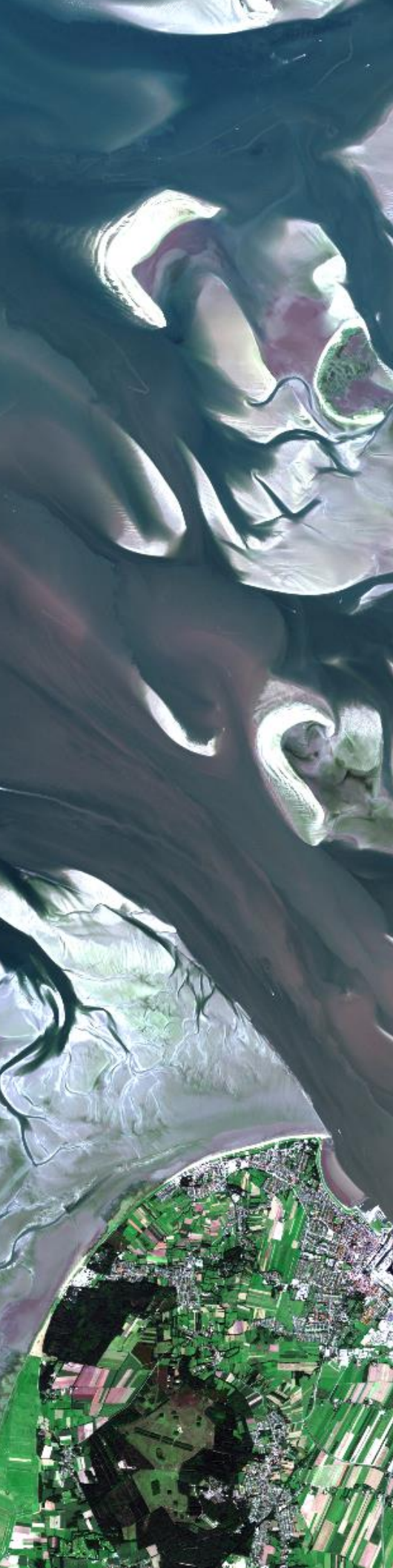




Abschlussbericht

WASCO Wasser-Watt-Sedimente Copernicus für die Küste

Projektfinanzierung:



Programm: Entwicklung und Implementierungsvorbereitung
von Copernicus Diensten für den öffentlichen Bedarf in Deutschland

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FKZ: 50EW2206A,B

Projektlaufzeit: 2023 - 2025

Aktuelle Version vom 30.04.2026

Zitierhinweis:

Oberrecht, D., Christiansen, A., Stelzer, K., Dissanayake, P., Mascioli, F., Kunde, T., Heubel, K., Scheiffarth, G., Kohlus, J., Wurpts, A. (2026), WASCO – Wasser-Watt-Sedimente, Copernicus für die Küste, Abschlussbericht

Projektpartner und Mitarbeiter:



Niedersächsischer Landesbetrieb
für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz
Forschungsstelle Küste

Dr. Pushpa Dissanayake
Tina Kunde
Dr. Francesco Mascioli
Dr. Dennis Oberrecht
Prof. Dr. Andreas Wurpts



Anne Christiansen
Dr. Katja Heubel



**BROCKMANN
CONSULT**

Kerstin Stelzer

Assoziierter Partner

**Nationalpark
Wattenmeer**

NIEDERSACHSEN



Dr. Gregor Scheiffarth

Assoziierter Partner

**Nationalpark
Wattenmeer**

SCHLESWIG-HOLSTEIN



Jörn Kohlus

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Zusammenfassung.....	8
1 Einleitung und Ausgangsbedingungen	10
1.1 Projektziele und Aufbau.....	10
1.1.1 Vorbereitung eines Küstendienstes	10
1.1.2 Arbeitsziel Kartierung der Oberflächenbeschaffenheit.....	11
1.2 Untersuchungsgebiete	12
1.3 Aufbau des Dokumentes.....	13
2 Kartierung des Eulitorals mit optischen Fernerkundungsdaten.....	14
2.1 Sedimentverteilung Eulitoral	14
2.1.1 Datengrundlage	14
2.1.2 Klassifikationsverfahren	16
2.1.3 Zuordnung der Korngrößenverteilung zu den optischen Sedimentklassen.....	18
2.1.4 Validierung der Sedimentklassifikation.....	20
2.2 Erfassung morphologischer Änderungen im Eulitoral	22
2.2.1 Verfahren zur Erstellung des Wattflächenindex	22
2.2.2 Vergleich mit TrilaWatt (Karte und Transekt)	22
3 Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule	24
3.1 Datengrundlage.....	24
3.2 Verfahren zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentration	24
3.3 Ergebnisse	25
3.4 Validierung der Analysemethodik.....	28
4 Kartierung des Sublitorals	30
4.1 Einleitung	30
4.2 Hydroakustische Datenerfassung und Ground Truthing	32
4.3 Attribution der Sedimentklassifikationen im Sublitoral	33
4.4 Verteilung der sublitoralen Sedimente	34

5	Bereitstellung der Sedimentdaten für die numerische Modellierung	37
5.1	Verschneidung eulitoraler Produkte mit der Sedimentklassifizierung des Sublitorals.....	37
5.2	Berechnung der repräsentativen Korngrößenverteilung.....	38
6	Aufbau des numerischen Modellwerkzeugs	42
6.1	Einleitung	42
6.2	Numerische Methodik	42
6.3	Osterems – Modell (OEMS in Niedersachsen)	43
6.3.1	Modellgitter & Bathymetrie	43
6.3.2	Randbedingungen	44
6.3.3	Anfangsbedingung der Sedimentverteilung.....	45
6.4	Föhr-Amrum-Sylt – Modell (FAS in Schleswig-Holstein)	48
6.4.1	Modellgitter & Bathymetrie	48
6.4.2	Randbedingungen	48
6.4.3	Anfangsbedingung der Sedimentverteilung.....	49
6.5	Validierung und Diskussion der numerischen Modelle	51
7	Anwendungsszenarien	53
7.1	Anwendung der Sedimentkarte zur morphologischen Entwicklung	53
7.1.1	Untersuchungsgebiet Osterems (OEMS).....	53
7.1.2	Untersuchungsgebiet Föhr-Amrum-Sylt (FAS)	60
7.2	Einsatz von Fernerkundung zur Dokumentation morphologischer Entwicklungen	66
7.2.1	Die Entwicklung der Juister Balje	66
7.3	Eignung der Fernerkundung zur Detektion von Seegraswiesen	70
7.3.1	Analyse der Veränderungen der Seegrasvorkommen im Amrumer Rückseitenwatt	71
7.3.2	Entwicklung der Seegraswiese auf dem Randzel	75
7.3.3	Saisonale Entwicklung von Seegraswiesen	78
7.4	Analyse von Veränderungen der Muschelvorkommen im Eulitoral	79
7.4.1	Entwicklung der Muschelbank südlich der Juister Balje aufgrund..... morphologischer Veränderungen	79
	Literaturverzeichnis	81

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Elemente von WASCO und ihre Rolle für einen künftigen Küstendienst.....	10
Abb. 2: Lokation der im Forschungsprojekt gewählten Wattgebiete	12
Abb. 3: Ausschnitt des schleswig-holsteinischen Testgebiets vom 08.03.2022.....	16
Abb. 4: Wissensbasierter Entscheidungsbaum für die Sedimentklassifizierung.....	17
Abb. 5: Einteilung der Wattoberflächen in optische Sediment- und Habitatklassen.....	17
Abb. 6: Übersetzung der optischen Sediment- und Habitatklassen in den WASCO-Code.....	19
Abb. 7: Sedimentverteilung (WASCO-Code) im Untersuchungsgebiet	19
Abb. 8: Gegenüberstellung von Sedimentklassen in einer Konfusionsmatrix	20
Abb. 9: Sedimentklassen (WASCO-Code) überlagert mit der Korngrößenverteilung (OEMS).....	21
Abb. 10: Sedimentklassen (WASCO-Code) überlagert mit der Korngrößenverteilung (FAS).....	21
Abb. 11: Wattflächenindex für den Zeitraum 2016 – 2025.....	22
Abb. 12: Vergleich des Wattflächenindex mit der Bathymetrie aus den TrilaWatt-Daten.....	23
Abb. 13: Flowchart der Prozessierungsschritte von Satellitendaten hin zu Gewässergüteinformationen.....	25
Abb. 14: Sedimentverteilung im Wasser für Hoch- und Niedrigwasser in Schleswig-Holstein.....	26
Abb. 15: Sedimentverteilung im Wasser für Hoch- und Niedrigwasser in Niedersachsen	27
Abb. 16: Validierungsergebnisse der CMS High Resolution-Trübung	28
Abb. 17: Lage der Messstation Borkum-W2.....	29
Abb. 18: Trübung aus der Fernerkundung im Vergleich mit gemessenen Schwebstoffkonzentrationen	29
Abb. 19: Schematische Darstellung der Klassifizierungs-Parameter.....	30
Abb. 20: Bathymetrie und Rückstreuintensität als Endprodukte hydroakustischer Messungen	32
Abb. 21: Backengreifer zur Sedimentbeprobung und Sedimentprobe	33
Abb. 22: Sedimentklassen nach Folk- und Figge-Klassifizierung	34
Abb. 23: Sonarmosaik eines durch zahlreiche Blöcke strukturierten Meeresbodens im Sublitoral.....	35
Abb. 24: Beispielhafte Darstellung sichtbarer Kantenstrukturen von Torf.....	36
Abb. 25: Abdeckung der verwendeten Datensätze für die Sedimentkartierung des Modellgebietes	37
Abb. 26: Sedimentkarte der sub- und eulitoral Bereiche.....	38
Abb. 27: Korngrößenverteilungskurven der Sedimentklassen.....	39
Abb. 28: Repräsentative Korngrößenverteilungskurve der kartierten Sedimentklassen	40
Abb. 29: Modellgitter und Bathymetrie für das OEMS-Fokusgebiet.....	44
Abb. 30: Anfangs- und Randbedingungen für das OEMS-Modell	45
Abb. 31: Räumliche Verteilung der AufMod-Sedimentdaten auf der OEMS-Modelldomäne	46
Abb. 32: Räumliche Verteilung der sieben Sedimentklassen basierend auf der Siebkurve.....	47
Abb. 33: Modellgitter und Bathymetrie für das FAS-Fokusgebiet	48
Abb. 34: Anfangs- und Randbedingungen für das FAS-Modell	49
Abb. 35: Räumliche Verteilung der AufMod-Sedimentdaten auf der FAS-Modelldomäne	50
Abb. 36: Räumliche Verteilung der sieben Sedimentklassen basierend auf der Siebkurve.....	51
Abb. 37: Kalibrierung und Validierung des Modells mittels Wasserstandvorhersage	52
Abb. 38: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters bei einjähriger Modellvorhersage.....	54
Abb. 39: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters an ausgewählten Standorten	55
Abb. 40: Vergleich der Änderung von Erosions- und Sedimentations-Sedimentvolumen	56
Abb. 41: Kumulativer Sedimenttransport an den offenen Rändern auf der Watt-Seite	57

Abb. 42: Vergleich zwischen beobachteten und berechneten Schwebstoffkonzentrationen.....	59
Abb. 43: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters bei einjährige Modellvorhersage	61
Abb. 44: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters an ausgewählten Standorten	62
Abb. 45: Vergleich der Änderung von Erosions- und Sedimentations-Sedimentvolumen	63
Abb. 46: Kumulativer Sedimenttransport im Wattbereich	64
Abb. 47: Vergleich zwischen beobachteter und durch Modellierung vorhergesagter Trübung.....	66
Abb. 48: Veränderung der Prielverläufe im Juister Rückseitenwatt zwischen 1987 und 2025	67
Abb. 49: Wattflächenindex Rückseitenwatt Juist von 2017 – 2024	68
Abb. 50: Änderungen zwischen 2018/2019 und 2022/2024.....	68
Abb. 51: Erosions- und Akkumulationsbereiche zwischen 2018/2019 und 2023/2024 südlich von Juist	69
Abb. 52: Erosions- und Akkumulationsbereiche zwischen 2015 und 2021.....	69
Abb. 53: Sedimentverteilung im Juister Rückseitenwatt für drei verschiedenen Zeitspannen	70
Abb. 54: Sedimentverteilung im Wattgebiet und Überflutungshäufigkeit zwischen Amrum und Föhr	72
Abb. 55: Entwicklung der Seegraswiese des Amrumer Rückseitenwatts	73
Abb. 56: Seegrassklassifizierung von 2015 und 2021	74
Abb. 57: Sedimentverteilung im Amrumer Rückseitenwatt nach WASCO-Code.....	75
Abb. 58: Entwicklung der Seegraswiese auf dem Randzel	76
Abb. 59: Falschfarbdarstellung der PlanetScope-Aufnahmen mit der Bodenkartierung.....	77
Abb. 60: Saisonale Entwicklung der Seegraswiese nördlich von Langeneß	78
Abb. 61: Mittlere saisonale Flächenentwicklung der Seegraswiese nördlich von Langeneß.....	79
Abb. 62: Entwicklung der Muschelbank südlich der Juister Balje	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Satellitensensoren und ihre Eigenschaften	14
Tabelle 2: Übersicht verwendeter Sedimentproben	15
Tabelle 3: Übersicht verwendeter Monitoringdaten aus Muschel- und Seegraskartierungen.....	15
Tabelle 4: Zuordnung einer Sedimentkodierung (SedCode) und Übersetzung in den WASCO-Code.....	18
Tabelle 5: Datengrundlage der für die Modellregionen verwendeten Sedimentkartierungen	31
Tabelle 6: Gemittelter prozentualer Anteil der jeweiligen Korngrößenklassen der Sedimenttypen.....	41
Tabelle 7: Sensitivitätsanalyse durch die Verwendung verschiedener Rauigkeiten des OEMS-Modells.....	52

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht bündelt die Ergebnisse eines länderübergreifenden Verbundprojektes, in dem Produkte aus der Fernerkundung hinsichtlich der Anwendung und Sicherstellung inhaltlicher Konsistenz zur Qualitätssicherung und damit zur grenzüberschreitenden Kohärenz von Bewertungsergebnissen getestet wurden. Das übergeordnete Projektziel war die Vorbereitung eines Küstendienstes mit den Produkten Oberflächensedimentverteilung, Seegras- und Muschelbankausdehnung im Eulitoral sowie der Gewässertrübung. Als Untersuchungsgebiet wurde zur Bündelung der länderübergreifenden Bearbeitung jeweils ein Gebiet je Bundesland gewählt. In Schleswig-Holstein lag der Fokus auf dem Wattbereich Sylt-Amrum-Föhr, während in Niedersachsen das Projektgebiet Osterems untersucht wurde. Beide Gebiete haben unterschiedliche Randbedingungen, vor allem hinsichtlich der Verteilung von Feinsedimenten sowie dem Vorkommen und der Verteilung sensibler Habitats wie Muschelbänke und Seegraswiesen. Dies bot die Möglichkeit für eine größere Bandbreite an Bedingungen, die Kartierung mittels Fernerkundung zu testen.

Die Eignung der Produkte aus Fernerkundungsinformationen wurde mittels numerischer Modellierung qualitativ und quantitativ bewertet. Für den Aufbau und die erweiterte Klärung von Fragen beispielsweise morphologischer Veränderungen ist neben den eulitoralischen Informationen auch der sedimentologische Systemzustand im Sublitoral zu berücksichtigen. Dies erfordert die konsistente Verschneidung der aus Fernerkundung abgeleiteten Sedimentverteilung im Eulitoral mit der aus hydroakustischen Daten abgeleiteten Verteilung im Sublitoral. Die Informationen aus dem Sublitoral wurden nicht innerhalb des Projektes erhoben, sondern es wurden bereits vorhandene Messdaten aus beiden Ländern gebündelt.

Bei der Verschneidung beider Datensätze hat sich gezeigt, dass die Sortierung von Sedimenten in beiden Bereichen durchaus unterschiedliche Charakteristiken aufweist. Sedimente im Sublitoral haben im Vergleich zum Eulitoral eine gleichmäßigere Verteilung mit einem erhöhten Feinkornanteil und höherem Grobsedimentanteil. Daher konnte keine einheitliche Klassifizierung von eulitoralischer und sublitoralischer Sedimentverteilung gefunden werden, ohne hierbei wesentliche Charakteristika zu verlieren. Unabhängig von der Klassifizierungsfrage wurde eine einheitliche Darstellung in Form einer einheitlichen Sedimentkarte entwickelt. Diese konsistente Sedimentkarte bildet für zukünftige Planungsprozesse wie auch die morphodynamische Modellierung, beispielsweise für Auswirkungsprognosen von Eingriffen, eine gute und erforderliche Grundlage.

In einem weiteren Schritt wurde für jedes Untersuchungsgebiet ein numerisches Modell aufgebaut und hydrodynamisch validiert. Bei dem verwendeten Modellwerkzeug handelt es sich um einen in vorherigen Projekten weiterentwickelten Modellansatz auf Basis von Delft3D. Für die morphodynamische Modellierung beider Gebiete wurden identische Einstellungen hinsichtlich wesentlicher Prozessparametrisierungen verwendet, um einen möglichst belastbaren Vergleich mit den Fernerkundungsdaten zu gewährleisten. Die im Projekt mit Blick auf die bereichsüberschreitende Konsistenz entwickelte Sedimentkarte wurde als Initialbedingung verwendet und auf deren Basis morphologische Veränderungen über einen Zeitraum von einem Jahr berechnet und bewertet. In einem zweiten Schritt wurde mit identischer Sedimentverteilung die Schwebstoffkonzentration nahe der Oberfläche mit Ergebnissen aus der Fernerkundung verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die verwendeten Oberflächensedimentverteilungen und Schwebstoffkonzentrationen aus den Fernerkundungsdaten vom numerischen Modell sehr gut reproduziert werden. Da ein direkter

Zusammenhang zwischen Sedimentverteilung und lokaler Trübung bzw. Sedimentkonzentration besteht, wird dieses Ergebnis als starker Indikator dafür gewertet, dass beide Fernerkundungsprodukte qualitativ und quantitativ die realen Bedingungen abbilden.

In weiteren Anwendungsszenarien konnte die Eignung der Fernerkundungsdaten hinsichtlich saisonaler Seegrasentwicklung, langfristiger morphologischer Veränderungen und Entwicklung von Muschelbänken und Seegraswiesen gezeigt werden. Bei Seegraswiesen und Muschelbänken ist eine Mindestbesiedlungsdichte erforderlich, da diese sonst von der optischen Messmethodik nicht erfasst werden können. Es konnte aber in beiden Bundesländern die langfristige Entwicklung bestehender Seegraswiesen erfolgreich verfolgt werden. Hinsichtlich des Untersuchungsbedarfes zu Veränderungen der Habitat-Ausdehnung hat das hier untersuchte Verfahren den Vorteil, dass synoptische Datensätze aus Sediment- und Habitatinformationen zur Verfügung stehen.

Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse bestätigen hiermit einen weiteren Anwendungsfall von Fernerkundungsdaten in der öffentlichen Verwaltung. Die hohe Konsistenz lässt hierbei sowohl qualitative als auch quantitative Analysen zu.

1 Einleitung und Ausgangsbedingungen

Die Deutschen Küsten bilden ein Spannungsfeld aus hochsensiblen Naturraum (z.B. Weltnaturerbe Wattenmeer, Flora-Fauna-Habitat (FFH), Biodiversität), intensiver Nutzung durch den Menschen (Tourismus, Fischerei, Energie) und Bedrohung durch den Klimawandel (Meeresspiegelanstieg). Speziell die deutsche Nordseeküste und die Küstengewässer sind aufgrund ihrer vielfältigen Nutzung und ihrer geologischen Einzigartigkeit ein Brennpunkt, der besonderer Aufmerksamkeit bedarf. Sediment ist hier ein zentrales Thema: In Dünen und Vorstränden dient es dem Küstenschutz, in der Wassersäule bestimmt es das Lichtklima und damit die Wachstumsbedingungen für pflanzliches wie auch tierisches Leben und als Sediment am Boden ist es Lebensraum für zahlreiche Organismen. Gleichzeitig beeinflusst die Sedimentdynamik und -zusammensetzung die Unterhaltung der Wasserstraßen. Darüber hinaus ist eine natürliche Sedimentdynamik eines der Anerkennungskriterien für das Weltnaturerbe.

Überwachung, Management und Planung werden in Deutschland durch verschiedene Bundes- und Landesbehörden sowie Landesbetriebe und Nationalparkverwaltungen abgestimmt wahrgenommen; international werden sie mit den Niederlanden und Dänemark trilateral koordiniert.

1.1 Projektziele und Aufbau

1.1.1 Vorbereitung eines Küstendienstes

Ziel des Forschungsvorhaben WASCO ist die Vorbereitung eines Dienstes für aufbereitete Produkte aus Fernerkundungsdaten und -produkten für den Küstenraum. Zentrales Thema des Küstenservice ist hier das Sediment - sowohl für das Eulitoral (trockenfallende Wattflächen) als auch die in der Wassersäule transportierten Schwebstoffe. Dabei sollen Daten aus der Satellitenfernerkundung gemeinsam mit weiteren Informationen über eine Prozesskette aufbereitet und direkt in Produkte für Dienste transformiert werden. Die Produkte stehen damit für die tägliche Arbeit der Projektpartner, anderen behördlichen Einrichtungen im Küstenraum und ebenso der Öffentlichkeit zur Verfügung (Abb. 1).

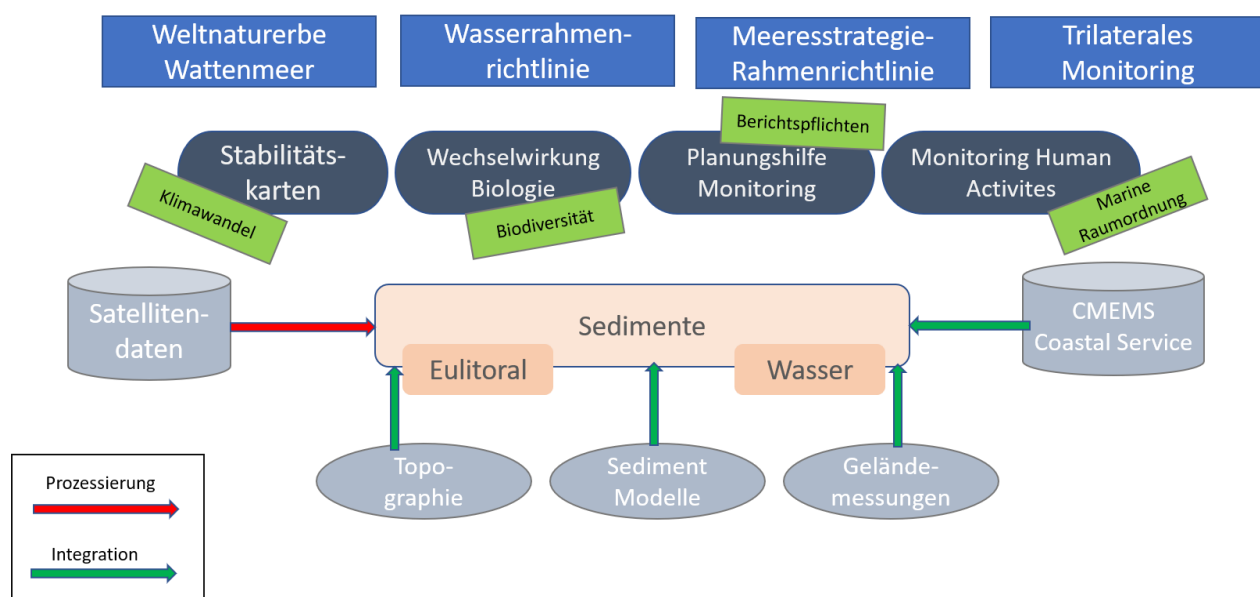


Abb. 1: Elemente von WASCO und ihre Rolle für einen künftigen Küstendienst mit thematischen Ausrichtungen.

1.1.2 Arbeitsziel Kartierung der Oberflächenbeschaffenheit

Die bisherigen, in Zuständigkeit des jeweiligen Bundeslandes erfolgenden Erhebungen zur Oberflächenbeschaffenheit der eulitoralischen Flächen hinsichtlich Sedimentzusammensetzung und Habitaten unterscheiden sich in Methodik, Häufigkeit und räumlicher wie auch zeitlicher Auflösung. So wurden bislang Sedimentinformationen in Niedersachsen im Rahmen händischer Kartierungen anhand von RGB-Orthofotos und Ortsbegehungen erfasst. Das durch die WRRL/MSRL angestrebte Wiederholungsintervall von sechs Jahren wird hierbei teilweise nicht flächendeckend erreicht, zudem erschwert die Subjektivität menschlicher Interpretation die Vergleichbarkeit konsekutiver Ergebnisse. In Schleswig-Holstein wird für die WRRL-Berichterstattung bereits Satellitenfernerkundung zur Sedimentklassifikation von Wasserkörpern eingesetzt, jedoch ergeben sich durch die methodischen Fortschritte (maschinelles Lernen im Zusammenhang mit guter Datenverfügbarkeit, Cloud Processing und Nutzung künftiger Hyperspektraldaten) neue Möglichkeiten für bessere Produktqualität, neue Produkte und effizientere Workflows. Im WASCO-Projekt wurden Fernerkundungsdaten mit anderen Informationsquellen kombiniert, um letztendlich für vielfältige Fragestellungen eine neue Qualität der Informationsgewinnung als Entscheidungsgrundlage zu erreichen.

Zur Anwendungsprüfung und Demonstration wurden Anwendungsszenarien (Kapitel 7) entwickelt, in denen die verschiedenen Produkte eingesetzt werden. Die resultierenden Workflows werden beschrieben und können so für weitere Datennutzungen verwendet werden. Sie ermöglichen die Erprobung der Bestandteile des Dienstes und sind wichtiges Kommunikationsmittel. Mittels qualitativer Analysen und der Untersuchung der Dynamik auf verschiedenen Zeitskalen wird die Interaktion des Sedimentes mit weiteren Systemkomponenten von der Hydrologie bis zur Biologie abgedeckt.

Die angestrebten Produkte werden aufgrund der mehrfach pro Jahr, quasi synoptisch für große Teile des Gebietes erfolgenden Abbildung des Systemzustands die Analysemöglichkeiten hinsichtlich der Systemdynamik um eine Größenordnung hin zur Ermittlung saisonaler Trends verbessern, was wiederum erhebliche Verbesserungen im Zusammenhang der Aufgaben der Projektpartner erwarten lässt. Hierfür ist es notwendig, dass die Produkte in einer automatisierten und datengetriebenen Prozessierung bei den Antragstellern zur Verfügung stehen und den assoziierten Partnern sowie der Öffentlichkeit bereitgestellt werden.

Der für die vorgenannten Aufgaben zu erfassende sedimentologische Systemzustand ist letztlich nicht von den dauerhaft unter Wasser befindlichen Bereichen zu trennen, so dass eine konsistente Verschneidung mit zumeist hydroakustisch erhobenen Datensätzen erfolgte. Ein solcher Zusammenhang wurde bisher noch nicht hergestellt.

Seegraswiesen sind ein charakteristisches, großräumiges Habitat des Weltnaturerbes. Seegräser erfüllen Zeigerfunktionen für die Wasserqualität sowie Sedimentstabilität und bilden einen Lebensraum für Jungfische und benthische Arten. Stabile Sedimentverhältnisse, das heißt weder zu starke Erosion noch Akkumulation, sind eine Voraussetzung für die Ansiedlung dieser weltweit rückläufigen, aber sich in Teilräumen des Wattenmeeres wieder etablierenden Pflanze. Nicht zuletzt wird das Monitoring des Seegrases mittels Copernicus-Satelliten durch Sedimentsignale beeinflusst und umgekehrt das Monitoring der Sedimente durch die Seegrasbedeckung. Ein fernerkundlich basierter Seegrasdienst befindet sich zurzeit bei den Projektbeteiligten im Aufbau und ist derzeit im Übergang in die operationelle Anwendung, sodass die Rückkopplung beider Monitoringprodukte optimal im Projekt berücksichtigt wird.

1.2 Untersuchungsgebiete

Aufgrund des länderübergreifenden Forschungsvorhabens soll das Fachwissen aus Niedersachsen und Schleswig-Holstein gebündelt und hinsichtlich der Gesamtziele des Vorhabens eingebracht werden. Daher wurde jeweils ein Untersuchungsgebiet je Bundesland ausgewählt (Abb. 2).

