungsraum festgelegt wurde (Abbildung 1). Im Einzelnen handelt es sich um die Hahnöfer NE, die Lühesander Süderelbe, die Haseldorfer Binnenelbe, die Pagensander NE, die Schwarztonnensander NE sowie die Glückstädter NE. Im Fall der Wischhafener Nebelnelbe bzw. des Wischhafener Fahrwassers handelt es sich gegenwärtig nicht um eine Nebelnelbe 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.

Alle Nebelnelben weisen neben der namensgebenden Eigenschaft (eine Nebenrinne wird durch eine Insel vom Hauptstrom abgetrennt) weitere Gemeinsamkeiten auf. Beispielsweise in 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 beiden Enden mit der Hauptrinne verbunden, wobei die Pagensander NE und die Haseldorfer BE als zusammenhängendes System eine Besonderheit darstellen. Durch die unterschiedlichen Querschnitte von Haupt- und Nebenrinne entstehen insbesondere bei einsetzendem Flutstrom Laufzeitdifferenzen wodurch am stromaufseitig gelegenen Ende eine besondere Strömungssituation entsteht, die auch zu morphologischen Veränderungen führen kann. Die Laufzeitdifferenzen und die resultierenden Effekte sind umso größer, je länger die Rinne der Nebelnelbe ist.

Neben den Gemeinsamkeiten gibt es Unterschiede zwischen den Nebelnelben, z.B. in den Bereichen Morphologie (Länge, Breite, Tief, Tiefenverteilung, Sohlstruktur), Sedimentologie (Zusammensetzung Sohlmaterial), Hydrodynamik und Morphodynamik.

Die heutige Gestalt der Tideelbe mit einer Hauptrinne und abschnittsweise abzweigenden Nebenrinnen ist in vor allem aufgrund strombaulicher Maßnahmen in der Tideelbe, aber auch aufgrund von Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes der Elbmarsch entstanden. In Kapitel 3 werden die zuvor genannten Nebelnelben im Detail auf Grundlage des bestehenden Wissens beschrieben, wobei auf die Entstehung, die Morphometrie, Hydrodynamik und Sedimenttransport, die morphologische Entwicklung, die aktuelle Unterhaltung und die Ufersicherung eingegangen wird.

Im Rahmen des Vorhabens werden ausgewählte Nebelnelben eingehender untersucht. Dies sind die Hahnöfer NE, die Lühesander Süderelbe sowie das System Pagensander NE – Haseldorfer BE. Hierzu wird zunächst die verfügbare Datengrundlage erweitert, indem jährlich eine hochauflösende Vermessung der Bathymetrie durchgeführt wird. Zudem werden in ausgewählten Nebelnelben Strömungsmessungen und Sedimentbeprobungen durchgeführt. Anhand der erzeugten digitalen Geländemodelle wird der aktuelle Zustand der jeweiligen Nebelnelbe im Detail beschrieben. Darüber hinaus ermöglicht die Gegenüberstellung der Geländemodelle für unterschiedliche Zeitpunkte eine Beschreibung der kurzfristigen morphologischen Entwicklung. Die Ergebnisse zur aktuellen Morphologie und der aktuellen Entwicklung sind in Kapitel 4 dargestellt und in Tabelle 19ff zusammengefasst.

Für das System Pagensander NE/Haseldorfer BE wird zudem ein hochaufgelöstes hydrodynamisch-numerisches Modell erstellt, um damit die z.T. komplexen Strömungsverhältnisse und die Wirkungen einzelner Einflussfaktoren zu analysieren und zu verstehen. Darüber hinaus werden die Auswirkungen von naturnahen Maßnahmen auf die Strömungsverhältnisse untersucht.

