

Projekt/Vorhaben: **NOR-9-2 / +525-kV-DC-Leitung**
Konverterplattform NOR-9-2 – Wilhelmshaven2
Abschnitt Seetrasse

Aufgestellt: Bayreuth, den 30.06.2023 <i>i.V. Paul</i> <i>i.V. M. Heiny</i>		Unterlage zur Planfeststellung			
<p>Anlage 11.3 zum Vorhaben</p> <p>NOR-9-2</p> <p>±525 kV-HGÜ-Offshore-Netzanbindungssystem</p> <p>Konverterplattform NOR-9-2 – Wilhelmshaven2</p> <p>für den Bereich der 12-sm-Grenze bis Anlandungspunkt Dornumergrode</p> <p>– Abschnitt Seetrasse –</p>					
Prüfvermerk	smile consult				
Datum	08.09.2020				
Ersteller	MR & PM				
Änderung(en):					
Rev.-Nr.	Datum	Erläuterung			
1					



Trassen 2030 - Morphologische Studie

Entwicklung und Morphodynamik
der Trassenkorridore Baltrum und Langeoog

Version 0.1



Verfasser:

Malte Rubel
Peter Milbradt

Redaktionelle Bearbeitung:

Marianne Gronewold

© smile consult GmbH

Alle Rechte vorbehalten. Die Unterlagen dürfen nur nach Zustimmung der smile consult GmbH kopiert, vervielfältigt oder in andere Sprachen übersetzt werden.

Hannover, den 08.09.2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Milbradt', written in a cursive style.

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt

smile consult GmbH
Schiffgraben 11
30159 Hannover

Tel.: 0511 / 54 36 17 - 40
Fax: 0511 / 54 36 17 - 66

info@smileconsult.de
www.smileconsult.de

Inhaltsverzeichnis

1.	VERANLASSUNG	5
2.	UNTERSUCHUNGSRAUM	6
2.1.	Morphologische Einordnung	6
2.2.	Hydrodynamische Einordnung	9
3.	BATHYMETRISCHE BASISDATEN	12
3.1.	Seevermessungen	12
3.2.	ALS-Daten	13
3.2.1.	Detektion von Muschelvergesellschaftungen in ALS-Daten	15
3.3.	DGM-W Modelldaten	16
4.	UNTERSUCHUNGSMETHODE	18
4.1.	Räumlich-zeitliche Interpolation	18
4.1.1.	Sensitivitätsstudie Rasterauflösung	21
4.2.	Analysen auf den Metadaten	23
4.3.	Morphodynamische Analysen	24
5.	BATHYMETRISCHE BASISPRODUKTE	26
5.1.	Konsistente digitale bathymetrische Modelle	26
5.2.	Statistische Produkte	27
5.3.	Funktionalanalytische Produkte	30
6.	ERGEBNISSE DER MORPHODYNAMISCHEN STABILITÄTSANALYSEN	33
6.1.	Flächenhafte Analysen	33
6.2.	Analyse der Wattentwicklung auf der Basis der Watteinzugsgebiete	35
6.3.	Untersuchungen über Querschnitte	39
6.3.1.	Tidequerschnitt und Wattentwicklung	39
6.3.2.	Wattneigung	42
6.4.	Untersuchungen entlang der Trassenachsen	45

7.	OPTIMIERUNG DER TRASSENLAGE	48
7.1.	Verlegetiefe	50
8.	ZUSAMMENFASSUNG	55
9.	LITERATURVERZEICHNIS	56

1. Veranlassung

Die smile consult GmbH wurde im Mai 2020 von der TenneT TSO GmbH beauftragt, eine morphologische Studie zum Thema

Trassen 2030 – Morphologische Studie Entwicklung und Morphodynamik der Trassenkorridore Baltrum und Langeoog

durchzuführen.

Im Herbst 2019 fand im Landkreis Friesland die Antragskonferenz zu einem Raumordnungsverfahren für die Seekabel-Anbindung von Offshore Windparks an das Festland statt. Im Zuge des Raumordnungsverfahrens „Seetrassen 2030“ wurden im Hinblick auf eine solche Anbindung Vorzugskorridore für Seekabeltrassen im Küstenbereich bei Baltrum und Langeoog geplant (Quelle: www.arl-we.niedersachsen.de/Seetrassen-2030/seetrassen-2030-181711.html). Im Rahmen des Auftrages wurde der smile consult GmbH ein Polygon des Untersuchungsraums (siehe Abbildung 1) zur Verfügung gestellt.



Abbildung 1: Untersuchungsraum

2. Untersuchungsraum

2.1. Morphologische Einordnung

Die deutsche Nordseeküste ist gekennzeichnet durch ein komplexes System von Barriereinseln, Wattflächen und Tide beeinflussten Rinnensystemen, deren heutiges Erscheinungsbild erdgeschichtlich eine aus geologischer Sicht sehr junge Landschaftseinheit darstellt, die sich in ihren Grundzügen erst im Verlauf des Quartärs (2,6 Mio. Jahre bis Gegenwart) geformt hat. Während der Weichsel-Kaltzeit (115.000 bis 11.600 v. Chr.) war der Nordseebereich aufgrund des bis zu 130 m unter heutigem Niveau liegenden Meeresspiegels in Gänze festländisch und von Eismassen bedeckt. Erst in Folge der einsetzenden Klimaerwärmung zum Ende des Pleistozäns fand ein anhaltendes Abschmelzen der Gletscher und ein rasanter Anstieg des Meeresspiegels statt, wodurch vor ca. 5.000 Jahren ein Meeresspiegelniveau erreicht wurde, das annähernd mit dem heutigen zu vergleichen ist (WALTER 2001). Das vorherrschende Relief bestimmte im Folgenden die weitere Landschaftsentwicklung. Hochlagen der Ostfriesisch-Oldenburgischen Geest lenkten hierbei die Transgression bis zur nahezu vollständigen Überschwemmung der pleistozänen Basis (KRAMER 1989). Flachwasserbereiche wuchsen anschließend durch die Ablagerung von Sinkstoffen zum Teil so weit auf, dass sie wieder über das Niveau des Tideniedrigwassers auftauchten. Die ersten Wattansätze bildeten sich. Geestsporne begünstigten hierbei die Ab- und Anlagerung verschiedenartiger holozäner Küstensedimente (STREIF 1990). Diese sind charakteristisch für immer wiederkehrende Schwankungen des Meeresspiegelniveaus und damit verbundene unterschiedliche Ablagerungsmilieus. Zunächst noch periodisch überflutete Sandbänke entwickelten sich in Abhängigkeit der wirkenden Kräfte aus Strömung, Seegang und Wind über teilweise hochwasserfreie Strandwälle zu Düneninseln. Hierbei spielten vor allem auch initiale Vegetationsgesellschaften eine entscheidende Rolle, da sie vom Wind transportierte Sedimente einfingen und die entstandenen Inseln stabilisierten. Die Beziehung zum pleistozänen Untergrund ging verloren und es entstanden sogenannte Barriereinseln (WALTER 2001). Die aktuelle Konfiguration der Dünen tragenden Inseln entstand vor ca. 2.000 Jahren und erfuhr im Spiel der Naturkräfte einen ständigen Wandel ihrer Lage und Form (LÜDERS 1953).

Vor der niedersächsischen Küste erstrecken sich heute auf einer Länge von rund 90 km die Ostfriesischen Inseln, die sich aus den Hauptinseln Borkum, Juist, Norderney, Baltrum, Langeoog, Spiekeroog und Wangerooge (von West nach Ost) zusammensetzen. In der Abbildung 2 sind zusätzlich die zugehörigen Watteinzugsgebiete dargestellt. Die Watteinzugsgebiete (auch häufig Tidebecken genannt) werden i. d. R. seeseitig durch die vorgelagerten Inseln und auf der anderen Seite durch die Festlandküste begrenzt. Untereinander erfolgt die Abgrenzung durch die Watthöhenscheiden, die sich aus den bathymetrischen bzw. topographischen Gegebenheiten ergeben und entlang einer gedachten Linie der höchsten Erhebungen zwischen zwei benachbarten Watteinzugsgebieten erstrecken. Diese werden von Westen nach Osten als Osterems, Norderneyer Seegat, Wichter Ee, Accumer Ee, Otzumer Balje und Harle sowie Blaue Balje bezeichnet (GOLDENBOGEN et al. 1998). Die in dieser Form definierten Watteinzugsgebiete werden im Wesentlichen über das zugehörige Seegat gefüllt bzw. entleert. Den Seegaten seewärts vorgelagert befinden sich i. d. R. Riffbögen oder Ebbdeltas.

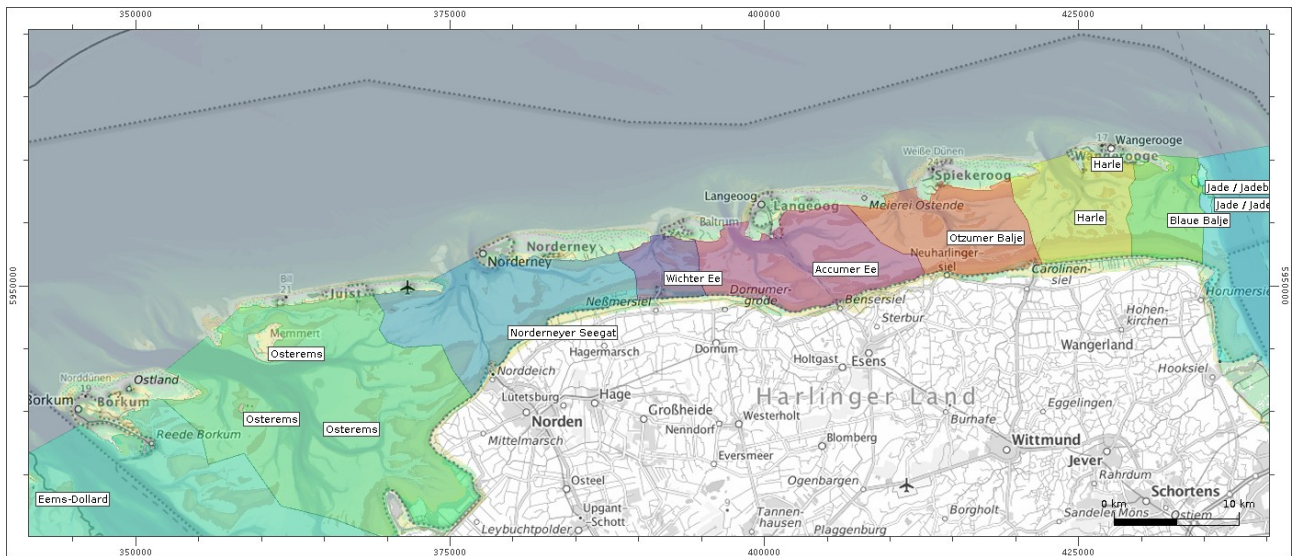


Abbildung 2: Ostfriesische Inseln mit zugehörigen Wateinzugsgebieten (Tidebecken) vor Bathymetrie des Jahres 2019

Aufgrund der Laufrichtung der Tidewelle entgegen dem Uhrzeigersinn in der Deutschen Bucht und den vorherrschenden meteorologischen Bedingungen sowie damit einhergehenden gestaltungswirksamen Wellenanlaufungen aus Nord bis Nord-West ist eine Neigung der Ostfriesischen Inseln zur Ostverlagerung zu beobachten (LUCK 1975). Um gewachsene Siedlungsstrukturen auf den Inseln zu schützen, fing man im 19. Jahrhundert damit an, die Westköpfe der Inseln zu sichern. Beispielsweise wurde im Jahr 1875 damit begonnen, den Westkopf der Insel Norderney zu befestigen (KRÜGER 1911). Die Stabilität solcher Sicherungen muss in der Regel durch künstliche Strandauffüllungen aufrechterhalten werden.

Der nach der letzten Eiszeit zu beobachtende starke Anstieg des mittleren Meeresspiegels (MSL) hat sich von 5.000 bis 2.000 v. Chr. auf das annähernd heutige Niveau eingependelt. Beobachtungen des mittleren Meeresspiegels über die letzten hundert Jahre weisen darauf hin, dass sich der globale Meeresspiegelanstieg seit den 1960er Jahren beschleunigt hat. Die durchschnittliche Anstiegsrate des Meeresspiegels im Zeitraum 1993 bis 2018 auf der Basis von Satellitenmessungen lag bei etwa 3,0 bis 3,3 mm/Jahr.

Für die Nordsee (WAHL et al. 2013) und insbesondere die Deutsche Bucht gibt es Analysen der Entwicklung des MSL über unterschiedliche Zeiträume und Detaillierungsgrade mit zum Teil sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Einen guten Überblick über Verfahren und Ergebnisse in der Deutschen Bucht gibt der Abschlussbericht zum Forschungsprojekt „Analyse von hochaufgelösten Tidewasserständen und Ermittlung des MSL an der deutschen Nordseeküste“ (AMSEL 2011). In der Abbildung 3 sind die Ergebnisse der linearen Trendanalyse für verschiedene Pegel der Deutschen Nordseeküste aufgetragen. Die Abkürzung RMSL steht hierbei für relativer MSL und soll verdeutlichen, dass die durchgeführten Analysen auf der Basis von direkt beobachteten Zeitreihen durchgeführt wurden, die ggf. durch Vertikalbewegungen des Landes beeinflusst sind.

Pegel	Lineare trends des RMSL für verschiedene Zeitfenster $\pm 1\text{-}\sigma$ Standardfehler [mm/a] (Korrelation mit der synthetischen Zeitreihe - Deutsche Bucht)				
	1843-2008	1901-2008	1937-2008	1951-2008	1971-2008
List (+)	-	-	2,0 \pm 0,3 (0,98)	2,4 \pm 0,4 (0,98)	4,2 \pm 0,8 (0,98)
Hörmum (+)	-	-	1,8 \pm 0,3 (0,98)	2,1 \pm 0,4 (0,98)	3,7 \pm 0,8 (0,98)
Wyk (+)	-	-	-	2,8 \pm 0,5 (0,98)	4,6 \pm 0,8 (0,97)
Dagebüll (+)	-	-	1,7 \pm 0,4 (0,95)	2,2 \pm 0,5 (0,96)	3,7 \pm 0,9 (0,97)
Wittdün (+)	-	-	2,4 \pm 0,3 (0,97)	2,6 \pm 0,4 (0,97)	3,9 \pm 0,8 (0,97)
Husum (+)	-	-	2,2 \pm 0,3 (0,96)	2,5 \pm 0,5 (0,96)	3,6 \pm 0,9 (0,97)
Helgoland	-	-	-	2,1 \pm 0,4* (0,96)	3,5 \pm 0,7 (0,96)
Cuxhaven (-)	2,3 \pm 0,1 (0,99)	2,2 \pm 0,2 (0,96)	2,1 \pm 0,3 (0,95)	2,0 \pm 0,4 (0,94)	3,6 \pm 0,8 (0,94)
Bremerhaven (-)	-	-	1,2 \pm 0,3 (0,92)	1,0 \pm 0,5 (0,90)	2,5 \pm 0,8 (0,94)
Lt. Alte Weser (-)	-	1,9 \pm 0,2* (0,88)	1,7 \pm 0,3 (0,95)	1,7 \pm 0,4 (0,95)	3,1 \pm 0,8 (0,96)
Wilhelmshaven (-)	-	-	1,9 \pm 0,3 (0,98)	2,0 \pm 0,4 (0,99)	3,4 \pm 0,7 (0,99)
Norderney (-)	-	2,4 \pm 0,1 (0,95)	2,4 \pm 0,3 (0,96)	2,8 \pm 0,4 (0,95)	4,2 \pm 0,6 (0,96)
Emden (-)	-	-	-	1,3 \pm 0,4 (0,94)	2,1 \pm 0,7 (0,94)
synthetische Zeitreihe (Schleswig-Holstein)	-	-	2,2 \pm 0,3 (0,99)	2,5 \pm 0,4 (0,99)	4,1 \pm 0,8 (1,00)
synthetische Zeitreihe (Niedersachsen)	2,0 \pm 0,1 (1,00)	1,7 \pm 0,1 (0,99)	1,8 \pm 0,3 (0,99)	1,8 \pm 0,4 (0,99)	3,2 \pm 0,7 (0,99)
synthetische Zeitreihe (Deutsche Bucht)	2,0 \pm 0,1	1,7 \pm 0,1	2,0 \pm 0,3	2,1 \pm 0,4	3,6 \pm 0,7

* Für einige Jahre des berücksichtigten Zeitraumes liegen keine Daten vor, es sind aber mind. 93% verfügbar

Abbildung 3: Lineare Trendanalysen auf Basis der RMSL-Zeitreihen für die Deutsche Bucht (aus AMS_{EL} 2011)

Dieser anhaltende Anstieg des MSL führt auch zukünftig zu Veränderungen des Küstenvorfeldes der Deutschen Bucht. Markant ist hierbei das Mitwachsen der Watten (siehe Abbildung 4). Die Bestimmung erfolgte durch Mittelwertbildung aller Modellstützstellen, die im Intervall von -2 bis +2 m NHN liegen. Das mittlere Wachstum der Watten beträgt, je nachdem welches Mittelungsintervall gewählt wird, zwischen 3,7 bis 4,4 mm/Jahr und liegt somit leicht über dem mittleren Anstieg des MSL. Für das Wattenzugsgebiet Accumer Ee, in dem die geplanten Trassen liegen, erfolgt eine detaillierte Auswertung in den Abschnitten 6.2 und 6.3.

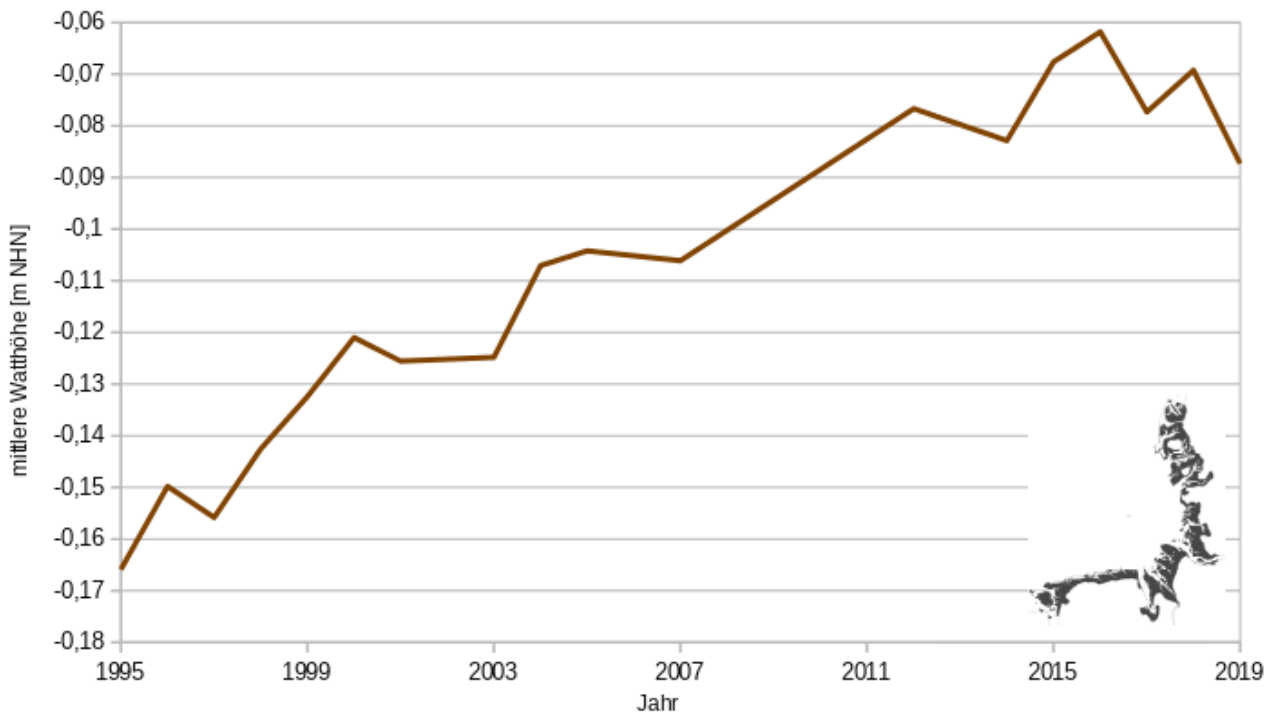


Abbildung 4: Entwicklung der mittleren Watthöhe in der Deutschen Bucht, Mittelwert über alle Höhen zwischen -2 und +2 m ü. NHN

2.2. Hydrodynamische Einordnung

Die zu betrachtenden Trassenkorridore queren die Inseln Baltrum und Langeoog jeweils im Osten der Inseln. Beide Inseln gehören zur vorgelagerten Inselkette des Ostfriesischen Wattenmeeres als südliche Begrenzung der Deutschen Bucht (südöstlicher Bereich der Nordsee). Die Ostfriesische Küste mit ihren vorgelagerten Inseln und dahinterliegenden Wattbereichen wird durch halbtägige Tiden, starken Westwinden und einer Küstenlängsströmung von West nach Ost geprägt. Nipp- und Springtiden modulieren den Tidehub um bis zu $\pm 0,7$ m. Der Bereich des mittleren Tidehubs liegt zwischen 2,4 m auf der Insel Borkum im Westen bis 3,0 m bei Wangerooge im Osten (EasyGSH-DB 2020). Die Jahresmittel der signifikanten Wellenhöhen liegen im Seegebiet der Ostfriesischen Inseln und Küste zwischen 0,7 und 1,0 m (NIEMEYER 1992). Nach der Klassifikation von (HAYES 1975 und 1979) ist die Küste der südlichen Nordsee mesotidal mit einem gemischten bis leicht Tide dominierten Regime.

Diese hydrodynamischen Bedingungen induzieren u. a. einen küstenparallelen Sedimenttransport von West nach Ost (siehe Abbildung 5) seeseitig der vorgelagerten Inseln (MILBRADT et al. 2015; HERRLING und WINTER 2018).

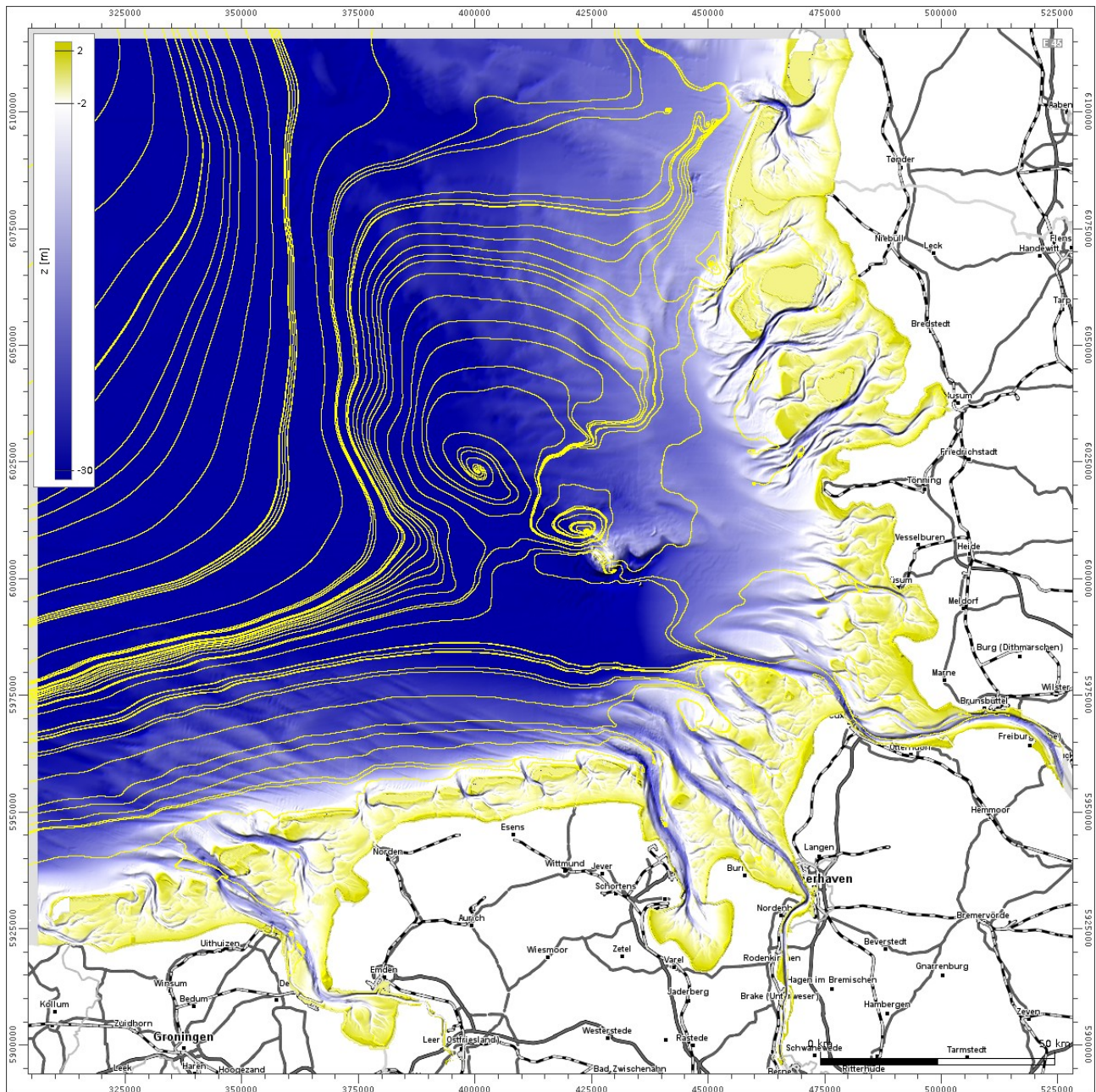


Abbildung 5: Transportpfade auf der Basis der resultierenden Bodenschubspannungen des Jahres 2006

Dieser Transport wird durch die Tiderinnen zwischen den Inseln gestört. Die Inseln und zugehörigen Tiderinnen zerlegen die Rückseitenwatten in Wateinzugsgebiete. Das Füllen und Entleeren dieser Wateinzugsgebiete erfolgt im Tiderhythmus durch die Seegaten mit schmalen, tiefen Rinnen über ein weitverzweigtes System von Baljen und Prielen. Seewärts sind die Seegaten von Ebbdeltas in Form von Riffbögen begrenzt. Vor den Inseln haben sich ausgeprägte seegangsinduzierte Unterwasserdünen und Sandriff-Rinnen-Systeme ausgebildet (siehe Abbildung 6), die jahreszeitlich variabel sind.