In Schleswig-Holstein wurde als Untersuchungsgebiet das Tidebecken Sylt-Amrum-Föhr gewählt. Dieses Gebiet liegt an der Nordseeküste und ist geprägt von einer eher sandigen Sedimentzusammensetzung des Gewässerbodens im Bereich des Eulitorals und Sublitorals. Im Bereich des Vorstrandes sind auch teilweise höhere Mengen schluffigeren Materials vorzufinden. An den tiefsten Stellen der großen Rinnen sind auch kiesige Sedimente detektiert worden. Im Vergleich zu anderen Tidebecken entlang des Wattenmeers weist das nördlichste deutsche Tidebecken großflächige Vorkommen von Seegras auf.

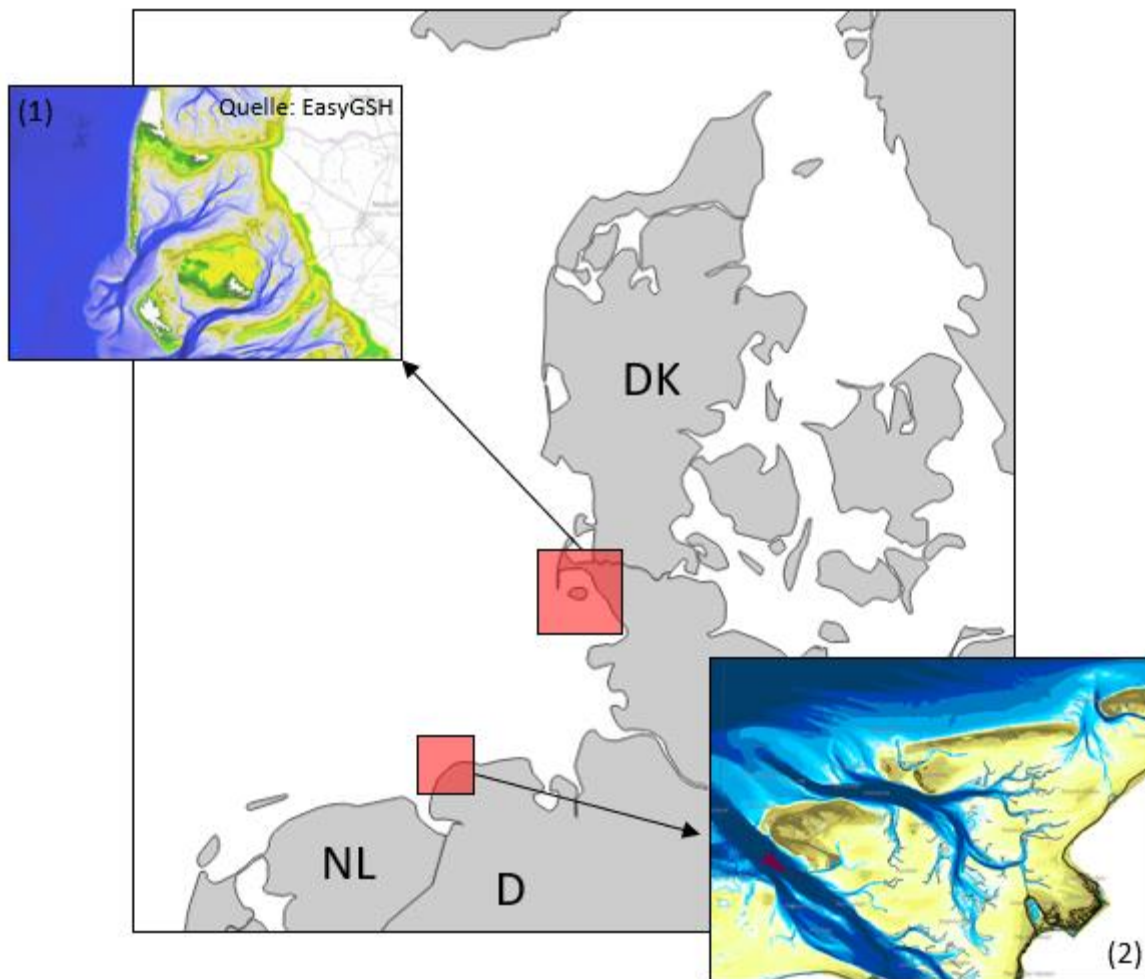


Abb. 2: Lokation der im Forschungsprojekt gewählten Wattgebiete: (1) Sylt-Amrum-Föhr in Schleswig-Holstein und (2) Osterems in Niedersachsen.

In Niedersachsen wurde die Osterems als Untersuchungsgebiet gewählt. Das Gebiet befindet sich im westlichen Bereich des niedersächsischen Wattenmeeres im Mündungsbereich des Ems-Ästuars. Die Osterems ist durch eine Wattwasserscheide von der Außenems (tiefe Rinne des Ems-Ästuars) getrennt. Zahlreiche anthropogene Eingriffe wie beispielsweise der Bau der Leybucht-Vordeichung führten zu morphologischen Veränderungen (Meyer, 2013). Ebenfalls kam es im Verlauf der letzten Jahrzehnte zu einem deutlichen Anwachsen der Wattwasserscheide im südwestlichen Bereich. Zudem ist der südliche Bereich, insbesondere westlich der Leybucht und in der Leybucht selber, geprägt von Schluff-Ablagerungen. Auf dem nördlichen Bereich der Wattwasserscheide auf dem Randzel befindet sich eine ausgeprägte Seegraswiese sowie zahlreiche Muschelbänke. Letztere sind ebenfalls teilweise im östlichen Bereich an den Ausläufern der Priele zu finden.

1.3 Aufbau des Dokumentes

Dieses Dokument gliedert sich in sechs Hauptkapitel. Die ersten vier Kapitel beschreiben die Hauptarbeiten der Projektpartner und beinhalten die fachliche Bearbeitung von Fernerkundungsdaten im Eulitoral (Kapitel 2) und der Wasseroberfläche (Kapitel 3). Zur Erstellung einer vollumfänglichen Sedimentkarte wird in Kapitel 4 die niedersächsische und schleswig-holsteinische Methodik vorgestellt und bereits vorhandene Datensätze präsentiert, auf die im Projekt zurückgegriffen wird. Um die Sedimentklassifizierungen unter anderem in der numerischen Modellierung oder auch in Planungsprozessen zu nutzen ist eine Darstellung auf Basis von Korngrößen erforderlich. Die hier durchgeführte Methode wird in Kapitel 5 vorgestellt. Kapitel 6 beschreibt die zur Validierung der Fernerkundungsdaten erstellten numerischen Modelle beider Untersuchungsgebiete. Das Schlusskapitel 7 zeigt mögliche Anwendungsszenarien hinsichtlich der Verwendung der erstellten Produkte.

2 Kartierung des Eulitorals mit optischen Fernerkundungsdaten

Dieses Kapitel beschreibt die Produkte aus der optischen Fernerkundung, die für das Eulitoral entwickelt wurden. Hierbei handelt es sich zum einen um die Sedimentverteilung und Habitat-Zuweisung des Eulitorals (Abschnitt 2.1) und zum anderen um Produkte, aus denen Informationen zur Morphologie und deren Veränderung abgeleitet werden können (Abschnitt 2.2).

2.1 Sedimentverteilung Eulitoral

Ein wesentlicher Baustein im WASCO-Projekt ist die Erfassung der Sedimentverteilung sowie von Habitaten des Eulitorals. Die verwendeten Daten (Satellit und Gelände) und die eingesetzten Verfahren werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.1.1 Datengrundlage

Die Auswahl der Satellitensensoren für das Eulitoral hängt von der Fragestellung ab bzw. es gibt Vor- und Nachteile der Sensoren für bestimmte Fragestellungen. In der Regel werden optische, multispektrale Sensoren mit mittlerer räumlicher Auflösung verwendet. Die am besten geeigneten (frei verfügbaren) Satellitensensoren sind die OLI-Sensoren (Operational Land Imager) auf Landsat-8 und Landsat-9 sowie der MSI-Sensor (Multispectral Imager) auf der Sentinel-2 Serie. Sentinel-2 MSI hat dabei mit 10m eine höhere räumliche Auflösung als Landsat, was insbesondere für die Erfassung von Seegras und Muschelbänken von Vorteil ist. Für die Bearbeitung des Eulitorals ist es wichtig, dass der Sensor die spektralen Kanäle des mittleren Infrarots (SWIR, Short-Wave Infrared) besitzt, da diese für die Korrektur der Wasserbedeckung verwendet werden. Dies ist insbesondere für die Klassifizierung des Sedimentes ausschlaggebend. Zusätzlich zu diesen beiden Sensortypen wurden auch Daten der kommerziellen Sensoren der Planet-Reihe für die Erfassung dünnbestandener Seegraswiesen verwendet.

Tabelle 1 enthält eine Zusammenfassung der hier verwendeten Satellitensensoren und ihrer technischen Eigenschaften.

Tabelle 1: Verwendete Satellitensensoren und ihre Eigenschaften. VIS: Visible Radiation, nIR: Near-Infrared, SWIR: Short-Wave Infrared.

	Landsat-8/9	Sentinel-2	Planet PS2 / Planet SD
Räumliche Auflösung	30 m	10 (-20) m	3-5 m
Zeitliche Auflösung	alle 8-16 Tage	alle 3-5 Tage	täglich
Spektrale Auflösung	7 Bänder (VIS, nIR, SWIR) + 2 Thermalbänder	12 Bänder (VIS, redEdge, nIR, SWIR)	PS2: 4 Bänder (VIS, nIR) SD: 8 Bänder (VIS, redEdge, nIR)
Verfügbarkeit	seit 2013 (L-8) seit 2021 (L-9)	2015 – 2025 (S-2A) seit 2017 (S-2B) seit 2024 (S-2C)	2019 – 2022 (PS2) seit 2020 (SD)

Neben den Fernerkundungsdaten werden Monitoringdaten der Nationalparkverwaltungen und der Landesbehörden verwendet, um die Validierung der Klassifizierungsergebnisse vorzunehmen (Tabelle 2 und Tabelle 3). Diese liegen für verschiedene Jahre für Seegras, Muschelbänke und Makrophyten vor. Referenzdaten für Sedimentklassen liegen aus gezielten Kartierungen vor, die sowohl in Niedersachsen als auch in Schleswig-Holstein von verschiedenen Institutionen erhoben wurden. Die in-situ-Daten decken größere Bereiche ab als die WASCO-Gebiete. Um genügend Daten für die Validierung zu erhalten, war es notwendig, auch diese Flächen außerhalb der WASCO-Gebiete in die Validierung einzubeziehen.

Tabelle 2: Übersicht verwendeter Sedimentproben.

Projekt/Monitoring	Institution	Region	Erhebungsjahr	Anzahl Proben
WASCO Erhebung	FTZ-CAU	Schleswig-Holstein Langeneß, Büsum, Föhr	2024	22
Sed NLWKN	NLWKN-FSK	Niedersachsen	2023, 2024	41
Zukunft Eider	BAW	Schleswig-Holstein Eider	2021	24
Wattkartierungen	LKN.SH Nationalparkverwaltung	Schleswig-Holstein	2020, 2021, 2022, 2023	158
Makrozoobenthos-monitoring	LfU Schleswig-Holstein	Schleswig-Holstein Büsum, Dagebüll, Nordstrand, Trischendamm	2019, 2020, 2021, 2023	16

Tabelle 3: Übersicht verwendeter Monitoringdaten aus Muschel- und Seegraskartierungen.

Projekt/Monitoring	Institution	Region	Erhebungsjahr
Muschelmonitoring	LKN.SH	Schleswig-Holstein	2024
Muschelmonitoring	NLPV	Niedersachsen	1997, 2002, 2009, 2019, 2022
SediEms	NLPV, NLWKN, CAU	Borkum	2019 – 2024
Seegrasmonitoring	AWI / LfU	Schleswig-Holstein	2015, 2021
Seegrasmonitoring	NLPV / NLWKN	Niedersachsen	2019, 2025

2.1.2 Klassifikationsverfahren

Die optische Fernerkundung basiert auf dem Prinzip, dass verschiedene Oberflächen charakteristische Reflektionseigenschaften aufweisen, welche von Sensoren auf Satelliten erfasst und gemessen werden können. Dabei wird die Energie des reflektierten Sonnenlichts am Sensor in verschiedenen Spektralkanälen gemessen.

Sowohl die Klassifizierung der Sedimente als auch die der Seegraswiesen und Muschelbänke erfolgt auf der Basis einer spektralen Entmischung sowie verschiedener spektraler Indizes, die in einem wissensbasierten Entscheidungsbaum kombiniert werden. Somit kann jedes Pixel im Bild einer bestimmten Klasse zugeordnet werden.



Abb. 3: Ausschnitt des schleswig-holsteinischen Testgebiets vom 08.03.2022. Links: RGB-Echtfarbdarstellung, Rechts: Sedimentindikator (hell: hoher Schlickanteil).

Beim Sediment kann man so zwischen Sand-, Misch- und Schlickwatt unterscheiden, da sich diese durch Helligkeit und Farbe leicht voneinander unterscheiden (Abb. 3). Zu beachten ist hierbei der variierende Wasserstand bzw. Verbleib von Restwasserflächen auf den Sedimenten, da Wasser einen großen Einfluss auf das spektrale Verhalten der Sedimentflächen hat und dieser Effekt korrigiert werden muss. Dies erfolgt durch die Anwendung einer linearen spektralen Entmischung. Hierbei wird das gemessene Signal der Oberflächen in seine spektralen Bestandteile zerlegt. Im Fall von Sediment sind dies (1) trockener heller Sand, (2) wasserbedeckter heller Sand und (3) Schlick (Abb. 4). Dies spiegelt die Mischung aus hellem und dunklem Sediment mit unterschiedlichen Wasserauflagen wider und deckt eine weite Spanne an tatsächlichen Begebenheiten im Wattenmeer ab. Wenn verfügbar, wird die Sedimenteinteilung aus einer Kombination verschiedener Aufnahmen bestimmt. Dies soll den kurzfristigen Effekt von Wetterlagen möglichst geringhalten.

Neben den Sedimentflächen werden auch Muschelbänke und Seegraswiesen bzw. Makroalgen erfasst. Für die Einteilung der Makrophyten dient der Vegetationsindex und für die Erkennung der Muscheln wurde ein spektraler Muschelindex entwickelt. Diese können bei Bedarf in verschiedene Dichteklassen aufgespalten werden. Für vegetationsbestandene Flächen können keine Sedimentangaben abgeleitet werden, da das Vegetationssignal das Sedimentsignal überlagert.

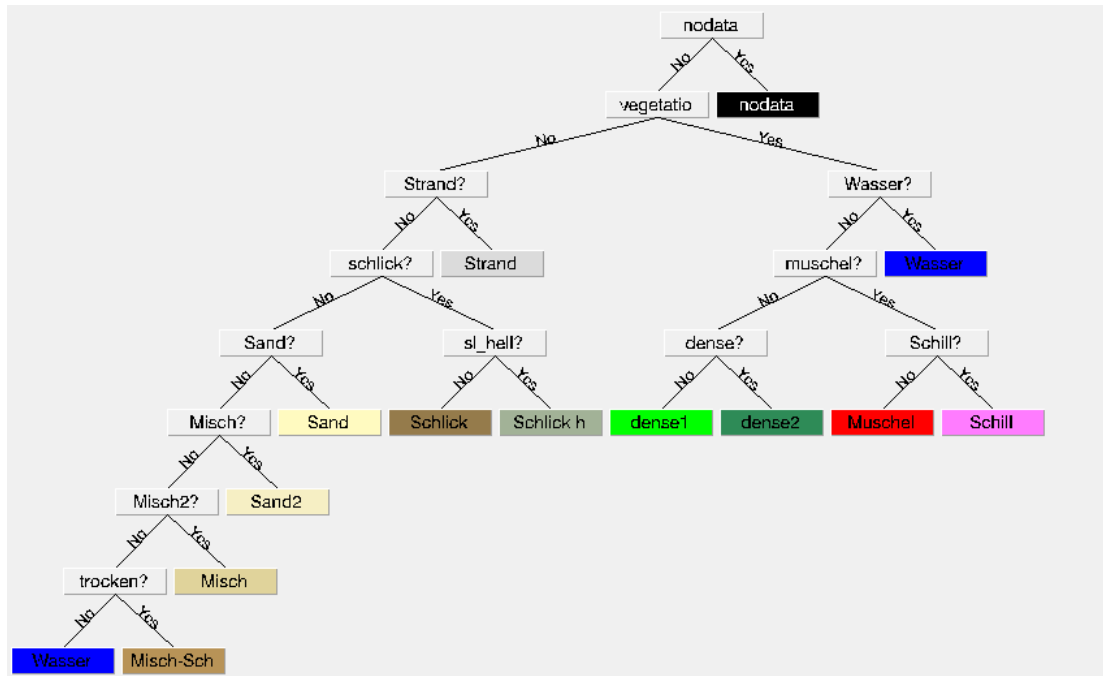


Abb. 4: Wissensbasierter Entscheidungsbaum für die Sedimentklassifizierung.

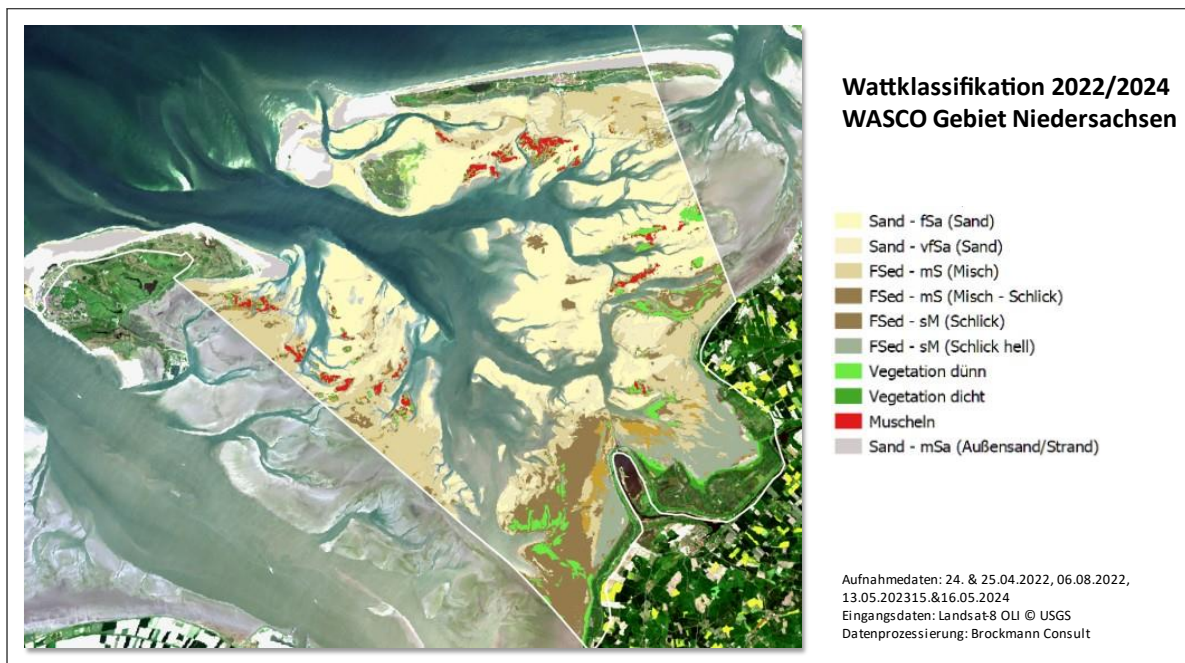


Abb. 5: Einteilung der Wattoberflächen in optische Sediment- und Habitatklassen für das niedersächsische Untersuchungsgebiet.

2.1.3 Zuordnung der Korngrößenverteilung zu den optischen Sedimentklassen

Die Klassifizierung der optischen Satellitendaten liefert visuell unterscheidbare Oberflächen. Die Übersetzung dieser optischen Klassen in Einteilungen der Sedimente nach Bezeichnungen in Abhängigkeit der Korngröße wurde in dem Projekt Synthese Nordsee (Stelzer & Trampe, 2022) entwickelt. Hierfür wurden die optischen Klassen mit Korngrößenverteilungen aus Sedimentproben verglichen und entsprechende Zusammenhänge abgeleitet, wobei die Sedimentklassen im Eulitoral weniger differenzierbar sind als durch die Hydroakustik im Sublitoral. Tabelle 4 listet die entsprechenden Zuordnungen für das Eulitoral auf, wobei die Klassen aus dem Synthese Nordsee-Projekt unter der Spalte SedCode zu finden sind. Im Rahmen des WASCO-Projektes wurden weitere harmonisierende Schritte durchgeführt, um die Eingangsdaten aus verschiedenen Quellen anzupassen. Hierbei wurden die Sedimentklassen zu zwei Klassen zusammengefasst: Feinsand und Feinsediment. So wurden die Sedimente mit einem Feinanteil <10 % zu Feinsand und die Sedimente mit einem Feinanteil >10 % zu Feinsedimenten zusammengefasst. Dieser Schritt wurde durchgeführt, da im Vergleich mit Siebproben die Zuordnung konkreter Korngrößenverteilungen für diese Einteilung die besten Ergebnisse erbracht hat. Weitere Informationen hierzu finden sich in Abschnitt 5.2.

Tabelle 4: Zuordnung einer Sedimentkodierung (SedCode) zu den verschiedenen optischen Klassen der Satellitenklassifizierung und Übersetzung in den WASCO-Code.

Beschreibende Sedimentklasse Satellit	SedCode	WASCO-Code
Sand	Feinsand - fSa	Feinsand
Sand 2	sehr feiner Sand - vfSa	
Misch	schlickiger Sand - mS	Feinsediment
Misch-Schlick	sandiger Schlick - sM	
Schlick	Schlick - M	
Schlick hell	Schlick - M	

Die beiden Karten in Abb. 6 zeigen, wie sich die Übersetzung von dem SedCode in den WASCO-Code in der Fläche für das niedersächsische Untersuchungsgebiet auswirkt. So fallen die küstennahen Bereiche der Rückseitenwatten von Juist und Borkum insbesondere entlang der Wattwasserscheiden in die Kategorie Feinsedimente.

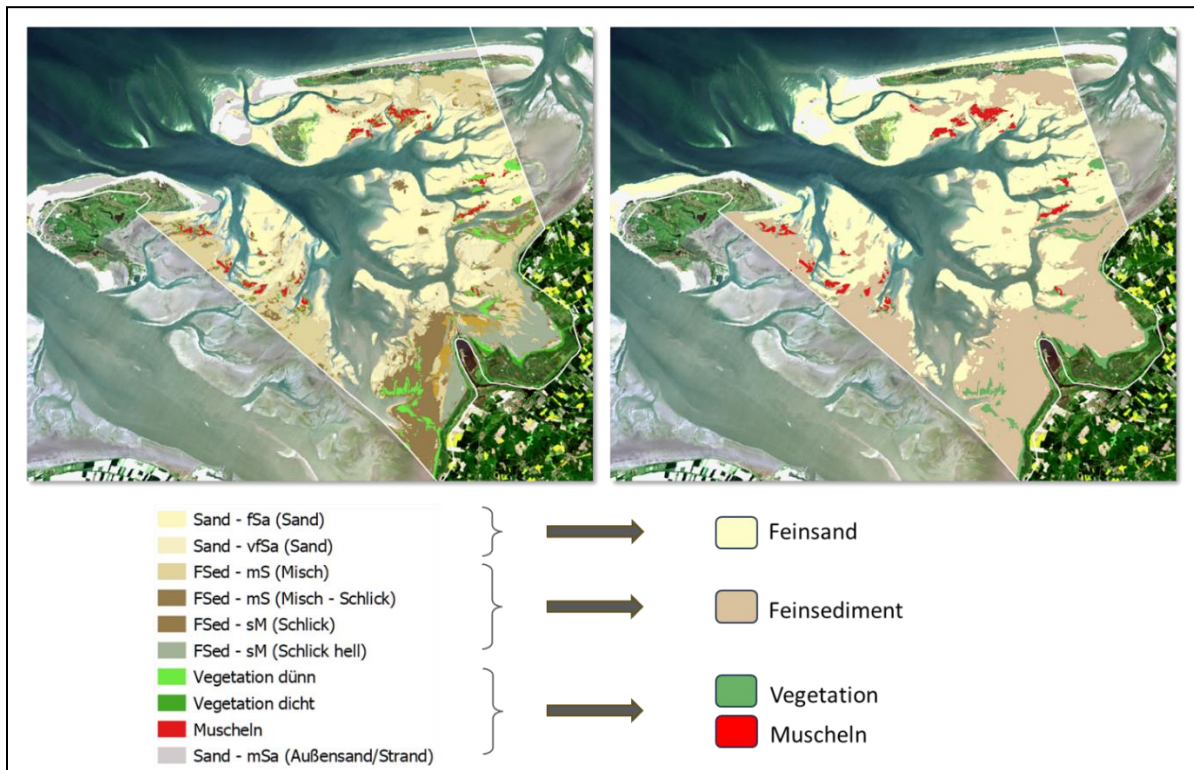


Abb. 6: Übersetzung der optischen Sediment- und Habitatklassen in Sedimenteinteilung in den WASCO-Code. Links: Darstellung gemäß Synthese Nordsee-Projekt, Rechts: Darstellung nach WASCO.

Somit ergibt sich für die beiden Untersuchungsgebiete Niedersachsen und Schleswig-Holstein, basierend auf Satellitendaten aus den Jahren 2020 – 2022, eine Sedimentverteilung, wie sie in Abb. 7 dargestellt ist. Eingangsdaten stammen aus den Frühjahrsmonaten, sodass keine Seegrasflächen ausgewiesen sind.

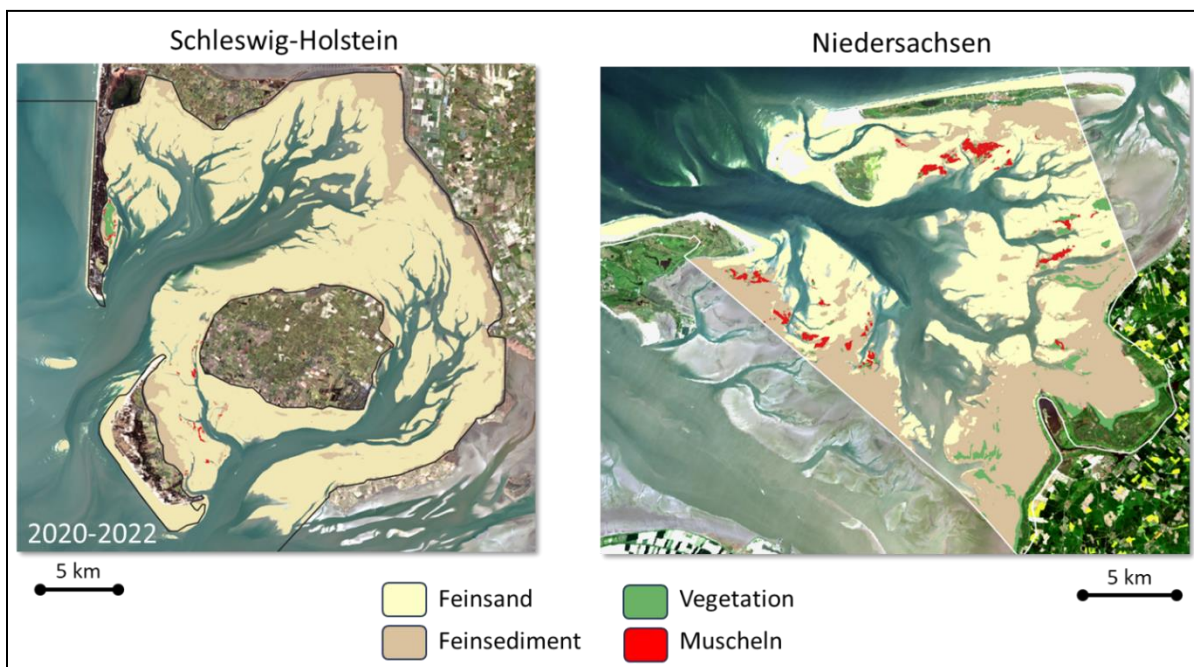


Abb. 7: Sedimentverteilung (WASCO-Code) im schleswig-holsteinischen (links) und niedersächsischen (rechts) Untersuchungsgebiet.

2.1.4 Validierung der Sedimentklassifikation

Bei der Verifizierung der Klassifizierung der Wattsedimente und des Bewuchses wird jede Klassifizierung auf Plausibilität geprüft. Dies erfolgt durch eine visuelle Einschätzung der groben Verteilung der Sedimentklassen und eine Einteilung von Muschelbänken und Makrophyten. Hierbei wird auf bekannte Verteilungsmuster geachtet (wie zum Beispiel ein höherer Schlickanteil nahe des Festlandes und in Lahnungsfeldern) sowie ein Abgleich mit den originalen Bilddaten durchgeführt.