Im ersten Projektjahr wurden gemäß Planung Arbeiten in den Arbeitspaketen AP 1.1 „Konzeption“, AP 1.2 „Bestandsdaten“ und AP 2.2 „Fächerlotpeilungen“ durchgeführt und wie geplant abgeschlossen. Darüber hinaus wurden Arbeiten aus AP 2.3 und AP 3.1 vorgezogen. Der erste Meilenstein M1 „Konzeption des Vorhabens abgeschlossen“ wurde plangemäß erreicht. Das daraus resultierende Produkt P1, der „Bericht zur Konzeption“, wurde fertiggestellt und bildet den Kapitel 2 dieses Berichts. Die Arbeiten an AP 1.3 „Datenqualität“ wurden ebenfalls begonnen, konnten aber nicht abgeschlossen werden, da sich im Laufe der Arbeiten herausstellte, dass zu diesem Zeitpunkt im Vorhaben kein sinnvoller Abschluss möglich ist. Hierzu bedarf es noch weiterer Informationen und Erkenntnisse, die erst im weiteren Verlauf des Vorhabens in ausreichendem Umfang (u.a. Erkenntnisse aus den Messungen) verfügbar sein werden. Die Verlängerung der Arbeiten in AP 1.3 wurde im Rahmen der Arbeitstreffen diskutiert und beschlossen. Diese Änderungen sind im Arbeitsplan (Tabelle 24) berücksichtigt.

Im zweiten Projektjahr wurden gemäß angepasstem Arbeitsplan die AP1.3 *Datenqualität* 2.1 *Messkonzept*, 2.2 *Fächerlotpeilungen* und 2.3 *Datenauswertung und –Analyse* bearbeitet. Folgende Produkte wurden plangemäß fertiggestellt:

- P2 *Kriterienkatalog zu Anforderungen an die bathymetrische Vermessung + Datenaufbereitung* im Entwurf (Kapitel 5.1.3)
- P3 *Messkonzept für die Nebelnelben* (Kapitel 4.1).
- P4 *Jährliche konsistente Bathymetrien (Sammelprodukt)* übergeben mit dem letzten Zwischenbericht
- P9 *Historische Entwicklung der Nebelnelben auf Grundlage von Bestandsdaten + Literatur* (Kapitel 3)
- P10 *Aktueller Zustand der Nebelnelben und aktuelle morphologische Entwicklung ausgewählter NE auf Grundlage neu erhobener Daten* im Entwurf (Kapitel 4.2 und 4.3)

In der Gesamtbetrachtung der Zeit- und Arbeitsplanung ist der Zeitplan am Ende des zweiten Projektjahres eingehalten.

Für das dritte Projektjahr steht gemäß Zeit- und Arbeitsplan der Beginn der Arbeiten an in AP 3 „Modellaufbau und Modellierung“ an. Darüber hinaus werden die AP 1.3 „Datenqualität“, AP 2.2 „Fächerlotpeilungen“ und AP 2.3 „Datenauswertung- und Analyse“ weiter bearbeitet.

Literaturverzeichnis

ARGE smile consult, Inphoris (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).

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, Nikolaus 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 (2014): 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, Marcus J. (2003): Realisierte Strombaumanahmen an der Elbe. BAW Kolloquium 2003, 13.11.2003.

Boehlich, Marcus J.; Strotmann, Thomas (2019): Das Elbeästuar. Die Küste 87 (2019), Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). DOI: 10.18171/1.087106.

Bohn, Jochim (2005): Pagensand. Die Geschichte der Elbinsel und ihrer Bewohner. 2. Aufl. Husum: Husum.

Bund-Länder-Arbeitsgruppe Beweissicherung (1995): Ausbau der Unterund Außenelbe zur Herstellung der Fahrwassertiefe von 13,5 m unter Kartennull, Strömungsmessungen in den Nebelnelben. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord.

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.

Eichweber, Günther (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.

Entelmann, I. (25.09.18): Gesamtüberblick Nebelnelben aus WSV-Sicht. Diskussionsbeitrag WSA Hamburg zur 1. Sitzung der AG Nebelnelben im Forum Tideelbe. WSV. Hamburg, 25.09.18.

Entelmann, I. (12.02.19a): Hydrologie und Morphologie der Nebelnelben. Stand des Wissens und Wissensdefizite. Beitrag WSA Hamburg zur 2. Sitzung der AG Nebelnelben im Forum Tideelbe. Hamburg, 12.02.19.

Entelmann, I. (12.02.19b): Modellstudien Pagensander Nebelnelben. Grundlegende Betrachtung und weiteres Vorgehen. Beitrag WSA Hamburg zur 2. Sitzung der AG Nebelnelben 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).

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.

Fräßdorf, Jörg (1995): Morphologische Veränderungen der Nebelben. BAW Kolloquium. Hamburg, 1995.

Gätje, Bettina; Cordes, Rubens (2013): Ufersicherungen an der Tideelbe. BAW Kolloquium, 29.08.2013.