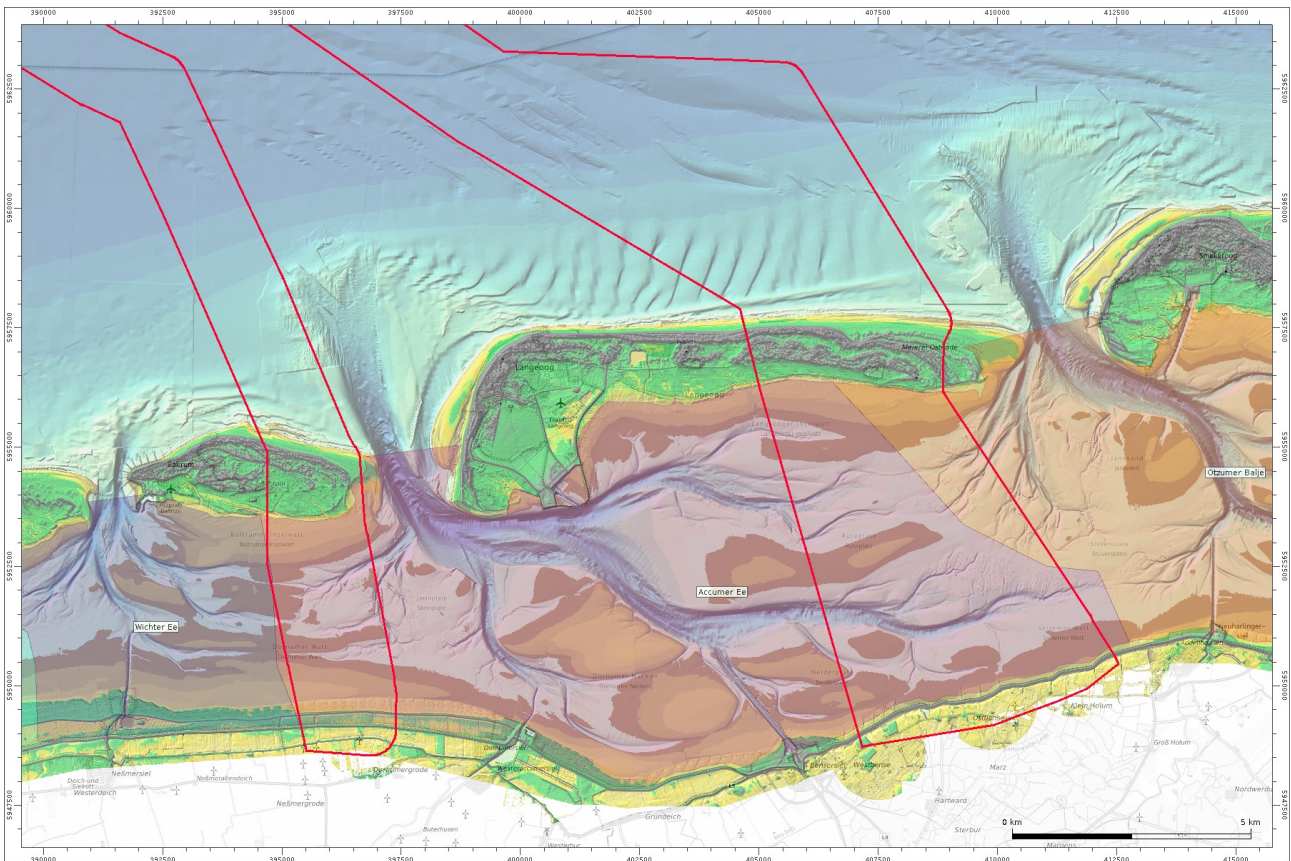


Abbildung 6: Inseln Baltrum und Langeoog mit dem gemeinsamen Wattenzugsgebiet Accumer Ee, der Bathymetrie 2019 und der Lage des Untersuchungsraums

3. Bathymetrische Basisdaten

Für die datenbasierten morphodynamischen Untersuchungen kommt das sogenannte Funktionale Bodenmodell (FBM) zum Einsatz (MILBRADT 2011). Das FBM ist ein datenbasiertes Hindcast-Simulationsmodell des Gewässerbodens der Deutschen Bucht. Es ist datenbankbasiert umgesetzt und verfügt über Softwarekomponenten zur Interpolation konsistenter digitaler bathymetrischer Modelle sowie zugehöriger Analysen.

In einer Datenbank werden die Vermessungsdaten mit zugehörigen Metadaten als quasi-konsistentes stetiges Raum-Zeit-Modell abgelegt. Die Metadaten orientieren sich an gängigen Standards und werden durch spezifische Zusatzinformationen ergänzt. Hierzu zählen u. a. auch Angaben zur Höhen- und Lagegenauigkeit. In der Regel sind nur Abschätzungen möglich. Bei neueren Vermessungen sind manchmal Angaben zur Höhengenaugkeit mitprotokolliert.

3.1. Seevermessungen

Messdaten des Gewässerbodens, die schiffsgestützt aufgenommen wurden und werden, werden als Seevermessungen bezeichnet. Großräumige Seevermessungen in der inneren Deutschen Bucht werden durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) durchgeführt. Die Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) vermessen in der Regel die Schifffahrtswege im Rahmen ihrer gesetzlichen Aufgaben zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt. Diese Peildaten sind seit etwa 1982 digital im 3D-Datenarchiv des Bundes archiviert.

Für die Analyse morphologischer Änderungen im Bereich von Baltrum und Langeoog wurden digitale Seevermessungen der zuständigen Behörden BSH und WSA Emden herangezogen.

In der Abbildung 7 sind exemplarisch zwei Seevermessungen des BSH aus den Jahren 1998 und 2019 als modellierte Oberfläche mit der Lage der zugehörigen Vermessungspunkte dargestellt. Bei schiffsgestützten Vermessungen wird durch Schall die relative Wassertiefe ermittelt (Echolot) und anschließend über Schätzungen des zugehörigen Wasserstandes die absolute Lage des Meeresbodens bestimmt. Sowohl die Lage im Ort als auch in der Tiefe sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Prinzipiell kann gesagt werden, dass je älter die Vermessungsdaten sind, desto größer ist die Messunschärfe. Analoges gilt auch bzgl. der Wassertiefe und der Entfernung zur Küste (geographische Festpunkte). In der Regel ist die Bestimmung der Lage im Ort wesentlich genauer als die der Tiefe (bis zu einem Faktor von 10). Bei Seevermessungen kann heute von einer Tiefengenaugkeit nicht besser als ± 20 cm ausgegangen werden.

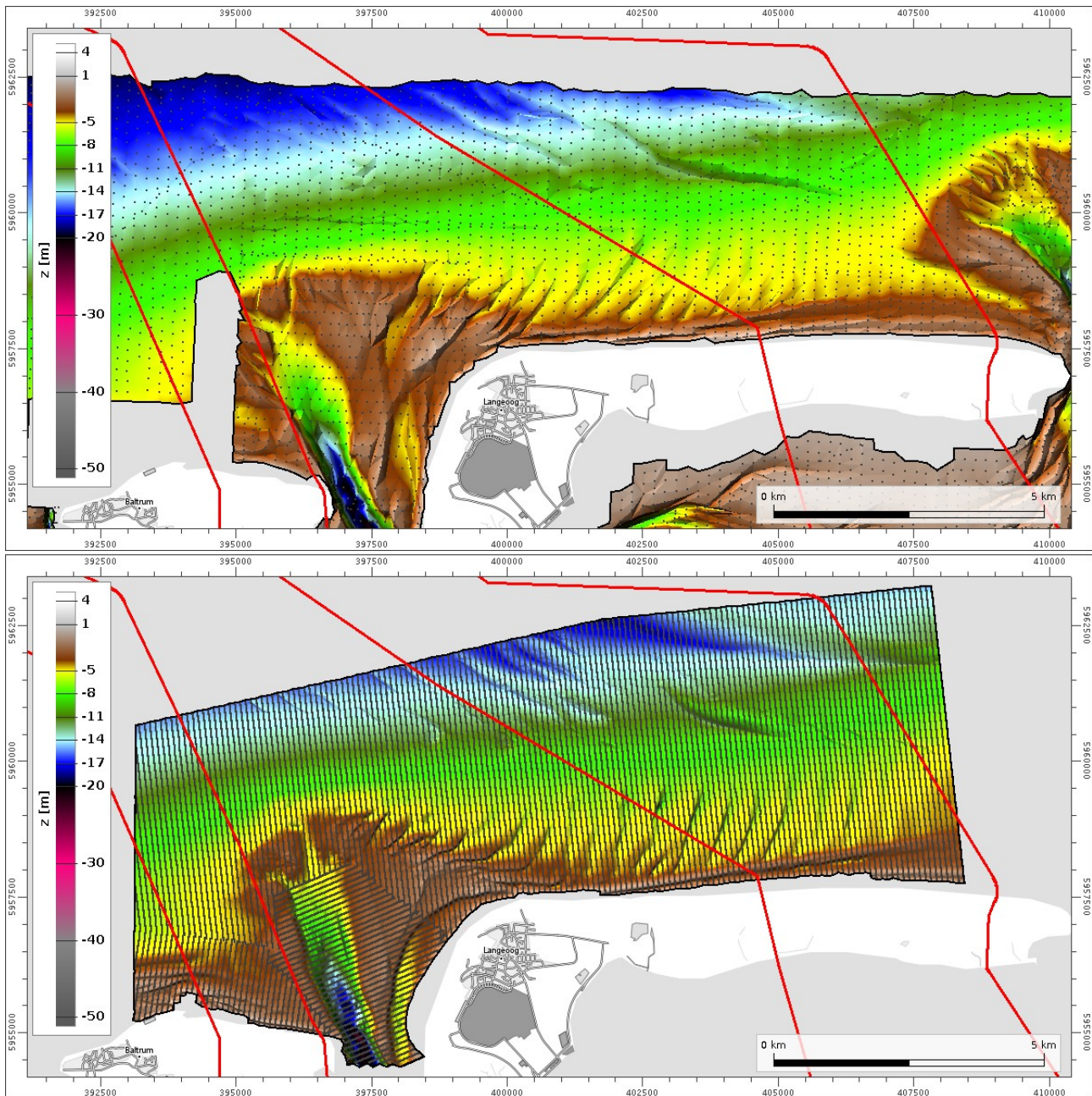


Abbildung 7: Exemplarische Vermessungsdaten BSH alt (1998, oben, 7000_-9999.0_-9999.0_19980701_S_4057_28.07.1998_1) und neu (2019, unten, 7070_393_595_20180206_K_0.0_1_68548)

3.2. ALS-Daten

Luftgestützte Vermessungen nutzen Laser, um die trockene Geländeoberfläche abzutasten. Mit sogenannten Bathymetrielasern, die Laser in zwei Farben (rot und grün) verwenden, ist es sogar möglich, in den Wasserkörper „hineinzuschauen“. Bei der aktuellen Beauftragung von ALS-Daten wird eine Höhengenaugigkeit von ± 15 cm für jeden Messpunkt gefordert. Die Messgenauigkeit wird auf festen, terrestrisch vermessenen Flächen auf Land nachgewiesen. Gewöhnlich wird zusätzlich eine bestimmte Anzahl von Punkten pro m^2 gefordert – hier sind 4 bis 8 Punkte üblich. Für die

Höhenbestimmung werden in der Regel 1 x 1 m-Kacheln verwendet und für diese eine repräsentative Höhe bestimmt. Diese repräsentative Höhe hat dann eine Höhenunschärfe von 12 bis 13 cm, je nach Anzahl der Vermessungspunkte pro m². Angaben zur Lagegenauigkeit werden in der Regel nicht gefordert und auch nicht geliefert.

In der Abbildung 8 ist exemplarisch die eingefärbte Punktmenge der ALS-Befliegung aus dem Jahr 2019 durch die Milan-Geoservice GmbH für den Wattbereich von Baltrum dargestellt.

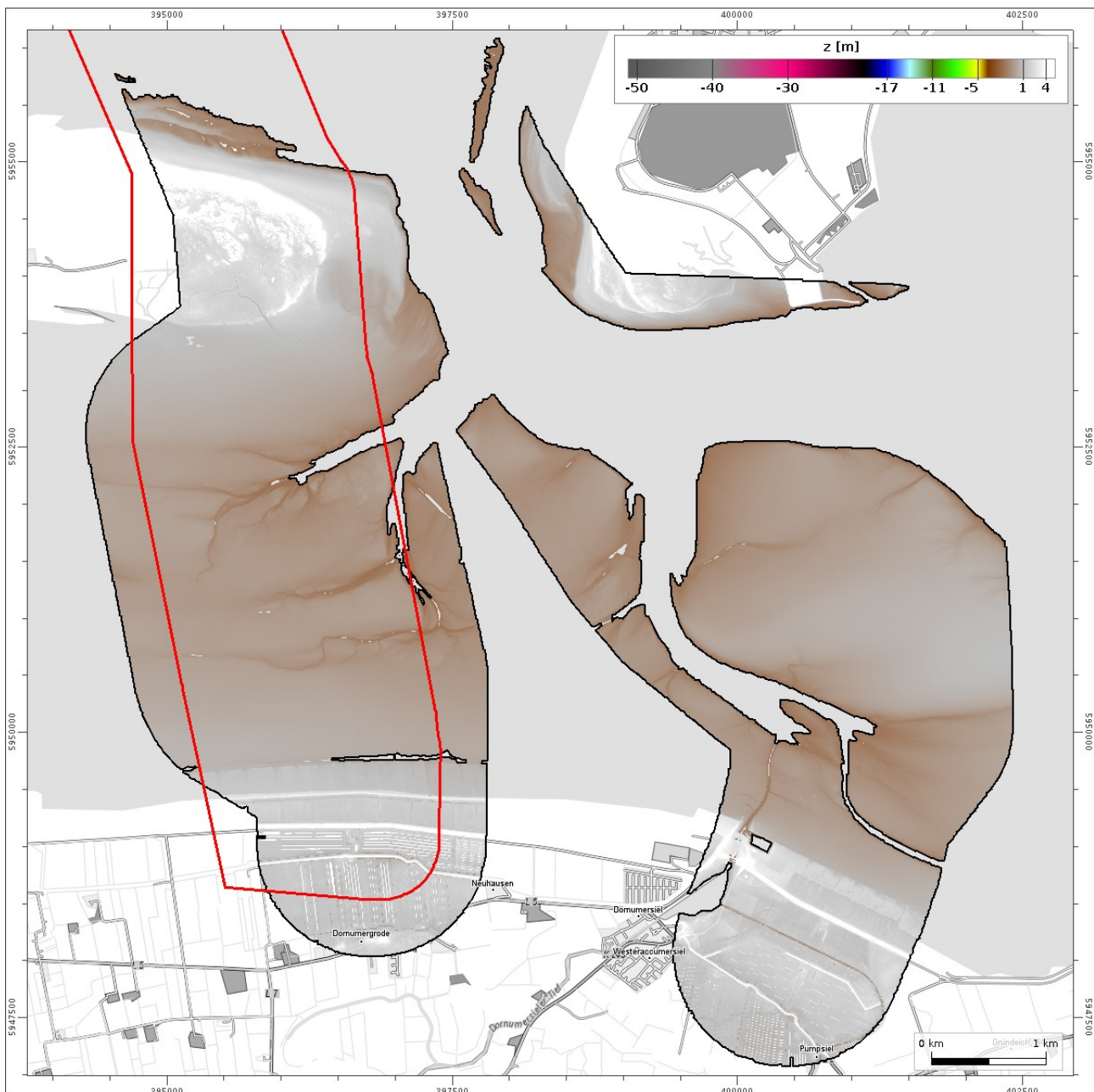


Abbildung 8: Exemplarischer Ausschnitt ALS-Daten der Milan-Befliegung Baltrum 2019

3.2.1. Detektion von Muschelvergesellschaftungen in ALS-Daten

Bei der Analyse und anschließenden Erstellung konsistenter digitaler Geländemodelle fielen auf den Watten Bereiche mit einer ausgesprochenen unruhigen Struktur auf (siehe Abbildung 9).

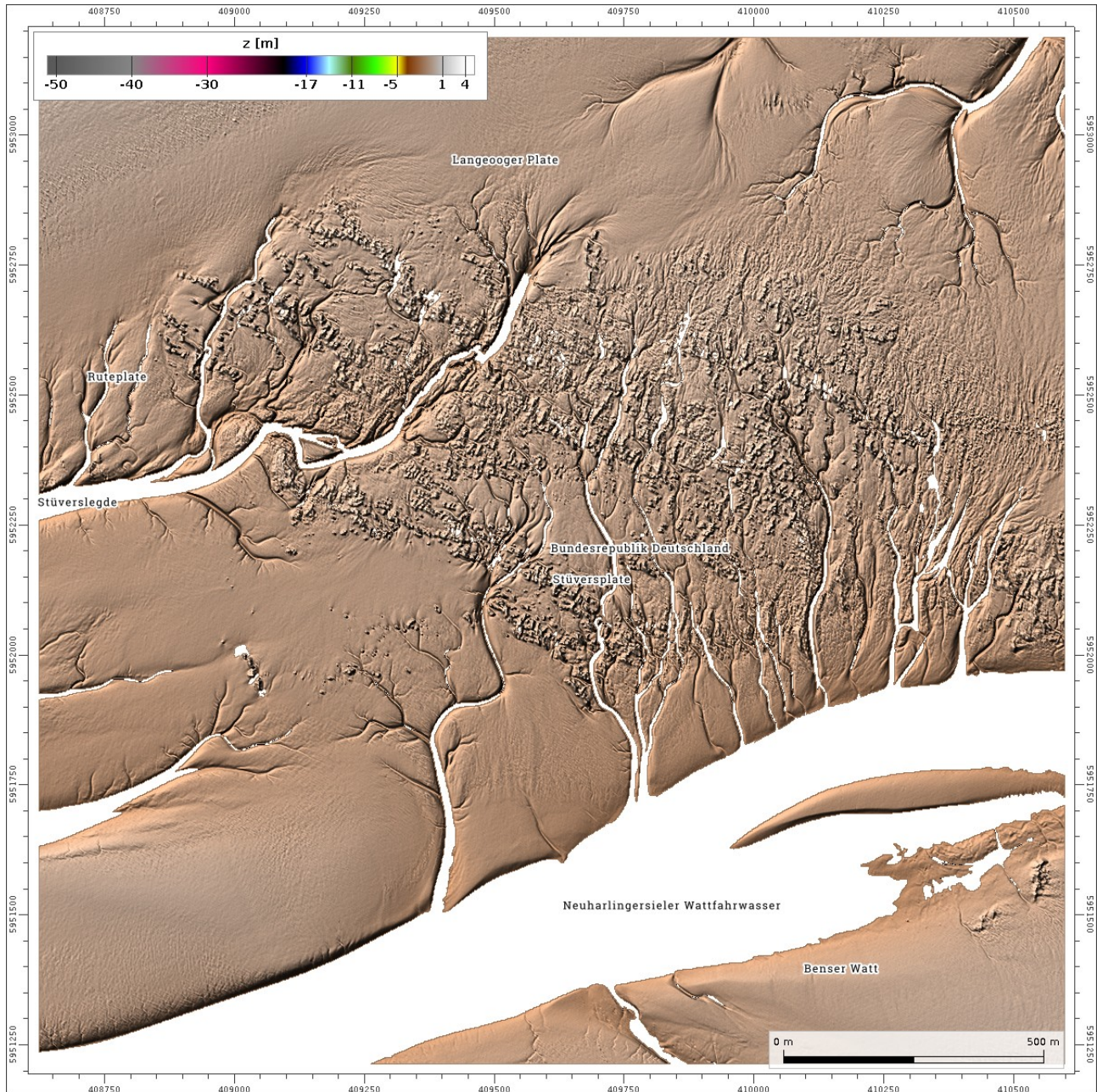


Abbildung 9: ALS-Daten (Milan-Befliegung Langeoog 2019) mit auffällig rauer Oberflächenstruktur (Stüversplate südl. von Langeoog)

Zusammenhängende Flächen lassen sich insbesondere dann identifizieren, wenn nicht die Geländeoberfläche, sondern die Varianz der ALS-Punkte dargestellt wird (wie in Abbildung 10). Überlagert man diese Darstellung mit kartierten und veröffentlichten Muschelvergesellschaftungen (Bänke, Riffe) des Jahres 2016 (Nationalparkverwaltung (NLPV) Niedersächsisches Wattenmeer), so ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Es kann davon ausgegangen werden, dass

zukünftig gute ALS-Daten zur Identifikation von Muschelvergesellschaftungen herangezogen werden können.

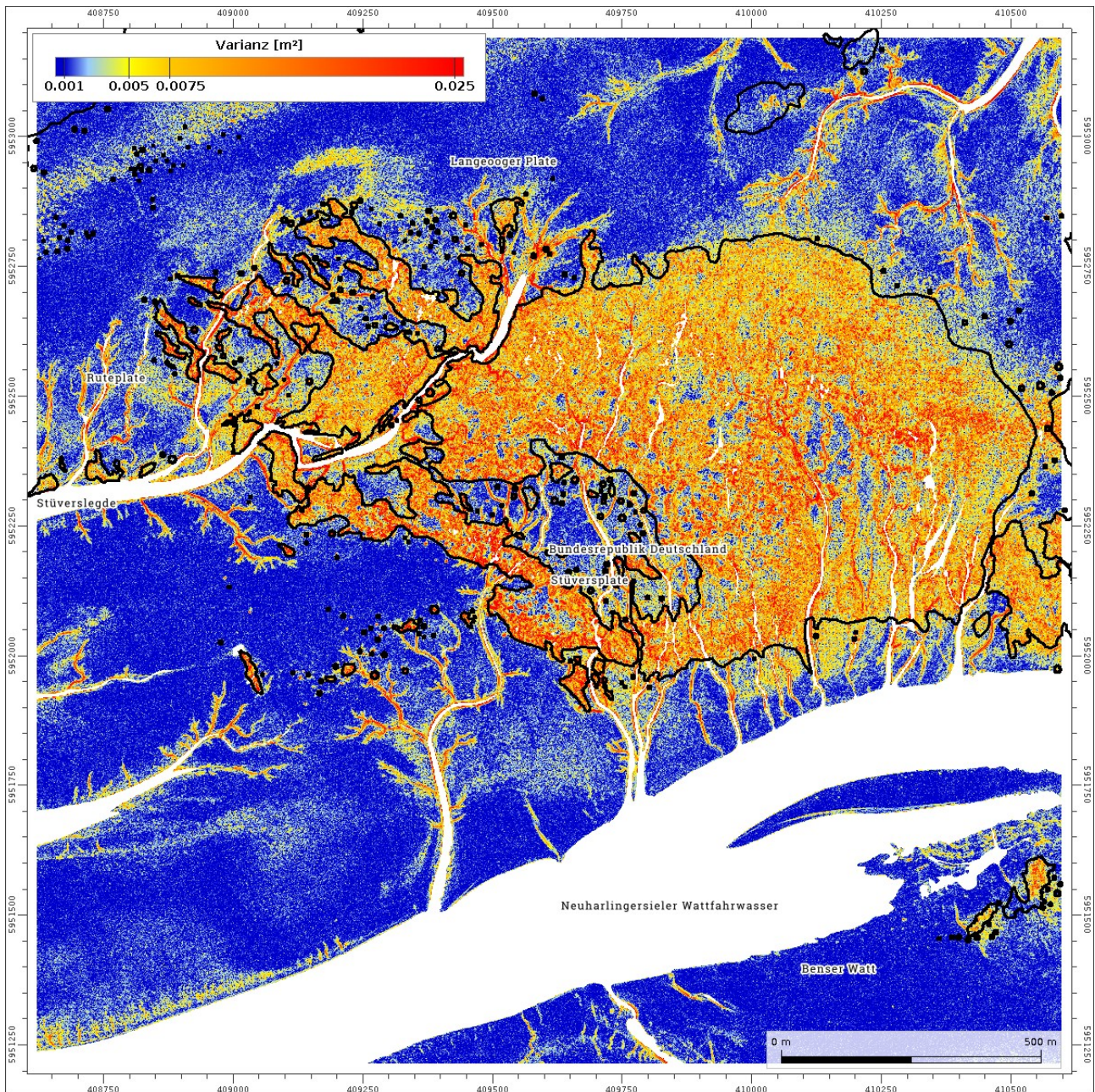


Abbildung 10: Varianz der Z-Werte mit Muschelflächen (NLPV Niedersächsisches Wattenmeer 2016)

3.3. DGM-W Modelldaten

Um eine Abdeckung der gesamten Fläche zu erhalten, wurden LÖcher mit Daten aus dem DGM-W Ems des Jahres 2015 geschlossen (PORTAL TIDEEMS DER WSV 2020). Die Ausdehnung ist in der Abbildung 11 gut zu erkennen. Den Datensätzen wurde als Aufnahmeintervall das gesamte Jahr 2015 zugeordnet.

Ein DGM-W, Abkürzung für Digitales Geländemodell des Wasserlaufes, entsteht durch die Komposition der zum Zeitpunkt aktuellsten Vermessungsdaten. In neueren DGM-Ws werden in der Regel auf trockenfallenden Flächen ALS-Daten herangezogen und diese mit Seevermessungen verknüpft. Bereiche, in denen keine „geeigneten“ Daten vorliegen, werden durch Ersatzmodelle geschlossen. Für das DGM-W Ems 2015 kann auf trockenfallenden Flächen von einer Höhenunschärfe ± 12 bis 13 cm und bei den Seevermessungen nicht besser als ± 20 cm ausgegangen werden. Angaben zur Lagegenauigkeit können nicht spezifiziert werden.