Für den WASCO-Ausschnitt Schleswig-Holstein sind die erwarteten Tendenzen von feinerem Sediment nahe des Festlandes und in den Rückseitenwatten der Inseln zu erkennen (Abb. 7). Die übrigen Bereiche zeichnen sich durch großräumige Feinsandflächen aus. Für Niedersachsen sind große Feinsedimentflächen in der Leybucht und in den südlich anschließenden Wattgebieten zu verzeichnen. Ebenso große Flächen von Feinsediment liegen im Borkumer Rückseitenwatt. Diese sind in den optischen Differenzierungen eher dem Mischwatt zuzuschreiben (WASCO-Code: FSed, SedCode aus Synthese Nordsee-Projekt: mS). Das niedersächsische WASCO-Gebiet weist eine hohe Anzahl an ausgedehnten Muschelbänken auf, während Muschelbänke im schleswig-holsteinischen Gebiet vor allem im Wattgebiet zwischen Amrum und Föhr vorkommen.

In einem weiteren Schritt im Validierungsprozess werden die Sedimentklassen mit den Sedimentinformationen aus Geländedaten verglichen. Sofern Korngrößenanalysen vorliegen wird eine Gegenüberstellung der Sedimentproben mit den Klassifizierungen der Satellitendaten über eine Konfusionsmatrix (Abb. 8) durchgeführt. Die Zahlen in der Diagonalen der Konfusionsmatrix stehen für gleiche Sedimentklassen in beiden Verfahren. Während das Feinsediment gut mit den Sedimentproben übereinstimmt (264 richtig zu 19 falsch klassifizierten Sedimentproben), werden die Stationen mit Feinsand zu 50 % als Feinsediment klassifiziert. Dies deutet darauf hin, dass die Klassifizierung das Sediment im Vergleich zu den Sedimentproben als zu schlickig einstuft. In nachfolgenden Arbeiten zu WASCO werden diesbezüglich weitere Untersuchungen stattfinden, die zum Teil auf niederländischen Sedimenterhebungen basieren. Eine sehr umfangreiche Datengrundlage von Sedimentproben stellt der SIBES-Datensatz (Synoptic Intertidal Benthic Survey) des Royal Netherlands Institute for Sea Research (NIOZ) dar (Bijleveld et al., 2024). Es wird erwartet, dass das Verfahren zur Sedimentklassifizierung durch diese Untersuchung weiter verbessert werden kann.

		2020 - 2022 WASCO SH und NDS				
		Klassifikation Satellit				
% Feinanteil < 63µ		fSa (Feinsand)	fSed (Feinsediment)	Σ		
	<10	63	63	126	50%	
	10-50	19	264	283	93%	
	Σ	82	327	409		
		77%	81%		80%	

Abb. 8: Gegenüberstellung von Sedimentklassen (WASCO-Code) aus den Satellitendaten mit dem Feinanteil aus den Sedimentproben in einer Konfusionsmatrix.

Eine Überlagerung der Korngrößenzusammensetzung mit der Sedimentklassifizierung gibt einen weiteren Eindruck über die Zusammenhänge beider Erfassungsmethoden. In Abb. 9 ist die Korngrößenzusammensetzung in Tortendiagrammen über die Sedimentklassen der Satellitenaufnahme gelegt (WASCO-Gebiet Niedersachsen). Die Proben fallen im WASCO-Gebiet ausschließlich in Bereiche mit Feinsediment und weisen alle einen Korngrößenanteil $<63\mu\text{m}$ von über 10 % auf. Hier gibt es also eine gute Übereinstimmung, allerdings kann die Gegenprobe nicht gezeigt werden, da es keine Sedimentproben in Feinsandbereichen gibt. In Schleswig-Holstein (Abb. 10) decken die Sedimentproben auch Feinsandbereiche ab, was sowohl in der Klassifizierung als auch den Sedimentproben wiedergespiegelt wird.

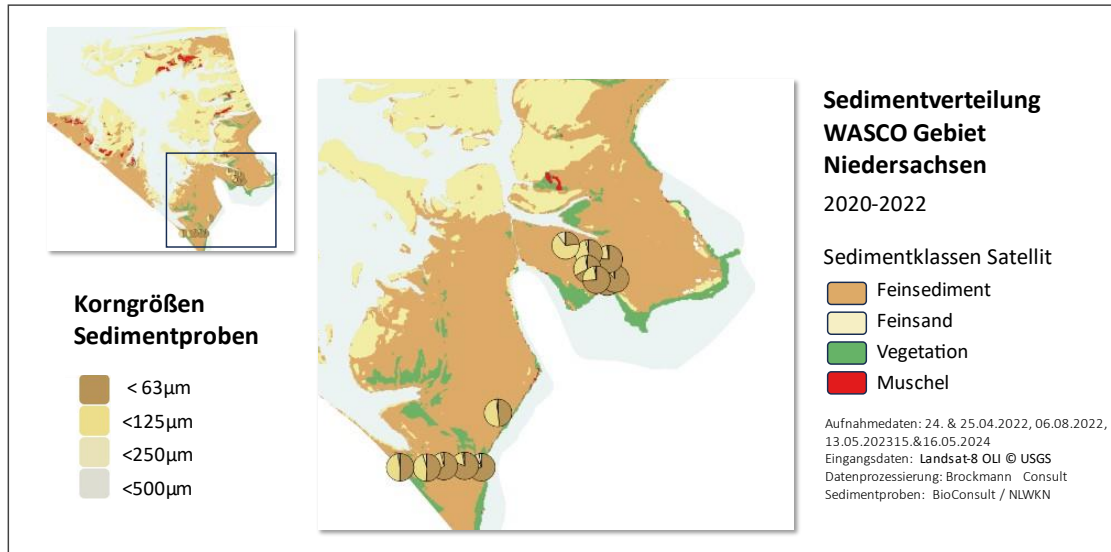


Abb. 9: Überlagerung der Sedimentklassen (WASCO-Code) der Klassifizierung mit der Korngrößenverteilung im niedersächsischen Untersuchungsgebiet.

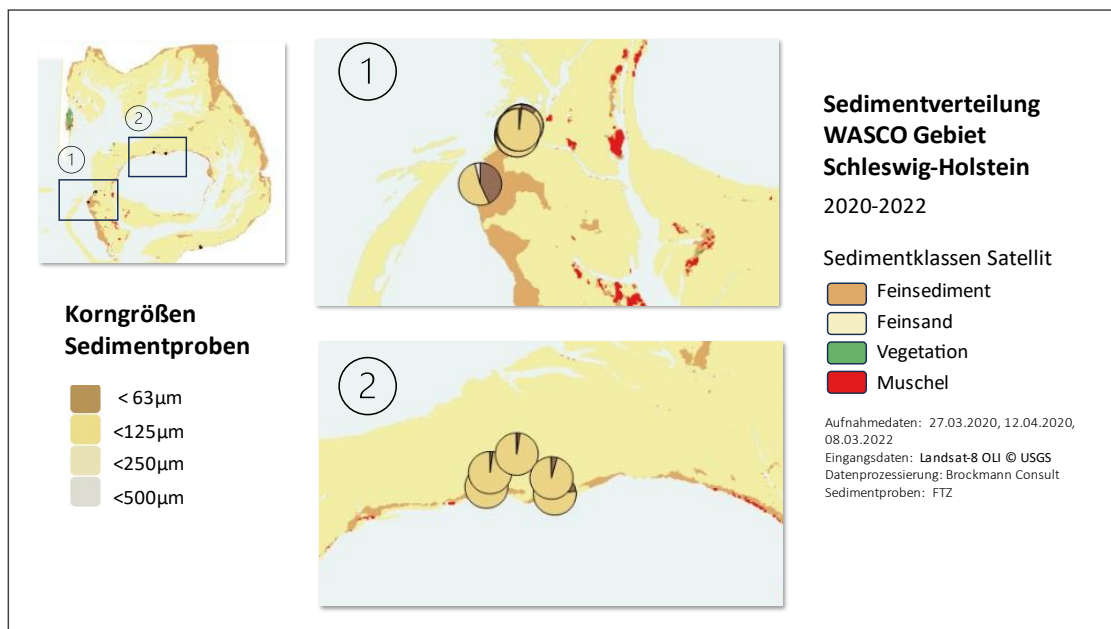


Abb. 10: Überlagerung der Sedimentklassen (WASCO-Code) der Klassifizierung mit der Korngrößenverteilung im schleswig-holsteinischen Untersuchungsgebiet.

2.2 Erfassung morphologischer Änderungen im Eulitoral

2.2.1 Verfahren zur Erstellung des Wattflächenindex

Die Berechnung des Wattflächenindex nutzt alle wolkenfreien Sentinel-2-Aufnahmen verschiedener Wasserstände, um eine Zusammenfassung der Verteilung der Wattflächen durchzuführen. Es wird eine Differenzierung von Wasser- und Wattflächen über einen spektralen Index durchgeführt und somit für jede Aufnahme die trockengefallenen Wattflächen identifiziert. Flächen, die länger trockenfallen und somit häufiger im trockenen Zustand vom Satelliten erfasst werden, erhalten eine höhere Kennzahl als Flächen, die kürzer trockenfallen und somit häufiger als Wasser erfasst werden. Für jedes Pixel werden die Tage gezählt, an denen während der Aufnahmen trockengefallenes Sediment erfasst wurde. Für eine Normierung werden diese durch die Anzahl aller gültigen Aufnahmen geteilt. Dieser Trockenfallindex wird sowohl für den gesamten Zeitraum als auch für jedes Jahr ermittelt. Die Berechnung des Wattflächenindex erfolgt mit einer räumlichen Auflösung von 20m. Abb. 11 zeigt den Wattflächen- oder Trockenfallindex für das niedersächsische und schleswig-holsteinische Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 2016 - 2025.

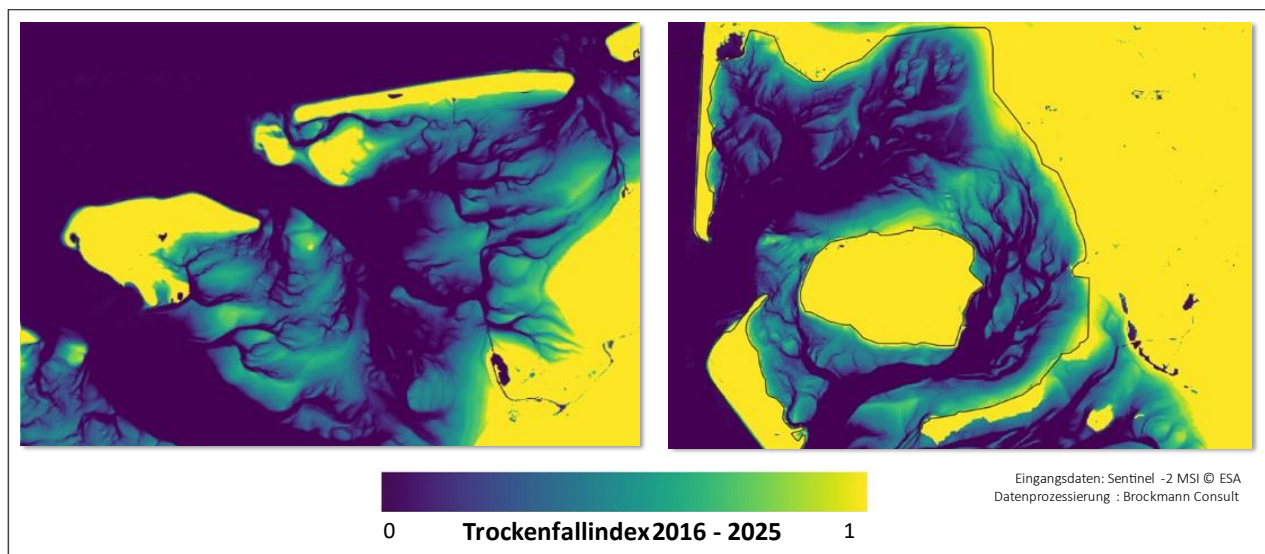


Abb. 11: Wattflächenindex für das niedersächsische (links) und das schleswig-holsteinische Untersuchungsgebiet (rechts) für den Zeitraum 2016 – 2025.

2.2.2 Vergleich mit TrilaWatt (Karte und Transekt)

Auch wenn der Wattflächenindex bisher nicht mit der eigentlichen Tiefe verknüpft wird, kann er mit der Bathymetrie verglichen werden, um die Aussagekraft des Wattflächenindex zu unterstreichen. Wenn die Varianz der Wasserstände, welche in den Wattflächenindex eingegangen sind, eine gute Verteilung aufweisen, so besteht ein guter Zusammenhang zur Bathymetrie, wie in Abb. 12 gezeigt wird. Hier ist entlang eines Transektes die Tiefe aus der Bathymetrie der TrilaWatt-Daten von 2020 (Digitaler hydromorphologischer Zwillings des trilateralen Wattenmeers, orange) im Vergleich mit dem Wattflächenindex (blau), generiert aus den Jahren 2016 - 2025, dargestellt. Das Transekt verläuft im Rückseitenwatt von Juist (weiße Linie in der integrierten Übersichtskarte).

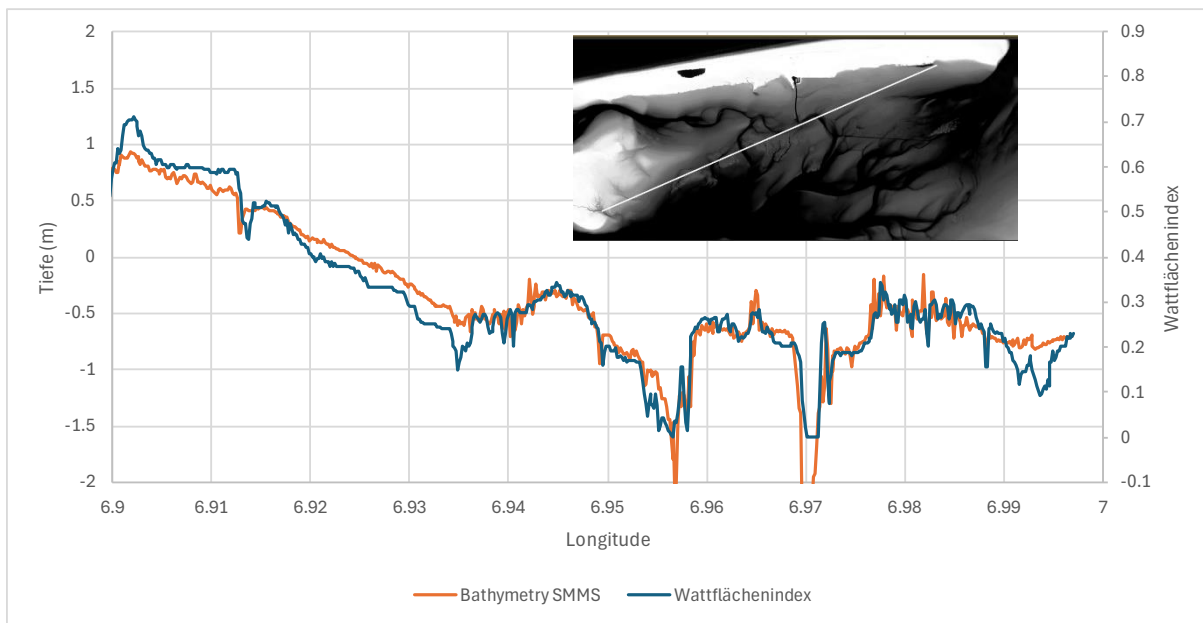


Abb. 12: Vergleich des Wattflächenindex (blau) mit der Bathymetrie aus den TrilaWatt-Daten (orange) (Lepper et al., 2025).

3 Bestimmung der Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule

3.1 Datengrundlage

Die Wasserqualitätsprodukte basieren auf Sentinel-2 MSI-Daten und werden in einer Auflösung von 60 m prozessiert. Dabei werden alle Aufnahmezeitpunkte verarbeitet, die eine Wolkenbedeckung <30 % aufweisen. Die Auflösung von 60m wurde als Kompromiss zwischen räumlicher Detailgenauigkeit und vertretbaren Prozessierungszeiten und Datenvolumina gewählt. Bei Fragestellungen, welche eine höhere räumliche Auflösung erfordern, wäre eine detailgenauere Prozessierung ebenfalls möglich.

Zur Validierung der Fernerkundungsprodukte wurden Ergebnisse von in-situ-Messungen vom NLWKN bereitgestellt. Es liegen regelmäßige Beprobungen des Schwebstoffgehaltes (SUSP) im Bereich der Seegatten vor. Zur Validierung wurden speziell die Daten der Messstation Borkum-W2 (Bork_W_2, Abb. 17) genutzt, da diese Station im niedersächsischen Untersuchungsgebiet liegt. Für das Untersuchungsgebiet in Schleswig-Holstein lagen keine Daten zur Validierung der Schwebstoffkonzentrationen aus Fernerkundungsdaten vor.

3.2 Verfahren zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentration

Um aus den am Sensor gemessenen Energiewerten Wasserinhaltsstoffe ableiten zu können, sind verschiedene Prozessierungsschritte notwendig. Die entsprechende Prozessierungskette kombiniert verschiedene Algorithmen zur Atmosphärenkorrektur und Berechnung der Trübung und Schwebstoffkonzentration. Die Abfolge der Prozessierungsschritte ist in Abb. 13 dargestellt. Es wird eine Kombination von Algorithmen angewendet, um die unterschiedlichen Gewässertypen der Küstengewässer gut erfassen zu können. So werden sehr trübe Gewässer mit der Atmosphärenkorrektur ACOLITE bearbeitet, während der C2RCC-Algorithmus für klare Wasserpixel am besten geeignet ist. Im Übergangsbereich findet eine Mittelung beider Algorithmen statt. Die Prozessierungskette wird auch für den Coastal Service des Copernicus Marine Dienstes (CMS) verwendet. Die hier erzeugten Daten weisen allerdings mit 60m eine höhere räumliche Auflösung als die Daten des CMS auf (100m). Die prozessierten Satellitendaten werden in räumlich-zeitlichen Data Cubes organisiert, die einen einfachen Zugriff auf die Daten und die schnelle Analyse der gesamten Zeitserie ermöglichen. Für die Analyse der zeitlichen Entwicklung können zeitliche Aggregate erzeugt werden.

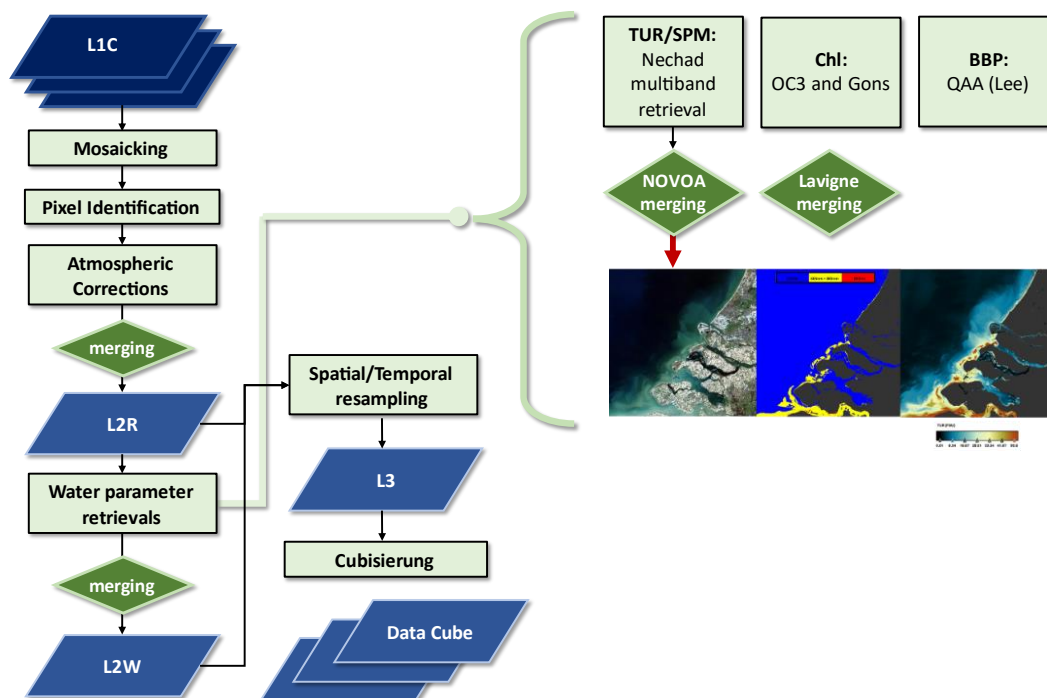


Abb. 13: Flowchart der Prozessierungsschritte von Satellitendaten hin zu Gewässergüteinformationen (Trübung, Schwebstoffkonzentration).

3.3 Ergebnisse

Die Wasserqualitätsprodukte zeigen die Schwebstoffverteilung im Küstengewässer. Abb. 14 zeigt die Verteilung im schleswig-holsteinischen Untersuchungsgebiet während zwei unterschiedlicher Aufnahmesituationen. Während die Aufnahme vom 18.04.2018 (oben) zum Niedrigwasserzeitpunkt aufgenommen wurde, zeigt die Aufnahme vom 31.07.2020 (unten) eine Situation bei Hochwasser. Gut zu erkennen ist dies an den trocken gefallenen Wattflächen, die im oberen Bild ausmaskiert sind und daher keine Werte aufweisen.

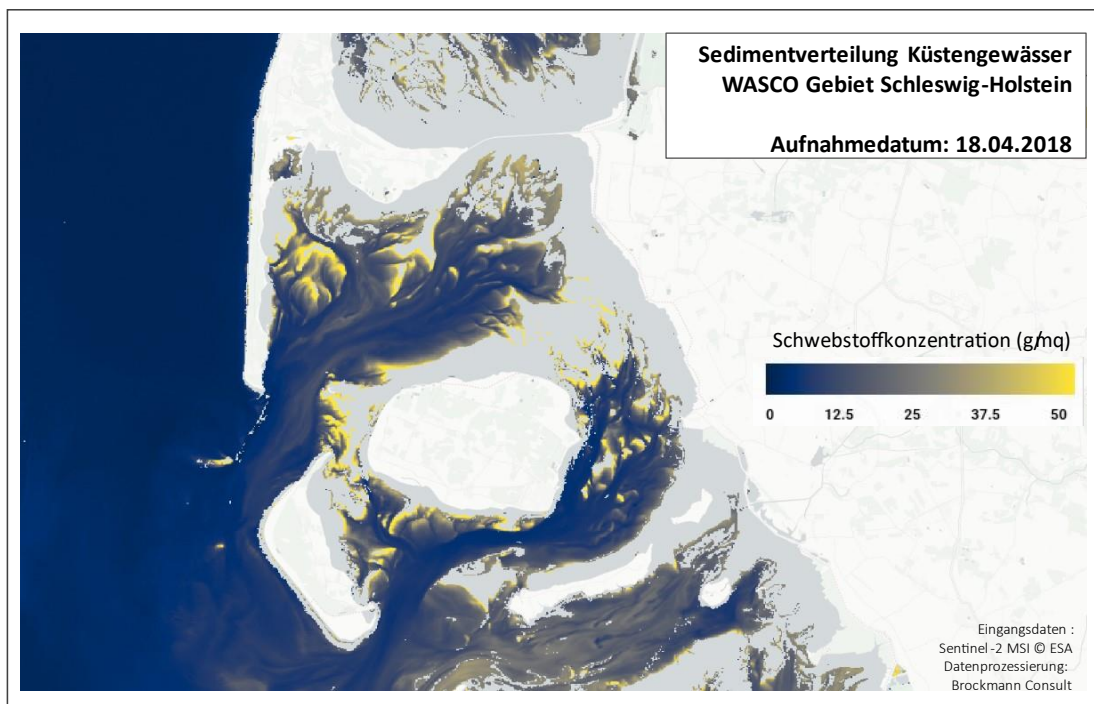
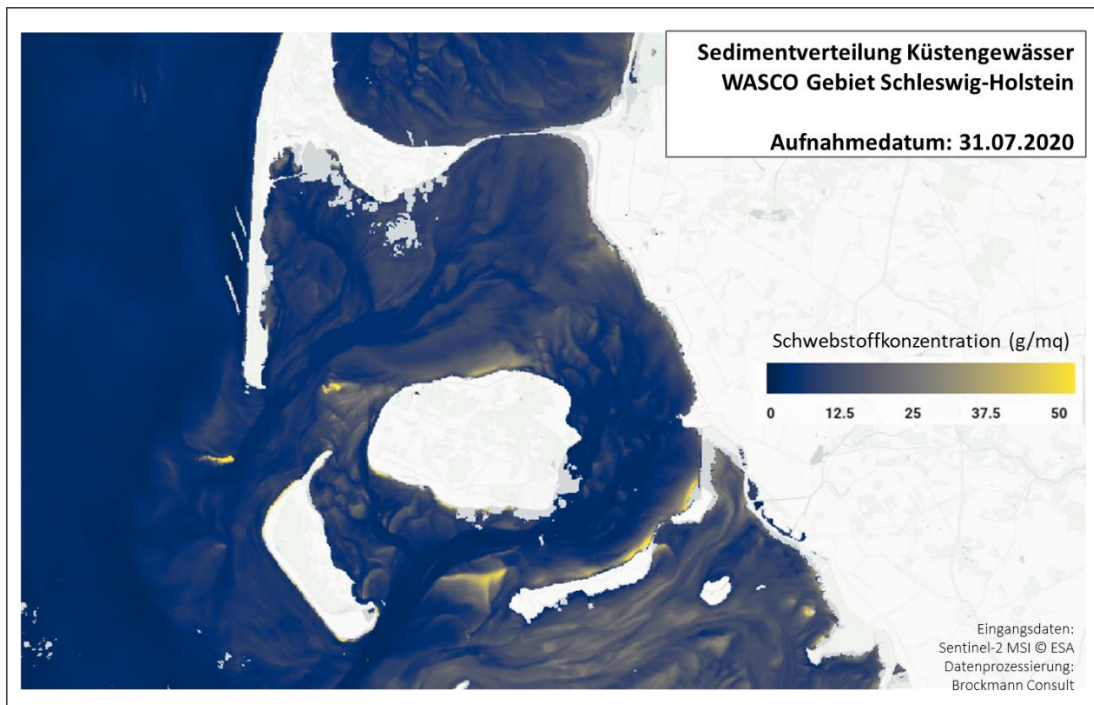


Abb. 14: Sedimentverteilung im Wasser für zwei unterschiedliche Aufnahmetage im schleswig-holsteinischen WASCO- Gebiet. Oben: Niedrigwasser, Unten: Hochwasser.

Abb. 15 zeigt die Schwebstoffverteilung für zwei Aufnahmesituationen im niedersächsischen Untersuchungsgebiet. Die obere Aufnahme zeigt eine Situation zu Hochwasser, welche durch einige Wolken beeinflusst ist. Die entsprechenden Flächen sind ausmaskiert. In der unteren Aufnahme sind wiederum die Wattflächen ausmaskiert, da es sich um eine Niedrigwasseraufnahme handelt.