Hensen, Walter (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.

Heyer, Harro; Schrottke, Kerstin (2013): AufMod Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht.

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 C, NiSa. Hg. v. Arbeitsgruppe IBP in Hamburg und Schleswig-Holstein:

IBP Arbeitsgruppe (2011b): Integrierter Bewirtschaftungsplan Elbästuar. Gesamträumliche Betrachtung. Teil B, HH SH. 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).

Internationale Organisation für Normung (1995): 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, Wilhelm (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 Hafenbautechnischen Gesellschaft, 40), S. 47–59.

Kerner, Martin (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, Dietrich (1993): Veränderung der Morphologie von Nebengelben innerhalb eines Zeitraums von 6 bis 7 Jahren. Untersuchungsgebiete: Glückstädter Fahrwasser (1976, 1978 und 1981); Pagensander Nebengelbe (1975, 1977 und 1981); Lühesander Nebengelbe (1981, 1985, 1987 und 1988).

Marnitz, Ulla (1995): Über den Einfluß baulicher Veränderungen in der Elbe auf Über den Einfluß baulicher Veränderungen in der Elbe auf die Morphologie im Gebiet Hahnöfer Nebengelbe / 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>.

Netz, B. U.; Hartmann, J. (2010): Die Vogelwelt der Elbinsel Auberg-Drommel (Hamburger avifaun. Beitr., 37, S. 7-30).

Rolinski, Susanne; Eichweber, Günther (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, Gyula (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, Th.; Meisel, K. (1937): Stromregelungsarbeiten in der Unterelbe. bei der Osterbank 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, Uwe; Fuchs, Elmar; Maik, Heuner (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 Hafenbautechnische Gesellschaft 1983/84. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer (Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 40). Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=NG3RBgAAQBAJ>.

Visscher, Georg; Wolf, Gottfried (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, Hans-Heinrich; Eichweber, Günther (2010): System Seeschiffahrtsstraße – Schifffahrt, Umwelt, Entwicklungen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.): *Veranstaltungen - Flusssysteme in Raum und Zeit*. Koblenz. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde, S. 103–111.

WSA Elbe-Nordsee (2021): Kartenserie zum aktuellem Zustand der Ufer im Bereich von Nebenelben. WSA Elbe-Nordsee. Hamburg.

WSA HH; HPA (2005): Bericht zur Beweissicherung – Anpassung 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 (2020): Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe. Online verfügbar unter <https://www.fahrrinnenanpassung.de/kompensation.html>, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Karte zum Untersuchungsgebiet zwischen Elbe-Km 632 und 683 (Blau; entspricht in etwa MThw-Linie bzw. der Deichlinie) mit Benennung (gelbe Textfelder) der berücksichtigten Nebenelben und Seitenbereichen (Quelle DGMW: WSA EN).	16
Abbildung 2: Verlust von Überschwemmungsflächen durch den Deichbau seit dem Jahr 1500 n. Chr. (Quelle: Boehlich und Strotmann (2019))	19
Abbildung 3: Karte der Unterelbe aus dem Jahr 1695 (Quelle: Kappenberg und Fanger (2007)).....	21
Abbildung 4: Bathymetrie der Hahnöfer Nebenelbe und des Mühlenberger Lochs und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)	23
Abbildung 5: Abschnitt der Tideelbe im Bereich der heutigen Hahnöfer Nebenelbe wie 1878 (Quelle: Boehlich 2003)	24
Abbildung 6: Morphologische Einheiten im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe und des Mühlenberger Lochs im 20. Jahrhundert (Quelle: WSA EN 2019)	28
Abbildung 7: Volumenverteilung in der Hahnöfer Nebenelbe und des Mühlenberger Lochs für die Jahre 1956, 1975, 1992 und 1995 (Quelle: Fräßdorf 1995)	29
Abbildung 8: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe und des Mühlenberger Lochs (Quelle: WSA EN 2019)	31
Abbildung 9: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021)	32
Abbildung 10: Bathymetrie in der Lühesander Süderelbe, derzeit keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN).....	33
Abbildung 11: Strömungsgeschwindigkeiten in ausgewählten Nebenelben vor und nach anthropogenen Eingriffen in der Elbfahrrinne, (Quelle der Daten vor und nach 1984: Bund-Länder-Arbeitsgruppe Beweissicherung 1995), Quelle der Daten vor und nach 2004: WSA HH und HPA 2005).....	35
Abbildung 12 Morphologische Einheiten im Bereich der Lühesander Süderelbe im 20. Jahrhundert (Quelle: WSA EN 2019).....	36
Abbildung 13: Volumenverteilung in der Lühesander Süderelbe für die Jahre 1950, 1970 und 1991 (Quelle: Fräßdorf 1995)	37
Abbildung 14: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Lühesander Süderelbe (Quelle: WSA EN 2019).....	38