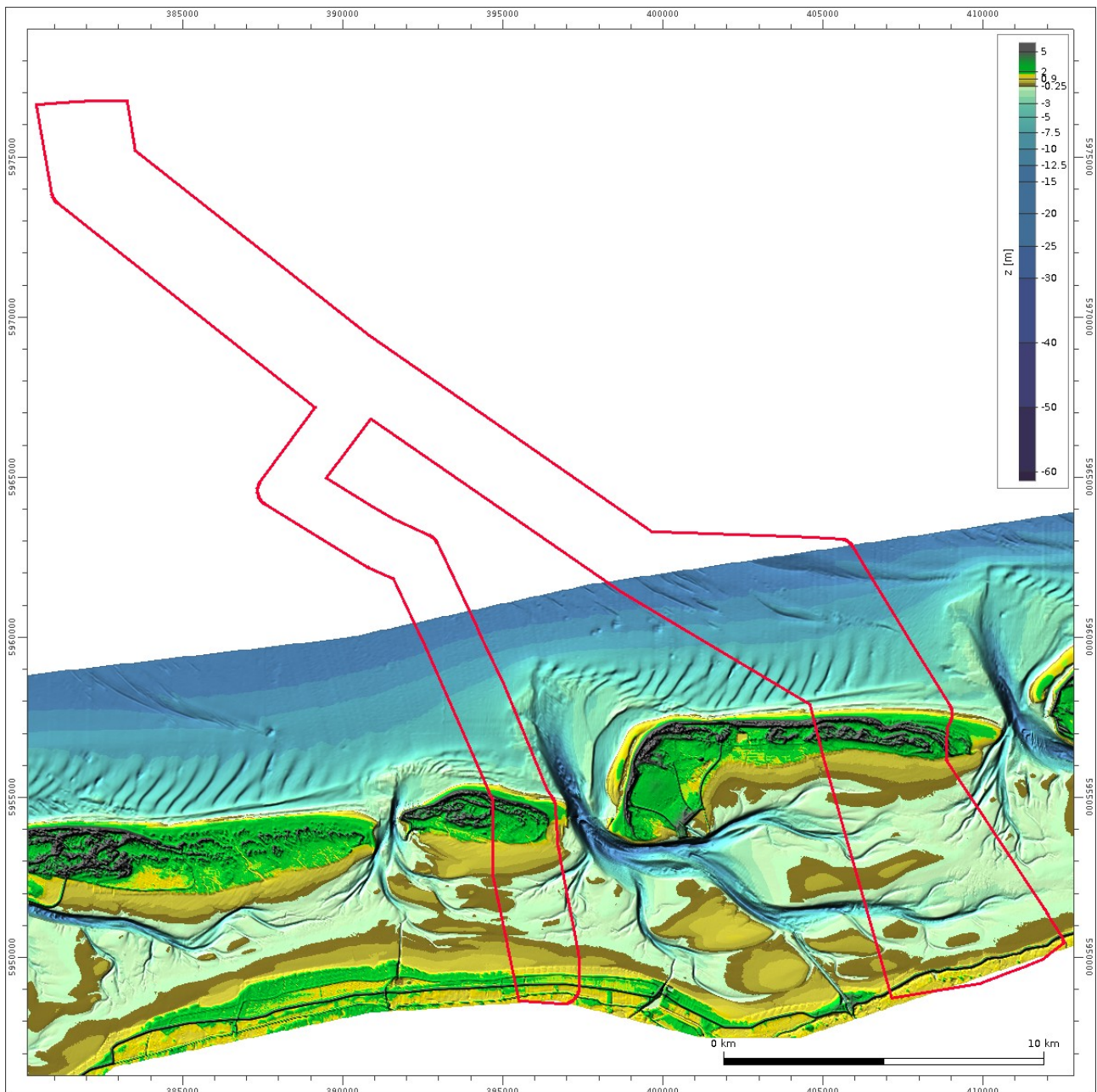


Abbildung 11: Gewässerbodenmodell und Ausdehnung des DGM-W Ems 2015 im Untersuchungsraum

4. Untersuchungsmethode

Die Analyse der morphodynamischen Verhältnisse im Untersuchungsraum erfolgt datenbasiert im Hindcast. Hierzu kommen das sogenannte FBM und aus diesem abgeleitete konsistente digitale bathymetrische Modelle in einer Auflösung von 10 x 10 m für den Zeitraum von 1995 bis 2019 zum Einsatz. Die konsistenten bathymetrischen Modelle werden räumlich-zeitlich zum 01.07. der Jahre 1995 bis 2019 (25 Jahre) auf dem FBM interpoliert. Auf der Basis von bathymetrischen Modellen dieser Zeitreihe lassen sich nun eine Vielzahl von Auswertungen und Analysen durchführen. Analysen lassen sich hierbei an jedem Punkt des 10 x 10 m-Rasters, an Querschnitten oder über Kontrollflächen erstellen. Neben statistischen Auswertungen, wie Minimum, Mittelwert und Varianz, lassen sich auch funktionalanalytische Kennwerte, wie Erosions- und Sedimentationsraten, über die Zeit betrachten.

4.1. Räumlich-zeitliche Interpolation

Zur Beschreibung der Veränderungen des Gewässerbodens wird von der Modellvorstellung einer kontinuierlichen Funktion $z(x,y,t)$ in Raum und Zeit ausgegangen.

Der Aufbau der bathymetrischen Modellkomponente ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt. In Bereichen, in denen Wiederholungsmessungen vorhanden sind, stellen die Zeitpunkte der frühesten und neuesten Tiefenmessung die Grenzen einer kontinuierlichen Raum-Zeit-Bathymetrie dar. Innerhalb dieser können durch die im FBM implementierten räumlich-zeitlichen Interpolationsverfahren quasi-synoptische Tiefenverteilungen berechnet werden. Unter einer quasi-synoptischen Bathymetrie wird also der horizontale Schnitt durch die kontinuierliche Raum-Zeit-Bathymetrie verstanden (wie in Abbildung 12 dargestellt).

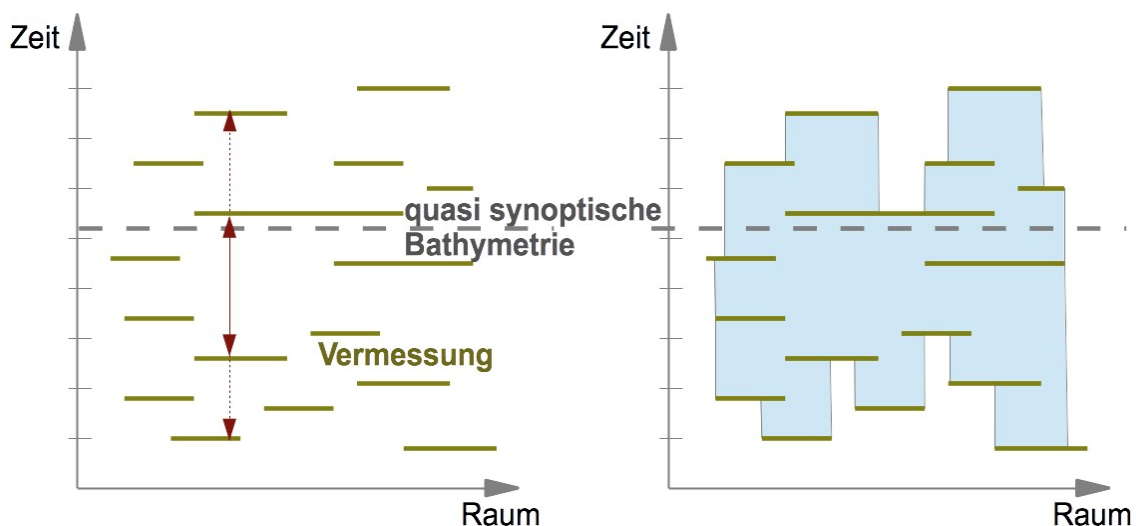


Abbildung 12: Schematische Darstellung einer Raum-Zeit-Interpolation (links) und des zeitlichen Aussagebereiches (rechts)

Um die Lage des Gewässerbodens an einer Stelle und zu einem Zeitpunkt zu erhalten, wird in allen den betrachteten Ort enthaltenden Vermessungen der z-Wert bestimmt und mit dem Aufnahmezeitpunkt verknüpft. Anschließend wird in der Zeit interpoliert. Abbildung 13 zeigt eine auf diese Weise generierte Tiefenverteilung des Untersuchungsraums zum 01.07.2019.

Die Höhen- und Lageunschärfe der abgeleiteten digitalen Modelle können nicht besser sein als die der zur Interpolation herangezogenen Vermessungsdaten. Vielmehr muss von einer weiteren Verschlechterung ausgegangen werden, wenn der betrachtete Punkt nicht am Ort und zum Zeitpunkt der eigentlichen Vermessung liegt.

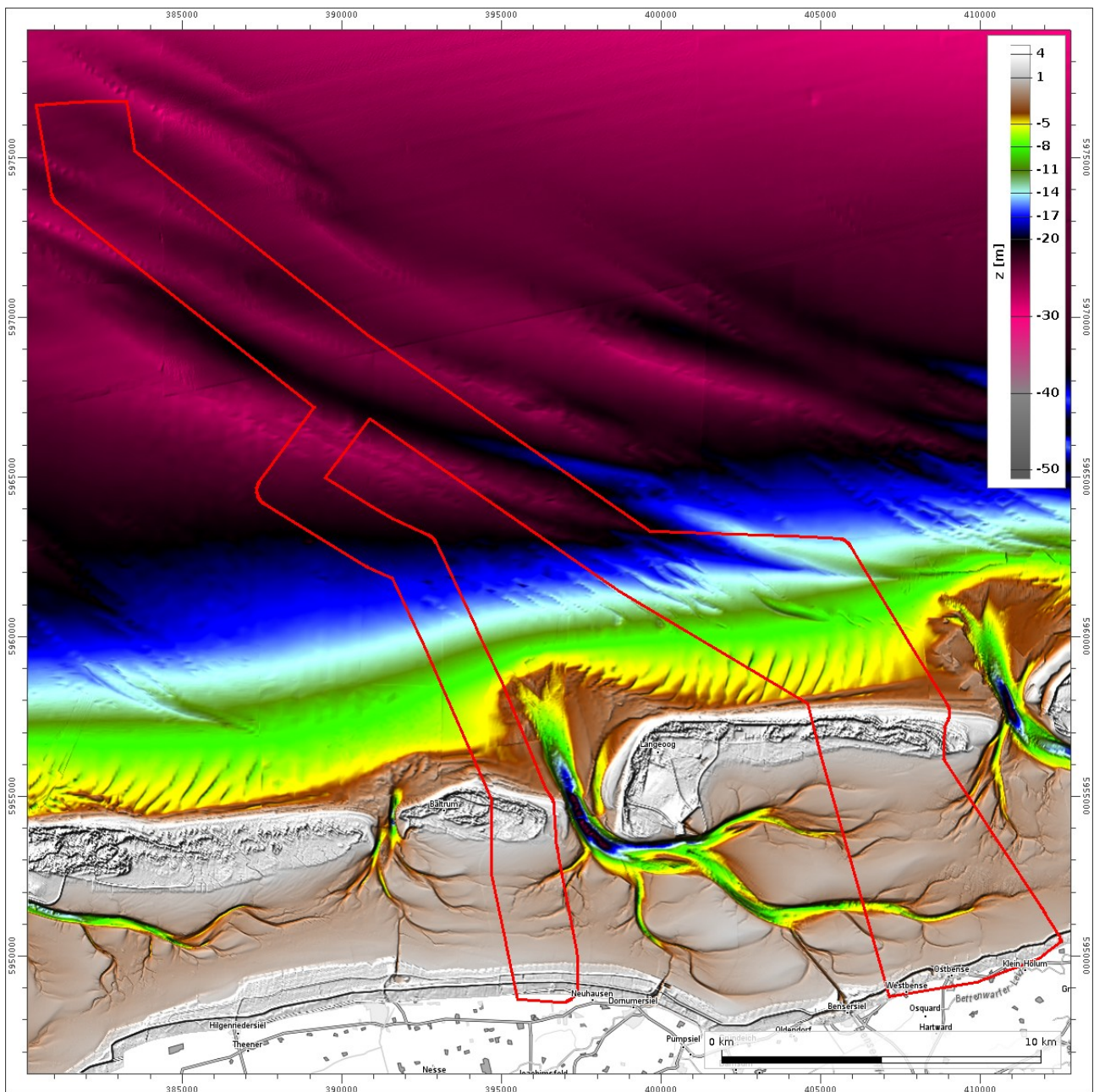


Abbildung 13: Digitales bathymetrisches Modell zum 01.07.2019 im Untersuchungsraum

Neben dem digitalen bathymetrischen Modell werden zusätzlich Datenquellenkarten davor und danach erstellt, an denen abgelesen werden kann, aus welchen Vermessungen die Tiefenwerte interpoliert wurden (siehe Abbildung 14).

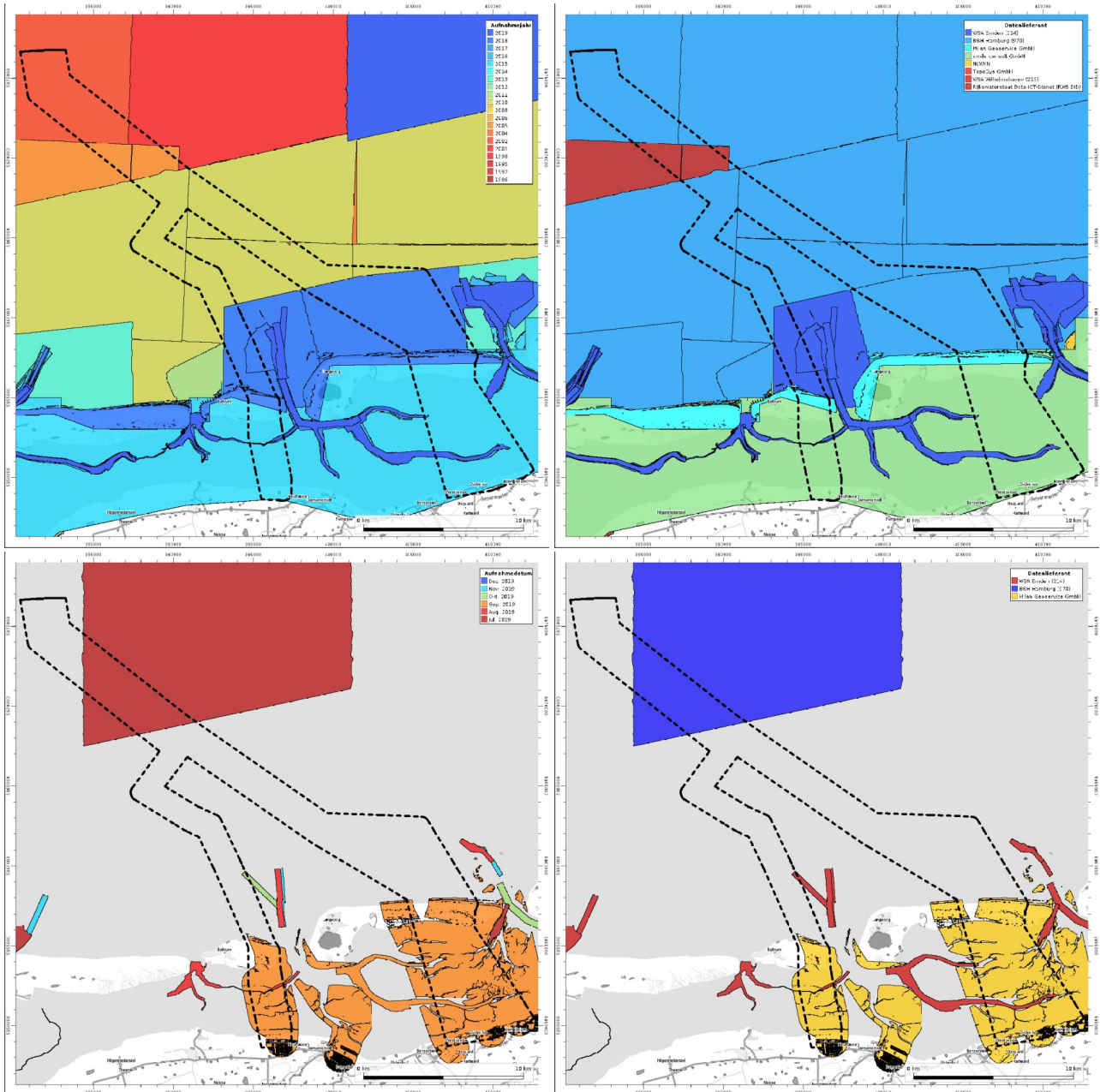


Abbildung 14: Datenquellenkarten

Zur Beurteilung der örtlichen Zuverlässigkeit wird noch ein Datendichtemodell generiert. In der Abbildung 15 sind beispielsweise die Wattflächen hinter den Inseln blau eingefärbt, was eine mittlere Datendichte von 1 m kennzeichnet (Daten des DGM-W Ems 2015). Die älteren Vermessungen des BSH haben im Gegensatz hierzu Datenabstände von mehr als 200 m und die neuen von 2019 unter 100 m.

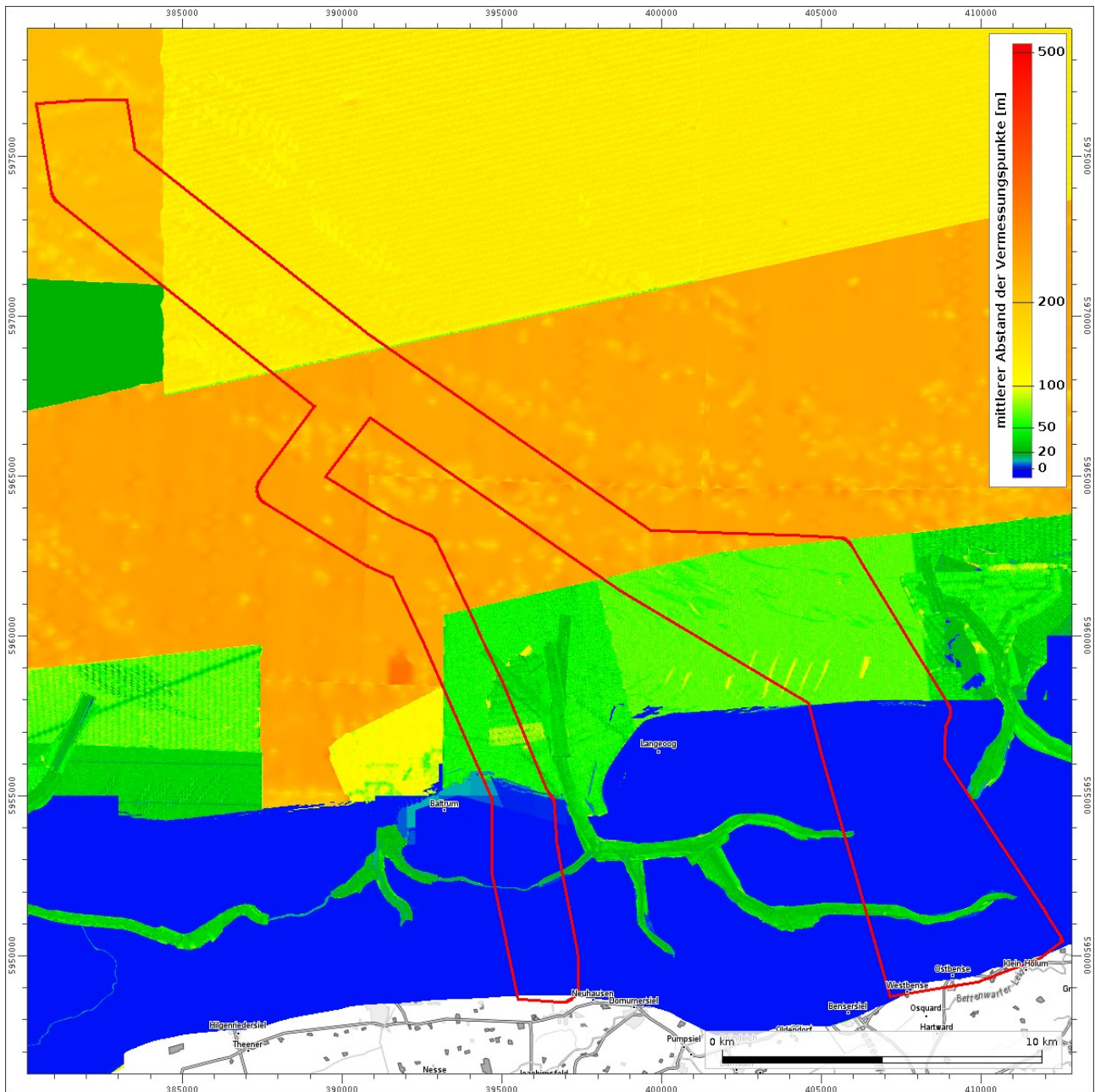


Abbildung 15: Dichtemodell des Jahres 2019 im Untersuchungsraum

4.1.1. Sensitivitätsstudie Rasterauflösung

Wie bereits dargestellt, werden die konsistenten digitalen bathymetrischen Modelle auf vorgegebenen örtlichen Stützstellen (10 m-Raster) und zu einem Zeitpunkt (01.07. des Jahres) interpoliert. Die Wahrscheinlichkeit, dass örtliche Extremwerte durch eine Stützstelle getroffen werden, steigt mit der örtlichen Auflösung. Die durch eine 10 m-Auflösung induzierte Höhenunschärfe kann dadurch abgeschätzt werden, dass für den 01.07.2019 ein 1 m-Raster interpoliert wird und auf den 1 m-Stützstellen die Differenzen zum 10 m-Modell bestimmt werden. Im entstehenden Histogramm (siehe Abbildung 17) haben 80 % der 1 m-Rasterpunkte Differenzen kleiner als 20 cm. Größere Differenzen entstehen erwartungsgemäß an steilen Gradienten und in den „rauen Muschelflächen“ (siehe Abbildung 16).

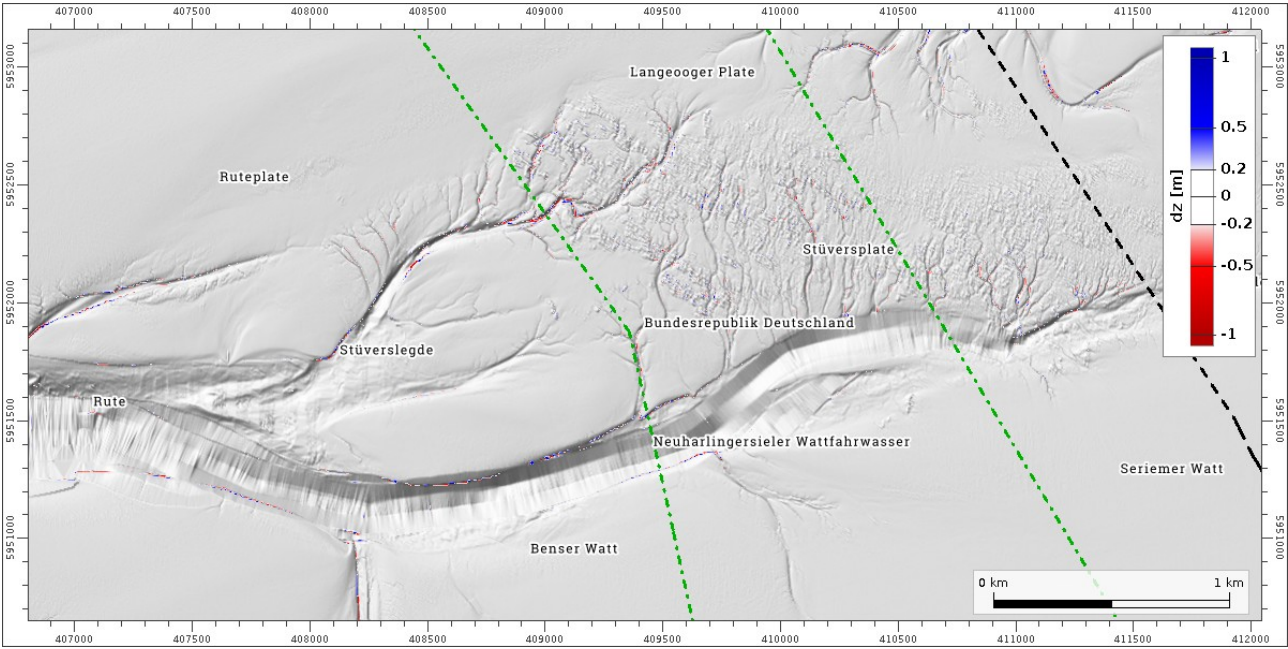


Abbildung 16: 2019er Jahresbathymetrien mit eingefärbten Differenzknoten ($\geq \pm 20$ cm)

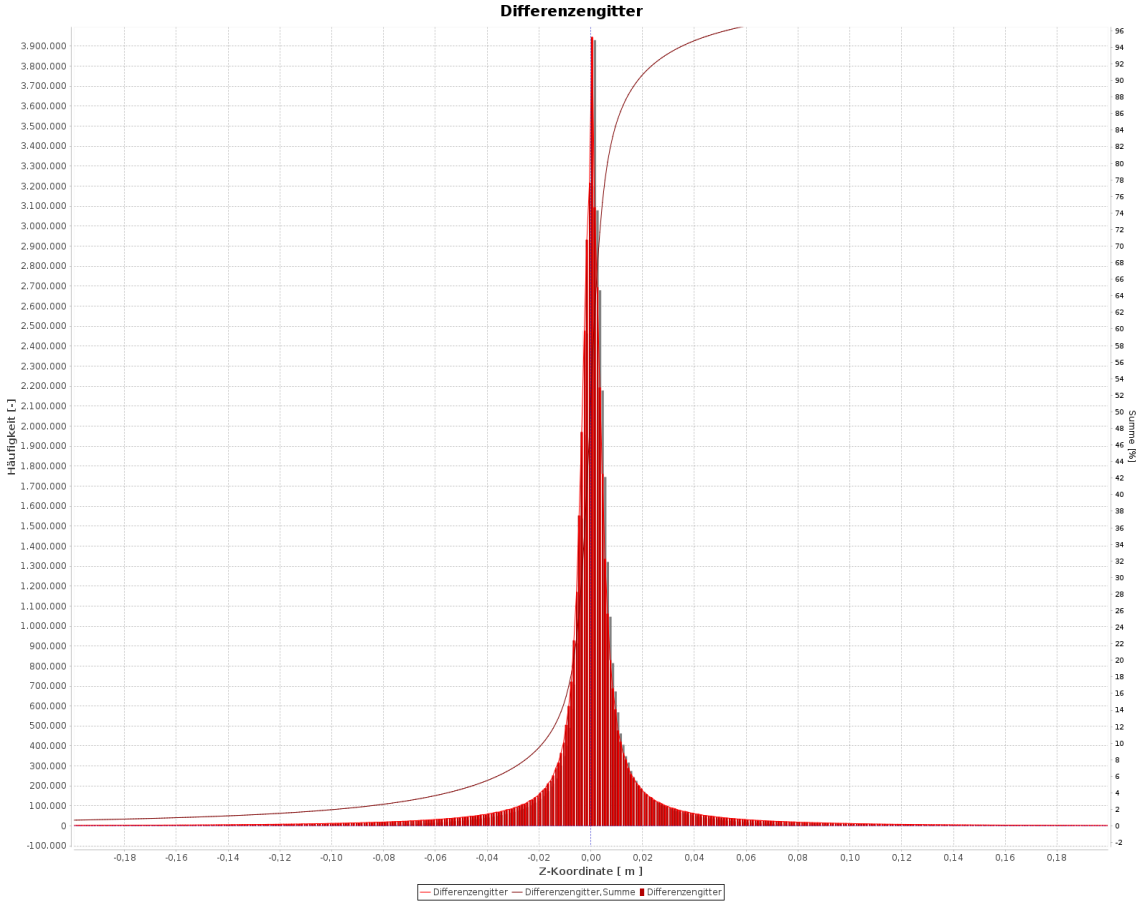


Abbildung 17: Histogramm des Differenzengitters

Wie sich diese Differenzen entlang der Vorzugstrasse C6a über Stüversplate mit Stüverslegde sowie das Neuharlingersieler Wattfahrwasser bis ins Benser Watt verteilen, ist in der Abbildung 18 zu sehen. Das 10 m-Modell unterschätzt entlang dieser Trasse die tiefsten Rinnen um ca. 10 cm, was weit unter der Genauigkeit der zugrundeliegenden Vermessungsdaten liegt.