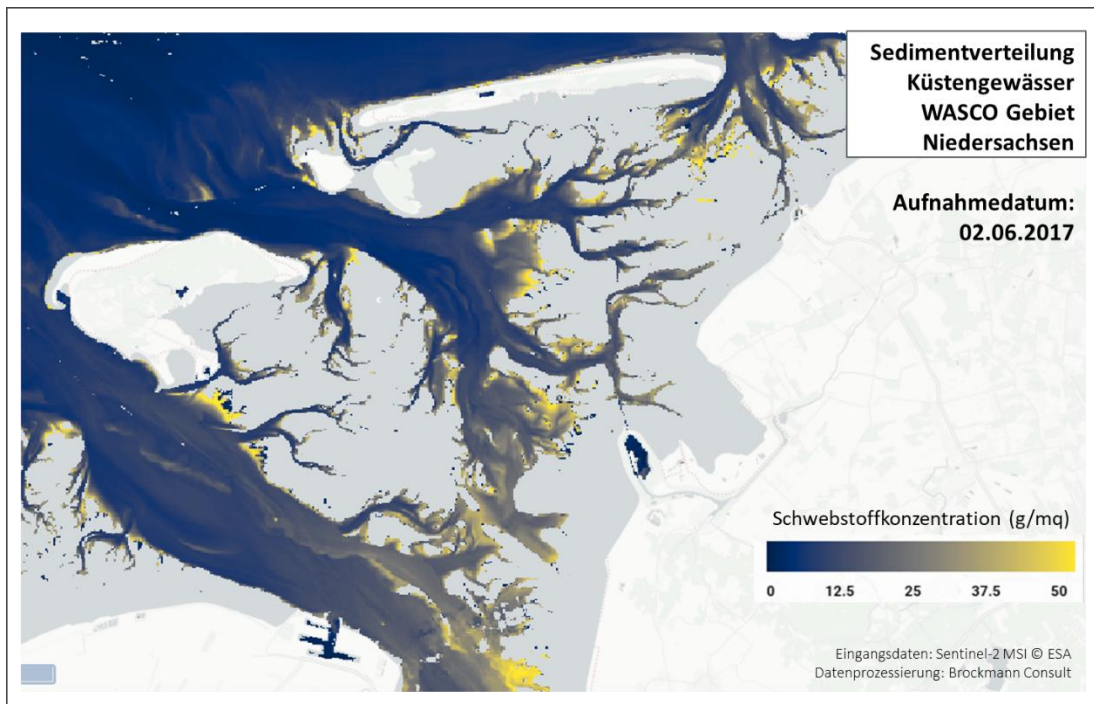
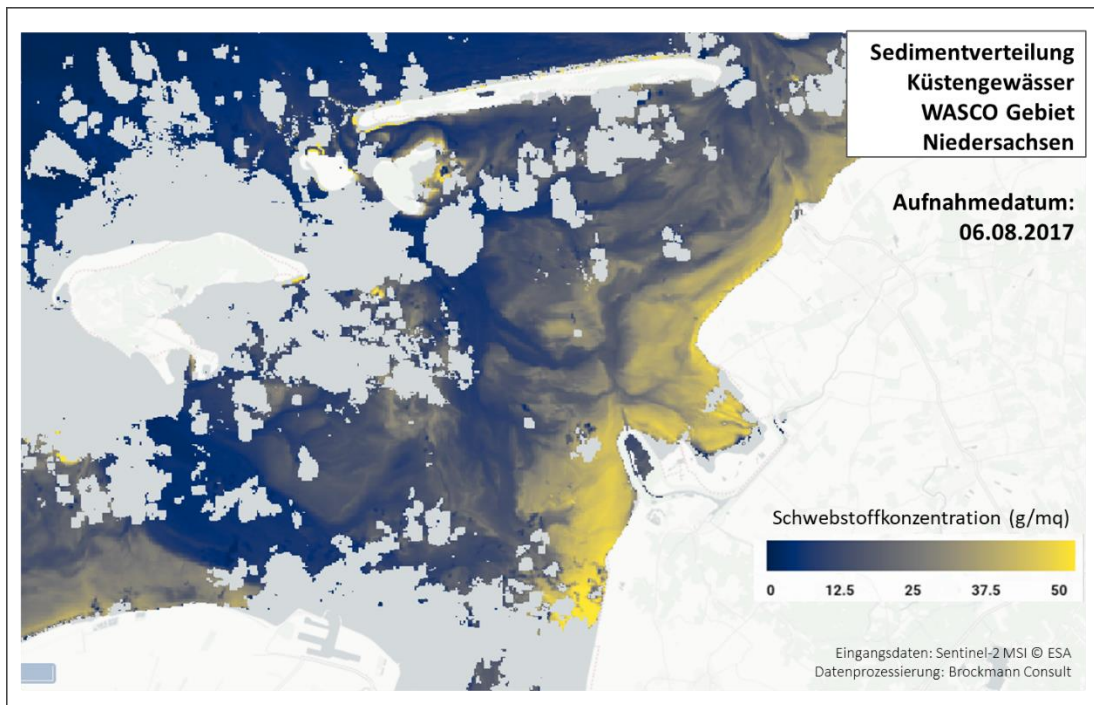


Abb. 15: Sedimentverteilung im Wasser für zwei unterschiedliche Aufnahmetage im niedersächsischen WASCO- Gebiet. Oben: Hochwasser, Unten: Niedrigwasser.

3.4 Validierung der Analysemethodik

Eine Validierung der Wasserqualitätsprodukte ist im Rahmen des CMS durchgeführt und in der Dokumentation des Dienstes beschrieben worden. Exemplarisch sei hier eine Abbildung herausgegriffen, welche eine Match-up-Analyse der Trübung anhand von in-situ-Messungen in verschiedenen europäischen Küstengewässern zeigt. Die verwendeten Messstationen stammen aus verschiedenen europäischen Küstengewässern (Nordsee (NWS), Iberische See (IBI) und dem Mittelmeer (MED)) (Abb. 16).

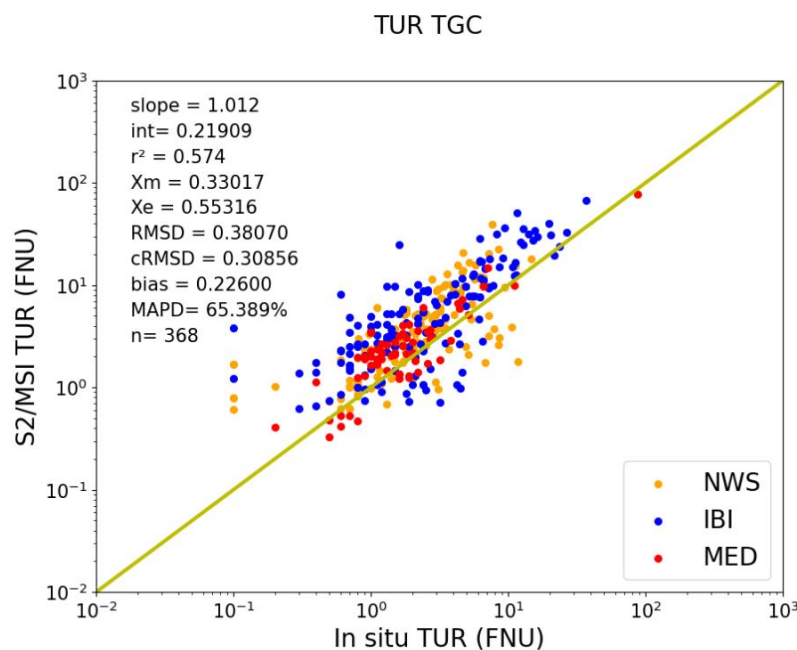


Abb. 16: Validierungsergebnisse der CMS High Resolution-Produkte - Trübung (Van der Zande et al., 2025).

Im Bereich des niedersächsischen Untersuchungsgebietes liegt eine Messstation, an der regelmäßig durch das NLWKN u.a. Schwebstoffdaten erhoben werden. Die Position der Station Borkum-W2 (BORK_W2) ist in Abb. 17 markiert, während Abb. 18 die Zeitreihe der Schwebstoffkonzentration an der Messstation zeigt. In blau sind die Konzentrationen aus den Satellitendaten dargestellt, die Werte der Messstation sind in Rot ausgewiesen. Beide Datensätze zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, besonders unter Berücksichtigung, dass die Messungen häufig nicht am gleichen Tag erfolgt sind und auch die Tidephase zwischen den Messungen sehr unterschiedlich sein kann.

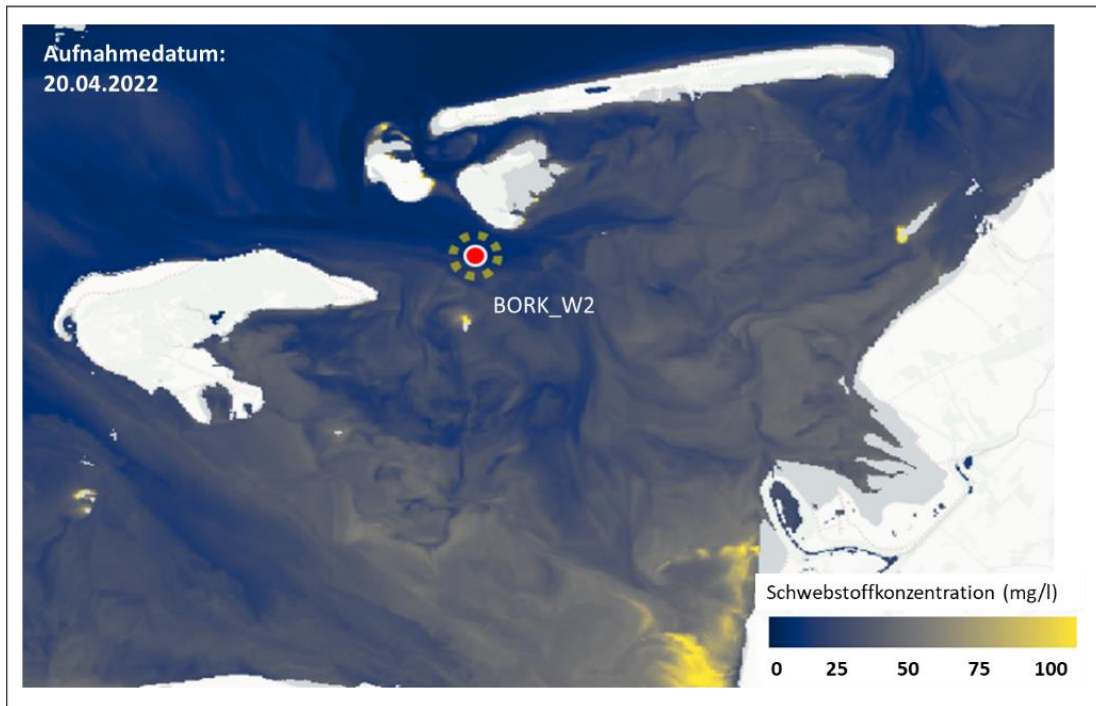


Abb. 17: Lage der Messstation Borkum-W2 (BORK_W2).

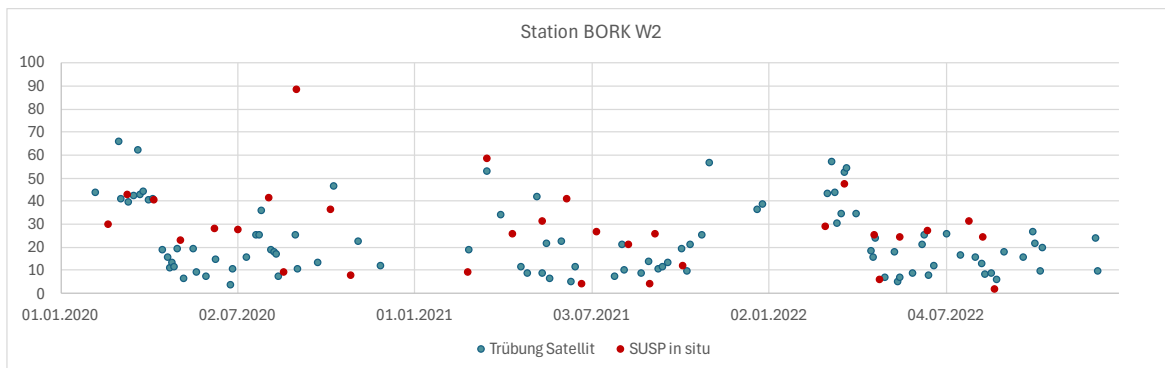


Abb. 18: Zeitreihe der Trübung aus der Fernerkundung (blau) im Vergleich mit der Schwebstoffkonzentration gemessen an der Station BORK_W2 (rot) für die Jahr 2020 - 2022.

4 Kartierung des Sublitorals

4.1 Einleitung

Zur verbesserten Nutzung der eulitoralischen Sedimentinformationen als Eingangsdaten wurde diese um Informationen aus dem Sublitoral ergänzt. Die subtidalen Bereiche werden regelmäßig durch hydroakustische Messverfahren erfasst, die eine flächendeckende Kartierung des Meeresbodens zur Identifizierung von Sedimentverteilungsmustern und marinen Lebensraumtypen ermöglichen. Methoden der Fernerkundung kommen hier aufgrund der Wasserbedeckung nicht mehr zum Einsatz. Begleitende Sedimentproben, Videos und Bilder dienen zur Validierung der in den hydroakustischen Aufnahmen abgrenzbaren Textur- und Strukturbereiche unterschiedlicher Rückstreuintensität (Abb. 19).

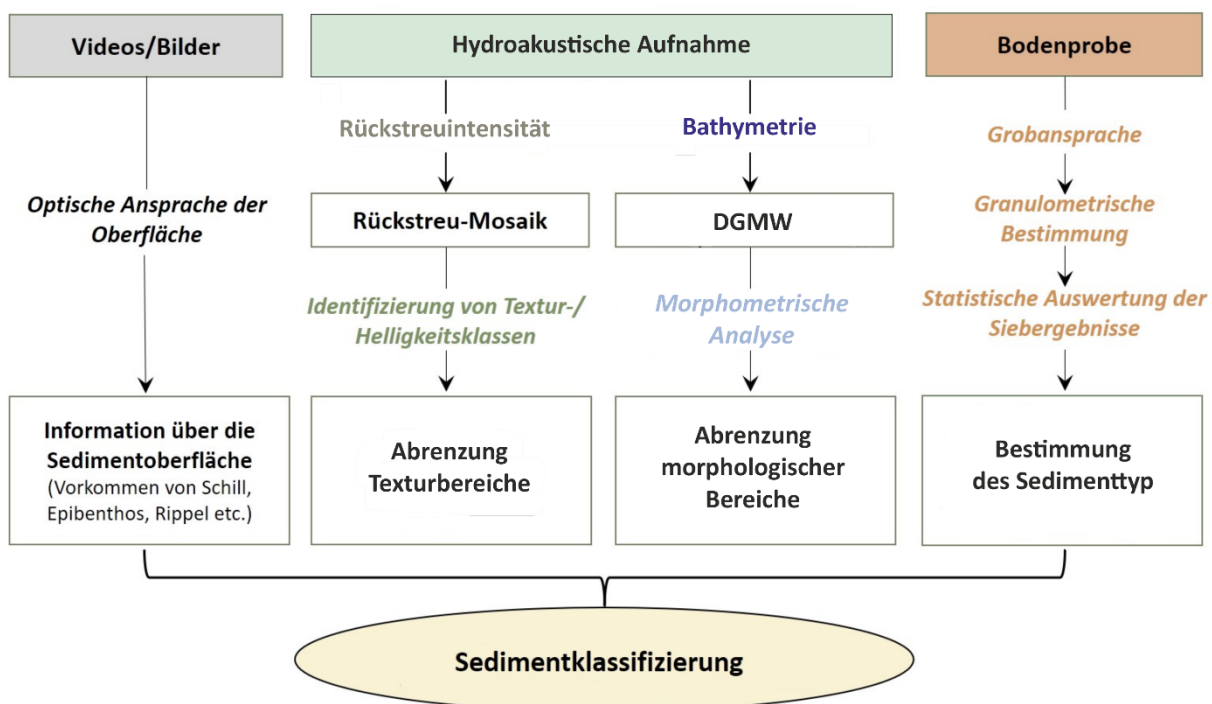


Abb. 19: Schematische Darstellung der Parameter, die in die Sedimentklassifizierung des Meeresbodens einfließen.

Basis für die Sedimentkartierung sublitoraler Bereiche sind in Schleswig-Holstein die auf die Modellregion zugeschnittenen Klassifizierungen aus einer Zusammenstellung von verfügbaren Messdaten (Tabelle 5) im Synthese Nordsee-Projekt (Stelzer & Trampe, 2022) und aktuelle Klassifizierungen aus dem WATThochDrei Projekt (Kühn et al., 2024).

Tabelle 5: Datengrundlage der für die Modellregionen verwendeten Sedimentkartierungen.

Gebiet	Jahr der Erhebung	Projekt	Daten bereitstellende Institution	Referenz
Amrumtief	2011	AufMod	FTZ-CAU/LKN-NPV/BSH/LfU (Synthese Nordsee)	Ricklefs & Arp, 2011; Heyer & Schrottke, 2013
Amrumbank	2013-2025	STopP I	BMBF/LKN.SH/LfU (Synthese Nordsee)/IfG-CAU	Schwemmer et al. 2017
Amrum (Westl.)	2015	STopP I	BMBF/LKN.SH/LfU (Synthese Nordsee)/IfG-CAU	Schwemmer et al. 2017
Amrum (Westl.)	2016	SubMu6	FTZ-CAU/LKN-NPV/LfU (Synthese Nordsee)	Ricklefs & Stage, 2017
Föhrer Ley/ Norderaue	2012	SubMu2/STopP I überarbeitet	BMBF/FTZ-CAU/LKN-NPV	Ricklefs & Scheffler, 2013; Schwemmer et al., 2017
Föhrer Ley/Norderaue	2023	WATThochDrei	FTZ-CAU/LKN-NPV	Kühn et al., 2024
Hörnumtief (Lückenbereich)	2009-2010	Sylter Rückseitenwatt	IfG-CAU/LKN-NPV/(FTZ-CAU)/LfU (Synthese Nordsee)	Schwarzer et al., 2010
Hörnumtief	2018	BASEWAD	FTZ-CAU/LKN-NPV/INTERREG-EU/LfU (Synthese Nordsee)	Ricklefs & Trampe, 2019
Hörnumtief (inneres)	2021	SubMu8	FTZ-CAU/LKN-NPV/LfU (Synthese Nordsee)	Trampe & Ricklefs, 2022
Hörnumtief	2022	WATThochDrei	FTZ-CAU/LKN-NPV	Kühn et al., 2024
Osterems	2016	Sublitoralkartierung	FSK-NLWKN	Mascioli & Kunde, 2017, 2021
Rütergat	2013-2014	STopP I	BMBF/FTZ-CAU/LKN-NPV/LfU (Synthese Nordsee)	Ricklefs & Stage, 2015; Schwemmer et al., 2017
Rütergat (Nord)	2023	WATThochDrei	FTZ-CAU/LKN-NPV	Kühn et al., 2024
Schmaltief	2013	STopP I überarbeitet	BMBF/FTZ-CAU/LKN-NPV	Ricklefs & Scheffler, 2014; Schwemmer et al., 2017

Seit 2009 wurden verschiedene Forschungsvorhaben in Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) und dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR) - heute Landesamt für Umwelt (LfU) - zur Klassifizierung sublitoraler Sedimente und Habitatstrukturen durchgeführt. Hinzukommen ähnlich angelegte Untersuchungen aus dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhaben. Daten zu Torfvorkommen, konsolidierten Sedimenten, Hartsubstraten (Steinen), Muschelvorkommen, Pantoffelschnecken, Lanice-Vorkommen und schillführenden Flächen aus einigen Projektarbeiten stehen zusätzlich zur Verfügung.

Für Niedersachsen sind Daten in die Auswertung eingeflossen, die im Rahmen des Sublitoralkartierungsprogrammes von der Forschungsstelle Küste (FSK) aufgenommen und ausgearbeitet wurden (Tabelle 5). Die Datenaufnahme wird auf Grundlage der Europäischen Richtlinien 1992/43/EG (FFH-Richtlinie), 2000/60/EG (EG-WRRL) und 2008/56/EG (EG-MSRL) für die Kartierung der sublitoralen Flächen der Übergangs-, Küsten- und Meeresgewässer durchgeführt. Für die Untersuchung der subtidalen Habitate erfolgt die Kartierung dabei in enger Abstimmung mit der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer (NLPV) und dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN).

4.2 Hydroakustische Datenerfassung und Ground Truthing

Die hydroakustischen Daten werden durch Fächerecholote (MBES), die gleichzeitig flächendeckend hochauflösende Tiefendaten und Rückstreuintensitäten erfassen, und/oder Seitensichtsonare (SSS), die ausschließlich Rückstreuintensitäten liefern, aufgezeichnet. Die eingesetzten Messinstrumente operieren im Frequenzbereich von 300 kHz bis 900 kHz (Mascioli & Kunde, 2021; Ricklefs & Trampe, 2021).

Die aufgenommenen Daten werden Prozessen der radiometrischen und geometrischen Korrektur unterzogen und anschließend zu einem Rückstreumosaik mit einer Zellgröße von 0,5 m bis 1 m zur Klassifizierung der Sedimentverteilung und mit einer Auflösung von 0,25 m zur Detaildarstellung zusammengefügt (Mascioli & Kunde, 2021; Ricklefs & Trampe, 2021). Die bathymetrischen Daten werden nach Bereinigung in ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer Rastergröße von 1 m x 1 m und einer Detailgenauigkeit von bis zu 0,25 m überführt (Abb. 20).

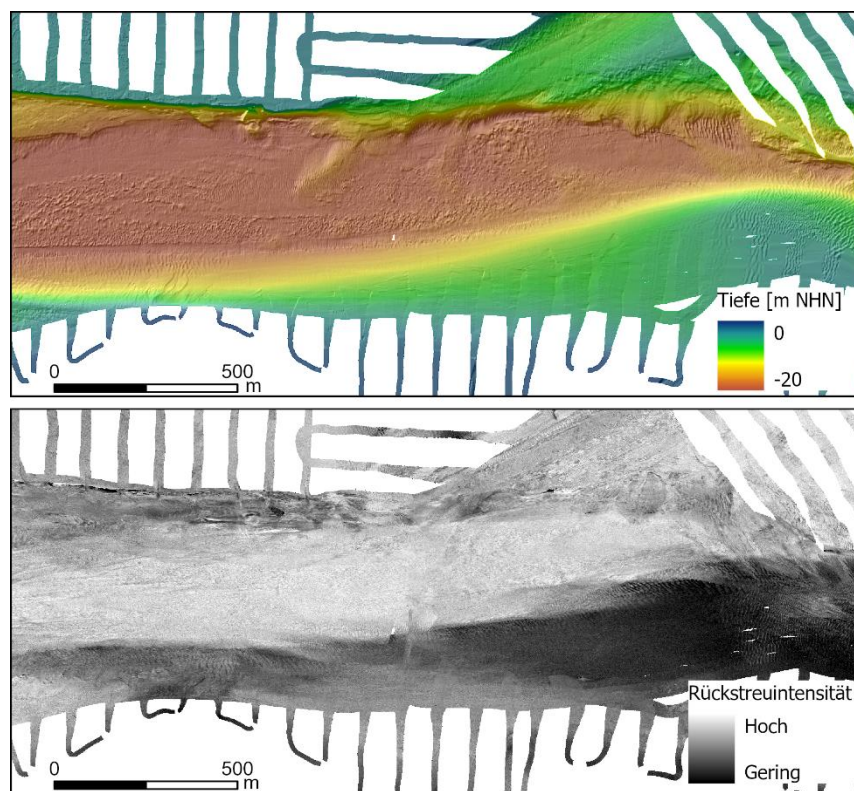


Abb. 20: Bathymetrie (oben) und Rückstreuintensität (unten) als Endprodukte hydroakustischer Messungen.

Ergänzend zu der Erfassung des Meeresbodens kommen teilweise parametrische Sedimentecholote (SBP) zur Untersuchung des Meeresuntergrundes zum Einsatz. Die niedrigfrequenten Systeme arbeiten im Bereich von 6 kHz bis 12 kHz und ermöglichen eine Eindringtiefe des akustischen Signals bis zu circa 6 m mit einer Auflösung von einigen Zentimetern innerhalb des Sedimentprofils (Mascioli & Kunde, 2021; Ricklefs & Trampe, 2021).

Zur Validierung der akustischen Aufnahmen kommen Greiferproben (Abb. 21), Video- und Bildaufnahmen zum Einsatz. Die Auswertung erfolgt zunächst an Bord durch eine standardisierte Grobansprache des Probenmaterials (Abb. 21). Die Sedimentanalyse wird anschließend mittels Siebverfahren durchgeführt. Die verwendeten Siebe haben eine Maschenweite von 8000 µm, 4000 µm,

2000 μm , 1000 μm , 500 μm , 250 μm , 125 μm und 63 μm , die eine spätere Korngrößenanalyse passend zur Klassifizierung nach Wentworth (1922) erlauben. Korngrößenverteilung und statistische Parameter werden durch die Software GradiStat ausgewertet (Blott & Pye, 2001). Die beprobten Sedimente werden entsprechend der Definition nach Folk (1954) entsprechend der prozentualen Anteile der Fein- (<63 μm), Sand- (63-2000 μm) und Kiesfraktion (> 2000 μm) zueinander eingeteilt und der Sandanteil nach Figge (1981) entsprechend der prozentualen Anteile von Fein- (63-250 μm), Mittel- (250-500 μm) und Grobsand (500-2000 μm) zueinander klassifiziert (Abb. 22).



Abb. 21: Backengreifer zur Sedimentbeprobung (links) und Sedimentprobe (rechts).

4.3 Attribution der Sedimentklassifikationen im Sublitoral

Die Sedimentklassifikationen resultieren entweder aus manuellen Zuordnung auf den Mosaiken (Ricklefs & Trampe, 2021) oder automatisierten Verfahren einer objektbasierten Bildanalyse (OBIA, Object-Based Image Analysis) (Ismail et al., 2015; Lucieer, 2008; Mascioli & Kunde, 2021). Bei der Zuordnung fließen die verschiedenen erfassten Parameter (Abb. 19) mit ein. Auf den Rückstreumosaiken erfolgt die Identifizierung anhand von Textur-, Struktur- und Helligkeitsklassen, wodurch Gebiete mit ähnlichen akustischen Signaturen identifiziert werden. Hinzu kommen bei Aufnahmen mit Fächerecholoten Neigung, Rauigkeit und Krümmung, wodurch die akustischen Signaturklassen weiter differenziert werden. Anhand der Siebergebnisse werden den Signaturklassen Korngrößenkennwerte zugeordnet. Bei der Zuordnung fließen auch die Informationen aus Bild- und Videoanalyse mit ein.

Die Einstufung der abgegrenzten Klassen wird für unterschiedliche Ebenen durchgeführt, welche einem steigenden Detailgrad entsprechen (Abb. 21). Zum einen handelt es sich um eine vereinfachte Einteilung der Folk-Klassifizierung (1954) nach der des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (2016), wodurch die Klassen in Fein-, Misch- und Grobsediment sowie Sand klassifiziert werden. Zum anderen werden die vereinfachten vier Klassen der Folk-Klassifizierung, wie von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) aufgearbeitet, feiner abgestuft (BSH, 2016). Zur weiteren Differenzierung werden die Sande nach Figge (1981) über das Verhältnis von Fein-, Mittel- und Grobsand, bezogen auf 100 % Sand, vier Sandtypen zugeordnet (Abb. 22).

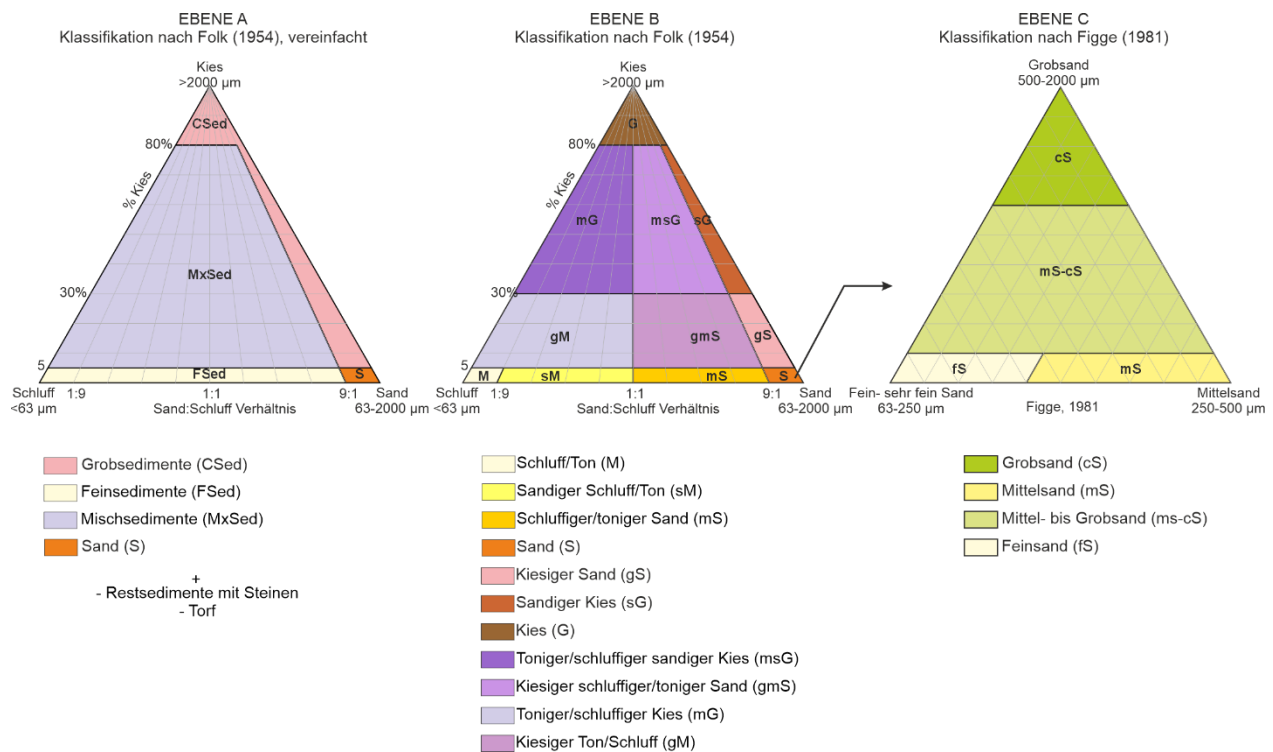


Abb. 22: Sedimentklassen nach vereinfachter Folk-Klassifizierung (1954) (Ebene A), Folk-Klassifizierung (1954) (Ebene B) und Sandtypen nach Figge-Klassifikation (1981) (Ebene C) (angelehnt an BSH, 2016). Auf Ebene C werden lediglich Sedimente klassifiziert, die in Ebene A und Ebene B bereits als Sand ausgewiesen wurden. Dies weicht von der Klassifikation nach Figge (1981) ab, nach der Sande ab einem Anteil von 20 % im Kornensemble klassifiziert werden.