Abbildung 15: Aktueller Zustand der Ufer der Lühesander Süderelbe, einschließlich der Insel Lühesand und der Pionierinsel (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021).....	39
Abbildung 16: Bathymetrie der Haseldorfer Binnenelbe, keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN).....	40
Abbildung 17: Orthofotos zur Beschreibung der Entwicklung der Haseldorfer Binnenelbe zwischen 1958-2000 (Quelle: BfG 2004)	42
Abbildung 18: Morphologische Einheiten im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN 2019).....	44
Abbildung 19: Volumenverteilung in der Haseldorfer Binnenelbe für die Jahre 1946, 1959, 1973 und 1992, (Quelle: Fräßdorf 1995)	45
Abbildung 20: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, (Quelle: WSA EN 2019).....	46
Abbildung 21: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021)	47
Abbildung 22: Bathymetrie der Pagensander Nebelnelbe und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN).....	48
Abbildung 23 Unterelbe-Schnittkarte von 1721 (modifiziert von Bohn (2005) auf Grundlage einer Karte von Zimmermann/Hansebach, ohne Datum)	50
Abbildung 24: Abschnitt der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand, Zustand zu Beginn der 1920er Jahre, vor dem 10m Ausbau (Quelle: Visscher und Wolf 1987) ...	51
Abbildung 25: Abschnitt der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand, Zustand zu Beginn der 1970er Jahre nach dem 12m Ausbau (Quelle: Visscher und Wolf 1987) .	52
Abbildung 26: Morphologische Einheiten im Bereich der Pagensander Nebelnelbe im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN 2019).....	56
Abbildung 27: Volumenverteilung in der Pagensander Nebelnelbe für die Jahre 1950, 1971 und 1992 (Quelle: Fräßdorf 1995)	57
Abbildung 28: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Pagensander Nebelnelbe, (Quelle: WSA EN 2019).....	59
Abbildung 29: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Pagensander Nebelnelbe, (Quelle WSA Elbe-Nordsee 2021)	60
Abbildung 30: Bathymetrie der Schwarztonnensander Nebelnelbe, derzeit keine regelmäßigen Unterhaltungsbaggerungen (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)	61

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).....	63
Abbildung 32: Morphologische Einheiten im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbe im 20. Jahrhundert (Quelle: WSA EN 2019)	65
Abbildung 33: Volumenverteilung in der Schwarztonnensander Nebelbe für die Jahre 1950, 1970, 1983 und 1995, (Quelle: Fräßdorf 1995)	66
Abbildung 34 : Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbe, (Quelle: WSA EN 2019)	67
Abbildung 35: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Schwarztonnensander Nebelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021)	68
Abbildung 36: Bathymetrie der Glückstädter Nebelbe und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden, (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)	69
Abbildung 37: Morphologische Einheiten im Bereich der Glückstädter Nebelbe im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN 2019)	72
Abbildung 38: Volumenverteilung des Glückstädter Nebelbe für die Jahre 1950, 1961, 1973 und 1992, (Quelle: Fräßdorf 1995)	73
Abbildung 39: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich der Glückstädter Nebelbe, (Quelle: WSA EN 2019)	74
Abbildung 40: Aktueller Zustand der Ufer im Bereich der Glückstädter Nebelbe, (Quelle: WSA Elbe-Nordsee 2021)	75
Abbildung 41: Bathymetrie im Bereich des Wischhafener Fahrwassers und Bereiche in denen regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen durchgeführt werden, (Datenquelle: DGMW 2016, WSA EN)	77
Abbildung 42: System Wischhafener Nebelbe / Wischhafener Fahrwasser, Zustand 1978 und 1985, die Linien (gestrichelt 1978, durchgezogen 1985) zeigen die Tiefenlinien der Jahre an (Quelle: Samu 1987)	78
Abbildung 43: Morphologische Einheiten im Bereich des Wischhafener Fahrwassers im 20. Jahrhundert, (Quelle: WSA EN, 2019)	80
Abbildung 44 Volumenverteilung des Wischhafener Fahrwassers für die Jahre 1950, 1968 und 1987, (Quelle: Fräßdorf 1995)	81