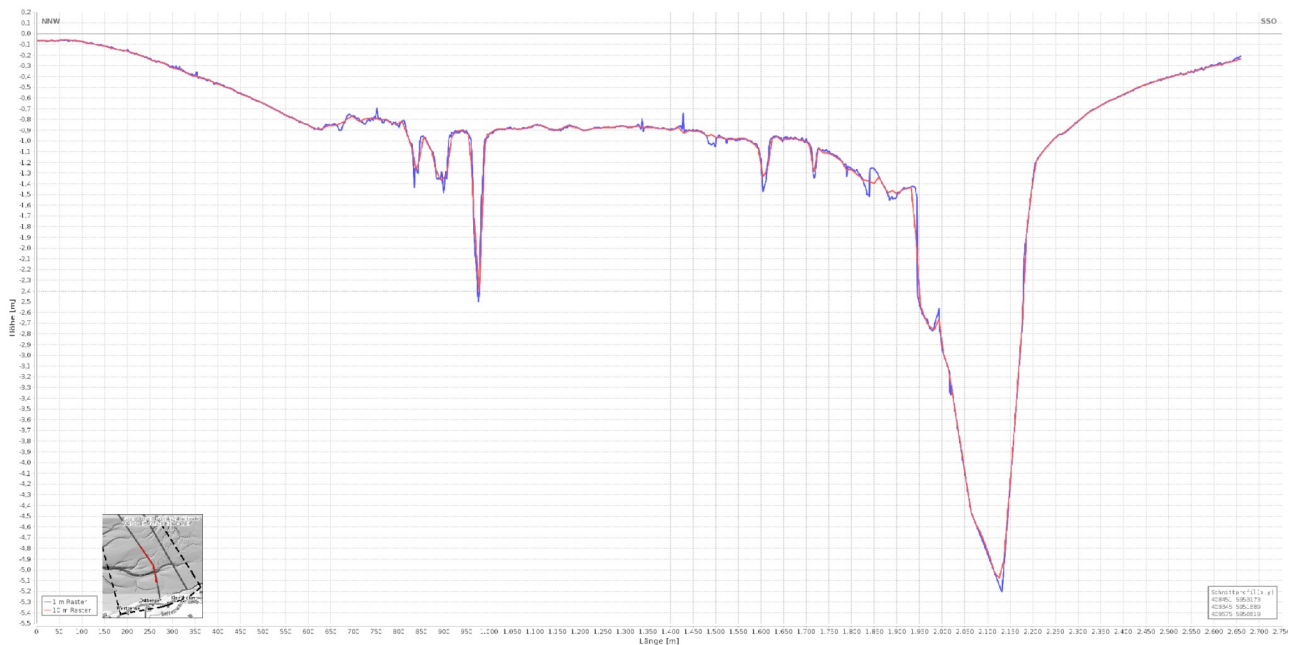


Abbildung 18: Profilschnitt über 2019er Jahresbathymetriemessungen mit 10 m- (rot) und 1 m-Rasterauflösung (blau) entlang der Vorzugstrasse C6a über Stüversplate mit Stüverslegde sowie das Neuharlingersieler Wattfahrwasser bis ins Benser Watt

4.2. Analysen auf den Metadaten

Neben der Raum-Zeit-Interpolation der Gelände- bzw. Meeresbodenoberfläche lassen sich auf dem FBM zusätzlich Analysen allein auf den Metadaten durchführen. Auch diese Betrachtungen helfen die morphodynamischen Analysen zu beurteilen. In der Abbildung 19 ist beispielsweise die Anzahl der Vermessungen, die im Zeitraum von 1990 bis 2019 zur Verfügung stand, dargestellt. Gut erkennbar sind hier die dunkelroten Flächen, die kennzeichnen, dass nur eine Vermessung vorliegt. Bereiche, in denen es viele Vermessungen gibt, sind die Schifffahrtswege, für deren Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt die WSVs des Bundes zuständig sind. Bereiche, in denen ebenfalls nur wenige Vermessungen vorliegen, sind die küstennahen Bereiche (Brandungszone). Die Brandungszone kann schiffsgestützt in der Regel nur bei wenig Seegang (Schönwetter) und luftgestützt bei ablandigen Windlagen (ebenfalls wenig Seegang) vermessen werden.

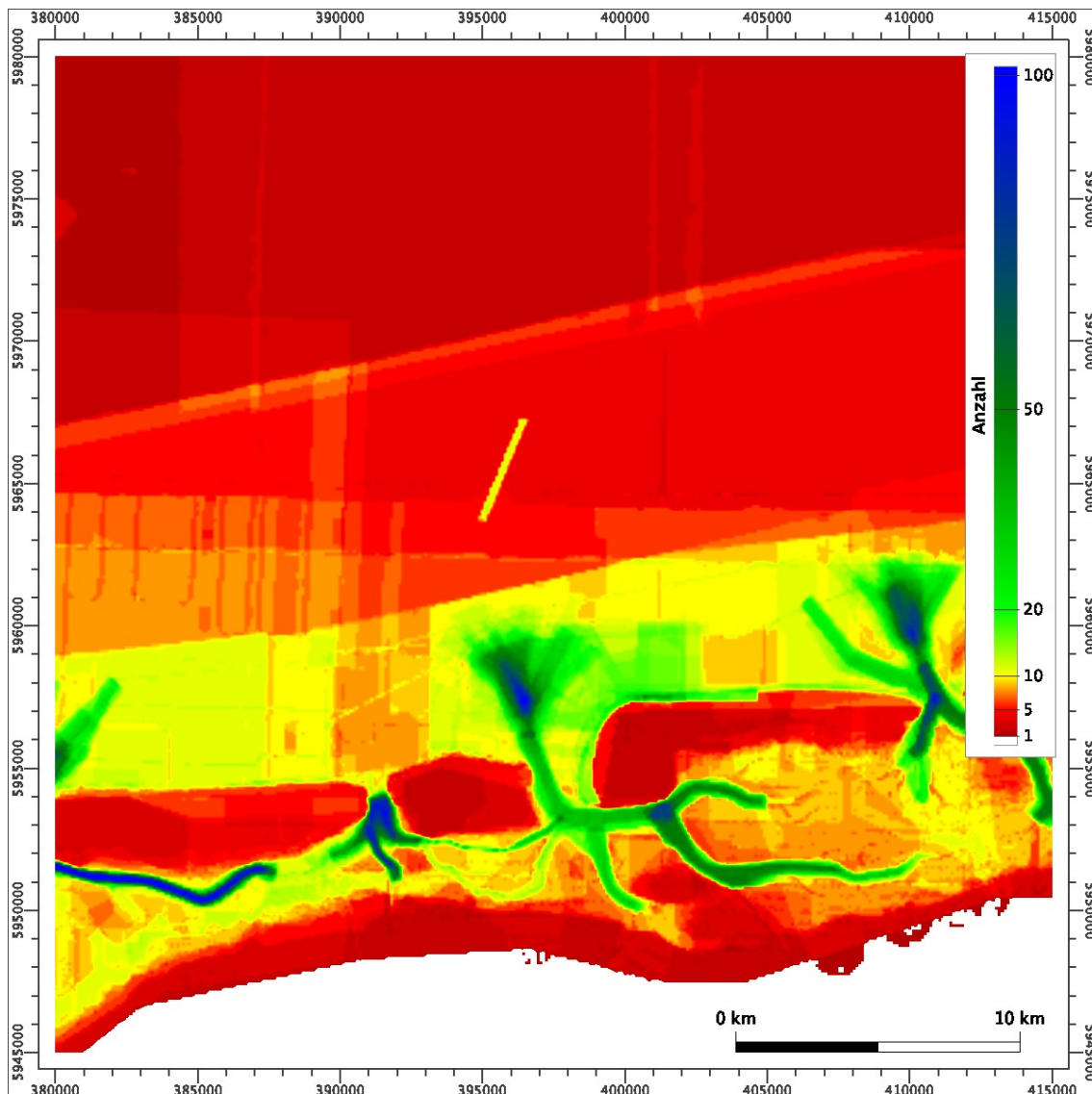


Abbildung 19: Anzahl der Vermessungen im Zeitraum von 1990 bis 2019

4.3. Morphodynamische Analysen

Durch analytische und statistische Auswertungen der bathymetrischen Zeitreihe sowohl auf der Basis der konsistenten bathymetrischen Modelle als auch auf dem FBM direkt können weitere Informationen über die Morphodynamik des Untersuchungsraums gewonnen werden. Zu den einfachsten Analysen gehören die Bestimmung der minimalen und maximalen Höhenlage des Gewässerbodens (z_{\min} , z_{\max}) über den Zeitraum von 1995 bis 2019 an jedem Punkt des Untersuchungsraums. Bei der Bestimmung der z_{\min} und z_{\max} kann gleichzeitig das Jahr mitprotokolliert werden, in dem dieser Wert angenommen wurde. Weitere Kenngrößen sind die mittlere Höhenlage, die Varianz und der Morphologische Raum.

Der **Morphologische Raum** errechnet sich aus der Differenz der maximalen und minimalen Tiefe an jedem Gitterpunkt. Er gibt demnach Aufschluss über die Mächtigkeit der maximalen Sedimentverlagerung innerhalb des Betrachtungszeitraums ($z_{\max} - z_{\min}$). Auf diese Weise lassen sich die

hochdynamischen Rinnen von den weniger mobilen Wattflächen gut abgrenzen. Es ist jedoch nicht ersichtlich, ob im betrachteten Zeitraum Sedimentation oder Erosion beobachtet wurde. Auch das Zeitintervall, in dem die morphologische Aktivität stattgefunden hat, ist nicht erkennbar.

Funktionalanalytische Auswertungen betrachten zusätzlich die bathymetrischen Änderungsraten (Erosions- und Sedimentationsraten) dz/da und auf diesen wiederum statistische Auswertungen.

Ein wichtiger funktionalanalytischer Parameter zur Analyse der Morphodynamik ist der **Morphologische Drive** $((dz/da)_{\max} - (dz/da)_{\min})$, die Differenz aus der größten beobachteten Sedimentations- und Erosionsrate. Durch diese Kenngröße wird eine Aussage darüber möglich, ob eine morphologische Änderung über den Betrachtungszeitraum stetig verlief oder ob Extremereignisse stattfanden. Hiermit lässt sich auch die Verlagerung von Rinnen gut identifizieren.

Die bathymetrischen Modelle sowie die statistischen und funktionalanalytischen Produkte werden als Raster erstellt. Auf der Basis dieser Raster lassen sich weitere Analysen durchführen. So kann beispielsweise die Entwicklung der mittleren Watthöhe und -fläche von Wateinzugsgebieten in Beziehung zu den Tidequerschnitten der zugehörigen Seegaten gesetzt werden.

5. Bathymetrische Basisprodukte

5.1. Konsistente digitale bathymetrische Modelle

Die Basisprodukte für die Beurteilung der morphodynamischen Entwicklung im Bereich der geplanten Trassen bilden die jährlichen räumlich-zeitlich interpolierten konsistenten digitalen bathymetrischen Modelle in einer Rasterauflösung von 10 x 10 m. Um eine bessere spätere Verarbeitung zu gewährleisten, wurden die Modelle in 5 x 5 km-Kacheln zerlegt und als Esri-ASCII-Grid exportiert. Modelle wurden für die Jahre 1995 bis 2019 erstellt. Exemplarisch ist in der Abbildung 20 die Bathymetrie zum 01.07.1995 mit schattierter Oberfläche dargestellt.

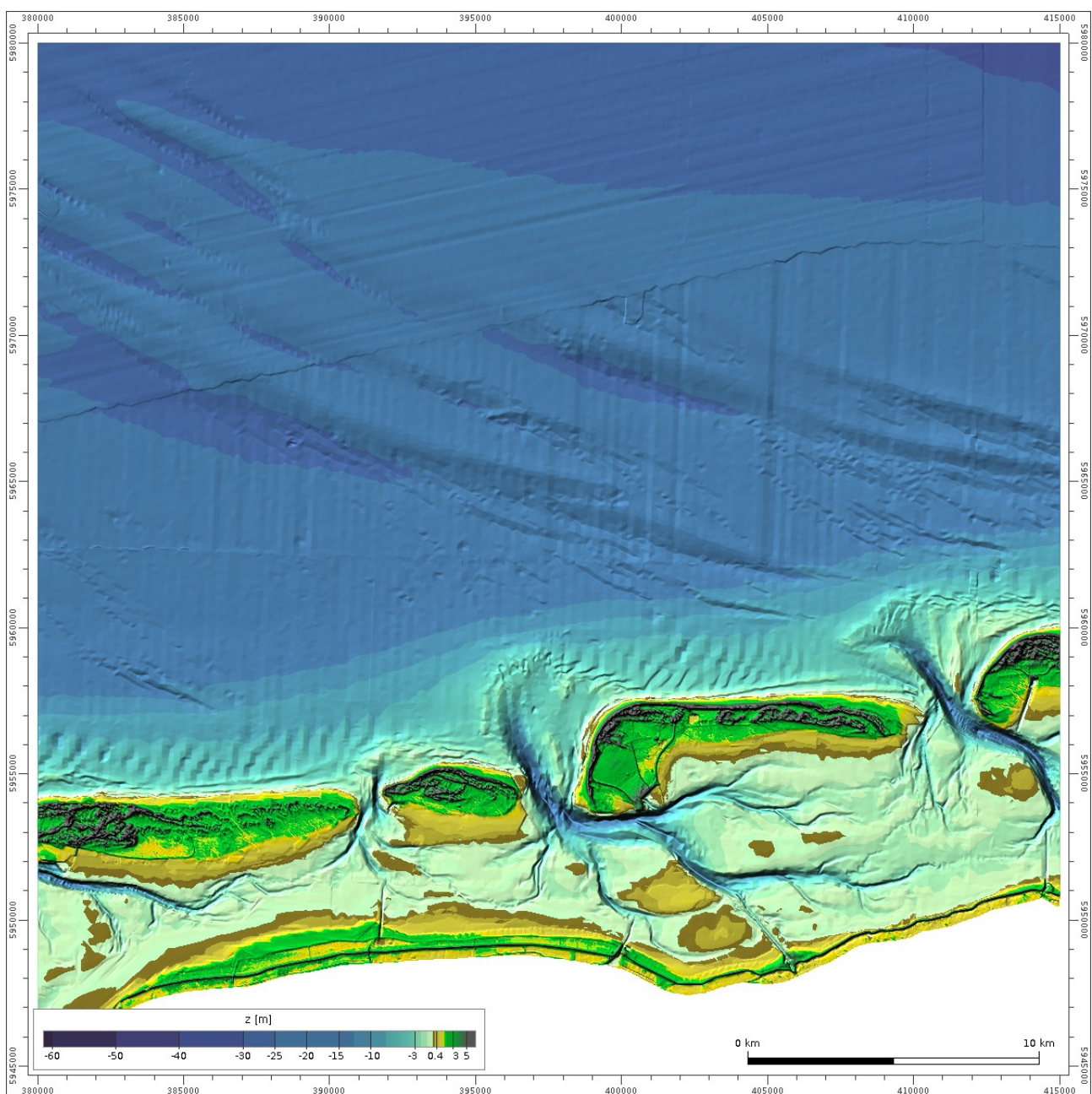


Abbildung 20: Digitales bathymetrisches Modell zum 01.07.1995

Die Güte (Höhen- und Lageunschärfe) der abgeleiteten Modelle hängt wesentlich von den zugrundeliegenden Vermessungsdaten ab. Je älter das Aufnahmedatum, desto größer die Messunschärfe. Bei dem Modell von 1995 kann mit einer Höhenunschärfe wesentlich größer als ± 20 cm ausgegangen werden.

5.2. Statistische Produkte

Für die Beurteilung der morphologischen Aktivität im Untersuchungsraum und insbesondere für die konkrete Trassenplanung ist die Fläche der minimal beobachteten z-Werte ein wichtiger Höhenhorizont. Die Differenz aus dem maximal und minimal beobachteten z-Wert wird als Morphologischer Raum bezeichnet. Die minimalen und maximalen z-Werte sind in der Abbildung 21 mit den zugehörigen Jahren des Auftretens dargestellt.

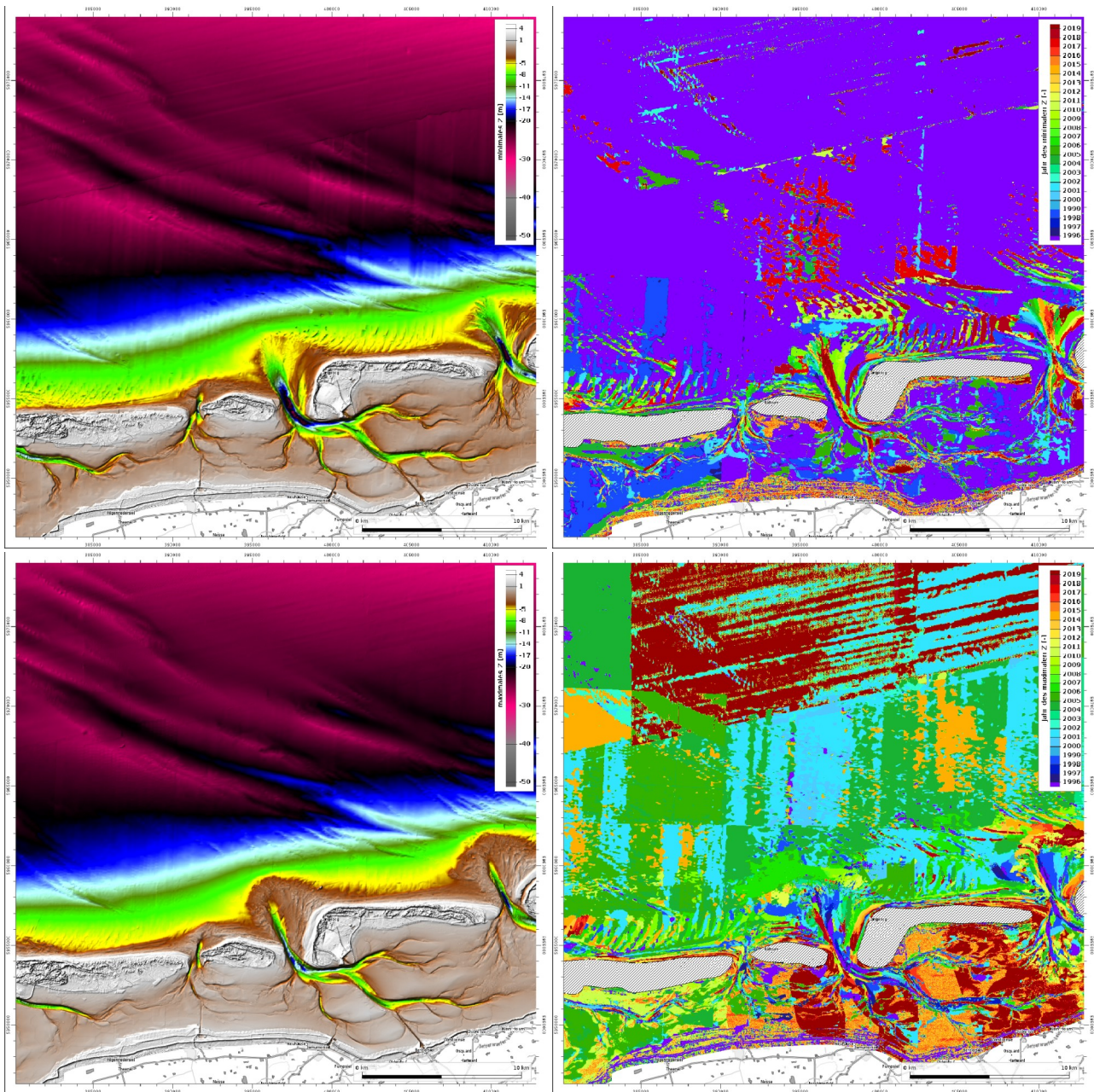


Abbildung 21: Beobachtete minimale (oben links) und maximale (unten links) z-Werte mit den zugehörigen Jahren (rechts), in denen diese Werte angenommen wurden

Fokussiert man seine Betrachtung auf die linken Bilder der Jahre, so ist gut zu erkennen, dass insbesondere in den Wattbereichen das z_{\min} in den „früheren“ Jahren 1995/96 und das z_{\max} in den Jahren 2019 und 2015 (entsprechend der Verfügbarkeit von Vermessungsdaten) angenommen werden. Dieses ist wiederum ein gutes Indiz, dass die Watten hinter den Inseln kontinuierlich wachsen. Die farbliche Kodierung in den tieferen seeseitigen Bereichen lässt keine Aussagen über die Entwicklung zu, da hier die Messhäufigkeit und -qualität dieses nicht erlaubt.

Der Morphologische Raum, als Differenz zwischen maximalem und minimalem z-Wert kann auch als morphologische Stabilitätskarte (Hindcast) bezeichnet werden (siehe Abbildung 22).

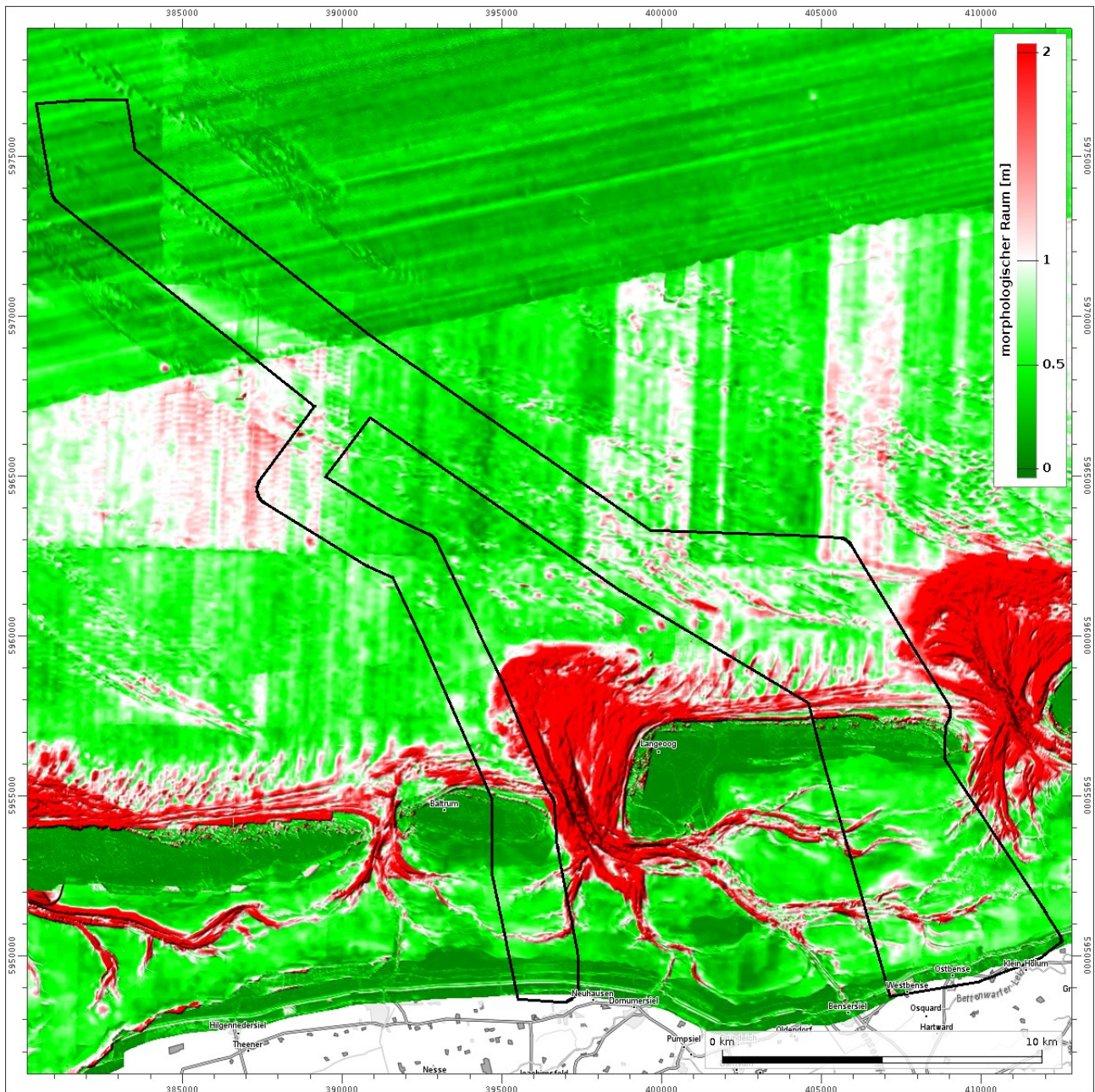


Abbildung 22: Morphologischer Raum

In den rot gekennzeichneten Bereichen der Abbildung 22 sind die Änderungen des Gewässerbodens größer als 1,5 m über die betrachteten 25 Jahre. An dieser Stelle muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass der Morphologische Raum im Bereich der Brandungszone (seeseitige Inselküste) mit großer Wahrscheinlichkeit unterschätzt wird. Dies liegt vor allem daran, dass in der Brandungszone in der Regel nur bei Schönwettersituationen schiffsgestützt und bei Ostwindlagen aus der Luft vermessen werden kann.

Die grün eingefärbten Bereiche können in den letzten 25 Jahren als stabil angesehen werden. Sehr gut sind die Wattscheiden und deren morphologische Stabilität zu erkennen.

5.3. Funktionalanalytische Produkte

Durch die Bestimmung der Differenzbathymetrien zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Jahren lassen sich jährliche Erosions- und Sedimentationsraten abschätzen. In der exemplarischen Abbildung 23 werden Erosionsbereiche rot und Sedimentationsflächen blau gekennzeichnet.