Aus hydroakustischen Daten lassen sich anhand sichtbarer Strukturelemente darüber hinaus weitere Informationen hinsichtlich konsolidierter Sedimente (Klei), Torfvorkommen, Steine, Muschelvorkommen, dichte Lanice-Vorkommen und Schill ableiten.

4.4 Verteilung der sublitoralen Sedimente

Feinsedimente und Feinsande sind für beide Modellregionen charakteristisch in den küstennahen Bereichen des Sublitorals und der strömungsberuhigten flacheren Priele wie dem inneren Hörnumtief, der Föhrer Ley, dem Flachwasserbereich zwischen Föhr und Amrum, direkt vor Amrum im schleswig-holsteinischen Gebiet sowie in der Bantsbalje und Memmertbalje im niedersächsischen Gebiet. Mit zunehmender Distanz zur Küste sowie steigender Wassertiefe nimmt der Grobanteil des Sediments zu. So prägen Mittel- bis Grobsande die tieferen Abschnitte der unterschiedlichen Tidebecken. Mischsedimente treten in den Klassifizierungen nur selten auf, was größtenteils an der oft nicht sehr eindeutigen hydroakustischen Signatur dieser Flächen sowie kleinräumigen Heterogenität der Sedimentzusammensetzung liegt.

Die Eindeutigkeit der Detektion von schillführenden Sedimenten hängt größtenteils davon ab, ob sich Schill in größerer Menge an der Oberfläche befindet und auf welchem Substrat Schill vorkommt. Schill auf reinen Feinsanden oder Feinsedimenten zeichnet sich häufig durch höhere Rückstreuintensitäten im Gegensatz zum umgebenden Sediment aus. Bei sehr hoher Dichte sind aufragende, unregelmäßige Strukturen erkennbar. In Bereichen gröberer Sande oder Kiese ist dies oft weniger deutlich ausgeprägt. Steinvorkommen treten oft in Erosionsbereichen auf, in denen eiszeitliche Ablagerungen angeschnitten und aufgearbeitet wurden (Ricklefs & Trampe, 2021). Die strömungsdominierten Rinnen des

Hörnumtiefs sind zudem geprägt von Hartsubstraten in Form von Steinvorkommen, die eng verzahnt mit gröberen Sanden und Kies auftreten (Abb. 23). Grobsedimente treten ebenfalls im Bereich der strömungsdominierten Rinne der Norderaue und Osterems sowie im seewärtigen Bereich westlich von Amrum und nördlich von Borkum auf.

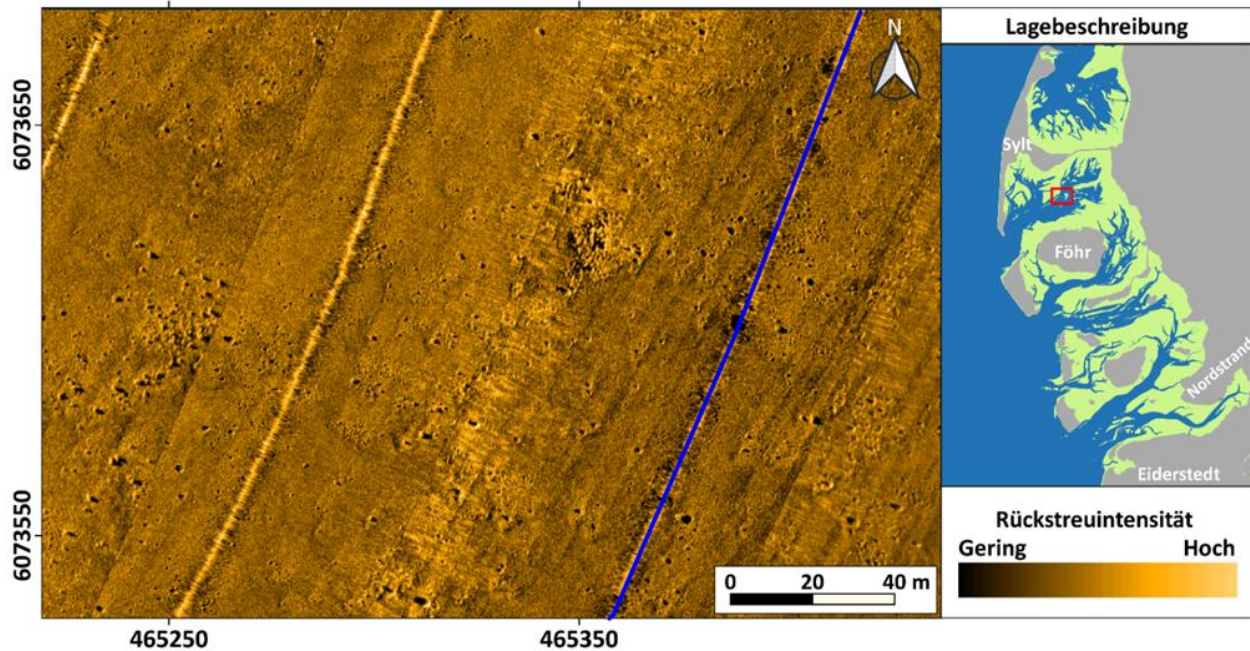


Abb. 23: Sonarmosaik eines durch zahlreiche Blöcke strukturierten Meeresbodens im Sublitoral des inneren Hörnumtiefs. Die Blöcke sind deutlich als helle Rückstreuzentren mit dunklen Schallschatten dahinter zu erkennen. Die blaue Linie markiert den Verlauf eines erfassten flachseismischen Profils (Ricklefs & Trampe, 2021).

Innerhalb der Gezeitenrinnen kommen häufig konsolidierte Sedimente (Klei) und Torfe wie in der Föhrer Ley und Bantsbalje vor. Konsolidierte Sedimente und Torfvorkommen sind entgegen unverfestigter Feinsedimente stabiler gegenüber Erosion und grundsätzlich in Erosionsbereichen zu finden. Kleie bilden plateauähnliche Strukturen oder Schichtausbisse aus (Ricklefs & Trampe, 2021). Torfe zeigen ein unregelmäßiges Relief und bilden steile Kanten (Abb. 24).

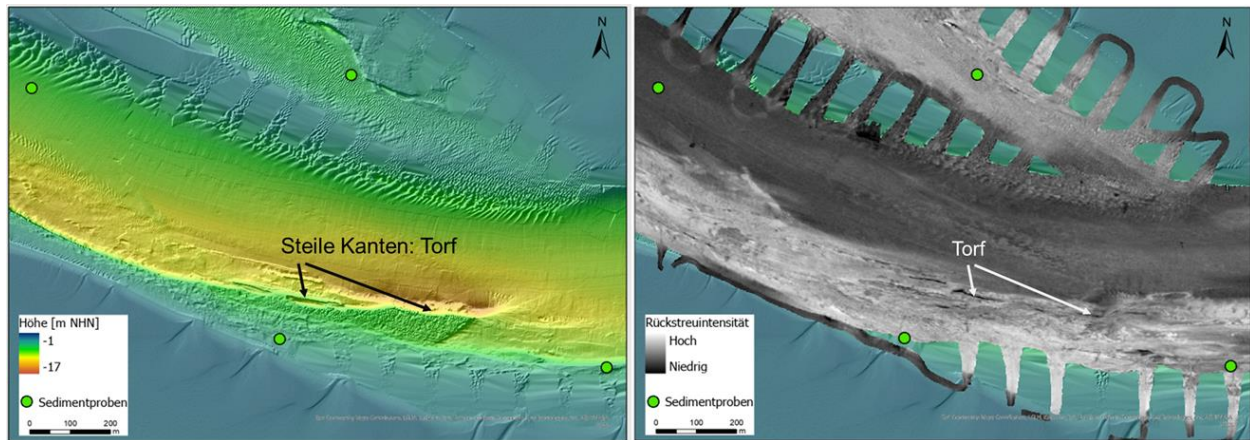


Abb. 24: Beispielhafte Darstellung der im bathymetrischen Raster (links) und Rückstreumosaik (rechts) sichtbaren Kantenstrukturen von Torf im Bereich der Bantsbalje in der Osterems.

Muschelvorkommen im Sublitoral sind oft die Verlängerung eulitoral Vorkommen und es handelt sich meist um Mischbänke aus Miesmuscheln (*Mytilus edulis*) und Austern (*Magallana gigas*), nur Austern oder nur Miesmuscheln (Oberrecht et al., 2024). Bäumchenröhrenwürmer (*Lanice conchilega*) treten verstärkt an Prielenden, wie in der Norderaue, auf und wurden bereits sowohl auf feinem als auch sandigem Sediment detektiert (Heinrich et al., 2017, BioConsult, 2022). Vorkommen in geringer Besiedlungsdichte oder inhomogener Umgebung können hingegen nicht flächenhaft detektiert werden.

5 Bereitstellung der Sedimentdaten für die numerische Modellierung

5.1 Verschneidung eulitoraler Produkte mit der Sedimentklassifizierung des Sublitorals

Eulitorale und sublitorale Sedimentkarten wurden zusammengestellt, um Sedimentdaten als Eingangsdaten für die numerische Modellierung bereitzustellen. Wegen der zwangsläufigen methodischen Grenzen von Fernerkundung und Hydroakustik sind einige Flächen in Übergangsbereichen nicht kartierbar. Zugleich decken die kartierten Bereiche nicht das ganze Modellgebiet ab. Damit das Modellgebiet vollständig und lückenlos durch Sedimentinformationen abgedeckt ist, werden die kartierten Daten durch Sedimentinformationen aus dem AufMod-Projekt (Valerius et al., 2013a) zu einem Kombi-Datensatz ergänzt.

Aufgrund der drei unterschiedlichen Datenquellen wurden die Daten durch eine Anpassung der Sedimentklassifizierung harmonisiert. Ausgehend von der Aufteilung des Sublitorals in zwei unterschiedlichen Ebenen angelehnt an Folk (1954) wurden einigen Datensätze nach vereinfachter Folk-Klassifikation (vier Klassen) und dem Sand-Typ nach Figge (1981) generalisiert. Mittelsande, Mittel- bis Grobsande und Grobsande werden zu einer Klasse zusammengezogen. Die kiesigen Sedimente (gS, sG, G) werden als Grobsedimente klassifiziert (Abb. 22, Ebene A). Als Hartsubstrate und Torf werden Stein- und Torfvorkommen kartiert.

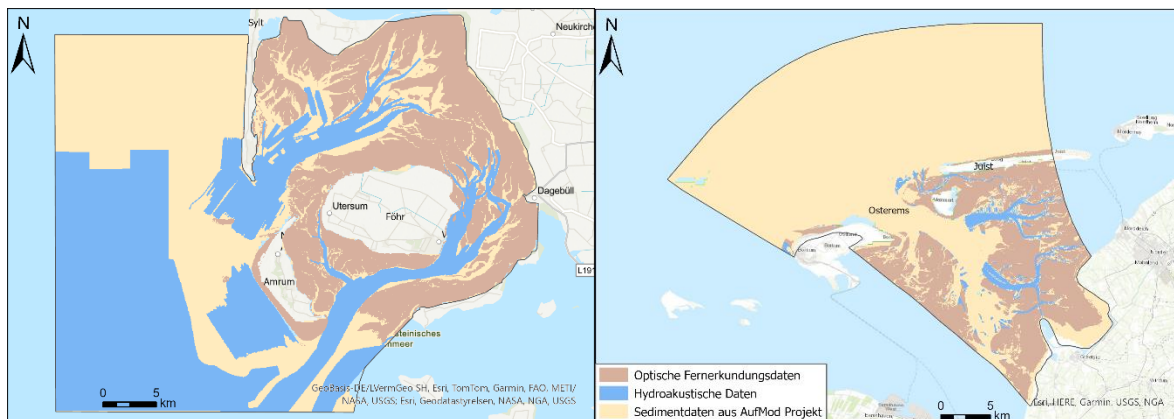


Abb. 25: Abdeckung der verwendeten Datensätze für die vollständige Sedimentkartierung des Modellgebietes.

Ebenso werden die Sedimentklassen der Eulitoralkartierung generalisiert und an die vereinfachte Folk-Klassifizierung (1954) angepasst. Sehr feiner Sand und Feinsand werden als Feinsande klassifiziert. Misch, Misch-Schlick, Schlick und Schlick hell werden als Feinsediment klassifiziert (siehe Abschnitt 2.1, insbesondere Tabelle 4).

Die resultierenden Klassen sind Feinsediment, Feinsand, Mittel- bis Grobsand, Mischsediment, Grobsediment, Hartsubstrat und Torf. Die vollständigen Sedimentkarten für beide Untersuchungsgebiete sind in Abb. 26 dargestellt.

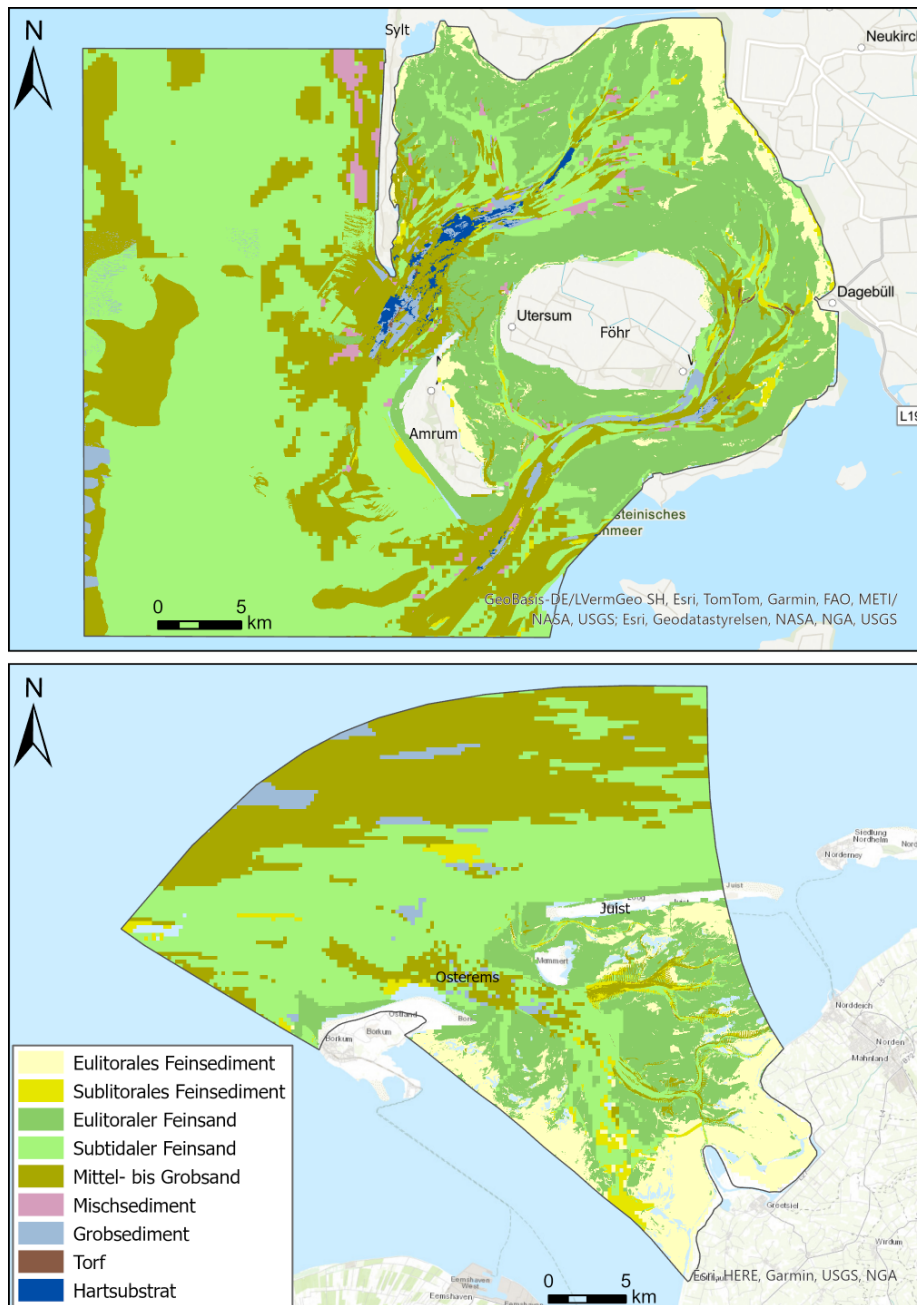


Abb. 26: Sedimentkarte der sub- und eulitoralen Bereiche, zusammengestellt als Eingangsdaten für die numerische Modellierung.

5.2 Berechnung der repräsentativen Korngrößenverteilung

Um den ausgewiesenen Flächen für die Modellierung statistische Korngrößen zuzuweisen, wurde für das Eu- und Sublitoral die repräsentative Korngrößenverteilung für die für WASCO definierten Sedimenttypen Feinsediment, Feinsand, Mittel- bis Grobsand, Mischsediment und Grobsediment berechnet. Für jeden Probenpunkt ist der prozentuale Anteil $<63 \mu\text{m}$, $63\text{--}125 \mu\text{m}$, $125\text{--}250 \mu\text{m}$, $250\text{--}500 \mu\text{m}$, $500\text{--}1000 \mu\text{m}$, $1000\text{--}2000 \mu\text{m}$ und $>2000 \mu\text{m}$ an der Gesamtprobe gebildet worden. Für alle Probenpunkte, die in dieselbe WASCO-Sedimentklasse fallen, wurde für jede dieser Korngrößenklassen ein Mittelwert gebildet (Abb. 27).

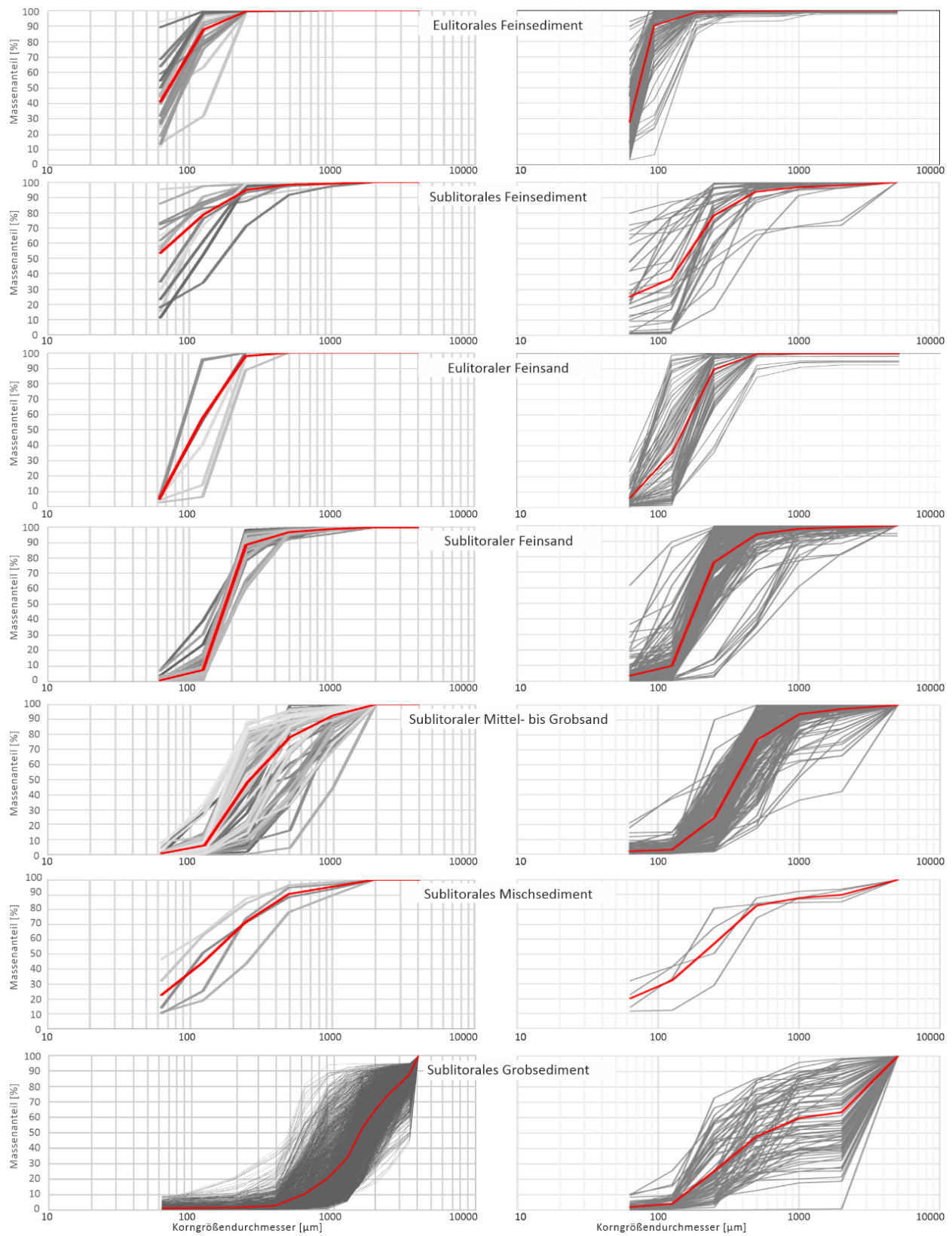


Abb. 27: Korngrößenverteilungskurven der jeweiligen Sedimentklasse in Schleswig-Holstein (links) und Niedersachsen (rechts) der einzelnen Probenpunkte (grau) und der gemittelten Korngrößenverteilung (rot).

Für jede Modellregion wurde hier eine eigene Erhebung der repräsentativen Korngrößenverteilung vorgenommen (Abb. 28). Die gemittelte Korngrößenverteilungskurve für das Eulitoral sowie das Sublitoral zeigen klare Unterschiede. Eulitorale Feinsedimente weisen im Durchschnitt einen höheren Feinanteil ($<63\ \mu\text{m}$) von circa 28-41 % auf, während 59-71 % dem sehr feinen Sediment und Feinsand ($63\text{-}250\ \mu\text{m}$) zuzuordnen ist (Tabelle 6). Betrachtet man das Feinsediment im sublitoralen Bereich, fällt auf, dass es eine breitere Korngrößenverteilung aufweist und wesentlich gleichförmiger verteilt ist. In Schleswig-Holstein sind 25 % der Partikel kleiner als $63\ \mu\text{m}$, jedoch ist der sehr feine Sediment- und Feinsandanteil mit 54 % deutlich höher als im eulitoral Feinsediment. In Niedersachsen weisen die sublitoralen Feinsedimente einen Anteil kleiner als $63\ \mu\text{m}$ bis zu 53 % auf, jedoch ist der sehr feine Sediment- und Feinsandanteil mit 42 % etwas geringer als im eulitoral Bereich. Feinsedimente im Sublitoral kommen zudem auf Mittel- und Grobsande bis circa 19 % in Schleswig-Holstein und 4 % in Niedersachsen vor.

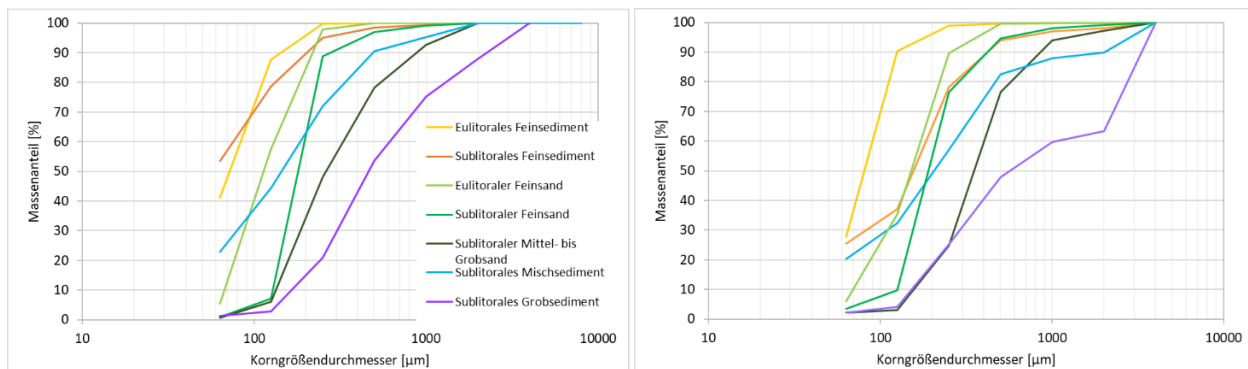


Abb. 28: Repräsentative Korngrößenverteilungskurve der kartierten Sedimentklassen für Niedersachsen (links) und Schleswig-Holstein (rechts).

Der Feinsand im Eulitoral weist im Vergleich dazu eine gröbere Zusammensetzung auf. Während der Anteil der Partikel $<63\ \mu\text{m}$ mit circa 5-6 % relativ gering ist, dominieren typischerweise die sehr feinen Sediment- und Feinsand-Klassen mit 84-93 % am gesamten Korngrößenspektrum. Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Feinsand im Sublitoral, der einen noch geringeren Feinanteil und eine hohe Dominanz der sehr feinen Sedimente und Sande von 73-88 % aufweist. Sowohl eulitoral als auch sublitoraler Feinsand treten selten als reiner Feinsand auf, sondern weisen stets einen Anteil an Mittel- und Grobsand auf. Dieser ist im sublitoralen Bereich grundsätzlich höher. Aufgrund der sichtbaren Unterschiede zwischen Feinsedimenten und Feinsand im Eulitoral und Sublitoral wurde jeweils eine eigene Korngrößenstatistik gebildet, um den Flächen möglichst repräsentative Korngrößenkennwerte zuzuweisen.

Bei Mittel- bis Grobsand überwiegen die Korngrößenklassen $250\text{-}500\ \mu\text{m}$ und $500\text{-}1000\ \mu\text{m}$ mit einem gesamten Anteil von 45-69 %. Zudem liegt die Fraktion der sehr groben Sande bei circa 3-7 %. Mischsedimente wurden nur selten gefunden. Ihre Sedimentzusammensetzung verteilt sich über einen größeren Korngrößenbereich von feinen Partikeln ($<63\ \mu\text{m}$) mit über 20 %, unterschiedlichen Sanden bis hin zu 77 % und - in Schleswig-Holstein - einem Kies-Anteil von circa 10 %.

Auch Grobsedimente zeigen eine deutlich heterogene Zusammensetzung. Charakteristisch ist jedoch der höhere Anteil der Grobfraktion ($>2000\ \mu\text{m}$) mit durchschnittlich circa 12-37 % und ein geringer Feinanteil von 1-2 %. Die Ergebnisse decken verschiedene Sandfraktionen mit einem Anteil von Mittel- und Grobsand bis 67 % ab.

Diese Ergebnisse bilden die statistische Grundlage der Sedimenttypen-Kennwerte für die Modellierung (Tabelle 6).

Tabelle 6: Gemittelter prozentualer Anteil der jeweiligen Korngrößenklassen der Sedimenttypen.

Schleswig-Holstein							
WASCOCode	<63 [%]	63-125 [%]	125-250 [%]	250-500 [%]	500-1000 [%]	1000-2000 [%]	> 2000 [%]
Eulitorales Feinsediment	27,84	62,47	8,64	0,70	0,11	0,45	0,01
Sublitorales Feinsediment	25,45	11,67	41,22	15,58	3,04	1,06	1,98
Eulitoraler Feinsand	6,09	29,32	54,30	9,79	0,28	0,08	0,00
Sublitoraler Feinsand	3,47	6,28	66,74	18,04	3,64	0,96	0,92
Sublitoraler Mittel- bis Grobsand	2,13	1,02	21,70	51,76	17,31	3,39	2,69
Sublitorales Mischsediment	20,21	12,10	24,72	25,51	5,31	2,08	10,07
Sublitorales Grobsediment	2,12	2,00	21,13	22,63	11,85	3,68	36,59
Niedersachsen							
WASCOCode	<63 [%]	63-125 [%]	125-250 [%]	250-500 [%]	500-1000 [%]	1000-2000 [%]	> 2000 [%]
Eulitorales Feinsediment	41,19	46,57	12,03	0,19	0,02	0,00	0,00
Sublitorales Feinsediment	53,42	25,30	16,35	3,52	0,83	0,58	0,00
Eulitoraler Feinsand	5,35	52,32	40,29	1,99	0,04	0,00	0,00
Sublitoraler Feinsand	0,81	6,38	81,53	8,34	2,02	0,92	0,00
Sublitoraler Mittel- bis Grobsand	0,77	5,29	42,00	30,17	14,46	7,31	0,00
Sublitorales Mischsediment	22,94	21,54	27,62	18,42	4,67	4,80	0,00
Sublitorales Grobsediment	1,24	1,59	18,08	32,79	21,44	12,84	12,01

6 Aufbau des numerischen Modellwerkzeugs

6.1 Einleitung

Zur Plausibilisierung der Fernerkundungsdaten wurde die numerische Modellierung als Werkzeug hinzugenommen, um den Einfluss der Verwendung der Sedimentdaten aus der Fernerkundung als Randgröße auf den Sedimenttransport und die morphologische Entwicklung einzuschätzen. Der Einsatz eines numerischen Modells ermöglicht es, die physikalischen Prozesse besser zu verstehen und verschiedene Szenarien zu untersuchen. Damit kann das neu gewonnene Verständnis den Einsatzbereich der Sedimentdaten aus Fernerkundungsdaten für die praxisorientierten Ansätze unterstützen.