Abbildung 45: Morphologische Einheiten, ermittelt auf Grundlage der DGMW 2010 und 2016 (oben) und Differenzendarstellung DGMW 2016 – DGMW 2010 (unten) im Bereich des Wischhafener Fahrwassers, (Quelle: WSA EN 2019)	82
Abbildung 46: Skizze zur geplanten Laservermessung. Klassische Fächerecholotvermessung (blau) sowie zusätzliche, neu konzipierte Laservermessung der flachen, trockengefallenen Seitenbereiche (rot) vom Bootsmast	87
Abbildung 47: Standorte der vom IWB vorgeschlagenen Sedimentproben für Pagensander Nebenelbe + Haseldorfer Binnenelbe	89
Abbildung 48: Vorgeschlagene Standorte für Sedimentbeprobungen a) in der gesamten Hahnöfer Nebenelbe und b) im zentralen Dünenfeld mit 100m Punktabstand	90
Abbildung 49: a) Prinzip der kombinierten Strömungsmessungen b) vorgesehene Messbereiche Steinloch und der Verbindung Pagensander NE - Haseldorfer BE.....	92
Abbildung 50 Übersicht über gesamte Fächerecholotpeilungen für 2020	93
Abbildung 51: Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 13.05.-16.05.2019.....	95
Abbildung 52: Digitales Geländemodell der Hahnöfer Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 25.08.-09.09.2020.....	96
Abbildung 53: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 24.06.2019.....	97
Abbildung 54: Digitales Geländemodell der Lühesander Süderelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 28.08.2020.....	97
Abbildung 55: Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 24.06. – 30.06.2019.....	98
Abbildung 56: Digitales Geländemodell der Haseldorfer Binnenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 15.06.-16.06..2020.....	99
Abbildung 57: Digitales Geländemodell der Pagensander Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 16.04. - 26.04.2019	100
Abbildung 58: Digitales Geländemodell der Pagensander Nebenelbe, erzeugt auf Grundlage der Vermessung vom 17.06.-03.07.2020	100
Abbildung 59: Differenzen zwischen dem DGMW 2016 und dem DGM 2019 der TUHH im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an	103
Abbildung 60: Differenzen zwischen dem DGMW 2016 und dem DGM 2019 der TUHH im Zentrum der Hahnöfer NE und Lage der Längsschnitte (Profildigramme).....	103

Abbildung 61: Beispielhafte Längsschnitte (Profildigramme) im Zentrum der Hahnöfer NE, oben: Profildigramm 1, unten Profildigramm 2	104
Abbildung 62: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Hahnöfer Nebeneibe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an.	105
Abbildung 63: a) Differenzen zwischen dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Zentrum der Hahnöfer NE und Lage der Längsschnitte (Profildigramme); b) Beispielhafte Längsschnitte im Bereich der Hahnöfer NE, Lage des Längsschnitts wie in a) markiert	106
Abbildung 64: 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 dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Schulau für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet	107
Abbildung 65: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Hahnöfer Nebeneibe (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).....	109
Abbildung 66: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Lühesander Süderelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an.....	111
Abbildung 67: 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 dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Hetlingen für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet.....	112
Abbildung 68: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (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).....	114
Abbildung 69: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an.....	115
Abbildung 70: Histogramme (links: kumulative Summenfunktion, rechts: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) der Sohlhöhen der Haseldorfer Binnenelbe a) und b) auf dem Raster des DGM 2019 der TUHH sowie c) und d) auf dem Raster des DGM 2020 der	

TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Kollmar für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet.....	116
Abbildung 71: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Pagensander Nebeneibe (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)	118
Abbildung 72: Differenzen zwischen a) dem DGMW 2016 und dem DGM 2020 der TUHH und b) dem DGM 2019 und dem DGM 2020 der TUHH im Bereich der Pagensander NE (blauen Boxen zeigen die Datenquelle der Daten im DGMW 2016 an). Rote und blaue Farben zeigen Depositions- bzw. Erosionsbereiche an	119
Abbildung 73: a) Räumliche Verteilung der Sohlsedimente (d_m klassifiziert nach DIN 4022) in der Pagensander Nebeneibe (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)	121
Abbildung 74: : 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 dem Raster des DGM 2020 der TUHH. Das mittlere Niedrigwasser wurde anhand der Pegeldaten Kollmar für die hydrologischen Jahre 2010-2020 berechnet	122
Abbildung 75: Abdeckung Bereich Tideelbe bzgl. des Datensatz für Parameter "Confidence" (Jahr 2012, Produkt des Projektes AufMod). „[...] Der Parameter Confidence [m] gibt die Vertrauenswürdigkeit der modellierten Bathymetrien an. Ausgehend von der Messgenauigkeit der zugrundeliegenden Vermessungsdaten (durchschnittlich +/- 20 cm) steigt die Confidence der interpolierten Daten mit zeitlicher und räumlicher Entfernung zum Messpunkt an. Niedrige Werte zeigen demnach eine hohe Vertrauenswürdigkeit der Modelldaten an, hohe Werte eine geringere.“ (Daten: Quelle AufMod).....	138
Abbildung 76: Exemplarische Darstellung eines Ausschnittes des DGMW 2016 (Datenquelle WSA EN) mit Untersuchungsgebiet als Referenz	139
Abbildung 77: Datenquellenkarte des DGMW 2016 (ARGE smile consult 2018) für Tideelbe mit Untersuchungsgebiet als Referenz	140
Abbildung 78: Ausschnitt des Bereiches Hahnöfer NE aus Datenquellenkarte für das DGMW 2016	141
Abbildung 79: Ausschnitt des Bereiches Pagensander NE aus Datenquellenkarte für das DGMW 2016	141
Abbildung 80: Exemplarische Darstellung der Höhendifferenz (± 1 m) des DGMW 2016 zu DGMW 2010 für einen Ausschnitt in der Mitte der Pagensander NE	144

Abbildung 81: Exemplarische Darstellung der Datenquellen gemäß Datenquellenkarte DGMW 2016 für einen Ausschnitt in der Mitte der Pagensander NE	145
Abbildung 82: Skizze zur Zusammensetzung der Messabweichungen.....	147
Abbildung 83: Korrekturdaten mit Teilunsicherheiten und Fehlerfortpflanzung für Fächerecholotmesssysteme	147
Abbildung 84: Ergebnisse der Vermessung des Drempels im Bereich des Krückausperrwerks im Jahr 2019. Die Höhen aus den Bauplänen sind für unterschiedliche Bereiche angegeben	150
Abbildung 85: Ergebnisse der Vermessung des Drempels im Bereich des Krückausperrwerks im Jahr 2020. Die Höhen aus den Bauplänen sind für unterschiedliche Bereiche angegeben	150
Abbildung 86: Schematische Darstellung von Bootskorrekturparametern (Quelle: Hypack user manual)	152
Abbildung 87: Sensitivitätsanalyse: Auswertung der Differenzenraster (Referenz - Szenario) für a) yaw-Variation und b) pitch-Variation, y-Achse in logarithmischer Skala	153
Abbildung 88 Auswirkung einer 5-Grad Änderung des yaw-Korrekturwerts auf die abgeleitete Bathymetrie in einem Sanddünenfeld in der Hahnöfer Nebenelbe	154
Abbildung 89: 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.....	155
Abbildung 90: Querschnitt der gesammelten Daten der Lühesander Süderelbe mit a) korrekten rollwerten und b) 5 Grad Rolländerung	155
Abbildung 91: a) Wertebereiche des 2σ bzw. 4σ - Filters mit identifizierten Ausreißern, b) Überhang/Unterschneidung Filter mit identifizierten Ausreißern	157
Abbildung 92: Ergebnisse der Sensitivitätsstudie A (Erste Phase der Datenaufbereitung mit statistischen bzw. manuellen Filtern), dargestellt ist die Auswertung der jeweiligen Differenzenraster (Referenzraster – Szenario-Raster) für die Hahnöfer NE, die Lühesander SE und das System Pagensander NE/Haseldorfer BE	159
Abbildung 93: 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 ..	160
Abbildung 94: Abgeleitete Morphozonen der Tideelbe im Bereich Pagensand für das Jahr 1900 (WSA EN) mit zusätzlicher Darstellung des Untersuchungsgebiets des Projektes (schwarze Line) als Referenz	162