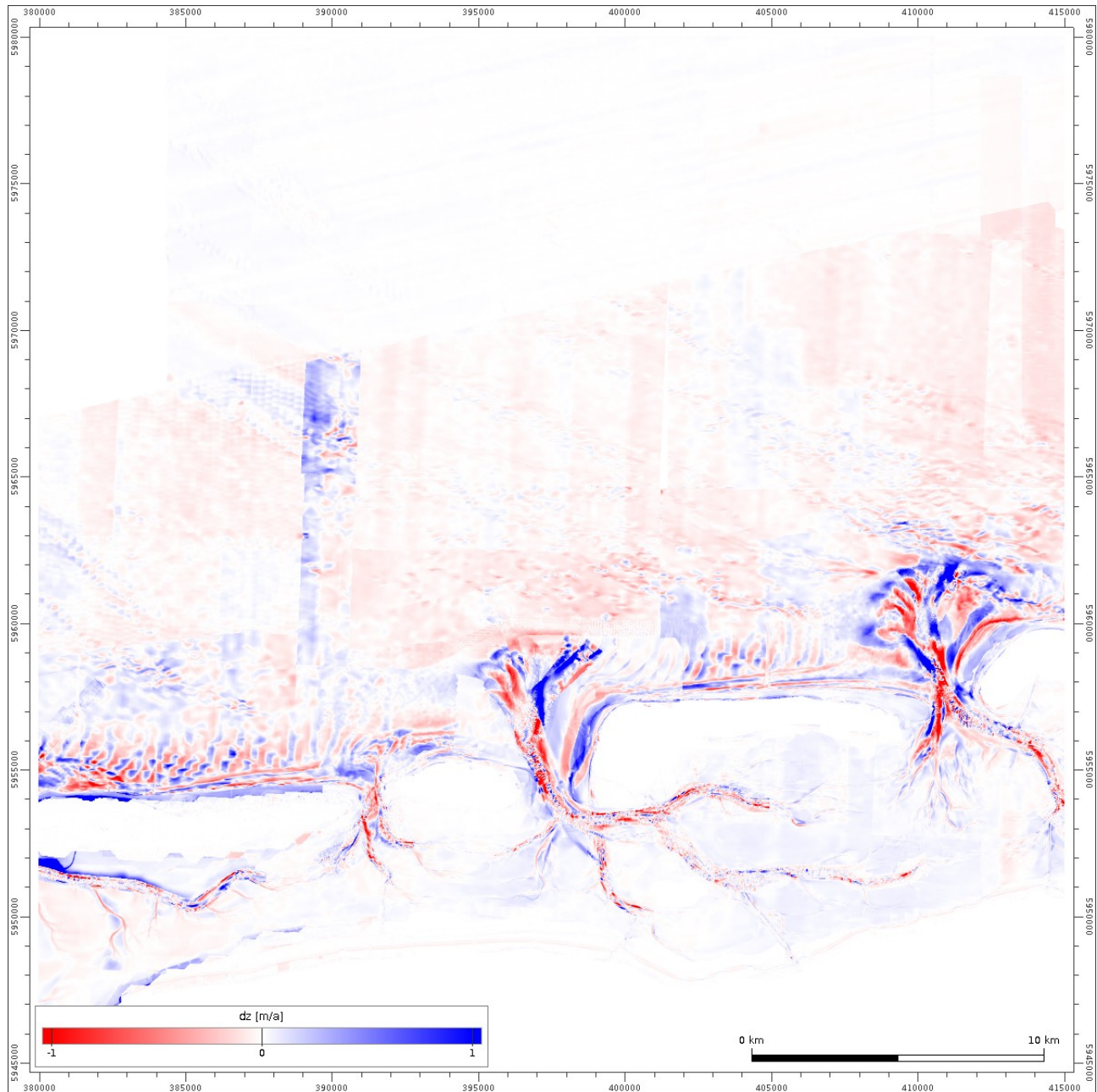


Abbildung 23: Jährliche Tiefenänderung vom 01.07.2009 bis zum 01.07.2010

Auf der Basis der jährlichen Änderungsraten lassen sich wiederum die maximalen Erosions- und Sedimentationsraten bestimmen sowie die Jahre darstellen, in denen diese Maxima angenommen werden. Eine Interpretation dieser Darstellungen gestaltet sich schwierig, da beim Wandern von

Rinnen beispielsweise die Jahre, in denen große Erosionen beobachtet werden, mit solchen großer Sedimentation wechseln.

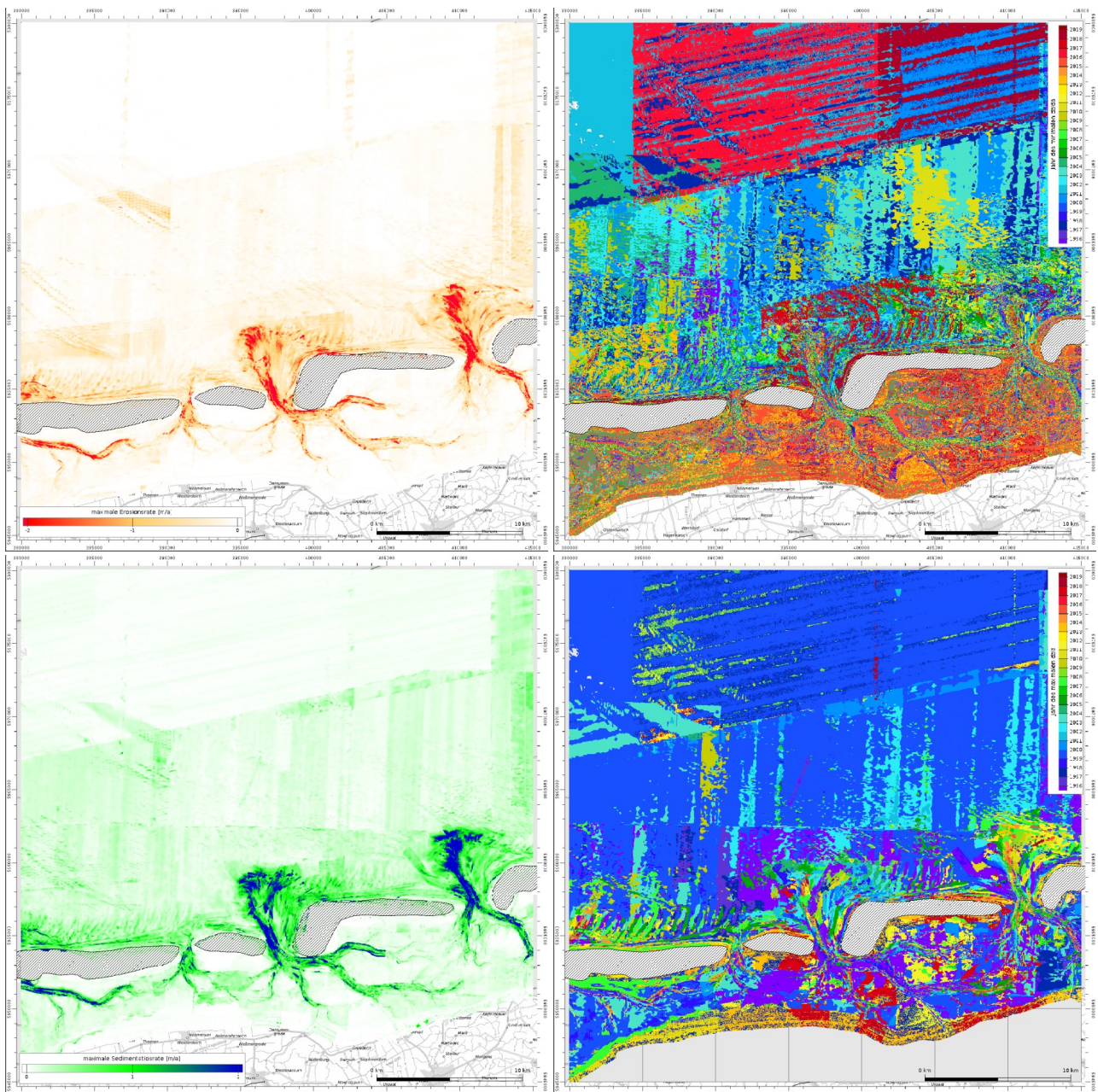


Abbildung 24: Beobachtete maximale Erosions- (oben links) und Sedimentationsrate (unten links) mit den zugehörigen Jahren (rechts), in denen diese Werte angenommen wurden

Die Differenz zwischen maximaler Sedimentationsrate und maximaler (minimales dz/da) Erosionsrate wird im Weiteren als Morphologischer Drive bezeichnet (siehe Abbildung 25). Die Darstellung des Morphologischen Drives weist ähnliche morphologisch aktive Bereiche aus, wie die Darstellung des Morphologischen Raums.

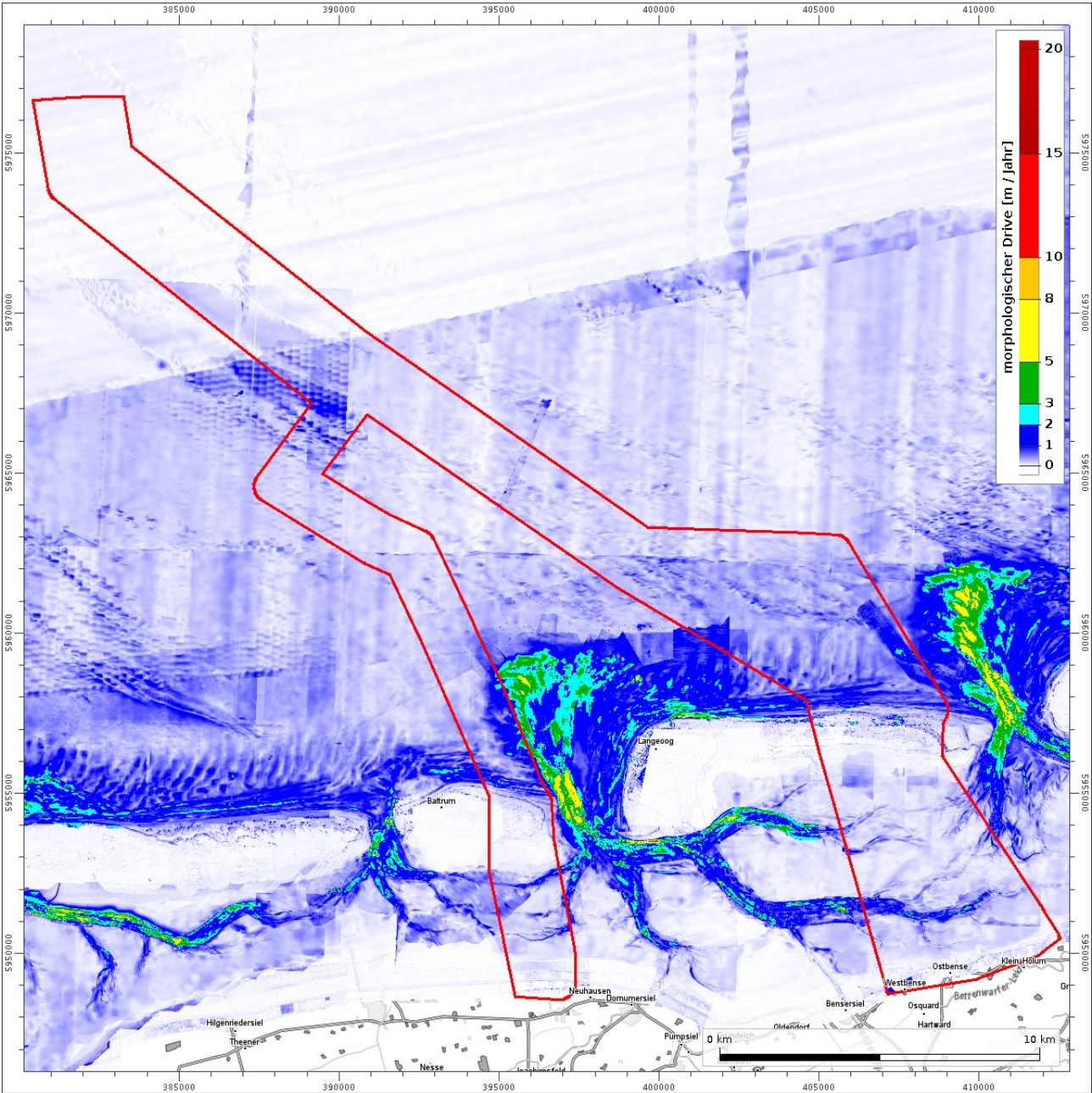


Abbildung 25: Morphologischer Drive des Zeitraums 1995 bis 2019

6. Ergebnisse der morphodynamischen Stabilitätsanalysen

Schon bei der Darstellung der Basisprodukte konnten Bereiche identifiziert werden, die in der Vergangenheit morphologisch sehr aktiv waren, und solche, die eher nicht aktiv waren. Eine grundlegende Tendenz des Aufwachsens der Watten hinter den Inseln konnte bereits bei den jährlichen Differenzen beobachtet werden. Im Folgenden werden morphologische Analysen in der Fläche, in Teilflächen, über Querschnitte und entlang von Achsen durchgeführt.

6.1. Flächenhafte Analysen

Der Morphologische Raum ist ein wichtiger Indikator für die Stabilität des Gewässerbodens in der Vergangenheit (siehe Abbildung 26).

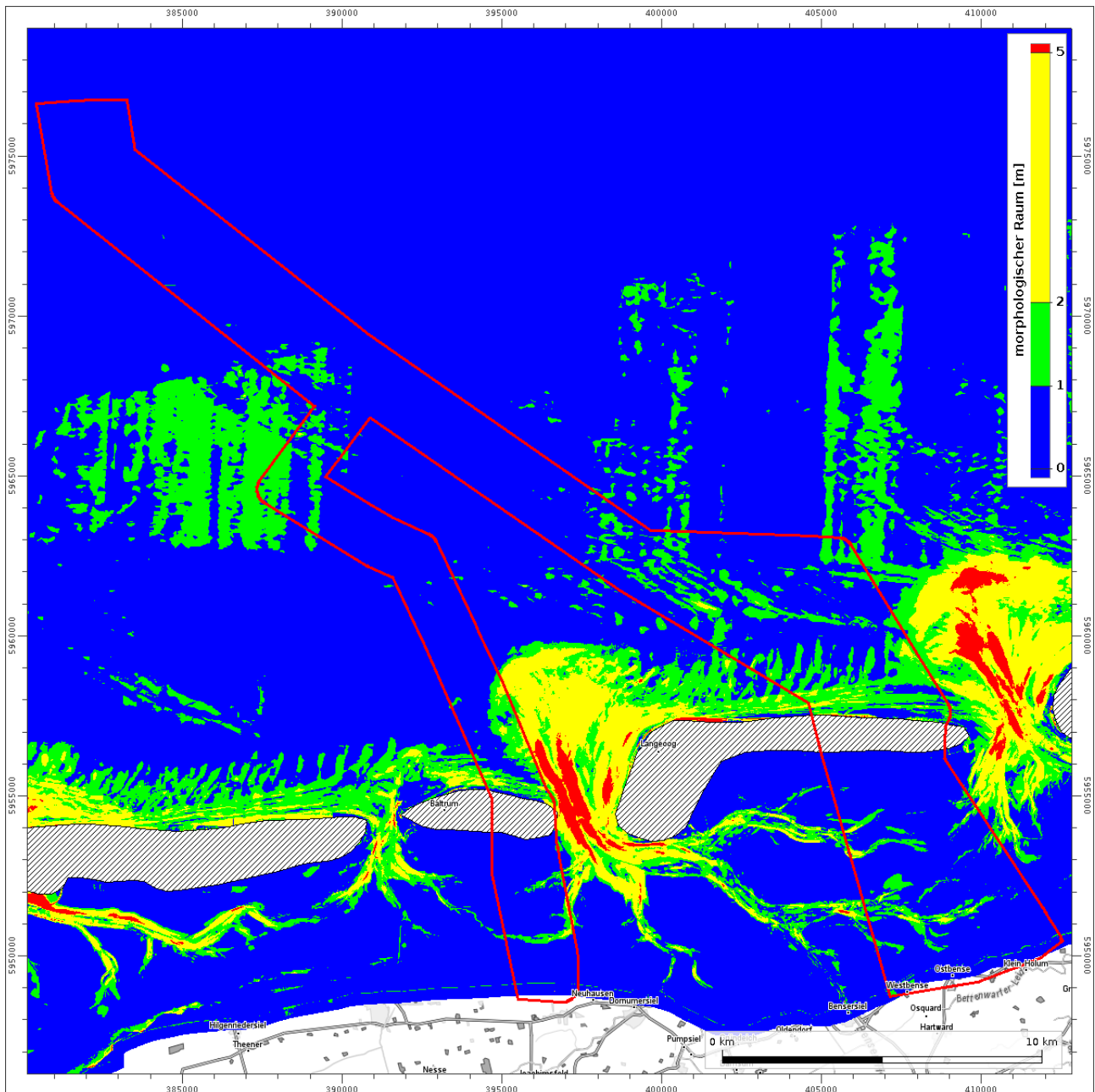


Abbildung 26: Morphologische Räume: von Blau → stabil bis Rot → hohe Aktivität

Die in der Abbildung 26 dargestellten blauen Flächen können in der Vergangenheit als morphologisch stabil angesehen werden.

Ergänzt werden kann die Betrachtung des Morphologischen Raums durch Differenzbetrachtungen über unterschiedliche Zeiträume. In der Abbildung 27 sind solche Differenzen für das letzte Jahr und die letzten 5, 15 sowie 25 Jahre dargestellt. Die grünen Flächen kennzeichnen Bereiche, deren Änderungen kleiner als ± 20 cm sind (unterhalb der Messvertrauenswürdigkeit).

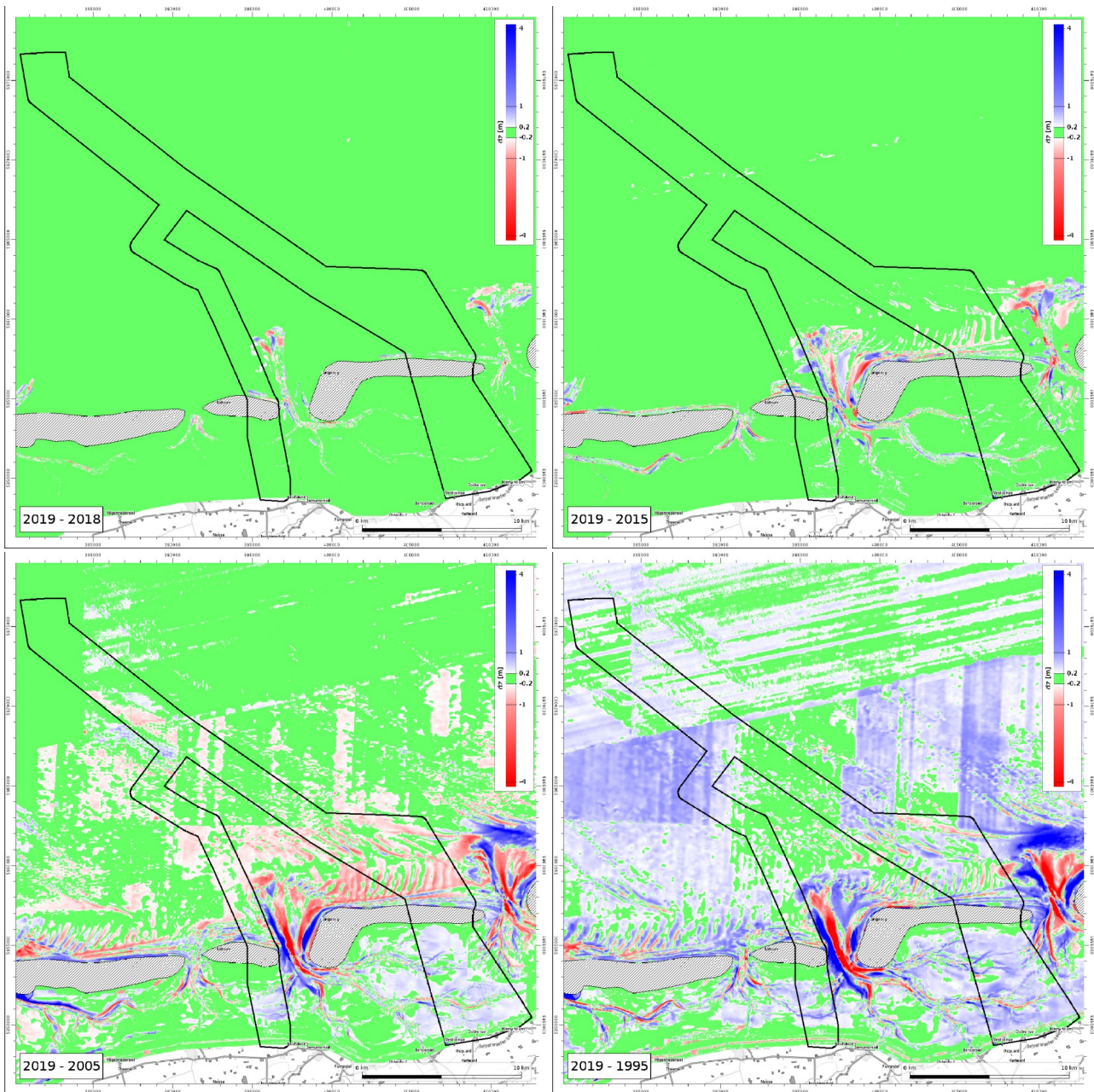


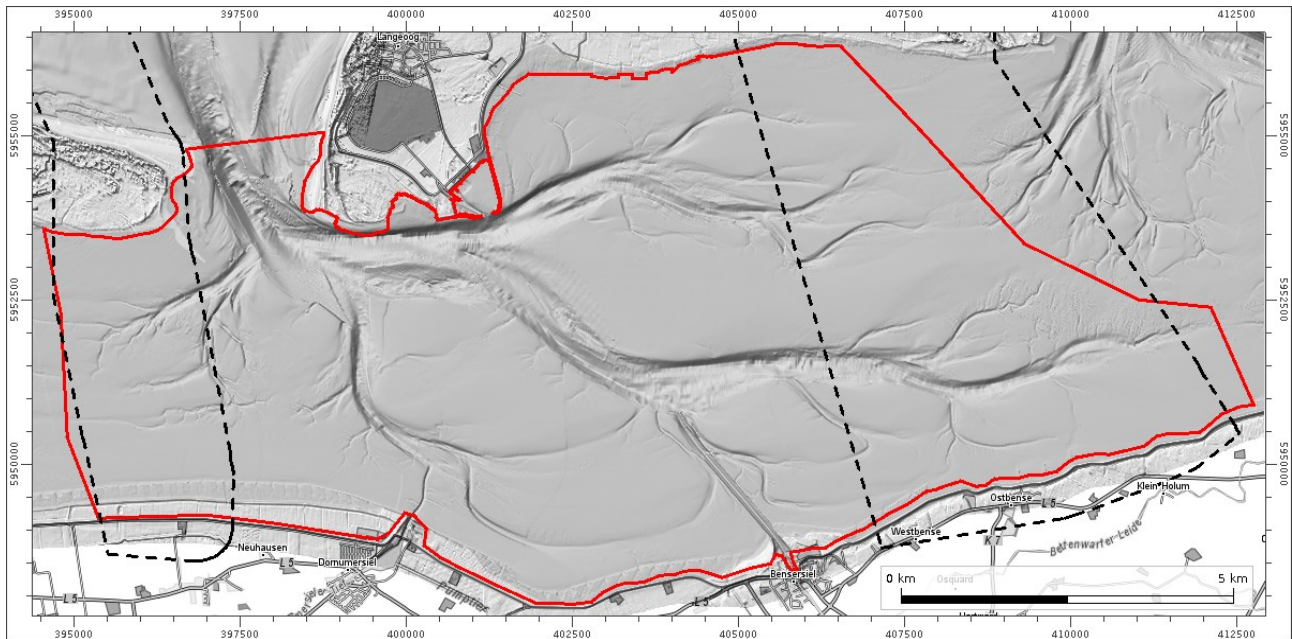
Abbildung 27: Zentrale Differenzen (1 Jahr, 5, 15, 25 Jahre)

In der Differenz zwischen 2019 und 1995 sind große blaue Flächen hinter den Inseln erkennbar, die auf ein Anwachsen hinweisen.

6.2. Analyse der Wattentwicklung auf der Basis der Watteinzugsgebiete

Wie in der Einleitung schon dargestellt, lassen sich die Rückseitenwatten der Inseln in Watteinzugsgebiete strukturieren. In der Abbildung 28 ist beispielsweise das Watteinzugsgebiet der Accumer Ee auf der Bathymetrie 2019 dargestellt. Watteinzugsgebiete und deren Entwicklung lassen sich durch die Parameter mittlere Höhenlagen, Flächen und Volumina charakterisieren. Werden jetzt alle Punkte des DGM, die im Intervall von -2 bis +2 m liegen, herausgesammelt und

dieser Bereich als Watt bezeichnet, kann die Entwicklung der mittleren Wathöhe und die Größe der Wattfläche bestimmt werden. Die Festlegung auf das Intervall von -2 bis +2 m ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse über mehrere Jahre. Die Definition des Watts auf der Basis von Tidekennwerten ist sicher für Biologen und Ökologen hilfreich – ein so definiertes Wattintervall würde jedoch aufgrund der starken meteorologischen Einflüsse stark schwanken und eine Vergleichbarkeit unmöglich machen. Die beobachtete Entwicklung der mittleren Wathöhe beträgt für die Accumer Ee ca. 0,54 cm/Jahr.



Wattentwicklung Einzugsgebiet Accumer Ee

Bezugshorizont -2 m < z < 2 m

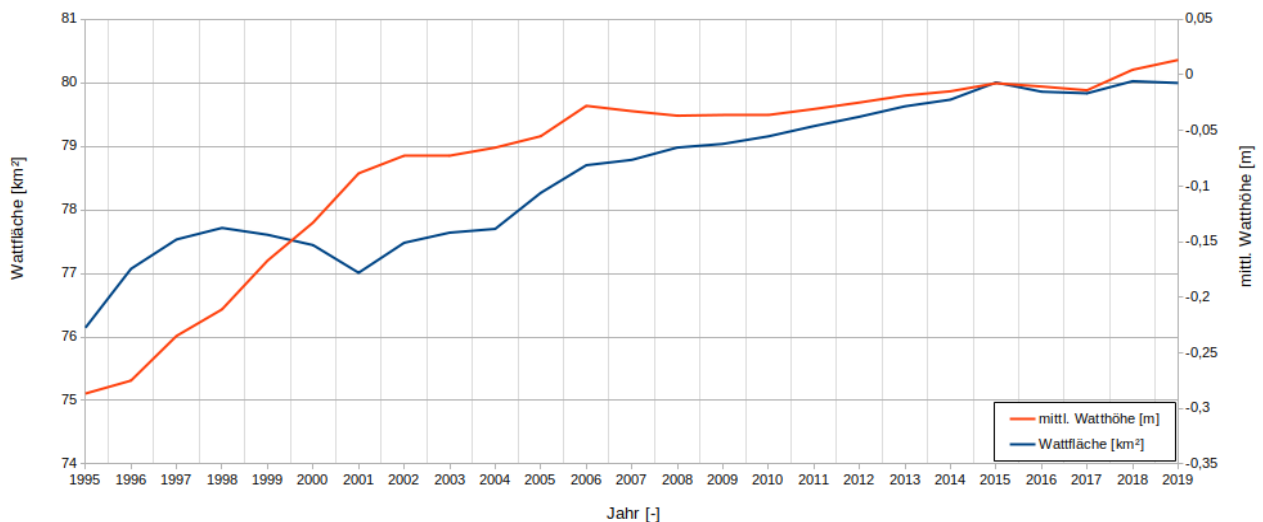


Abbildung 28: Wateinzugsgebiet der Accumer Ee

Einen Überblick über die Höhenverteilungen und deren Änderungen in der gesamten Fläche des Wateinzugsgebietes der Accumer Ee geben hypsometrische Analysen (Abbildung 29). So ist in

der Entwicklung der hypsometrischen Häufigkeitsdichte sehr deutlich das Aufwachsen der Watten zu erkennen.