Für den Aufbau des numerischen Modellwerkzeugs wurde das Modell Delft3D (Deltares, 2026) ausgewählt, mit dem bereits die Untersuchungen in vielen Projekten wie beispielsweise dem Projekt SediEms (Oberrecht et al., 2024) durchgeführt wurden.

6.2 Numerische Methodik

Die durchgeführten Untersuchungen basieren auf numerischen Berechnungen in den zwei Gebieten (1) Osterems (OEMS) in Niedersachsen und (2) Föhr-Amrum-Sylt (FAS) in Schleswig-Holstein, welche das mathematische Strömungsmodell Delft3D-Flow (Deltares, 2026), gekoppelt mit Wellen (Delft3D-Wave), nutzen. Für die morphodynamischen Rechenläufe wurde zusätzlich mit dem Modul für die Morphodynamik (Delft3D-MOR) gearbeitet. Das Wellen-Modul SWAN wird für die Berechnung der Wellenparameter und den Einfluss der Wellen auf die Morphologie eingesetzt.

Delft3D-FLOW (Deltares, 2026) basiert auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen und den folgenden zwei grundlegenden Annahmen:

- Die Änderungen der Dichte geht nur in den Druck- bzw. Schwerkraftsterm ein (Boussinesq'sche Approximation).
- Es werden Flachwasserverhältnisse angenommen, da die horizontale Längenskala sehr viel größer als die vertikale Längenskala ist und vertikale Beschleunigungen vernachlässigt werden.

Es ist daher ausreichend, die Impulsbilanz der Navier-Stokes-Gleichungen in den horizontalen Richtungen zu lösen. Die vertikale Geschwindigkeit wird über die Kontinuitätsbedingung bestimmt. Delft3D löst die Gleichungen mithilfe eines Finite-Differenzen-Verfahren auf einem strukturierten und kurvenlinearen Rechengitter mit versetzt angeordneten Variablen (Staggered Grid). Die Diskretisierungen im Raum und die Zeitintegration erfolgen kombiniert mit der ADI-Methode (Alternating-Directions-Implicit), einem semi-impliziten Verfahren zweiter Ordnung (Deltares, 2026). Die Reynoldsspannungen werden mit einem k-L-Turbulenzmodell und einem empirischen Dämpfungsansatz (Smith & McLean, 1977) modelliert.

Die oben angesprochene hydro-morphodynamische Kopplung erfolgt auf Zeitschrittebene in beide Richtungen (Online Mode). Mit Delft3D-MOR können sowohl nicht-kohäsive Sedimentfraktionen als Geschiebe und in Suspension als auch kohäsive Sedimentfraktionen in Suspension abgebildet werden. Sedimente werden bei diesem Ansatz über ihre Dichte ρ definiert; zusammen mit einer maximalen Sinkgeschwindigkeit $w(s, \max)$ für kohäsive Sedimente und einem mittleren Radius D_{50} für nicht-kohäsive Sedimente. In die tatsächliche Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Sedimentfraktionen an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit gehen außerdem der Salzgehalt, eine Korn-Korn-

Interaktion (Hindered Settling) und eine Flockenbildung von kohäsiven Sedimentfraktionen ein (Mehta, 1986; van Rijn, 1993; Oberrecht, 2021; Deltares, 2026).

Die kritische, zur Erosion zu überschreitende Bodenschubspannung τ_{cr} kann für kohäsives Sediment nur unzureichend nach dem Shields-Kriterium berechnet werden. Das liegt primär an den Kohäsionskräften zwischen den Feinsedimentkörnern, die infolge von (unterschiedlich starker) Konsolidierung und der damit variierenden Trockenrohdichte stark schwanken. Da bisher das Konsolidierungsverhalten und die Implementierung in numerischen Modellen noch Gegenstand der Forschung ist, wird τ_{cr} für kohäsive Sedimente vereinfacht als konstanter Wert vorgegeben, der versucht, die natürlichen Bedingungen vor Ort zu beschreiben. Die tatsächlichen Erosionsraten hängen jedoch nicht nur von τ_{cr} und den Strömungsverhältnissen ab, sondern auch von der lokalen Verfügbarkeit des Sediments (je weniger Sediment einer Fraktion vorhanden ist, desto weniger kann davon erodiert werden) und von einer möglichen Korn-Korn-Interaktion von nicht-kohäsiven Sedimenten (Hiding and Exposure). In Bewegung geratenes Sediment wird als Geschiebe und in Suspension mittels einer Advektions-Diffusions-Gleichung transportiert (Meyer-Peter & Müller, 1948). Längs- und Querneigung der Sohle gehen ebenfalls in den berechneten Geschiebetransport ein. Für weitere Details zur Implementierung sei auf Deltares (2026) verwiesen.

Neben dem Einfluss extrem hoher Schwebstoffkonzentrationen auf den Sedimenttransport (Oberrecht, 2021) und die Morphologie wurde im Projekt SediEms der Einfluss von Muschelbänken integriert (Oberrecht et al., 2024). Durch die Filtrationsfähigkeit der Muscheln werden der Wassersäule verstärkt Feinsedimente entzogen und lagern sich in den Zwischenbereichen ab. Dieses Verhalten führt ebenfalls zu einer verringerten Trübung und damit zu geringen horizontalen Transportprozessen im Nahbereich von Muschelfeldern.

6.3 Osterems – Modell (OEMS in Niedersachsen)

6.3.1 Modellgitter & Bathymetrie

Die Modelldomäne für das niedersächsische Fokusgebiet OEMS wurde unter Berücksichtigen der üblichen Merkmale der Nordsee und des Wattenmeers ausgewählt und beschreibt das Tidebecken hinter den Ostfriesischen Inseln Borkum und Juist sowie die dazugehörigen Vorstrandbereiche. Damit können gegenseitige Wechselwirkungen der Strömung, des Sedimenttransports und der morphologischen Änderung zwischen dem Wattenmeer und der Nordsee simuliert werden.

Das OEMS-Modellgitter (Abb. 29b) entspricht einem kurvilinearen, strukturierten Gitter, mit dem eine räumliche Variabilität der Auflösung in der Domäne aufgebaut werden kann. Ein solcher Ansatz ermöglicht es, sowohl eine hohe als auch eine gröbere Auflösung aufzubauen und damit Rechenzeit zu optimieren. Die Auflösung entspricht einem minimalen Wert von circa 30 m im Wattbereich und einem maximalen Wert von circa 500 m seewärts der Inseln. Das gesamte Einzugsgebiet umfasst in etwa 920 km² und besteht aus fünf offenen Rändern; zwei im Wattenmeer (WA-W und WA-O) und drei seewärtig (NO-W, NO-N und NO-O). Für die Ermittlung der Randbedingungen an diesen Rändern wurde das Ems-Dollart-Modell 2015 der FSK (Abb. 29a) verwendet (Oberrecht, 2025), in dem die maximale Auflösung im Wattbereich circa 300 m beträgt. Die Bathymetrie (Abb. 29c) weist die Hauptmerkmale der gemessenen DGM-W-Daten aus 2015 auf.

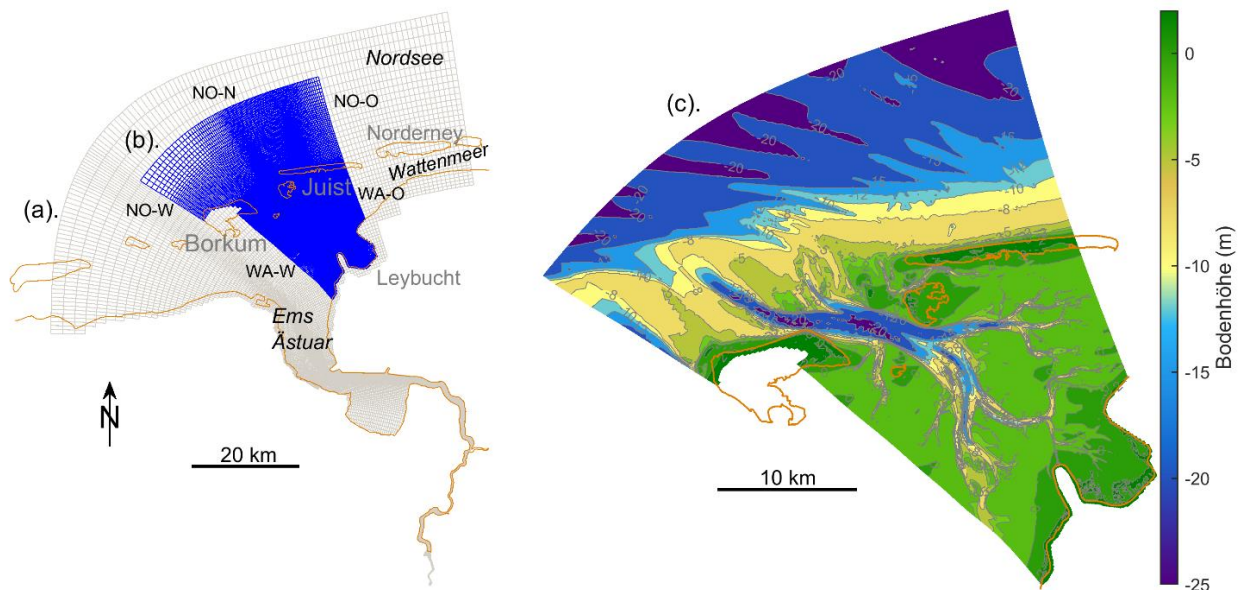


Abb. 29: Modellgitter und Bathymetrie für das OEMS-Fokusgebiet. Links: Das gekoppelte Modellgitter zwischen der Ems-Domäne (a, grau) und der OEMS-Domäne (b, blau). Die OEMS-Domäne hat 5 offene Ränder: WA-W und WA-O im Wattenbereich, NO-W, NO-N und NO-O im Nordseebereich. Rechts: Die Modell-Bathymetrie (c) zeigt die Bodenhöhe bezogen auf Normalnull (NN).

6.3.2 Randbedingungen

Für die Randsteuerung des Modells wurden repräsentative klimatische Bedingungen für Wasserstand, Seegang und Wind ausgewählt, mit denen eine realistische morphologische Entwicklung für den Untersuchungszeitraum Juli 2017 erwartet werden kann (Abb. 30). Mit Hilfe eines Beschleunigungsfaktors (MorFac) konnte so eine einjährige morphologische Änderung simuliert werden (Lesser et al., 2004; Roelvink, 2006).

Die Wasserstände und Strömungen an den Rändern des OEMS-Modells wurden durch die Kopplung mit dem Ems-Dollart-Modell (graues Gitter in Abb. 29a) hergestellt, die zeitliche Auflösung entlang der Ränder beträgt 10 min.

Für den Seegang an den Rändern sowohl von der Nordsee als auch über die Wattwasserscheiden werden beide Modelle gekoppelt. Die zeitliche Auflösung der Seegangsdaten beträgt 60 min. An den seeseitigen Modellrändern treten aufgrund der Richtung zur offenen See die höchsten signifikanten Wellenhöhen auf. Die maximale Wellenhöhe im Untersuchungszeitraum beträgt hier 3,6 m bei einer

Wassertiefe von rund 25 m. Die Wellenhöhen an den offenen Rändern im Bereich der Watten sind wesentlich geringer und liegen in einer Größenordnung von <1,0 m.

Durch eine Sensitivitätsanalyse mit den verschiedenen räumlichen und stationären Windfeldern (DWD, Fino1, NOAA) wurden die gemessenen Winddaten der DWD-Station auf Norderney als am repräsentativsten ermittelt und zur Steuerung des Modells ausgewählt. Die zeitliche Auflösung beträgt 10 min (DWD, 2026). Die maximale Windgeschwindigkeit ist 16,4 m/s aus nördlicher Richtung (Abb. 30c). Grundsätzlich zeigen die Daten, dass höhere Winde vor allem aus westlicher und nördlicher Richtung auftreten.

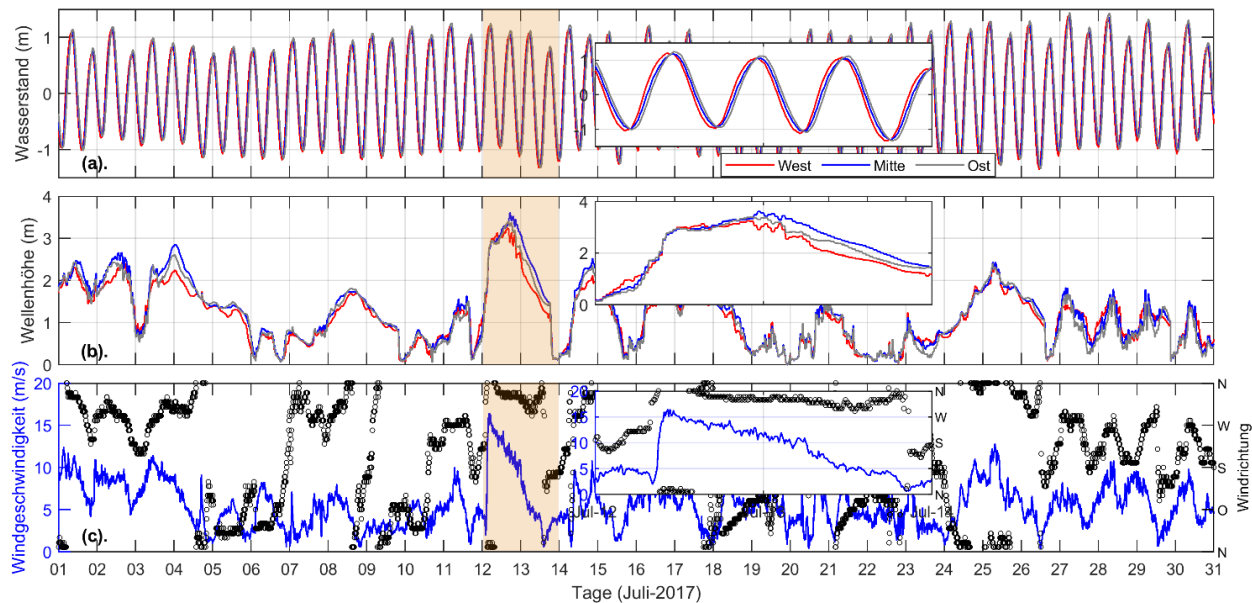


Abb. 30: Anfangs- und Randbedingungen für das OEMS-Modell bestehend aus Wasserstand (a), Wellenhöhe (b) und Windverhältnisse (c). Die Linien sind West- (rot), Mittel- (blau) und Ostpunkt (grau) des nördlichen Randes (NO-N in Abb. 29b). Der hervorgehobene Bereich zeigt die Periode vom 12.07.2017 bis 14.07.2017 mit höchster Windgeschwindigkeit.

Als Anfangsbedingungen an den Rändern wurden die ersten Werte dieser Zeitreihe eingesetzt. Die ersten sechs Stunden der Simulation bilden die Spin-Up-Zeit ohne morphologische Änderung. So ist es möglich, die angegebenen Randbedingungen im gesamten Modellgebiet einzurechnen.

6.3.3 Anfangsbedingung der Sedimentverteilung

Für eine hydro-morphodynamische Simulation ist die Anfangsverteilung der Sedimente im Gewässerboden von entscheidender Bedeutung und sollte daher möglichst realistisch sein. Ohne eine realistische Sedimentverteilung an der Gewässersohle können keine zuverlässigen morphologischen Ergebnisse erwartet werden, obwohl das Modell in der Lage ist, hydrodynamische Kenngrößen genau zu berechnen.

Für die Sedimentverteilung wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz basiert auf der Verwendung eines Kombi-Datensatzes aus den hier zusammengestellten Daten aus der Eulitoralkartierung (Fernerkundung) und der Sublitoralkartierung (Hydroakustik) aus Messprogrammen beider Bundesländer. Lücken wurden mit bereits vorhandenen AufMod-Datensätzen geschlossen (Valerius et al., 2013a). Der zweite Ansatz beinhaltet die ausschließliche Verwendung des AufMod-Datensatzes, welcher öffentlich zur Verfügung steht.

Die AufMod-Sedimentdaten mit einer räumlichen Auflösung von 500 m sind durch zwölf Korngrößen beschrieben (Valerius et al., 2013a). Die interpolierte Verteilung dieser Fraktionen auf dem OEMS-Modellgitter ist in Abb. 31 dargestellt. Am höchsten ist der Schluff-Anteil ($<63 \mu\text{m}$) in der Leybucht. Fraktion 4 ($125\text{--}177 \mu\text{m}$) zeigt den größten Anteil am Sedimentboden sowohl in der Nordsee als auch im Wattgebiet. Die letzten vier größeren Fraktionen befinden sich im Nordseebereich. Diese interpolierten Daten wurden in die Sedimentfraktionen des WASCO-Sedimentcodes umgewandelt, wodurch AufMod- und Fernerkundungsdaten zu einem flächendeckend interpolierten Kombi-Datensatz zusammengesetzt werden konnten (Abb. 32).

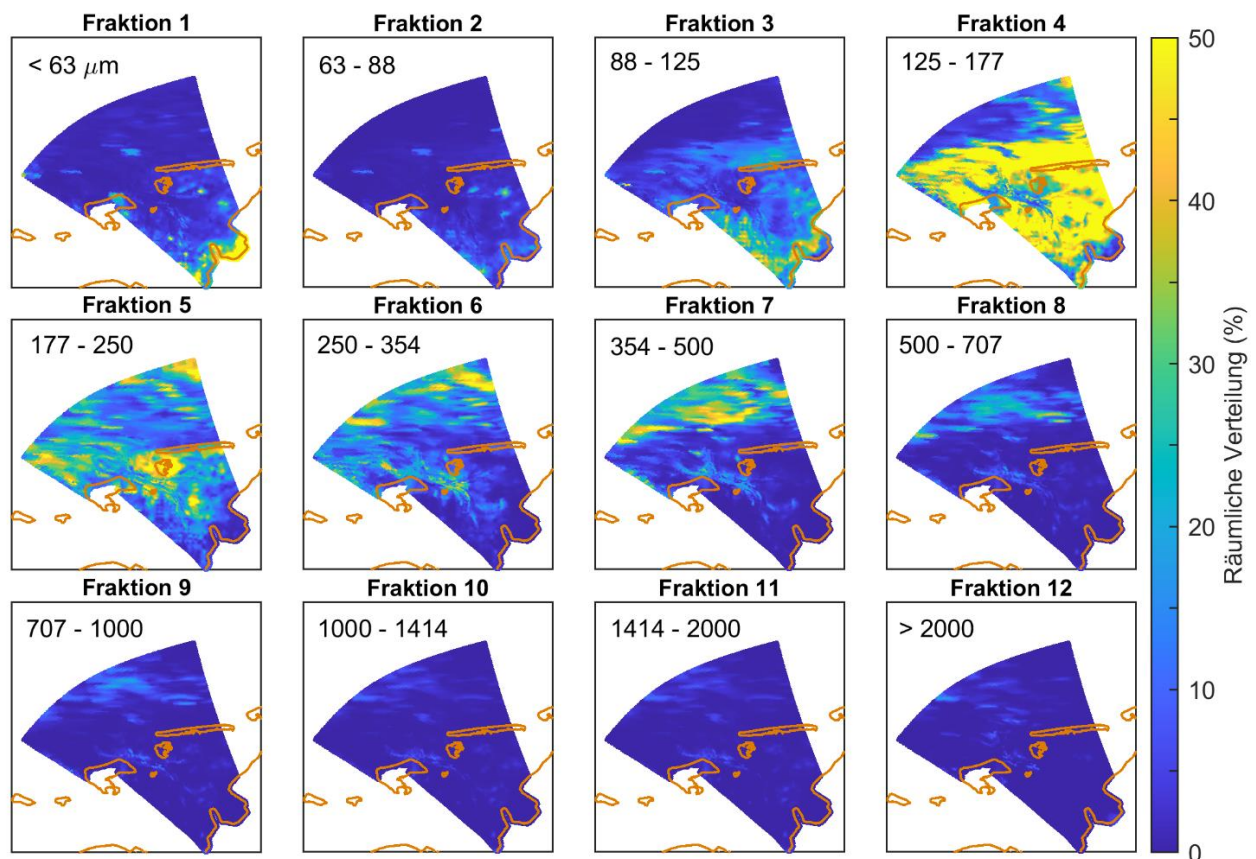


Abb. 31: Räumliche Verteilung der AufMod-Sedimentdaten auf der OEMS-Modelldomäne.

Die aus unterschiedlichen Quellen zusammengesetzte Anfangsverteilung der Sohlsedimente ist in Abb. 32 dargestellt und basiert auf dem WASCO-Sedimentcode. Besonders im Bereich nördlich der Ostfriesischen Inseln musste vermehrt auf AufMod-Daten zurückgegriffen werden.

Im Vergleich zu den generierten Sedimentverteilungsdatensätzen aus dem AufMod-Projekt zeigt die hier aufgebaute Sedimentverteilung zum Teil deutliche Unterschiede. So ist der Schluff-Anteil im Wattbereich der Osterems im eulitoral Bereich aus Fernerkundungsdaten wesentlich höher (Vergleich Abb. 31 und Abb. 32). Weiterhin dominieren Sedimente mit einem Korndurchmesser von $125 \mu\text{m}$ und $250 \mu\text{m}$ die Gewässersohle im Watt- und Nordseebereich.

Um die einzelnen Klassen auf dem Modellgitter zu initialisieren bedarf es dreier sedimentologischer Parameter für jeden Gitterknoten: (1) Der mediale Korndurchmesser (D_{50}), (2) der Volumen- oder Massenanteil und (3) die Mächtigkeit und Stratigraphie des Meeresbodens bzw. jeder einzelnen

Schicht. Der mediale Korndurchmesser beschreibt den oberen Grenzwert jeder Klasse. So ergibt sich eine Sedimentverteilung an der Oberfläche wie in Abb. 32 dargestellt. Die Sedimentmächtigkeit des Bodens beträgt konstant 1 m, jedoch wurden Bereiche mit Torf und Hartsubstrat ohne eine Sedimentmächtigkeit (keine verfügbaren Sedimente) initialisiert.

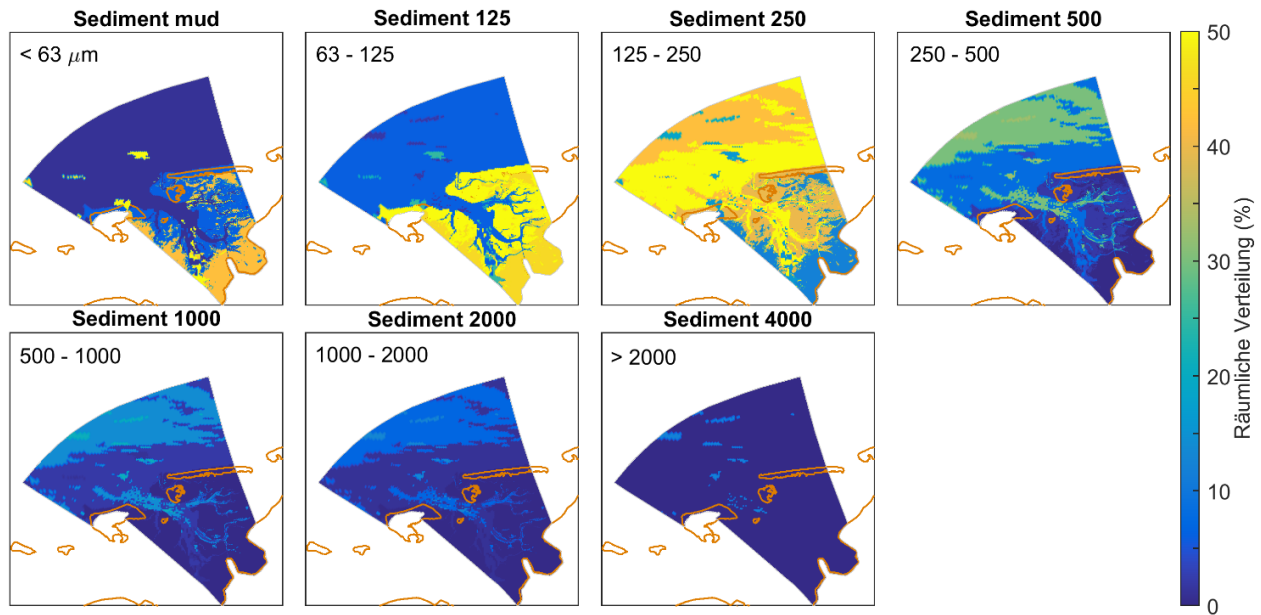


Abb. 32: Räumliche Verteilung der sieben Sedimentklassen basierend auf der eingeteilten Siebkurve jeder nach WASCO-Sedimentcode definierten Sedimentfraktion des Kombi-Datensatzes.

6.4 Föhr-Amrum-Sylt – Modell (FAS in Schleswig-Holstein)

6.4.1 Modellgitter & Bathymetrie

Als Fokusgebiet FAS in Schleswig-Holstein wurde das von den Inseln Föhr, Amrum und Sylt sowie Hallig Langeneß umgebene Tidebecken ausgewählt. Im Gegensatz zur OEMS-Domäne sind hier zwei Seegatten vorhanden: (1) Das Seegat zwischen Sylt und Amrum und (2) das Seegat zwischen Amrum und Langeneß.

Wie im OEMS-Modell basiert das Gitternetz auf kurvilinearen, strukturierten und variablen Zellen (Abb. 33a) mit einem Einzugsgebiet von circa 1250 km². Die höchste Auflösung beträgt im Wattbereich 50 m, die geringste Auflösung liegt im Nordseebereich bei 500 m. Es sind drei offene, seeseitige Ränder (NO-N, NO-W und NO-S), an welchen Randbedingungen vorgegeben werden müssen. Unter der Annahme, dass es keinen wesentlichen Strömungsaustausch zwischen dem Modellgebiet und dem Wattenmeer gibt, wurden geschlossene Ränder im südlichen Wattbereich eingesetzt. Die Modellbathymetrie (Abb. 33b) besteht aus verschiedenen Messdaten unterschiedlicher Jahre (Valerius et al., 2013b).

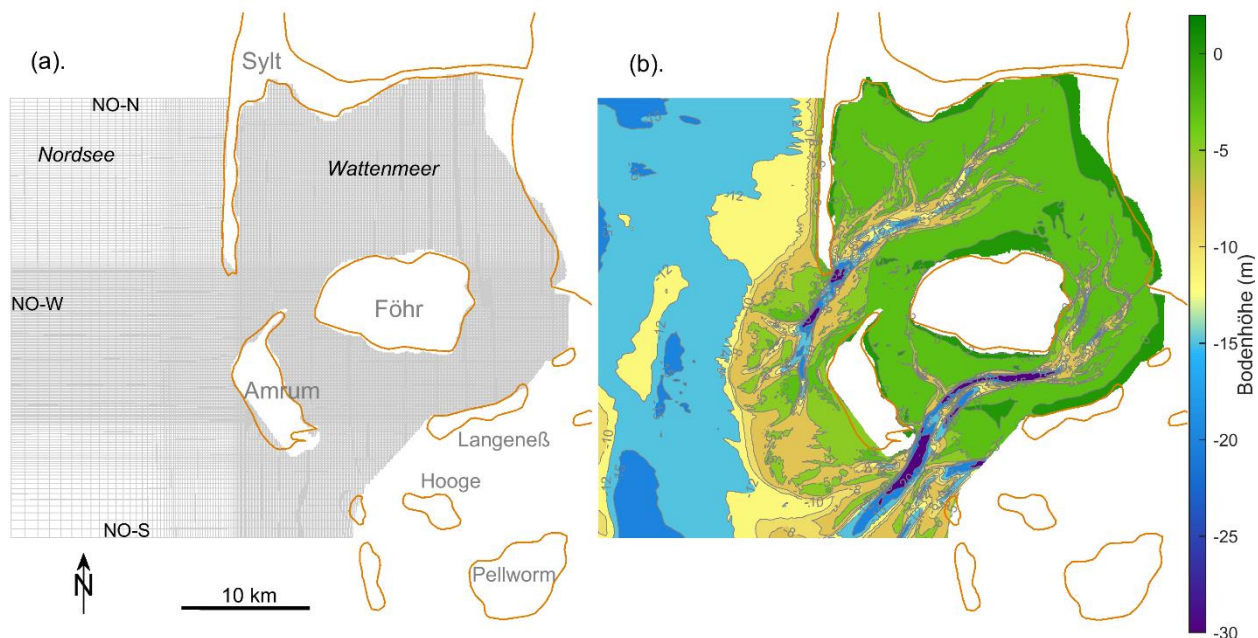


Abb. 33: Modellgitter und Bathymetrie für das FAS-Fokusgebiet. Links: Modellgitter (a) mit drei offenen Rändern im Nordseebereich (NO-N, NO-W und NO-S). Rechts: Die Modell-Bathymetrie (b) zeigt die Bodenhöhe bezogen auf Normalnull (NN).