Abbildung 95: Ausschnitt aus historischer Seekarte der Tideelbe im Bereich Pagensand/Schwarztonnensand von 1905 (Quelle BSH).....	162
--	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick zur verfeinerten Zielsetzung des Vorhabens	3
Tabelle 2: Übersicht zur Untersuchung ausgewählter Nebenelben (NE) im Vorhaben	17
Tabelle 3: Ausgewählte Baumaßnahmen im Bereich der Hahnöfer Nebenelbe (aus (Marnitz 1995) modifiziert und erweitert um Informationen aus (BfG 2002a; WSA HH und HPA 2005)	25
Tabelle 4: Ausgewählte Baumaßnahmen im Bereich Pagensander Nebenelbe, (Informationen aus: Schätzler und Meisel 1937; BfG 2002b, 2004).	53
Tabelle 5: Messverfahren und zu erhebende Parameter	84
Tabelle 6: Übersicht zu erfolgten Fächerecholotpeilungen auf den Nebenelbe (NE) und Stand der Aufbereitung der Daten (Stand April 2021).....	85
Tabelle 7: Übersicht über erfolgte Arbeitsschritte der Datenfilterung und Aufbereitung (Verwendete Software: Hypack; Werkzeug MBmax)	86
Tabelle 8: Übersicht zu Durchgeführten Feldtests für Laservermessung	88
Tabelle 9: Übersicht geplante Sedimentprobenmessung am Pagensander NE + Haseldorfer BE und Hahnöfer NE	91
Tabelle 10: Geeignete Zeiträume für die geplanten Strömungsmessungen.....	92
Tabelle 11: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Hahnöfer NE, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)	108
Tabelle 12: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Hahnöfer NE, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2020 TUHH	108
Tabelle 13: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Lühesander Süderelbe, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)	113
Tabelle 14: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Lühesander Süderelbe, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2020 TUHH....	113
Tabelle 15: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)	117
Tabelle 16: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Haseldorfer Binnenelbe, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2020 TUHH...	117
Tabelle 17: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Pagensander NE , bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2019 TUHH (geringere Abdeckung als DGM 2020)	120

Tabelle 18: Relative Änderungen der Zonen Tiefwasser 2 und Flachwasser im Bereich der Pagensander NE, bestimmt auf Grundlage der Rasters des DGM 2020 TUHH.....	120
Tabelle 19: Morphologie und aktuelle (2016-2020) morphologische Entwicklung der Hahnöfer NE	123
Tabelle 20: Morphologie und aktuelle (2016-2020) morphologische Entwicklung der Lühesander SE	124
Tabelle 21: Morphologie und aktuelle (2016-2020) morphologische Entwicklung der Haseldorfer BE.....	125
Tabelle 22: Morphologie und aktuelle (2016-2020) morphologische Entwicklung der Pagensander NE.....	126
Tabelle 23: Zeit- und Arbeitsplan Vorhaben Nebelben inklusive der Produkte und Meilensteine.....	129
Tabelle 24: Meilensteine im Vorhaben Systemverständnis Nebelben.....	130
Tabelle 25: Übersicht über zusammengestellte Literatur zu den Nebelben. Die als besonders relevant eingestufte Literatur ist hervorgehoben	132
Tabelle 26: Übersicht über die vom WSA EN im Rahmen des Vorhabens bereitgestellten Daten	135
Tabelle 27: Erfassungsgenauigkeiten für Messverfahren, Quelle: Metadaten zum DGMW 2016, https://www.kuestendaten.de/media/zdm/portaltideelbe/Allgemeine_Informationen/Archiv/GIS/DGMW_Unterelbe_2016_1x1m/Metadaten_DGMW_2016_ETRS89UTM32N.pdf , abgerufen am 10.06.2020)	143
Tabelle 28: Patch-Tests, durchgeführt mit dem Boot Nekton.....	152
Tabelle 29: Unterscheidung von qualitativen und quantitativen Aussagen im Rahmen der Analyse morphologischer Änderungen.....	161
Tabelle 30: Übersicht geplante Vermessungen er Nebelben (Stand April 2021).....	165