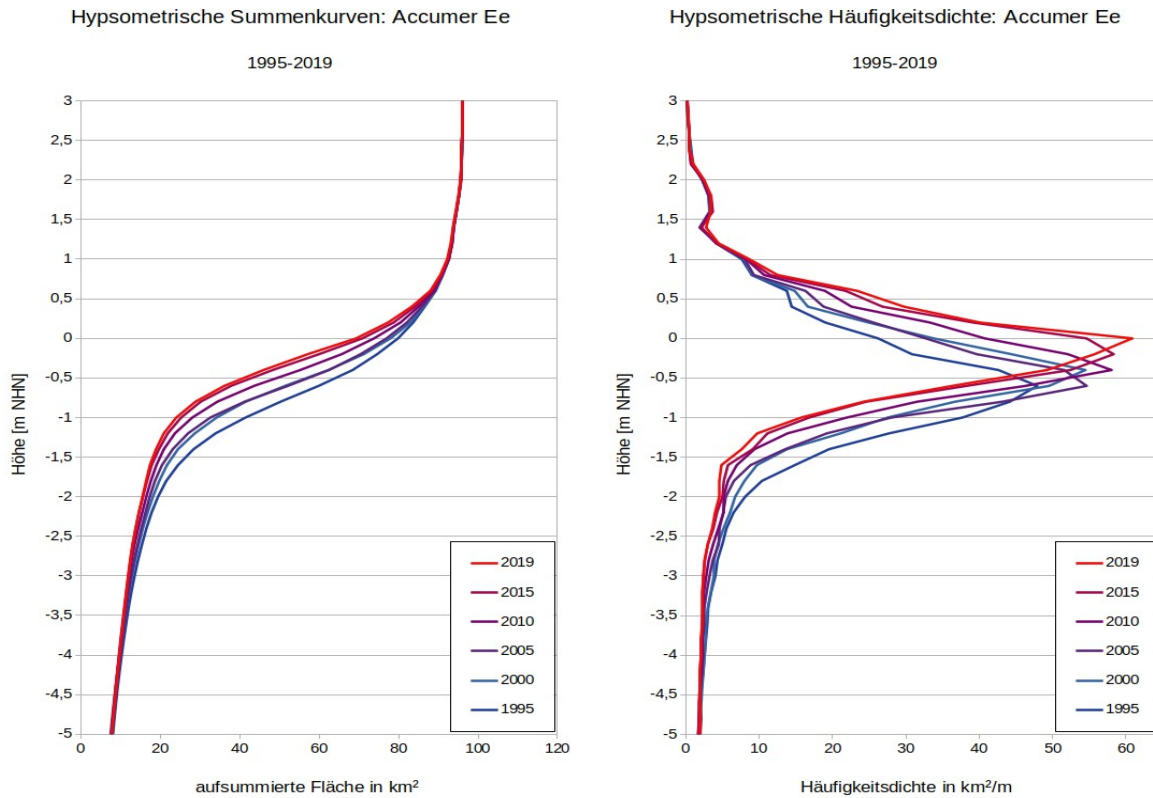


Abbildung 29: Hypsometrische Analysen Accumer Ee

Der Vollständigkeit halber ist in der Abbildung 30 die Entwicklung der mittleren Watthöhe Accumer Ee in Zusammenhang mit der der benachbarten Wattenzugsgebiete dargestellt. Es ergeben sich mittlere Wattwachstumsraten von:

Wichter Ee:	0,59 cm/Jahr
Accumer Ee:	0,54 cm/Jahr
Otzumer Balje:	1,08 cm/Jahr

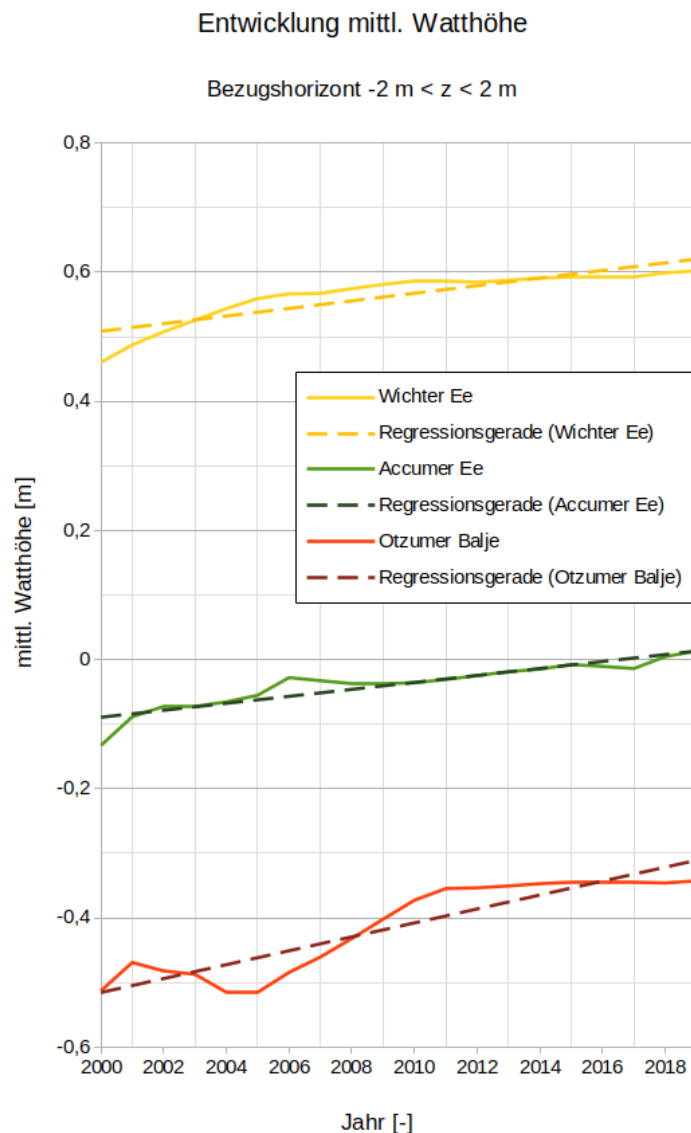


Abbildung 30: Entwicklung der Watthöhen der Watteinzugsgebiete Wichter Ee, Accumer Ee und Otzumer Balje (von Westen nach Osten);

Betrachtungshorizont für Wattflächen für Höhenwerte zwischen -2 und +2 m ü. NHN

Stellt man die Entwicklung der mittleren Watthöhe (stellvertretend die Tiefen zwischen -2 und +2 m) in Beziehung mit den mittleren Tiefen der im Einzugsgebiet befindlichen Rinnensysteme (stellvertretend die Tiefen unter -2 m), so stellt man auch hier einen entgegengesetzt verlaufenden Trend fest (siehe Abbildung 31). Dieser ist damit zu erklären, dass als Antwort auf das kontinuierliche Wattwachstum (im Mittel stärker als der Meeresspiegelanstieg) und die damit verbundene Abnahme des Tidevolumens im Einzugsgebiet existierende Rinnen tiefer und / oder breiter werden oder neue Rinnen entstehen, die die in den Gezeiten ein- und ausströmenden Wassermengen auffangen. Grundsätzlich kann also eine Verbindung zwischen Sedimentakkretion auf den Wattflächen und der Vertiefung von Rinnen hergestellt werden (siehe hierzu auch BENNINGHOFF und WINTER 2018).

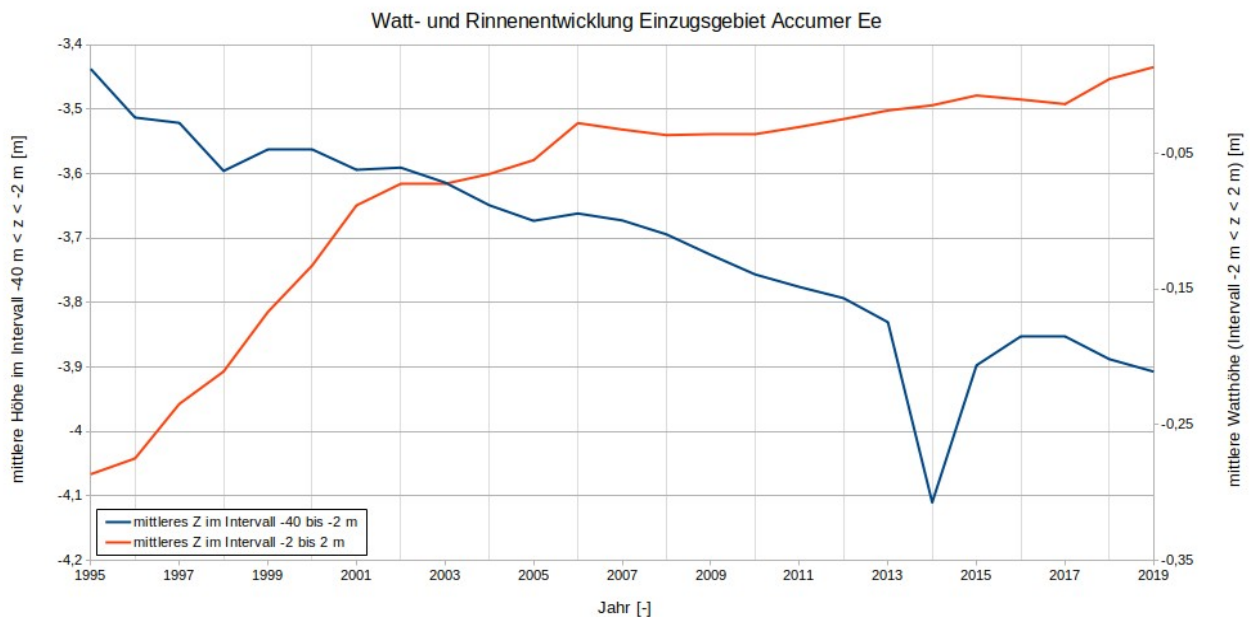


Abbildung 31: Entwicklung der mittleren Höhen für die Intervalle -40 bis -2 m (stellvertretend für Rinnen) sowie -2 bis +2 m (stellvertretend für Wattflächen) im Einzugsgebiet Accumer Ee

6.3. Untersuchungen über Querschnitte

6.3.1. Tidequerschnitt und Wattentwicklung

Zur Plausibilisierung der Wattentwicklung im Wateinzugsgebiet Accumer Ee kann der Tidequerschnitt des Seegats zwischen den Inseln Baltrum und Langeoog herangezogen werden. Das Wateinzugsgebiet Accumer Ee mit seinem zugehörigen Tidevolumen wird über das Seegat zweimal täglich be- und entwässert. Veränderungen im Tidevolumen (mittlere Watthöhe) werden Einfluss auf den Querschnitt des Seegats haben und umgekehrt.

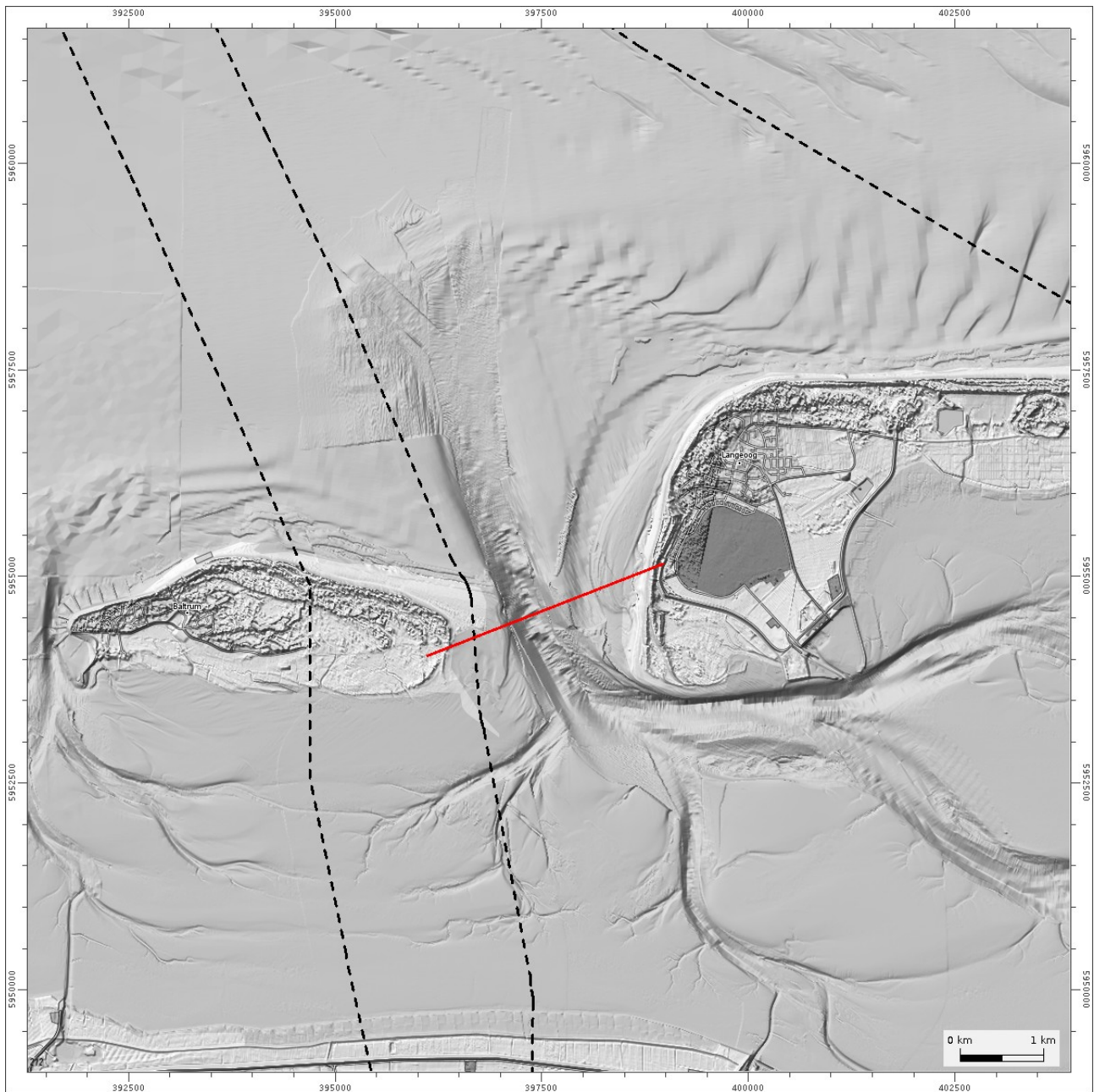


Abbildung 32: Tidequerschnitt Accumer Ee

In der Abbildung 32 ist die Lage des betrachteten Querschnittes und in der Abbildung 33 sind die zugehörigen Tiefen, eingefärbt nach Jahren, dargestellt. Gut erkennbar ist das Wandern der Rinne von West nach Ost in Richtung Langeoog.

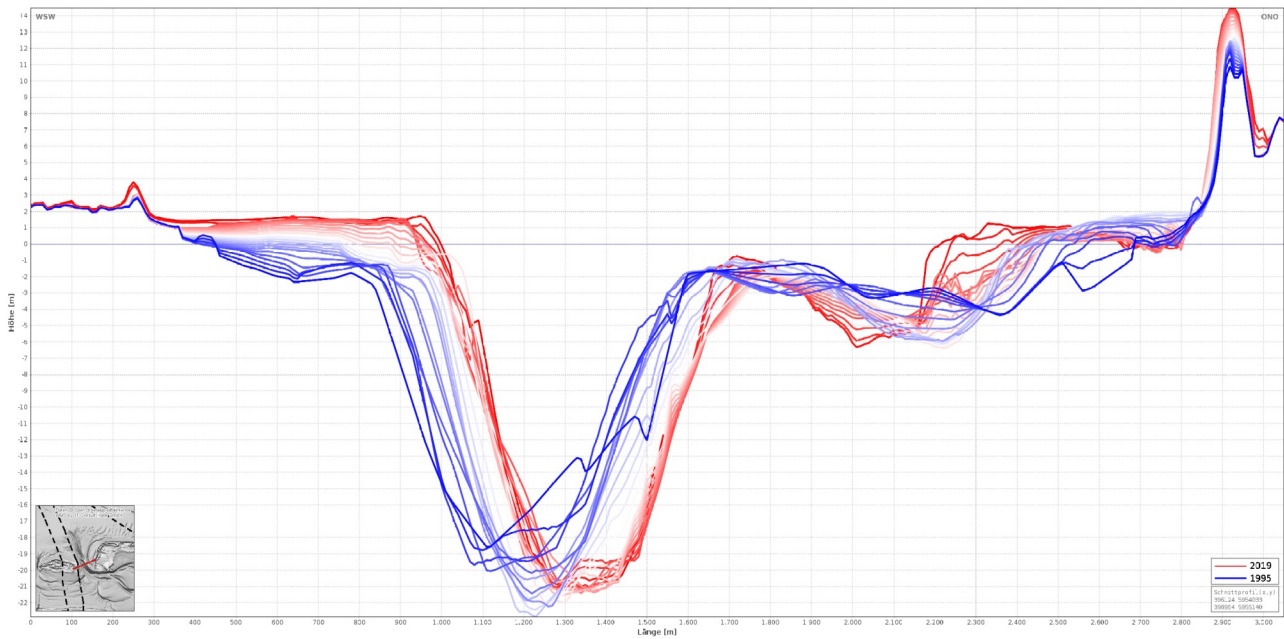


Abbildung 33: Tiefenentwicklung des Seegats Accumer Ee

Die Entwicklung des Tidequerschnitts des Seegats Accumer Ee ist in Beziehung zur Entwicklung der mittleren Watthöhe in der Abbildung 34 dargestellt. Beide Kurven haben entgegengesetzte Tendenzen, was die Plausibilität des mittleren Höhenwachstums des Wateinzugsgebietes Accumer Ee unterstreicht. Die mittlere Abnahme des Tidequerschnitts des Seegats Accumer Ee beträgt ca. 36,42 m²/Jahr.

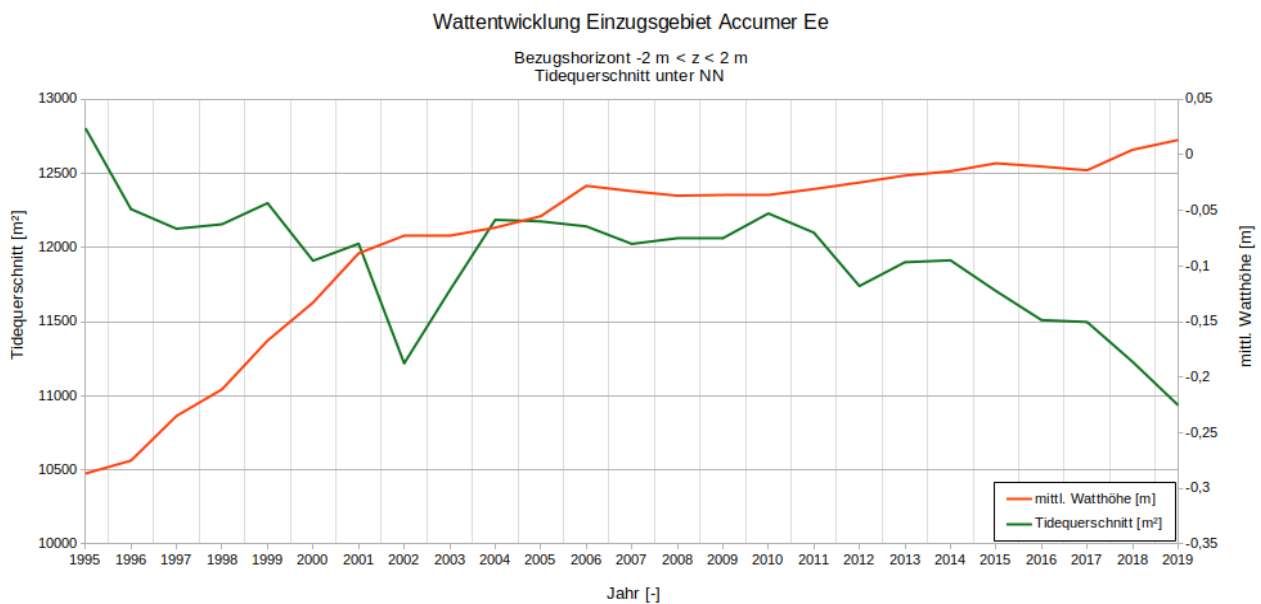


Abbildung 34: Tidequerschnitte des Seegats Accumer Ee

6.3.2. Wattneigung

Entlang der durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellten vorläufigen Trassenachsen sollen die passierten und morphologisch zum Teil aktiven Wattflächen auf ihre Neigung hin untersucht werden (Abbildung 35).

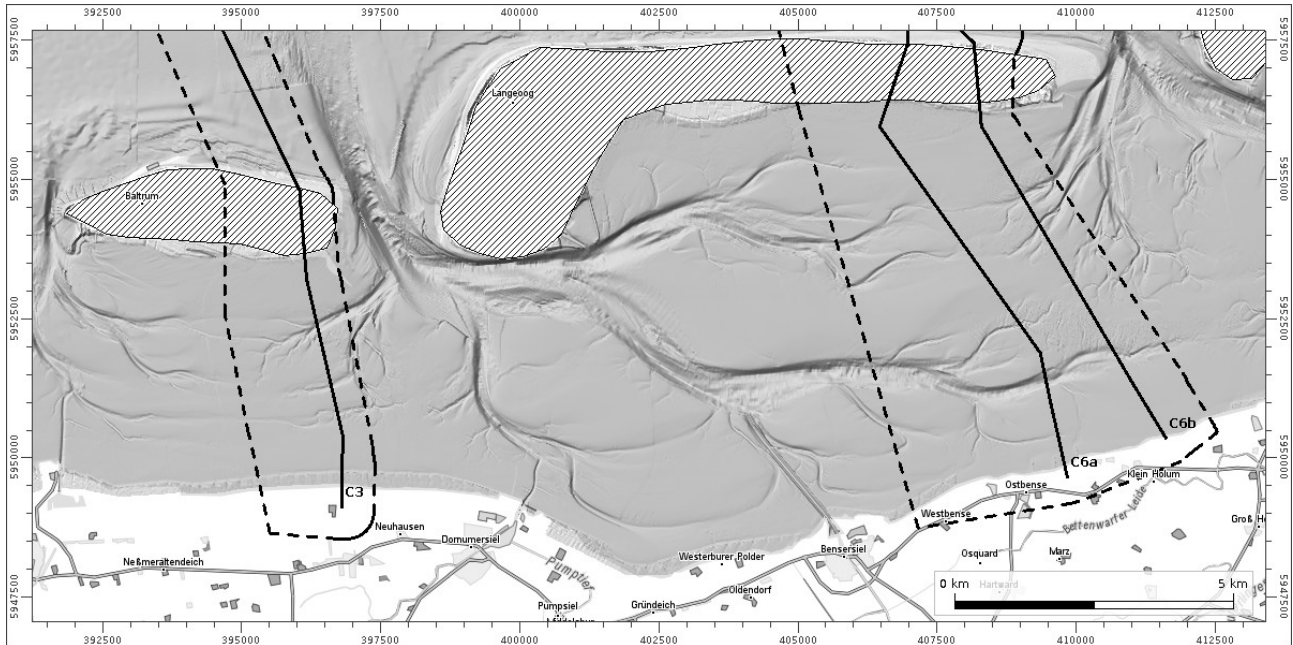


Abbildung 35: Vorläufige Trassenachsen vor Wattgebieten aus der Jahresbathymetrie 2019

Die Wattneigungen innerhalb der Trassenkorridore lassen sich mithilfe orthogonal zu den jeweiligen Trassenachsen verlaufender Profilschnitte abschätzen (Abbildung 36).

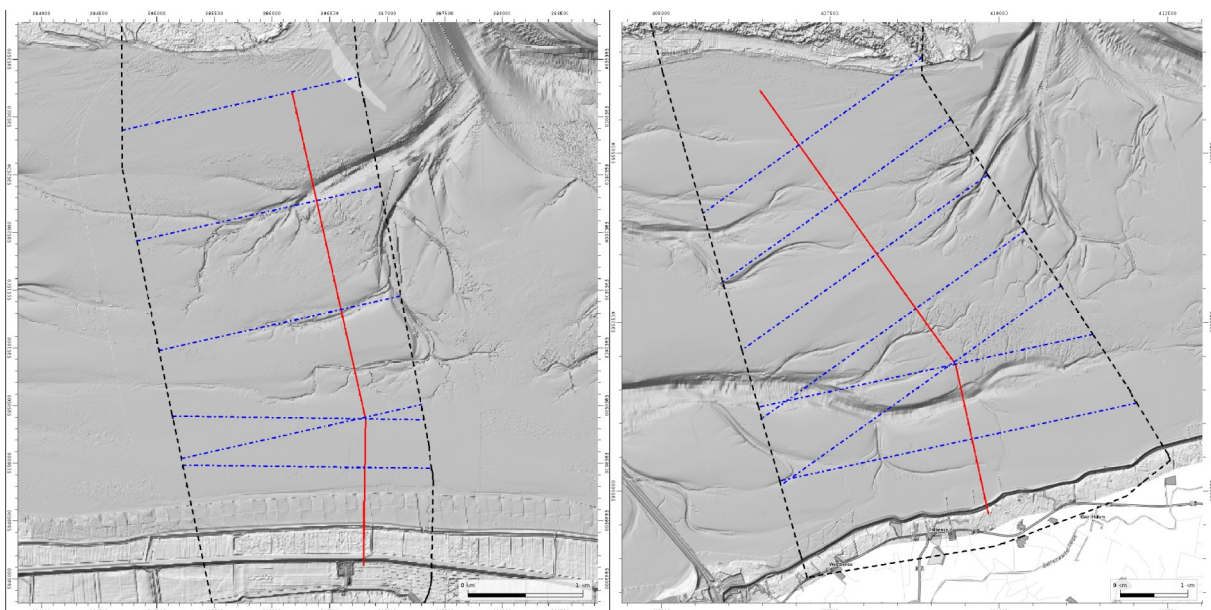


Abbildung 36: Querprofile im Abstand von max. 1 km entlang der Vorzugstrassen C3 (links) und C6a (rechts)

In den folgenden beispielhaften Querprofilardarstellungen ist die Geländeoberfläche des Jahres 2019 (dunkelgrau) in Verbindung mit dem Verlauf des minimalen Z über die letzten 25 Jahre (blau) dargestellt. Die jeweilige Vorzugstrasse ist als 20 m gepufferter, roter Bereich gekennzeichnet. Der Verlauf der Geländeoberfläche im Profil zeigt hier anschaulich die horizontale Lage und damit die Neigung des durch die Vorzugstrassen durchquerten Wattbereiches (Abbildung 37).