6.4.2 Randbedingungen

Als Modellzeitraum wurde der Monat April 2018 aufgrund der hohen Verfügbarkeit gemessener Daten ausgewählt. Wie im OEMS-Modell werden Randbedingungen für Wasserstand, Wellenhöhe und Windverhältnisse implementiert.

Die Wasserstandsvariation an den Rändern wurde durch die Kopplung mit dem grobskaligen Nordsee-Modell (Verboom et al., 1992) realisiert. Im Gegensatz zum OEMS-Modell sind alle Ränder mit Wasserständen angetrieben worden. Die Länge des westlichen Randes beträgt circa 35 km. Die Wasserstandsvariation südlich, mittig und nördlich des westlichen Randes zeigt eine Propagation der Tidewelle mit abnehmendem Tidehub (Detailbereich in Abb. 34a). Das Tidehoch- und Tideniedrigwasser beträgt im Mittel 1,0 m bzw. -1,0 m mit einem resultierenden Tidehub von 2m.

Zur Berücksichtigung des Seegangs wurden gemessene Daten von der seewärts gelegenen Wellenmessboje (13 m Wassertiefe) vor Westerland, Sylt (BSH 2025) mit einer zeitlichen Auflösung von 30 min verwendet. Die maximale Wellenhöhe beträgt 2,5 m und wurde am 05. April 2018 in nordwestlicher Richtung gemessen (Detailbereich in Abb. 34b). Grundsätzlich werden im gesamten übrigen Untersuchungszeitraum geringere Wellenhöhen ($<1,0$ m) gemessen.

Die Berücksichtigung des lokalen Windes ist gerade im Bereich der Rückseitenwatten eine wichtige Voraussetzung zur Wellenerzeugung, da dort die Wellen vermehrt durch lokale Winde entstehen. Die gemessenen Windverhältnisse auf Hallig Hooge mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min (DWD, 2026) wurden als Randbedingung im Modell eingesetzt. Die maximale Windgeschwindigkeit (16,4 m/s am 12. April 2018) wurde aus östlicher Richtung gemessen, allerdings verursachte der aus nordwestlicher Richtung kommende Wind (15 m/s am 05. April 2018) die höchste gemessene Wellenhöhe in dieser Periode (Detailbereich in Abb. 34c).

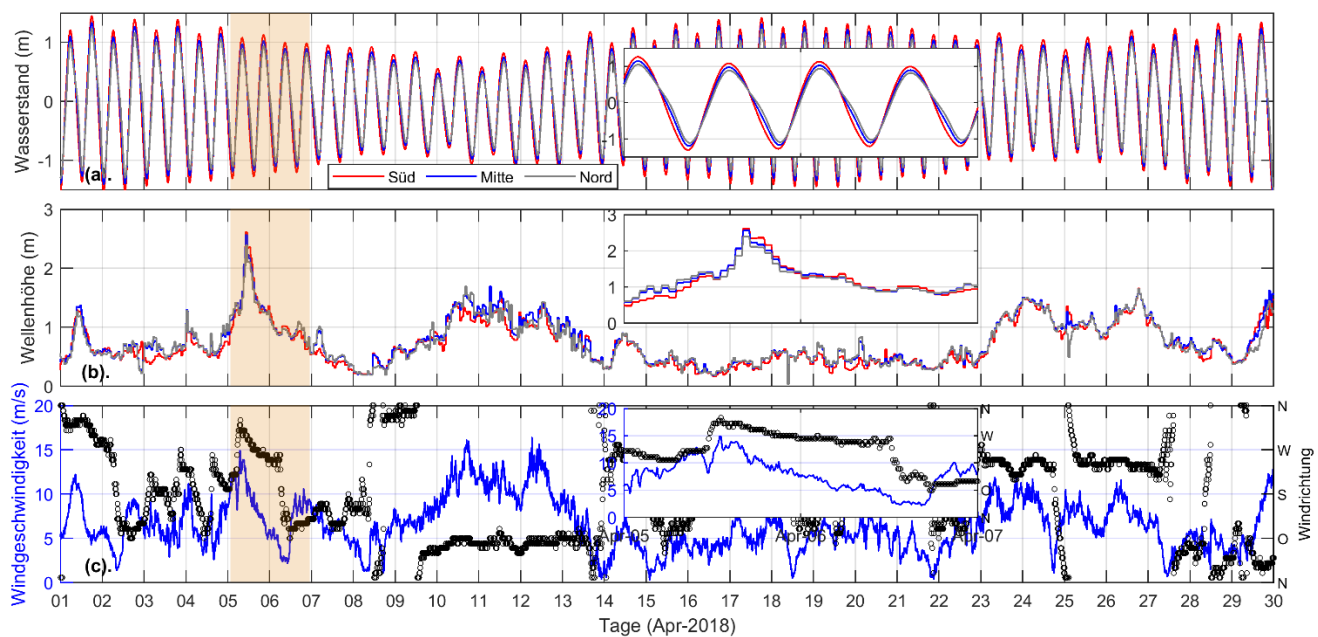


Abb. 34: Anfangs- und Randbedingungen für das FAS-Modell bestehend aus Wasserstand (a), Wellenhöhe (b) und Windverhältnisse (c). Die Linien sind Süd- (rot), Mittel- (blau) und Nordpunkt (grau) des westlichen Randes NO-W.

6.4.3 Anfangsbedingung der Sedimentverteilung

Wie im OEMS-Modell wurden zwei unterschiedliche Sedimentverteilungen für die Eingangsdaten zur Modellierung vorbereitet. Die Erste besteht rein aus dem frei verfügbaren AufMod-Datensatz und die zweite Verteilung ist ein Kombi-Datensatz aus Fernerkundungsdaten und Hydroakustik; Datenlücken wurden mit Daten aus dem AufMod-Projekt geschlossen.

Die räumliche Verteilung der AufMod-Sedimentdaten bzw. der zwölf Fraktionen im Bereich des FAS-Untersuchungsgebiets ist in Abb. 35 dargestellt. Wie im OEMS-Gebiet zeigt Fraktion 4 den höchsten und Fraktion 5 den zweithöchsten Anteil an der Verteilung des Oberflächensediment. Im Allgemeinen befindet sich ein höherer Schluff-Anteil (Fraktion 1) entlang des Vorlandes, insbesondere im Bereich zwischen dem Hindenburgdamm und dem Festland. Im Vergleich zum OEMS-Gebiet zeigen die Daten einen größeren Anteil an größeren Sandfraktionen im Wattbereich.

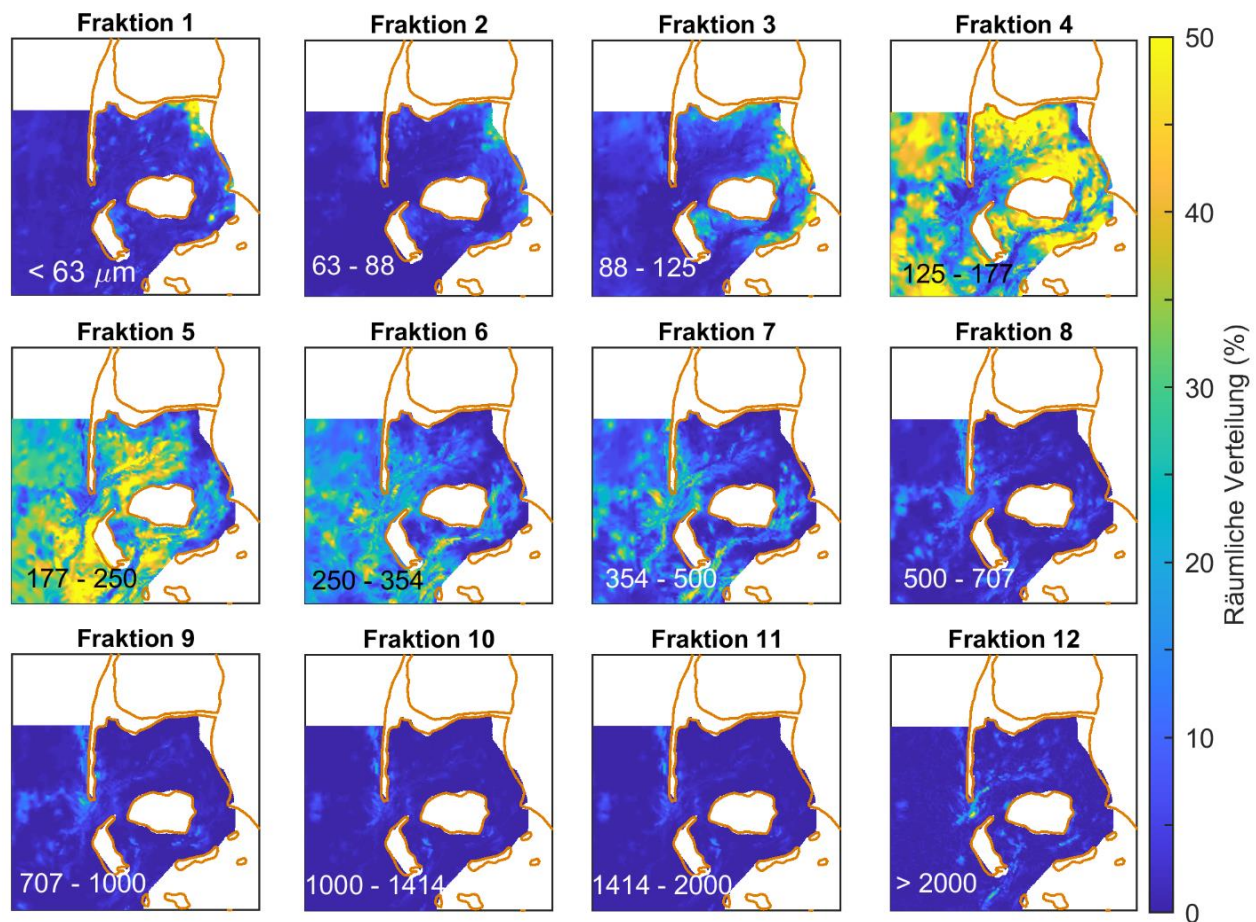


Abb. 35: Räumliche Verteilung der AufMod-Sedimentdaten in dem Bereich der FAS-Modelldomäne.

Die zusammengestellte Sedimentverteilung (Fernerkundung, Hydroakustik und AufMod) der Oberflächen-Sedimentklassen basierend auf dem WASCO-Sedimentcode ist in Abb. 36 dargestellt. Wie auch im OEMS-Gebiet zeigt sich eine deutliche Zunahme des Schluff-Anteils im Wattbereich im Vergleich zum AufMod-Datensatz. Vor allem die Korngrößen 125 µm und 250 µm sind im Wattbereich dominant. Dies zeigt auch, dass die Korngrößen 500 µm und 1000 µm im Vergleich zum OEMS-Gebiet einen höheren Anteil im FAS-Gebiet ausmachen. Wie im OEMS-Modell beträgt die Mächtigkeit des Sedimentbodens konstant 1m, Bereiche mit Torf und Hartsubstraten wurden ohne Sedimentmächtigkeit (keine verfügbaren Sedimente) initialisiert.

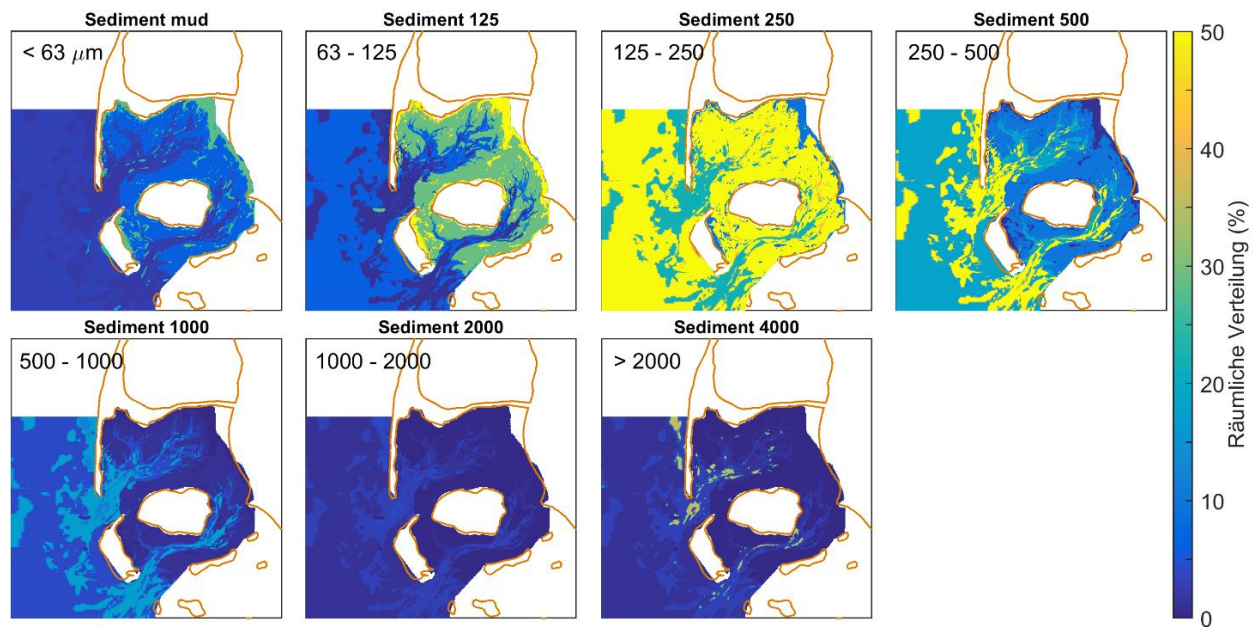


Abb. 36: Räumliche Verteilung der sieben Sedimentklassen basierend auf der eingeteilten Siebkurve jeder nach WASCO-Sedimentcode definierten Sedimentfraktion des Kombi-Datensatzes.

6.5 Validierung und Diskussion der numerischen Modelle

Die Kalibrierung und Validierung des Modells wurde in verschiedenen Zeitfenstern durch die Anpassung der Bodenrauigkeit durchgeführt, welche einen wesentlichen Einfluss auf Wasserstand und Strömung erzeugt. Für die Kalibrierung ist das Modell zunächst für die hydrodynamischen Berechnungsgrößen über den Monat Oktober 2015 mit unterschiedlichen Rauigkeiten simuliert worden. Zur Validierung wurden anschließend mit der aussagekräftigsten Rauigkeit zwei unabhängige Perioden im November und Dezember 2015 betrachtet. Zur Kalibrierung und Validierung wurden dabei die in Tabelle 7 ausgewählten Szenarien untersucht.

Die Genauigkeit der Modellvorhersage kann anhand eines Vergleichs von gemessenen Daten beurteilt werden. Hierzu wurden der Wasserstand und die Wellenhöhe an Standort A und Standort B (Abb. 37d) verglichen.

Der Vergleich des Wasserstandes deutet darauf hin, dass es keinen wesentlichen Unterschied zwischen den Rauigkeiten ($R^2 \sim 0,9$ in Abb. 37a) gibt. Allerdings zeigt sich, dass die optimale Vorhersage ($R^2 = 0,97$) mit der Rauigkeit M2 (Tabelle 6) erzielt wird (Dissanayake & Wurpts, 2013). Dies gilt sowohl für den Wattbereich als auch den Bereich seewärts der Inseln. In beiden Validierungssimulationen November (Abb. 37b) und Dezember (Abb. 37c) zeigt die Wasserstandsvorhersage eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten ($R^2 = 0,95$ und $RMSE < 0,24$ m über die gesamte Zeitreihe).

Tabelle 7: Sensitivitätsanalyse durch die Verwendung verschiedener Rauigkeiten des OEMS-Modells. z_0 ist die Rauigkeitslänge des Bodens mit $z_0 = ks/30$ (ks beschreibt die Nikuradse Rauigkeitslänge).

Modell	Beschreibung der Rauigkeitsschemen
M1	White-Colebrook vom Ems-Modell (Oberrecht, 2025): räumliche Werte von z_0
M2	Verschiedene Mannings-Werte wie im existierenden Leybucht-Modell (Dissanayake & Wurpts, 2013): Werte auf Basis von verschiedenen Wassertiefe-Klassen
M3	Chèzy = 50 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$: räumliche Konstante
M4	Chèzy = 40 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$: räumliche Konstante
M5	Chèzy = 60 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$: räumliche Konstante
M6	Verschiede z_0 in White-Colebrook: Küste in offener See $z_0=0.0002$, Tidebecken $z_0 = 0.006$ (WMO, 2008)

Die Vorhersage der Wellenhöhe an Standort B in der Leybucht ist mittels Bodenrauigkeit, Wellenbrechung und Einfluss von Windfeldern untersucht worden. Mit einer Rauigkeit von 0,07, einem Parameter zum Wellenbrechen von 0,73 und gleichmäßiger Windfelder basierend auf Daten der Station Norderney konnte die optimale Reproduktion der Wellenhöhe erreicht werden ($R^2 = 0,82$ und $\text{RMSE} = 0,05 \text{ m}$) (Abb. 37d).

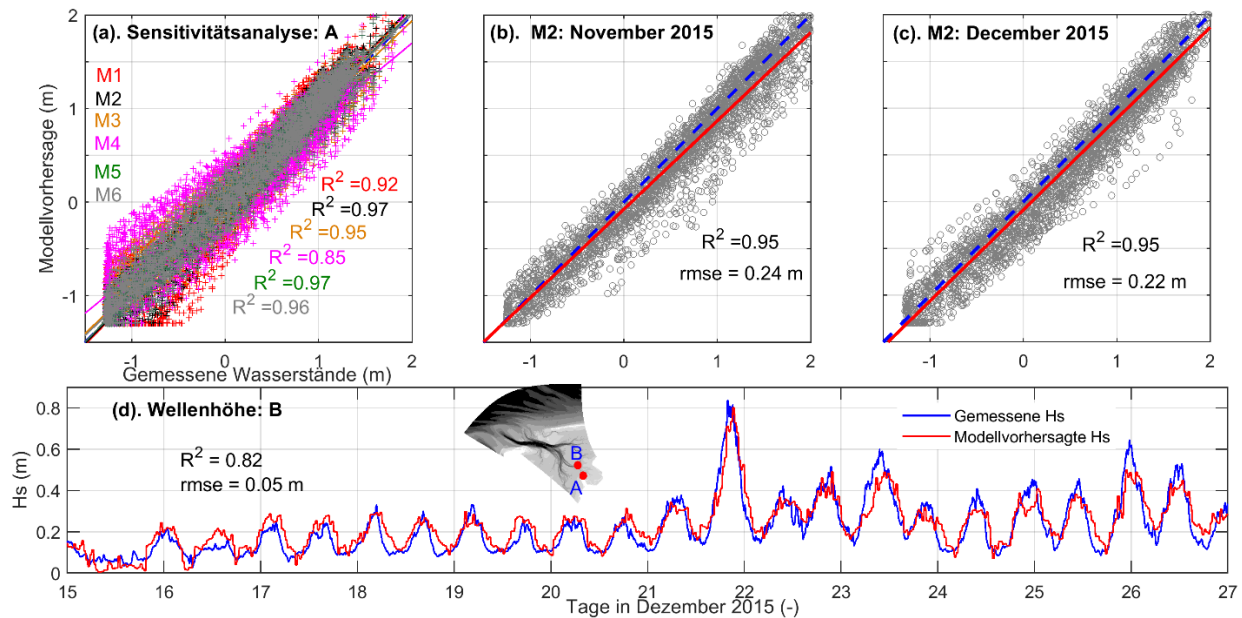


Abb. 37: Kalibrierung und Validierung des Modells mittels der Wasserstandvorhersage am Punkt A. (a) Vergleich der Wasserstandvorhersage im Oktober 2015 mit verschiedenen Rauigkeiten (siehe Tabelle 7). Validierung mit optimaler Rauigkeit (M2) für November 2015 (b) und Dezember 2015 (c). Die gestrichelte Linie (blau) zeigt die beste Übereinstimmung, die durchgezogene Linie (rot) die Übereinstimmung zwischen gemessenen und vorhergesagten Wasserständen. (d) Vergleich zwischen gemessenen und vorhergesagten Wellenhöhen am Punkt B.

7 Anwendungsszenarien

7.1 Anwendung der Sedimentkarte zur morphologischen Entwicklung

7.1.1 Untersuchungsgebiet Osterems (OEMS)

Für die Plausibilisierung der erstellten Sedimentkarten auf Basis von Messdaten wurde der Vergleich mittels morphodynamischer Modellierung durchgeführt. Dabei wurde ein Zeitraum von einem Jahr modelltechnisch abgebildet. Um den Rechenaufwand einzugrenzen wurde für die voll-gekoppelte hydro-morphodynamische Modellierung das Verfahren der morphologischen Beschleunigung (Lesser et al., 2004; Roelvink, 2006) angewendet. Dieses Verfahren ist grundsätzlich zur Reduzierung der Rechenzeit geeignet, solange die Randbedingungen als konstant betrachtet werden können. Ein Grundannahme der morphologischen Beschleunigung ist, dass die morphologische Reaktion zum hydrodynamischen Antrieb innerhalb eines morphologischen Zeitschritts linear ist. Hier wurde als hydrodynamischer Zeitraum der Monat Juli 2017 zur Berechnung der morphologischen Änderungen für das gesamte Jahr 2017 (morphologischer Faktor 12) ausgewählt. Der Einfluss der Anfangsverteilung der Sedimente auf die morphologischen Änderungen ist mittels dreier Parameter ausgewertet worden: (1) Dem Erosions-/Sedimentationsmuster, (2) der Änderung des Sedimentvolumens und (3) dem Sedimenttransport. Um den Einfluss auf die Trübungsentwicklung zu untersuchen wurden die Modell-Vorhersagen mit beobachteten in-situ-Daten verglichen.

7.1.1.1 Langfristige morphologische Entwicklung

Für den Vergleich mit gemessenen morphologischen Daten wurde die Differenz der beiden vorliegenden DGM-W aus den Jahren 2015 und 2021 berechnet (Abb. 38c). Anhand eines Vergleichs mit den gemessenen Daten kann die Güte der berechneten morphologischen Änderungen eingeschätzt werden. Dabei sei darauf hingewiesen, dass der in der Natur auftretende physikalische Vorgang des Suspensions- und Geschiebetransportes in den Modellwerkzeugen für große Skalen teils stark vereinfacht dargestellt wird.

Die sich mit den beiden Sedimentverteilungen (AufMod und Kombi-Daten) ergebenden Modellergebnisse (einjährige Entwicklung) haben nahezu ähnliche Muster (Abb. 38a und Abb. 38b), welche eine natürliche, geringere Entwicklung im Vergleich zu den gemessenen Daten (sechsjährige Entwicklung) aufweisen. Am Wattbereich des Riffgats findet in beiden Sedimentverteilungen mehr Sedimentation als Erosion statt. Man erkennt stärkere Erosion und Sedimentation primär in den in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Hauptprielen, jedoch weisen die Kombi-Daten im Vergleich zu den reinen AufMod-Daten eine höhere Sedimentation im östlichen Bereich dieses Hauptpriels sowie im Bereich vor der Leybucht auf. Zudem ist südlich von Juist eine größere Erosionsfläche erkennbar als in den Kombi-Daten. Auf Grund der sechsjährigen Entwicklung in den gemessenen Daten ist ein stärkeres Erosions- und Sedimentationsmuster, in welchem eine stärkere Entwicklung sowohl in den Prielen als auch auf den Platen erkennbar ist, plausibel.

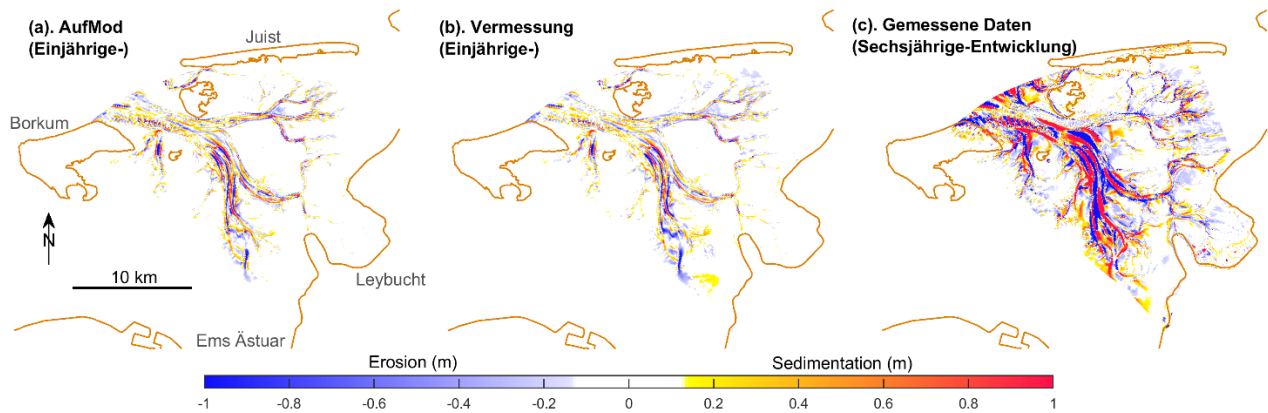


Abb. 38: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters bei einjähriger Modellvorhersage über das Jahr 2015. (a) AufMod-Daten, (b) Kombi-Daten, (c) Unterschied der gemessenen DGM-W-Daten zwischen 2015 und 2021 (sechsjährige Entwicklung).

Um den Unterschied zwischen den sich aus den zwei Sedimentverteilungen ergebenden Modellergebnissen und den gemessenen DGM-W-Daten sowie dem Einfluss der initialen Sedimentverteilung auf die morphologische Entwicklung besser zu beschreiben, wurde das Erosions- und Sedimentationsmuster an vier ausgewählten Beispielstandorten näher betrachtet (Abb. 39): (A) südlich von Juist, (B) Memmertbalje, (C) Bantsbalje und (D) Osterems. An Standort A zeigen die Kombi-Daten eine über ein Jahr betrachtet höhere Sedimentation entlang des Priels als die AufMod-Daten, obwohl die Erosion in beiden Fällen fast ähnlich ist. Die DGM-W-Daten zeigen dort nicht nur eine stärkere Erosion, sondern auch eine höhere Sedimentation bei einer sechsjährigen Entwicklung. In diesem Bereich wurden die Kombi-Daten nicht durch AufMod-Daten ergänzt (Abb. 25), weshalb ein zuverlässiger Einfluss von Hydroakustik und Fernerkundung auf die Bodenentwicklung am Standort A beobachtet werden kann. In ähnlicher Weise decken die Kombi-Daten auch die Standorte B und C ab (Abb. 25). B zeigt ein starkes Erosion- und Sedimentationsmuster in beiden Sedimentverteilungen, welches hauptsächlich entlang der Priele dominiert, jedoch findet man im Vergleich zu den reinen AufMod-Daten in den Kombi-Daten vermehrte Erosion an den Platen. An Standort C zeigt sich im Vergleich zu den AufMod-Daten eine stärkere Sedimentation ohne spürbare Erosion an den Prieilen in den Kombi-Daten. Es sieht so aus, als würden die vorhandenen höheren Schluff- und Feinanteile in den Kombi-Daten bis zum Ende der Prieile transportiert werden (Abb. 32). Ein ähnliches Muster, jedoch mit schwächeren Änderungen, zeigt sich in den AufMod-Daten. In den gemessenen Daten der DHM-W sind sowohl Erosion als auch Sedimentation an den Prieilen aufgetreten, darüber hinaus ist eine Erosion auf den Platen erkennbar. Insofern liefern die Kombi-Daten bessere Ergebnisse im Vergleich zu den DGM-W-Daten. Am Standort D gibt es weder Daten aus Hydroakustik noch aus der Fernerkundung (Abb. 25), weshalb hier komplett mit AufMod-Daten aufgefüllt wurde (Abb. 32). Die einjährige Entwicklung zeigt in den Kombi-Daten eine stärkere Sedimentation auf den Platen verglichen zu den AufMod-Daten. Mit den gemessenen Daten ist dieses Muster noch prägnanter geworden, weshalb es darauf hinweist, dass die Ergebnisse der Kombi-Daten plausibler als die der reinen AufMod-Daten sind, obwohl die DGM-W-Daten über die sechsjährige Entwicklung viel Sedimentation zeigen.