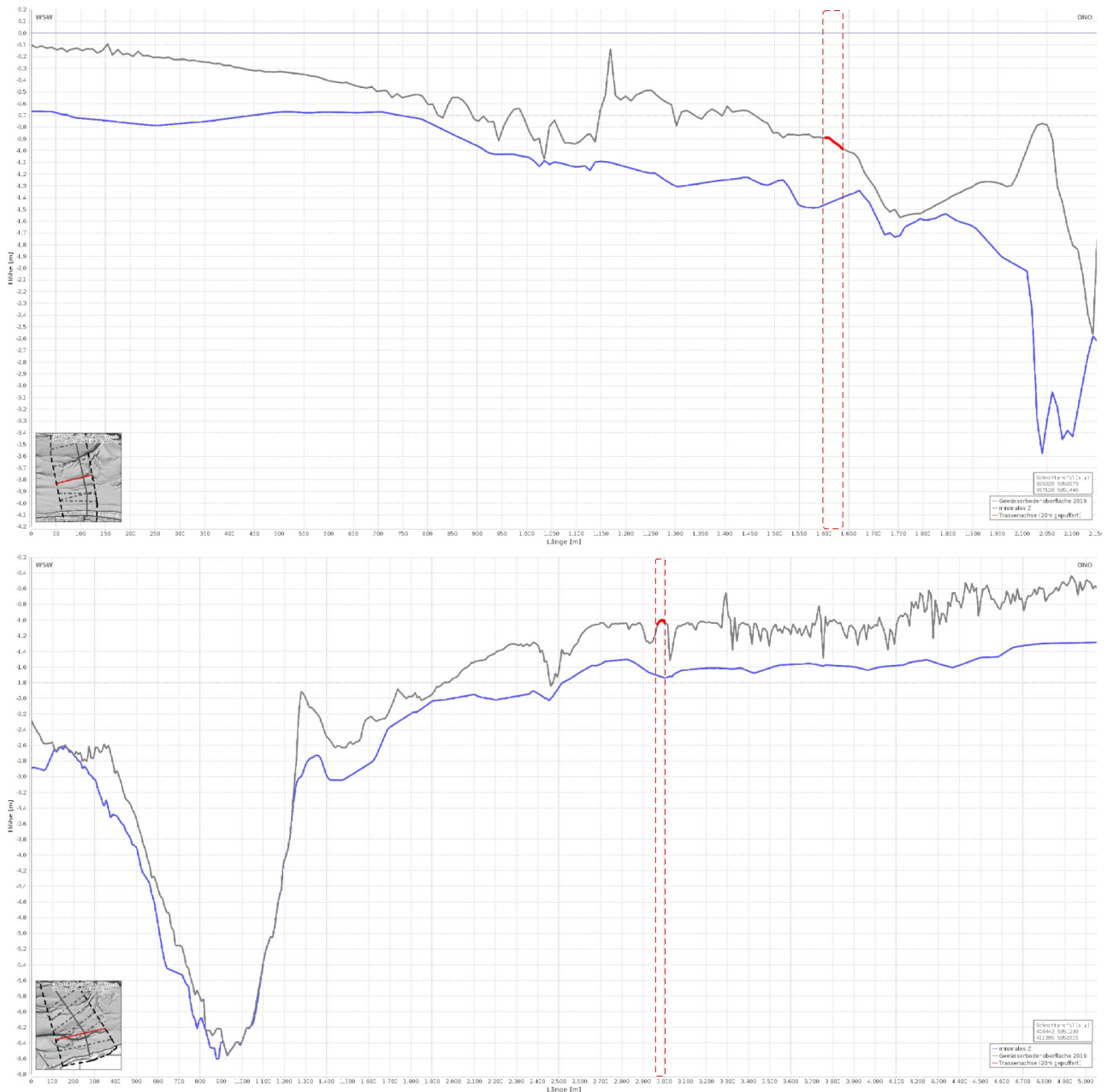


Abbildung 37: Beispielhafte Darstellung der Wattneigung im Bereich der Vorzugstrassen C3 (oben) und C6a (unten);
Wattneigung im betrachteten Abschnitt C3 Richtung Ost-Nordost, im Abschnitt C6a von Ost nach West

Die Vorzugstrasse C3 durchquert den westlichen Teil des Wateinzugsgebietes der Accumer Ee. Die einzelnen Profilschnitte zeigen über nahezu die gesamte Trassenlänge ein nach Ost-Nordost

geneigtes Gefälle der Geländeoberfläche in Richtung der das Einzugsgebiet entwässernden Rinnen (Abbildung 37 oben).

Im Gegensatz dazu orientieren sich die Trassenachsen C6a und C6b im Bereich von Stüvers- und Langeooger Plate grob entlang der Wattscheide (siehe Abbildung 36), die die Wateinzugsgebiete der Accumer Ee und der Otzumer Balje trennt. Es ergeben sich wechselnde Orientierungen der Wattneigung abhängig von der relativen Lage zur Wattscheide und den entwässernden Rinnensystemen.

Die unmittelbaren Küstennahbereiche sind gekennzeichnet durch eine insgesamt sehr geringe Neigung der Wattflächen (siehe anliegender Foliensatz „Wattneigung“).

6.4. Untersuchungen entlang der Trassenachsen

Durch den Auftraggeber wurden vorläufige Trassenachsen zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 38), entlang derer Profilanalysen durchgeführt werden können.

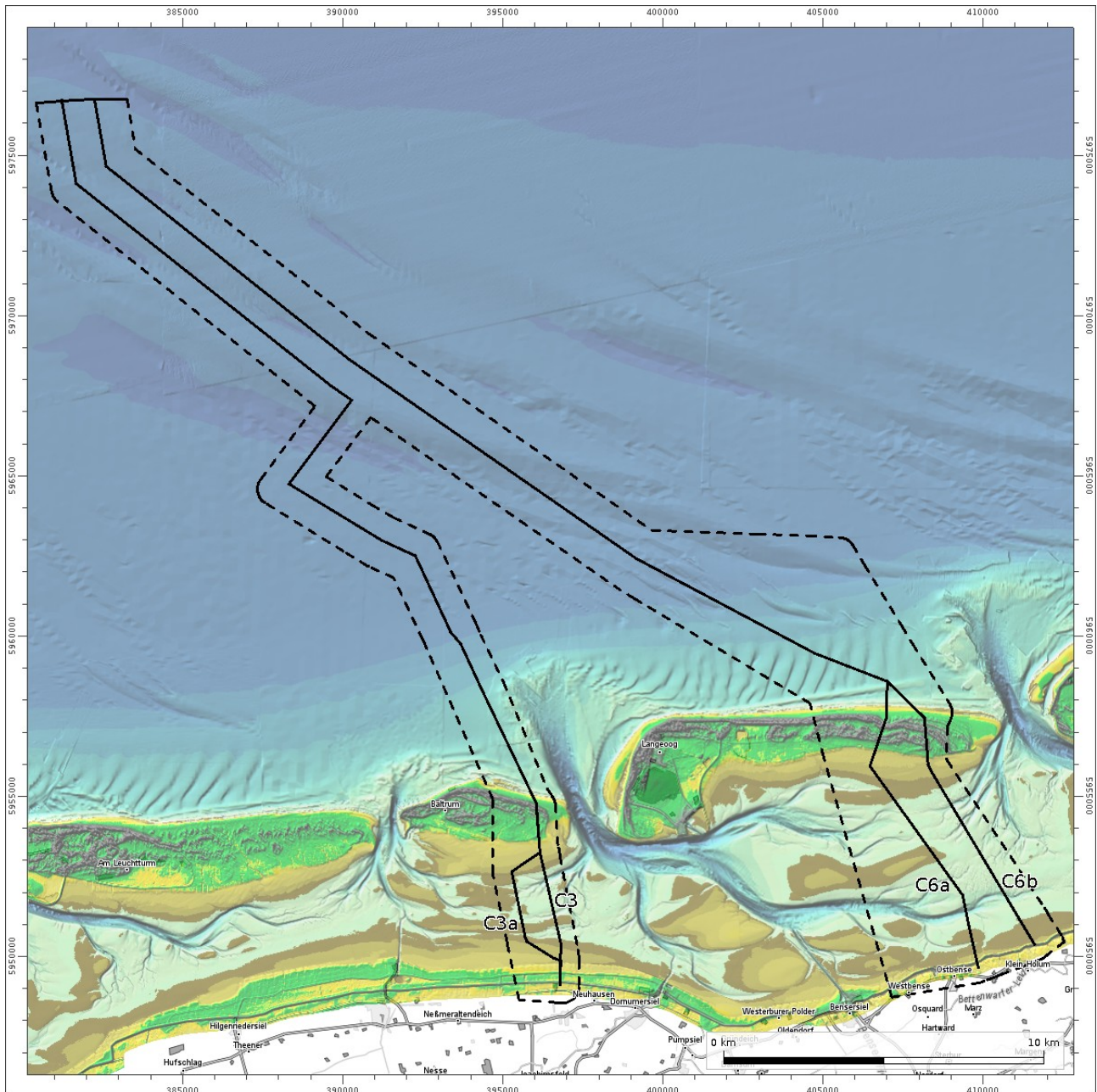


Abbildung 38: Vorläufige Trassenachsen auf der Bathymetrie 2019

In den Profilschnittdarstellungen in Abbildung 39 und Abbildung 40 sind z_{\min} , z_{\max} und die Höhenlage 2019 dargestellt. Die Differenz zwischen $z_{2019} - z_{\min}$ überschreitet entlang der Trasse nur selten 2 m und liegt im Mittel bei ca. 1 m.

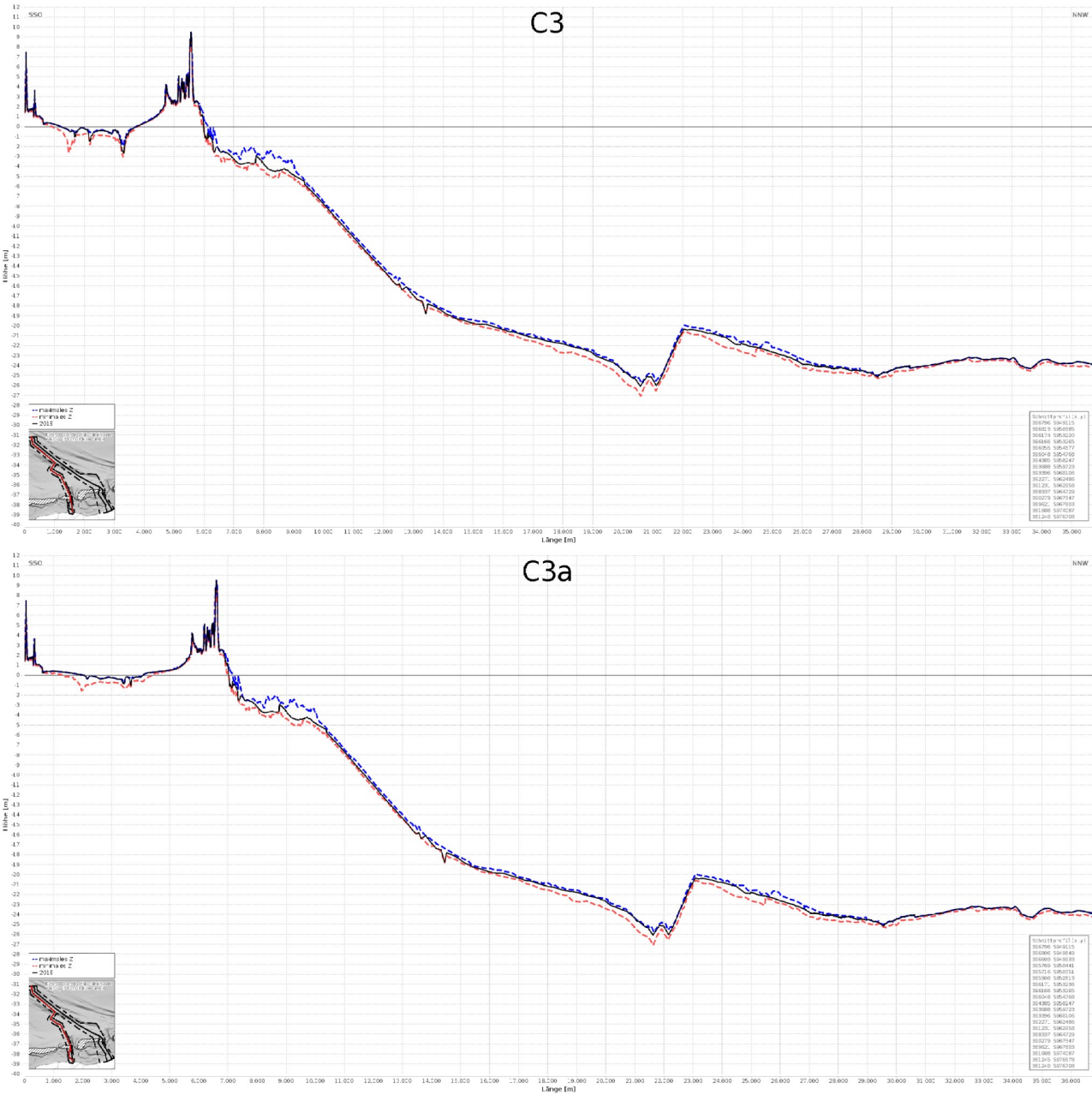


Abbildung 39: Schnittprofile entlang der Kabeltrassen C3 und C3a

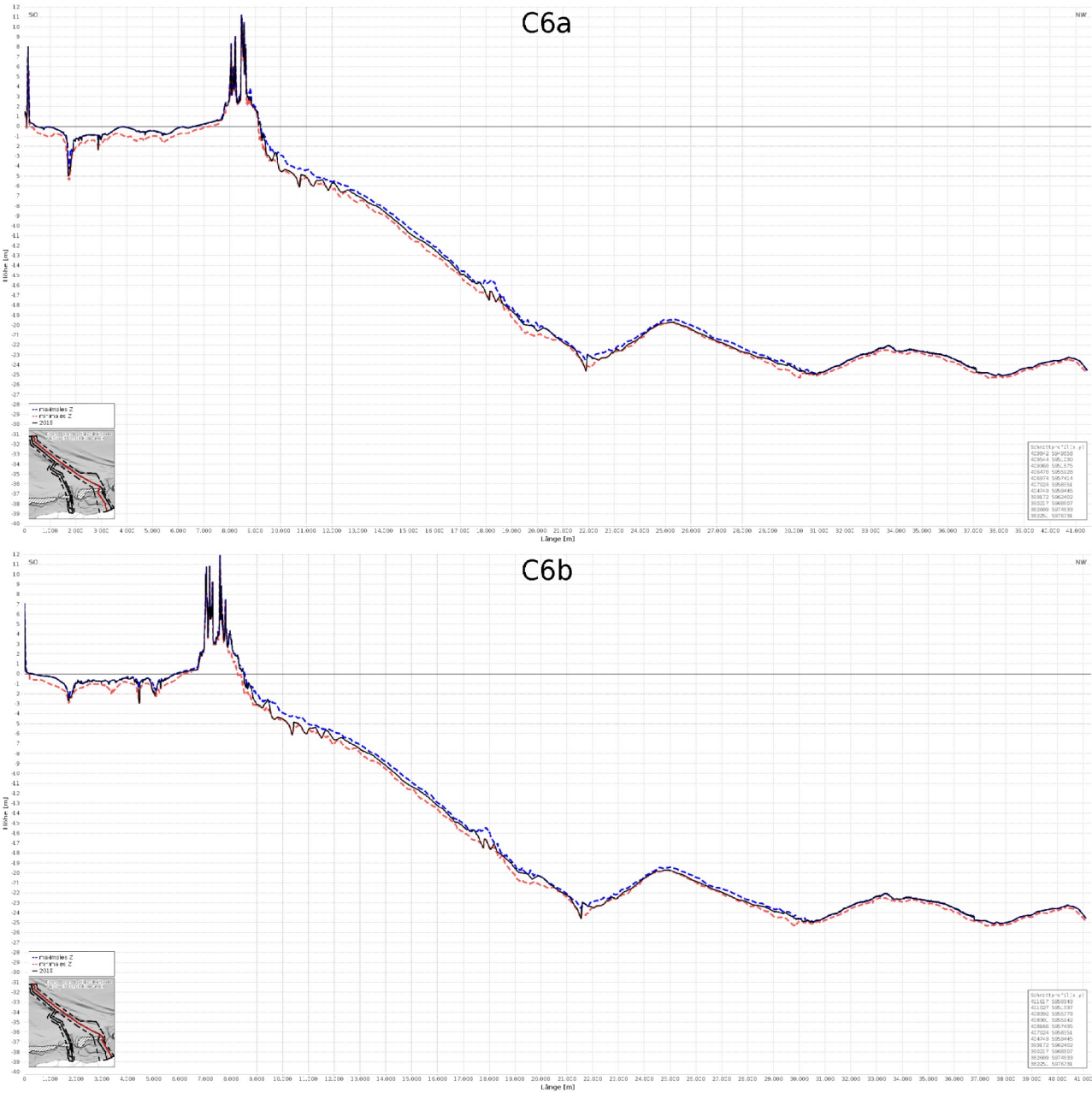


Abbildung 40: Schnittprofile entlang der Kabeltrassen C6a und C6b

7. Optimierung der Trassenlage

Die Optimierung der Trassenlage erfolgt unter ganz verschiedenen Gesichtspunkten, z. B. Anzahl der Richtungsänderungen im Trassenverlauf, Verlegetiefe, Risiko des Freilegens in der Zukunft oder auch Minimierung von ökologischen Beeinträchtigungen. Die bathymetrischen Produkte und abgeleiteten Analysen können zur Optimierung der Trassenlage herangezogen werden.

Die digitalen Modelle des Morphologischen Raums und des Morphologischen Drives können genutzt werden, um die Trassenlage bzgl. des Risikos eines Freilegens in der Zukunft zu minimieren.

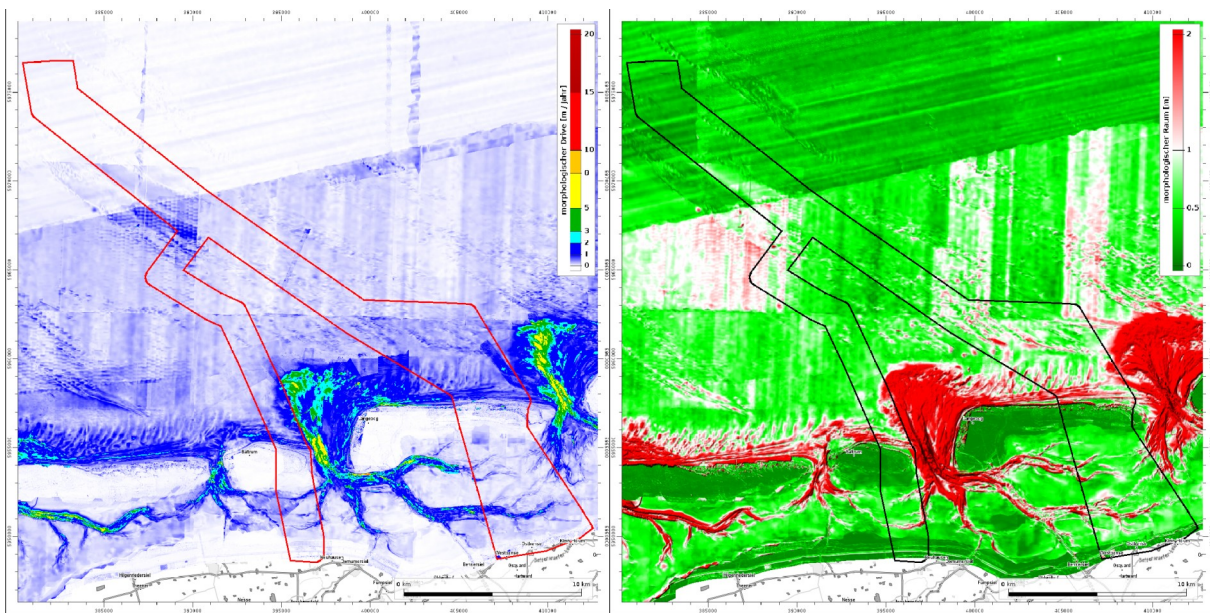


Abbildung 41: Morphologischer Drive und Raum

Eine weitere Karte entsteht, wenn die neueste Bathymetrie 2019 in Differenz zum z_{\min} gebildet wird. Auf der Basis dieser Karte kann die Trasse bzgl. deren Verlegetiefe weiter optimiert werden.

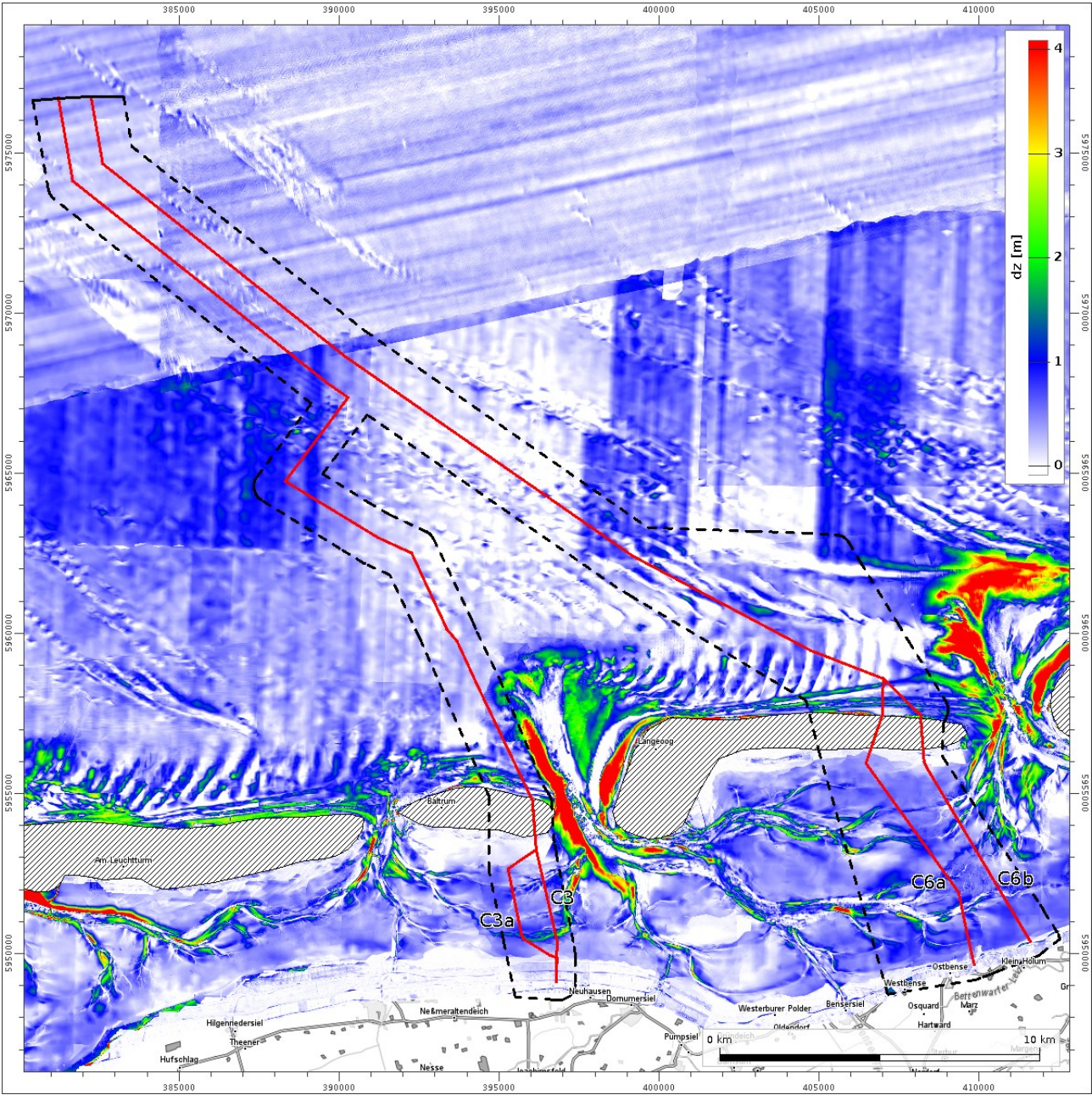


Abbildung 42: Z2019-Zmin

7.1. Verlegetiefe

Die Verlegetiefe von Trassenkabeln ist abhängig von der morphologischen Charakteristik des durchquerten Trassenabschnittes. Um die geforderte dauerhafte Überdeckung der verlegten Kabel von mindestens 1,5 m unter Meeresbodenoberfläche zu gewährleisten ist es notwendig, bei der Ermittlung einer Verlegetiefe die morphologischen Veränderungen über einen längeren Zeitraum zu berücksichtigen. Auftraggeber und -nehmer haben sich im Hinblick auf die Bestimmung einer Verlegetiefe daher darauf verständigt, diese zur Sicherstellung einer dauerhaften Überdeckung auf Basis des minimalen Z der letzten 25 Jahre zu ermitteln.

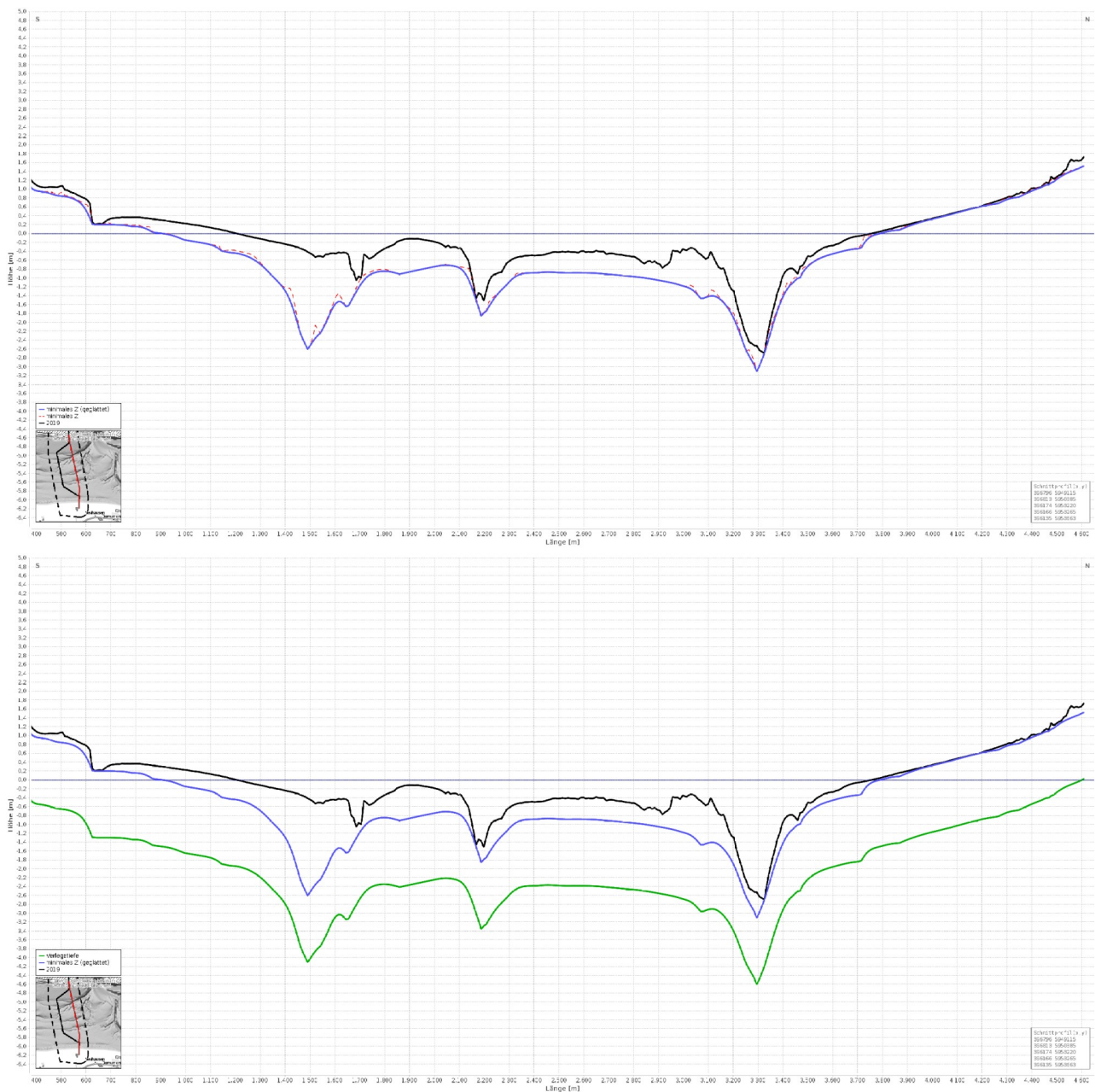


Abbildung 43: Schrittweise Bestimmung einer abschnittsweise variablen Mindestverlegetiefe am Beispiel der Vorzugstrasse C3 im Verlauf des Wattenmeeres südlich von Baltrum; Glättung des minimalen Z als Berechnungsbasis (oben) und anschließende Absenkung um die minimal geforderte Überdeckung von 1,5 m (unten)

Um dabei unerwünschte bathymetriebedingte Sprünge (durch bspw. unebene Geländeoberflächen wie im Bereich von Muschelvergesellschaftungen) zu eliminieren, wird das zugrundeliegende minimale Z unter Beibehaltung der Mindesttiefen zunächst geglättet (im Gegensatz zum nautischen Glätten, bei dem die geglätteten z-Werte nicht tiefer werden dürfen, dürfen sie hier nicht höher werden, siehe Abbildung 43 oben).

Das geglättete minimale Z wird anschließend auf Basis der geforderten minimalen Überdeckung um 1,5 m abgesenkt (siehe Abbildung 43 unten). Der resultierende Tiefenverlauf erfüllt entlang des Trassenverlaufes an jedem Punkt die geforderte Überdeckung in Bezug auf das minimale Z seit 1994 (dunkelgrüne Linie in Abbildung 43 unten). Landabschnitte, zu denen auch Inselquerungen zählen, bleiben hierbei unberücksichtigt.

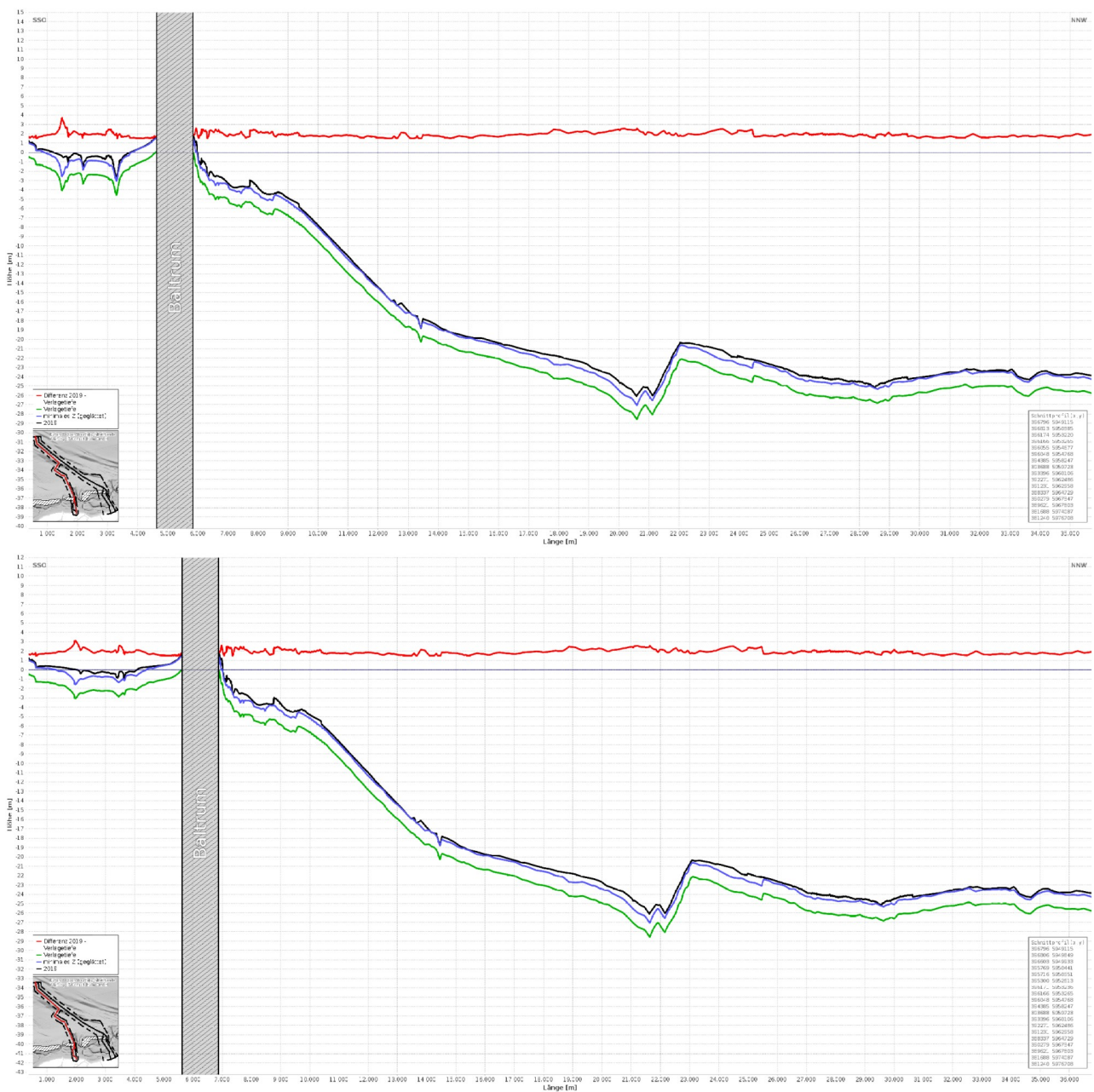


Abbildung 44: Resultierende Verlegetiefen (grün – Bezugsniveau NHN, rot – Verlegetiefe unter Geländeoberfläche der Jahresbathymetrie 2019) der Vorzugstrassen C3 und C3a (von oben nach unten)

Durch die Berechnung der Differenz zwischen absoluter Verlegetiefe und der aktuellsten Bathymetrie aus dem Jahr 2019 lässt sich außerdem die erforderliche relative Verlegetiefe der jeweiligen Vorzugstrasse unter der aktuellsten Geländeoberfläche ermitteln. Dies ist für die gesamten Trassenverläufe in Abbildung 44 sowie Abbildung 45 dargestellt.

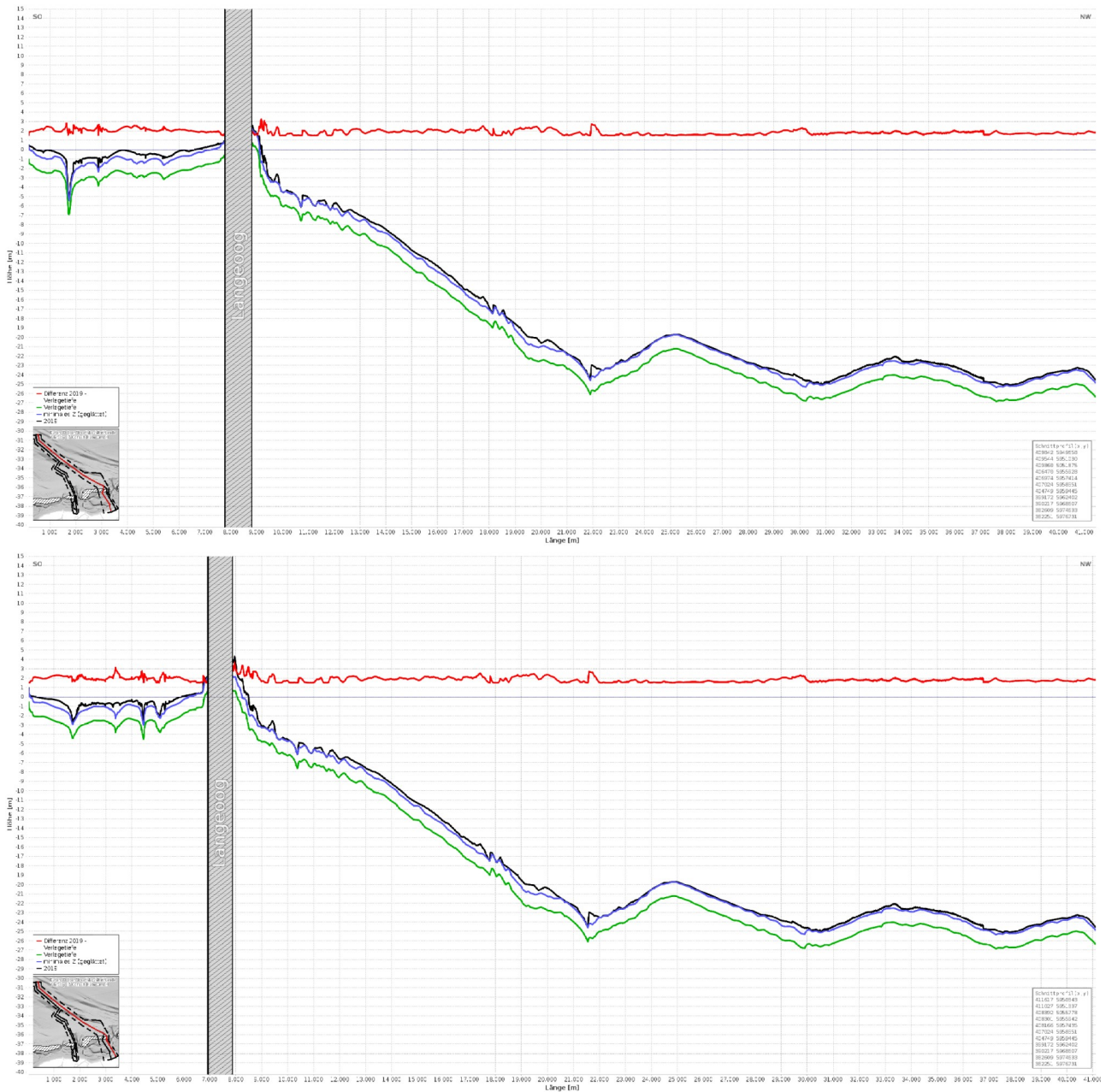


Abbildung 45: Resultierende Verlegetiefen (grün – Bezugsniveau NHN, rot – Verlegetiefe unter Geländeoberfläche der Jahresbathymetrie 2019) der Vorzugstrassen C6a und C6b (von oben nach unten)

Speziell in Bereichen hoher Geländegradierten, wie sie beispielsweise charakteristisch für Rinnenränder sind, kann es vorkommen, dass die ermittelte Verlegetiefe gerade im Fall von tiefen Prielen (das Neuharlingersielener Wattfahrwasser, welches von den Trassen C6a und C6b gekreuzt wird, weist bspw. teilweise ca. 5 m Höhendifferenz zum umliegenden Gelände auf) vergleichsweise nah an der Rinne verläuft. In solchen Fällen wird empfohlen, dass die zusätzlichen, diesem Bericht zugrunde liegenden morphologischen Analyseergebnisse zu einer Abschätzung der örtlichen morphologischen Aktivität herangezogen und die Verlegetiefen entsprechend angepasst werden (siehe hierzu beispielhaft Abbildung 46).

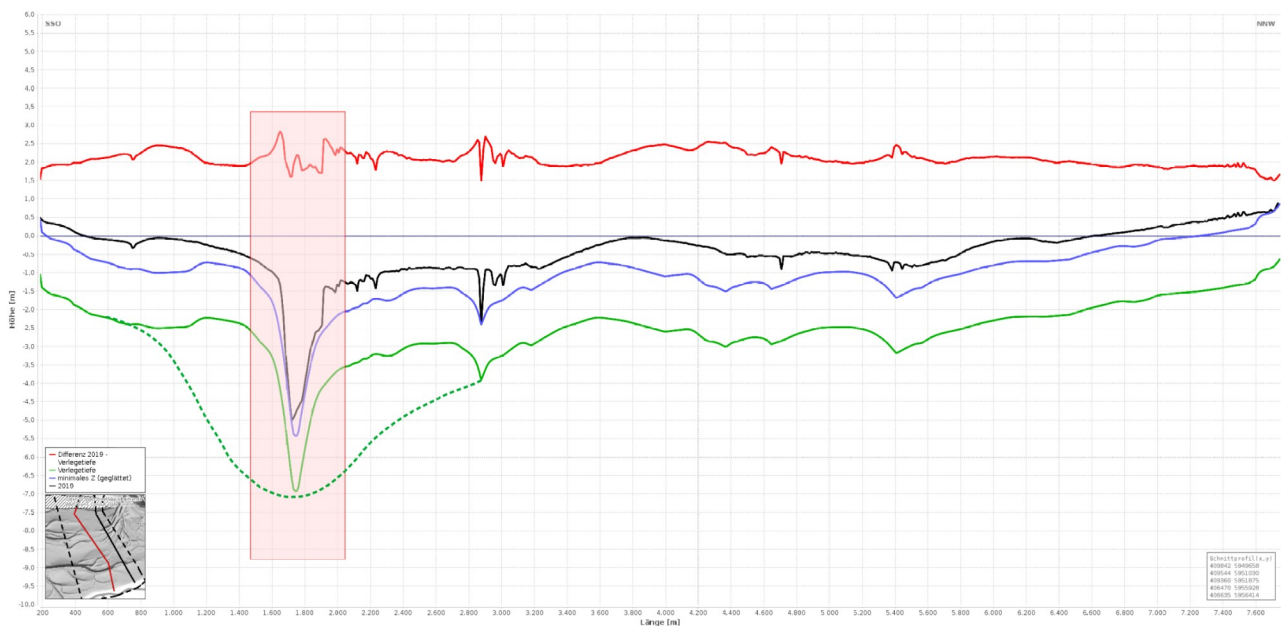


Abbildung 46: Mögliche Anpassung (gestrichelte dunkelgrüne Linie) der Verlegetiefe im Bereich tiefer, steiler Rinnen am Beispiel der Kreuzung der Trasse C6a mit dem Neuharlingersielener Wattfahrwasser

Zudem ist festzustellen, dass in Bereichen, in denen die Bathymetrie 2019 das minimale Z darstellt oder nah an dieses heranreicht, gerade genau die geforderte dauerhafte Überdeckung von 1,5 m erreicht wird (siehe Abbildung 47). Im Hinblick auf den in Kapitel 6.2 angesprochenen Zusammenhang zwischen Wattwachstum und Rinnenvertiefung ist in solchen Fällen und speziell im Bereich morphologisch aktiver Rinnen zu empfehlen, die minimale Verlegetiefe entsprechend anzupassen, um die dauerhaft geforderte Überdeckung zu gewährleisten.

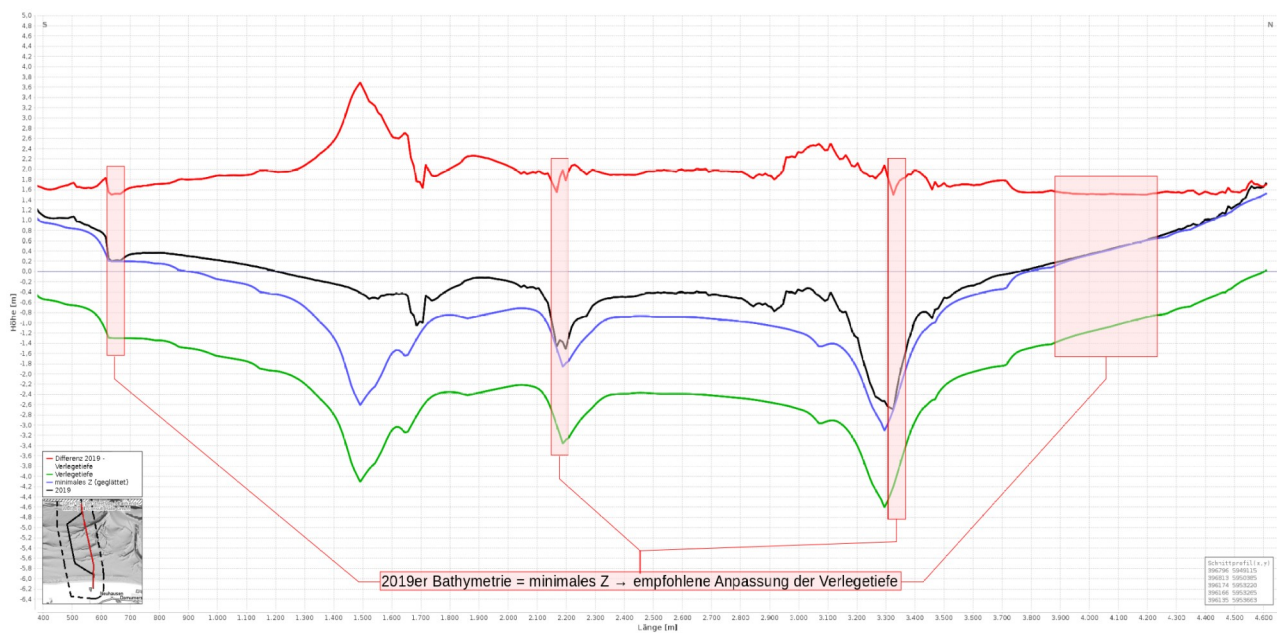


Abbildung 47: Am Beispiel der Querung des Wattbereiches südlich von Baltrum durch die Kabeltrasse C3 ermittelte Bereiche, in denen die Bathymetrie aus dem Jahr 2019 gleichzeitig das minimale Z seit 1995 darstellt

Über die Tiefenlage im Profil hinaus wäre im Folgenden auch eine flächenhafte Darstellung einer minimalen Verlegetiefe für das gesamte Untersuchungsgebiet und über die Breite der Trassenkorridore sowie eine daraus resultierende flächenhafte Verlegetiefe unter der aktuellsten Bathymetrie des Jahres 2019 realisierbar.

Auf Basis solcher Darstellungen wäre eine Optimierung der Trassenlage im Hinblick auf eine Minimierung ortsabhängiger Verlegetiefen unter Berücksichtigung einer geringen Anzahl an Richtungsänderungen innerhalb der Trassenverläufe denkbar.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist die Ermittlung und Darstellung einer variablen Verlegetiefe auf Basis des minimalen Z der letzten 25 Jahre und unter Berücksichtigung einer geforderten dauerhaften Überdeckungsmächtigkeit von mindestens 1,5 m entlang der Profilschnitte der Achsen der Vorzugstrassen C3, C3a, C6a und C6b. Sie kann im Folgenden zur Abschätzung tatsächlicher, minimal geforderter Verlegetiefen unter der aktuellen Geländeoberfläche herangezogen und zur Minimierung des Risikos einer Freilegung der Trassenkabel durch morphologische Veränderungen verwendet werden.

8. Zusammenfassung

Zur Analyse der morphologischen Stabilität möglicher Trassenkorridore wurde ein Zeitraum von 25 Jahren (1995 bis 2019) betrachtet. Bereits die Abfolge der bathymetrischen Modelle im Rahmen einer Animation zeigt die zum Teil hohen morphodynamischen Veränderungen auf.

Zur Quantifizierung der morphodynamischen Aktivität wurden die beiden Kenngrößen Morphologischer Raum und Morphologischer Drive flächig bestimmt. Durch die Überlagerung beider Kenngrößen können Flächen geringerer und höherer Aktivität separiert werden.

Die vorläufigen Trassenlagen C3 und C3a (im Bereich Baltrum) sowie C6a und C6b (im Bereich Langeoog) verlaufen auf den Inselrückseiten in der Nähe der Wattscheiden, die sich über die letzten 25 Jahre als relativ stabil erwiesen haben. Die Trassen im Osten der Inseln Langeoog und Baltrum queren seeseitig die Sandriffe der Brandungszone. An den Ostenden der Inseln endet der küstenparallele Transport, sodass diese eher zu Auflandungstendenzen neigen. Der direkte Angriff des aus der Deutschen Bucht einlaufenden Seegangs führt trotz alledem zu starken saisonalen Umlagerungen.

Aufgrund dessen wurde bei der Bestimmung einer minimalen Verlegetiefe die Hüllfläche der minimalen Gewässerbodenlage um 1,5 m abgesenkt, um eine ausreichende dauerhafte Überdeckung der Kabel zu gewährleisten. Gerade im Bereich morphologisch aktiver Rinnen sollte im Hinblick auf das Freilegungspotenzial verlegter Kabel durch ein Wandern von Rinnen in den Horizont der Verlegetiefe diese unter Umständen noch angepasst werden. Dieselbe Empfehlung ist für Gebiete auszusprechen, in denen die Gewässerbodenoberfläche der Bathymetrie aus dem Jahr 2019 der des minimalen Z seit 1995 entspricht.

Mit den bereitgestellten bathymetrischen Modellen und Analyseprodukten wird es möglich sein, bei Bedarf die Lage der Trassen weiter zu optimieren.

9. Literaturverzeichnis

- AMSEL – JENSEN, J., FRANK, T., WAHL, T., DANGENDORF, S.: Abschlussbericht zum KFKI-Projekt AMSeL. BMBF 03KIS068, 2011.
- BENNINGHOFF, M. und WINTER, C.: Decadal evolution of tidal flats and channels in the Outer Weser estuary, Germany. *Ocean Dynamics* 68, 1181-1190, 2018.
- EASYGSH-DB: Projektwebseite <http://mdi-de.baw.de/easygsh/>, Stand Juli 2020.
- GOLDENBOGEN, R., KUNZ, H., NIEMEYER, H.-D., SCHROEDER, E.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben WADE (MTK 0508). Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste, März 1998.
- HAYES, M. O.: Morphology of sand accumulation in estuaries. In: Cronin, L.E. (ed.): *Estuarine Research*, vol. 2., Geology and Engineering, Academic Press, New York, 1975.
- HAYES, M. O.: Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: S. P. Leatherman: *Barrier islands*, Academic Press, New York, 1979.
- HERRLING, G. und WINTER, C.: Tidal inlet sediment bypassing at mixed-energy barrier islands. *Coast. Eng.* 140, 342-354, 2018.
- KRAMER, J.: *Kein Deich, kein Land, kein Leben. Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee.* 304 S., Leer, 1989.
- KRÜGER, W.: *Meer und Küste bei Wangeroog und die Kräfte, die auf ihre Gestaltung einwirken.* Zeitschrift für Bauwesen, Berlin, 1911.
- LUCK, G.: Der Einfluß der Schutzwerke der ostfriesischen Inseln auf die morphologischen Vorgänge im Bereich der Seegaten und ihrer Einzugsgebiete. *Mitt. d. Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau*, H. 47, Braunschweig, 1975.
- LÜDERS, K.: Die Entstehung der ostfriesischen Inseln und der Einfluß der Dünenbildung auf den geologischen Aufbau der ostfriesischen Küste. *Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet*, Band 5, 1953.
- MILBRADT, P.: Sedimenttransport und Morphodynamik in der Deutschen Bucht. In: *Die Küste*, 78, 33-58, ISSN 0452-7739, 2011.
- MILBRADT, P., KÖSTERS, F., PUTZAR, B., PLÜSS, A.: Analyse des Sedimenttransports und der Morphodynamik in der Deutschen Bucht auf der Basis des Multi-Modell-Ansatzes. In: *Die Küste*, 83, 147-166, ISSN 0452-7739, 2015.
- NIEMEYER, H.D.: Zur Systematik hydrodynamisch-morphologischer Wechselwirkungen im Einzugsbereich der Otzumer Balje. *Berichte zur Ökosystemforschung, Hydrographie - Nr. 5, Teil F, NLWA -Forschungsstelle Küste-, Norderney*, 1992.
- PORTAL TIDEEMS DER WSV: www.portal-tideems.de, Stand Juli 2020.
- STREIF, H.: *Das ostfriesische Küstengebiet – Nordsee, Inseln, Watten und Marschen.* Sammlung geologischer Führer, 57, 367 S., 1990.
- WAHL, T., HAIGH, I. D., WOODWORTH, P. L., ALBRECHT, F., DILLINGH, D., JENSEN, J., NICHOLLS, R. J., WEISSE, R., WÖPPELMANN, G.: Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present, *Earth-Science Reviews*, Vol. 124, 51-67, ISSN 0012-8252, 2013.
- WALTER, J.: *Die Ostfriesischen Inseln.* Seminar zur Regionalen Geographie Nordwestdeutschland, Institut für Geographie, Universität Stuttgart, 2001.