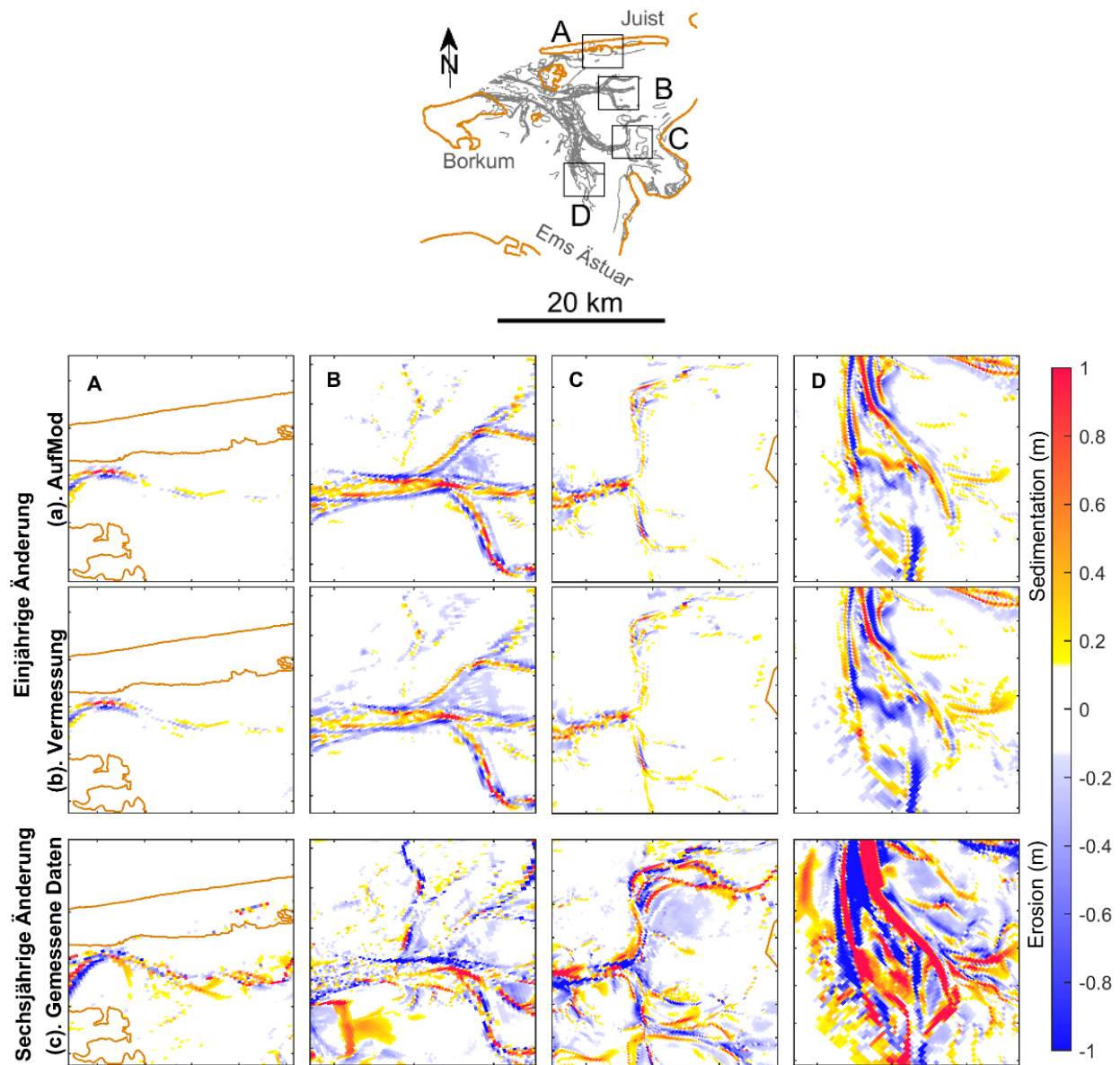


Abb. 39: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters an den ausgewählten Standorten: (A) südlich von Juist, (B) Memmertbalje, (C) Bantsbalje und (D) Osterems. Einjährige Modellvorhersage über das Jahr 2015: (a) AufMod-Daten. (b) Kombi-Daten, (c) Gemessene DGM-W-Daten zwischen 2015 und 2021 (sechsjährige Entwicklung).

Die Übereinstimmung zwischen den Modellergebnissen und den DGM-W-Daten wurde mittels der Änderung von erodierten und abgelagerten Sedimentvolumen im Wattbereich ausgewertet (Abb. 40). Während der einjährigen Entwicklung betragen Erosion und Ablagerungen circa 16 mm^3 bzw. 14 mm^3 in den AufMod-Daten und circa 18 mm^3 bzw. 14 mm^3 in den Kombi-Daten. Die Ergebnisse der AufMod-Daten ergeben mehr Sedimentation ($\sim 87 \%$) im Vergleich zu den Kombi-Daten ($\sim 77 \%$) und geringeren Sedimentverlust (2% in den AufMod-Daten und 4% in den Kombi-Daten). Bei Betrachtung der sechsjährigen Entwicklung (2015 - 2021) werden hauptsächlich die erodierten Sedimente der Priele Osterems und Bantsbalje im Wattbereich abgelagert ($\sim 100 \%$) und es ist kein wesentlicher Sedimentverlust erkennbar. Im Vergleich zu den DGM-W-Daten fällt die Überschätzung der einjährigen Modellergebnisse für die Erosion um das doppelte und für die Sedimentation um das eineinhalbfache

geringer aus, da es im Wattbereich in beiden Fällen geringere Sedimentverluste gibt. Neben der Modelleinstellung können auch mögliche Fehler in der Erstellung der 2015er und 2021er DGM-W dazu beitragen.

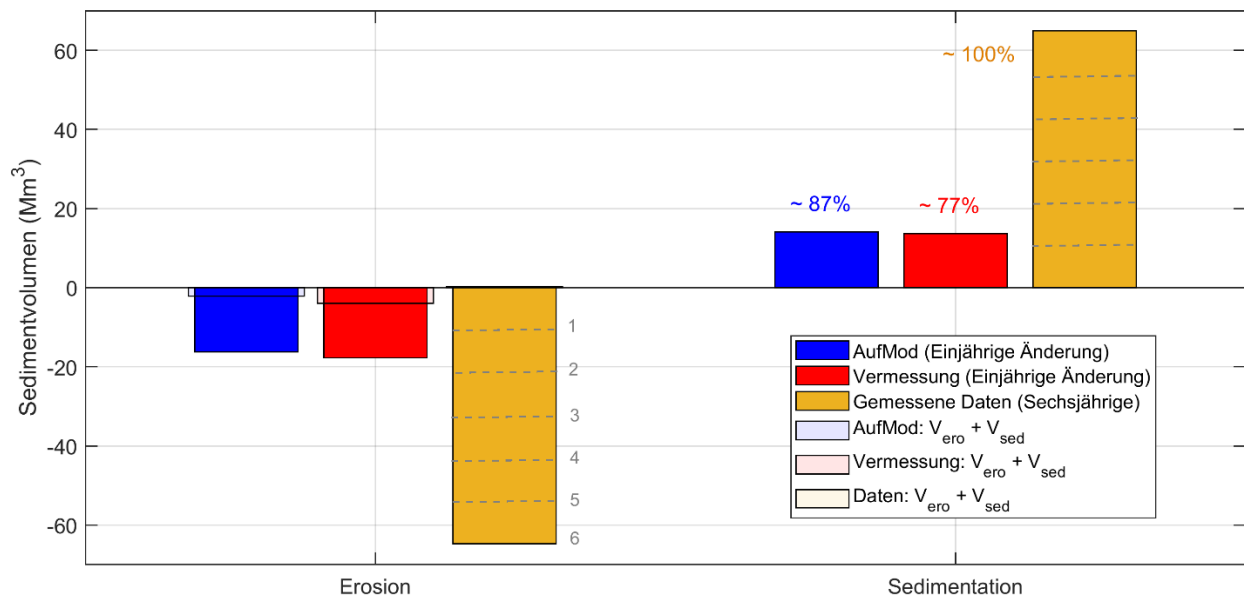


Abb. 40: Vergleich der Änderung von Erosions- und Sedimentations-Sedimentvolumen. Einjährige Modellvorhersage über 2015: AufMod-Daten (blau), Kombi-Daten (rot), gemessene DGM-W-Daten zwischen 2015 und 2021 (gelb). Die gemittelte Änderung über ein Jahr ist mit den gestrichelten Linien gezeigt. Pastellfarben zeigen die dazugehörigen Nettoveränderungen. Die Prozentwerte (%) zeigen das abgelagerte Verhältnis $V_{sed}/V_{ero} \times 100$.

Die Erosions- und Sedimentationsmuster als Ergebnis der Modellierung werden durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Die durchgeführten Analysen stellen die Wichtigkeit der Sedimentverteilung zur Vorhersage der morphologischen Entwicklung in einem Modell noch einmal heraus. Anstelle von sieben Fraktionen in den Kombi-Daten nach dem WASCO-Code gibt es zwölf Fraktionen in den AufMod-Daten. Somit kann jede Sedimentverteilung mehr oder weniger Fein- beziehungsweise Grobsandbereiche enthalten. So dominieren in Bereich D (Abb. 39) Fraktion 1 (<63 µm), Fraktion 3 (88-125 µm) und Fraktion 4 (125-177 µm) in den AufMod-Daten (Abb. 31) im Vergleich zu Sediment mud (<63 µm), Sediment 125 (63-125 µm) und Sediment 250 (125-250 µm) in den Kombi-Daten (Abb. 32). Daher ist das Sediment in den Kombi-Daten feiner als das in den reinen AufMod-Daten. Je feiner die Sedimentpartikel sind, desto höher wird der Sedimenttransport. Vor allem in den Prielen, wo eine starke Strömung herrscht, tritt so ein verstärkter Sedimenttransport in den Kombi-Daten im Vergleich zu den AufMod-Daten auf und es zeigt sich somit ein starkes Erosions- und Sedimentationsmuster in den Kombi-Daten (Abb. 39). Daher kann der Einfluss der Kombi-Daten in einigen Bereichen unterschätzt werden. Diese Faktoren können zudem die Differenz zwischen den Modellergebnissen und den Daten aus den DGM-W beeinflussen.

Die Anfangs- und Randbedingungen bestimmen die Prognosefähigkeit des Modells. Die Modellbathymetrie wurde aus unterschiedlichen Daten generiert und besteht zum Großteil aus den im ersten Quartal 2015 erfassten LiDAR-Daten. Durch die Kombination der verschiedenen Datensätze mit variierenden Auflösungen können Ungenauigkeiten in der finalen Bathymetrie entstehen. Im vorangegangenen Winter kann es zu einer starken Veränderung des Gewässerbodens gekommen sein, welche sich auch in den Bathymetriedaten zeigt. Für die Randbedingungen des Modells wurden,

entsprechend der Verfügbarkeit der meteorologischen Informationen, Daten im Juli 2015 ausgewählt; idealerweise sollte immer ein repräsentativer Monat ausgewertet werden (Dissanayake et al., 2024), denn die Datenauswahl kann das Erosions- und Sedimentationsmuster klar beeinflussen. Darüber hinaus spielen auch die verwendeten, zum Teil empirischen Modellparameter eine Rolle; besonders seien hier die verwendete Sedimenttransportformel, die dazugehörigen Parameter, die Bodenrauigkeit und die Auflösung des Gitters genannt. Als Sedimenttransportformel wurden zunächst unterschiedliche Formeln verwendet (Meyer-Peter und Müller, 1948; Van Rijn, 1993; Van Rijn et al., 2004). Die optimale, mit den gemessenen DGM-W-Daten vergleichbare Bodenentwicklung wurde mit der Transportformel nach Meyer-Peter und Müller (1948) erreicht.

7.1.1.2 Großräumige Sedimenttransporte

Die kumulierten Sedimenttransporte an den offenen Rändern im Wattbereich und dem Seegat zeigen klare Unterschiede zwischen den beiden initialen Sedimentverteilungen (Abb. 41). Der kumulierte Sedimenttransport hängt nicht nur von der Anfangsverteilung der Sedimente ab, sondern auch von den in jedem Zeitschritt berechneten morphologischen Änderungen und damit verbundenen Aktualisierungen der Sedimentverteilung im oberen Bodenkörper.

An allen drei Querschnitten (Watt-West, Seegat und Watt-Ost) tritt bei Verwendung der Kombi-Daten ein höherer Sedimenttransport im Vergleich zum AufMod-Datensatz auf, obwohl beide eine ähnliche Tendenz aufweisen. Dies ist vermutlich auf den höheren Schluff- und Feinanteil im Sohlsediment zurückzuführen (siehe Fraktion 1 in Abb. 31 und Sediment Mud in Abb. 32), da dieser am mobilsten ist und damit höhere Transportraten zur Folge hat.

Am Seegat ist der Gezeiten-Einfluss auf den Sedimenttransport besonders dominant, da hier in Abhängigkeit des Wasserstandes stärkere Strömungen kombiniert mit Wellen auftreten und damit der höchste Sedimenttransport in den beiden Sedimentverteilungen beobachtet werden kann (Abb. 41c). Hinsichtlich der Nettoveränderung des Sedimenttransportes im Watt-Becken (Abb. 41d) zeigt sich, dass der Wattbereich im Juli 2017 eine negative Sedimentbilanz aufweist.

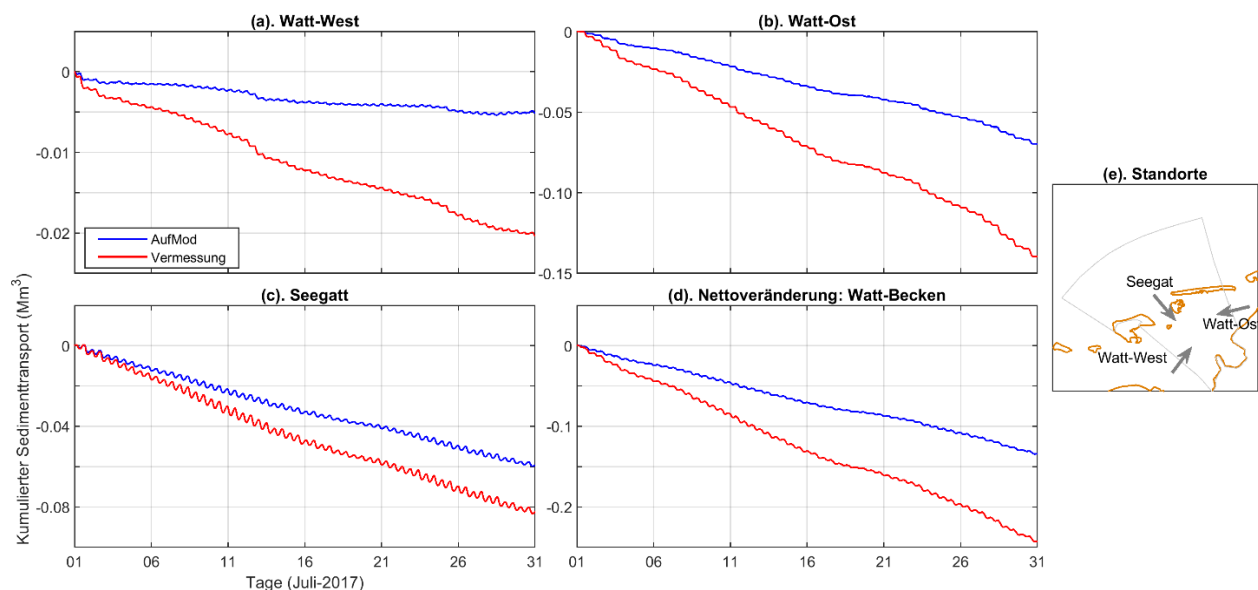


Abb. 41: Kumulativer Sedimenttransport an den offenen Rändern auf der Watt-Seite: (a) Watt-West, (b) Watt-Ost, (c) Seegat, (d) Nettoveränderung des Sedimenttransportvolumen. Blau: AufMod-Daten, rot: Kombi-Daten. Die Pfeile zeigen die positive Richtung des Sedimenttransports (e).

7.1.1.3 Reproduktion der Trübungsentwicklung

Die beobachtete Trübung aus Fernerkundungsdaten wurde mit den numerisch berechneten Schwebstoffkonzentrationen der obersten vertikalen Schicht verglichen. Da die instantanen Schwebstoffkonzentrationen mehr das Ergebnis lokaler Erosion an der Gewässersohle sind, dient der direkte Vergleich zum einen der Validierung des numerischen Modells, zum anderen aber auch der Eignung der ermittelten Oberflächenverteilung aus Fernerkundung und Hydroakustik. Für den Vergleich konnte ein Zeitpunkt am 17. Juli 2017 um 12:45 Uhr entsprechend der Verfügbarkeit und Eignung der Fernerkundungsdaten ausgewählt werden. Zu diesem Zeitpunkt herrscht Niedrigwasser im Watt-Bereich, seewärts der Inseln bereits Flut bei nordwestlichem Wind (7,2 m/s).

Die abgeleiteten Trübungsinformationen aus den Fernerkundungsdaten sind auf Grund von Wolkenbedeckung nicht im kompletten Tidebecken verfügbar (Abb. 42a). Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die Modellergebnisse daher maskiert, um eine identische räumliche Ausdehnung darzustellen (Abb. 42b&c). Die Fernerkundungsdaten zeigen hohe Werte im Tidebecken, besonders dort, wo die Hauptpriele sich verästeln, und niedrigere Werte seewärts der Inseln.

Innerhalb des Tidebeckens zeigen die Schwebstoffkonzentrationen aus den Fernerkundungsdaten und den mit dem Modell berechneten ein ähnliches Muster. Dies gilt sowohl in der horizontalen Ausdehnung als auch in den absoluten Werten (Mittelwert ~ 70 mg/l). Am Ende des Hauptprieis am Übergang zum eulitoral Bereich sind im Modell etwas höhere Werte berechnet worden. In diesen Bereichen hängt die Schwebstoffkonzentration allerdings direkt von der Reproduktion des Seegangs ab. Hier können schon geringe Änderungen einen deutlichen Einfluss auf die lokalen Sedimentkonzentrationen haben. Der Transport muss dabei aber nicht direkt betroffen sein, da es sich um kurzfristige Ereignisse handelt.

Seewärts der Insel Borkum zeigen die abgeleiteten Konzentrationen aus der Fernerkundung höhere Werte als in der Modellierung. Da sich der Bereich in nächster Nähe zum Modellrand befindet, ist eine eindeutige Übereinstimmung nicht zu erwarten. Mit etwas Abstand zum Modellrand reproduziert das Modell ebenfalls nahezu identische Konzentrationen ($\sim 20-30$ mg/l).

Grundsätzlich ist festzustellen, dass eine auf Basis der Kombi-Daten aus Fernerkundung und Hydrakustik abgeleitete, initiale Oberflächensedimentverteilung auch zu einer plausiblen Reproduktion der Schwebstoffkonzentrationsverteilung im oberen Bereich der Wassersäule führt. Der Modellvergleich mit der nur aus AufMod-Daten bestehenden Anfangsverteilung führt zu einer zu geringen Schwebstoffkonzentration im gesamten Wattbereich und seewärts der Inseln. Langfristig führt dies zu einer Unterschätzung der großräumigen Sedimenttransporte und schlussendlich der langfristigen Prognosefähigkeit hinsichtlich morphologischer Änderungen/Anpassungen.

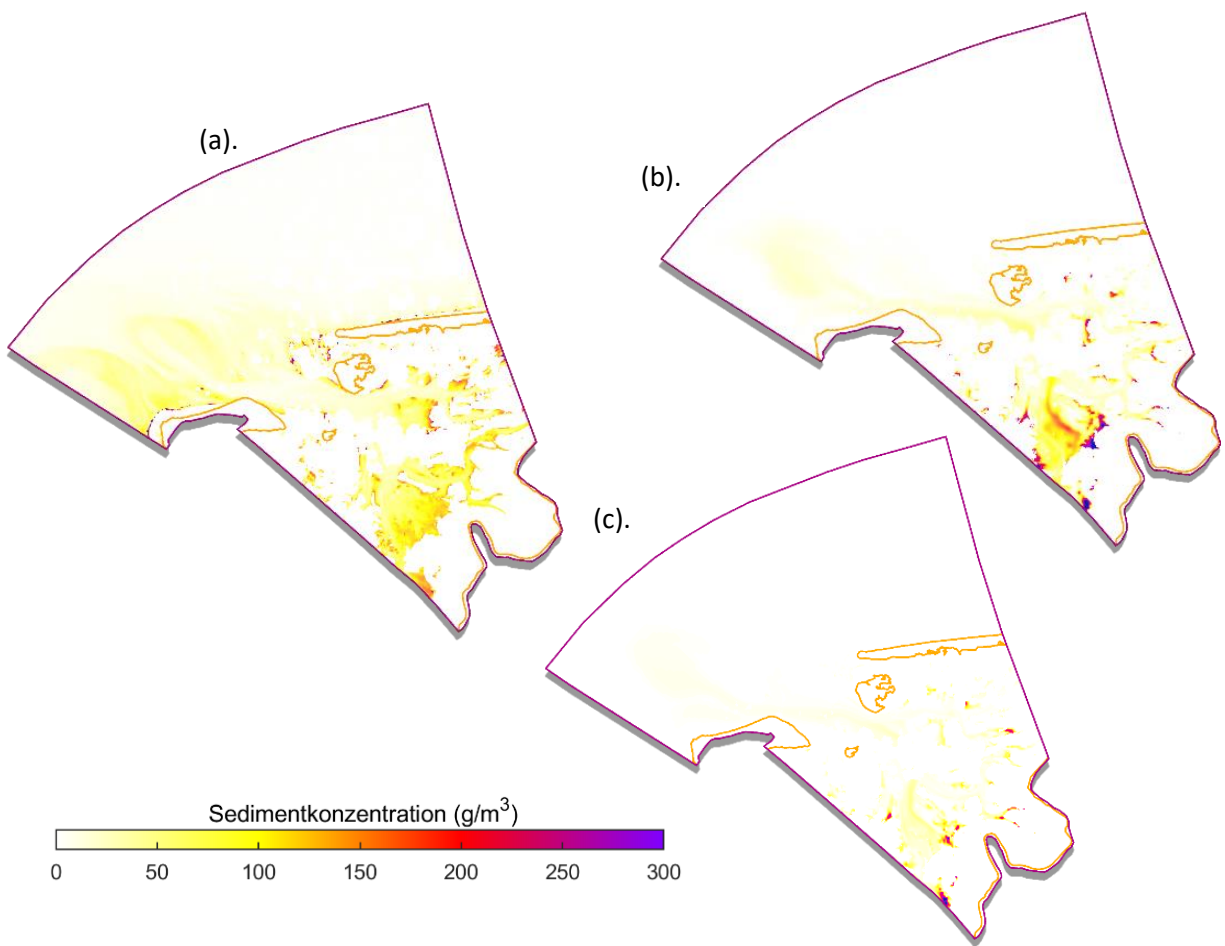


Abb. 42: Vergleich zwischen den beobachteten und den berechneten Schwebstoffkonzentrationen am 17. Juli 2017 um 12:45 Uhr. Die beobachteten Daten aus Fernerkundung (a), Modellauf mit Oberflächensedimenten aus Kombi-Daten (b), Modell ausschließlich mit den AufMod-Sedimentdaten (c).

Der Unterschied zwischen Beobachtung und Modellvorhersage kann von vielen Faktoren sowohl in der Auswertung der Satellitenaufnahmen als auch den genutzten Modelleinstellungen abhängig sein. Auch, wenn eine Bodenverifikation der ausgewerteten Satellitenaufnahmen mittels Sedimentproben durchgeführt wurde (Scholze et al., 2025), sind in der räumlichen Ausdehnung fehlerhafte Werte auf Grund der großen Variabilität der Sedimentzusammensetzung unvermeidbar. In der Modellierung können vom Modellaufbau bis hin zur Einstellung der physikalischen Prozesse viele Faktoren das finale Ergebnis beeinflussen. So kann selbst eine hohe Gitter-Auflösung von 30 m kleinräumige bathymetrische Änderungen nicht auflösen. Die verwendete Bathymetrie basiert auf dem gemessenen DGM-W aus dem Jahr 2015; für das betrachtete Jahr 2017 wurden keine neuen Daten erfasst. Die prognostizierte Hydrodynamik (Wasserstand, Wellen und Strömungen) entspricht einer höheren Genauigkeit und stimmt daher nicht vollumfänglich mit den gemessenen Daten überein. Im verwendeten Modell wird der Einfluss der Trübung im Ems-Ästuar auf die Trübung in den angrenzenden, speziell seewärtigen Gebieten nicht simuliert. Dementsprechend können niedrigere Trübungswerte nördlich der Inseln erwartet werden. Zusätzlich zeigt die durchgeführte Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Sedimenttransportformeln und der dazugehörigen Parameter, dass die Trübung je nach gewählter Formel stark variieren kann. Der für die WASCO-Analysen gewählte

Modellansatz ist jedoch genau genug, um den Einfluss zweier unterschiedlicher Sedimentverteilungen auf die Trübung zu untersuchen und die Bedeutung und Wichtigkeit des Einsatzes einer genauen Sedimentverteilung in Form von kombinierten Fernerkundungs- und Hydroakustik-Daten darzustellen und zu unterstreichen.

7.1.2 Untersuchungsgebiet Föhr-Amrum-Sylt (FAS)

Wie bereits im OEMS-Modell wurde das FAS-Modell über einen Monat mit einer morphologischen Beschleunigung von 12 simuliert, um auftretende einjährige morphologische Änderungen zu untersuchen. Der ausgewählte Betrachtungszeitraum liegt im April 2018, für welchen je nach Verfügbarkeit die verwendeten Randbedingungen ausgewählt wurden. Erosions- und Sedimentationsmuster, Sedimentvolumen und Sedimenttransport wurden wie auch im OEMS-Modell ausgewertet, um den Einfluss der Sedimentverteilung auf die morphologischen Änderungen zu beschreiben. Ebenfalls wurde die im Modell berechnete Trübungsentwicklung mit beobachteten Daten aus der Fernerkundung verglichen.

7.1.2.1 Langfristige morphologische Entwicklung

Für die qualitative und quantitative morphodynamische Modellvalidierung für das FAS-Gebiet lagen keine weiteren digitalen Geländemodelle zur Verfügung. Daher wurde die vorhergesagte, einjährige morphologische Entwicklung zwischen den reinen AufMod-Daten und den Kombi-Daten verglichen (Abb. 43), um den Einfluss zweier unterschiedlicher Sedimentverteilungen auf die morphologischen Änderungen auszuwerten. Vor allem entlang der Hauptpriele Hörnumtief zwischen Sylt und Amrum und Norderaue zwischen Föhr und Langeneß zeigen die Ergebnisse basierend auf den Kombi-Daten sowohl eine stärkere Erosion wie auch Sedimentation als die AufMod-Daten. Begünstigt durch die starke Erosion ist eine Sedimentation im Vorstrandbereich von Amrum und den angrenzenden Watten zu verzeichnen. Im Seegat zwischen Sylt und Amrum sowie im Wattbereich des Hörnumtiefs gibt es nur geringe Änderungen in den Kombi-Daten im Vergleich zum AufMod-Datensatz, bei dem in diesem Bereich ein grober Sedimentanteil verfügbar ist (Fraktion 12 in Abb. 35 und Sediment 4000 in Abb. 36). Auf dem Riffbogen, insbesondere im nordwestlichen Bereich, findet man bei Betrachtung der Kombi-Daten ebenfalls ein stärkeres Sedimentationsmuster als bei den AufMod-Daten. In beiden Sedimentverteilungen ist nur geringfügige Erosion auf den Platen aufgetreten.

Im Allgemeinen zeigen beide Modellergebnisse eine ausgeprägte Sedimentation im Hörnumtief und mehr Erosion im Bereich der Norderaue, was auch in den Untersuchungen von Miao et al. (2025) so herausgearbeitet wurde. Dieser erste Vergleich zeigt, dass die angewendeten Sedimentverteilungen zur morphologischen Modellierung im FAS-Gebiet einen Einfluss auf die Bodenentwicklung haben und dass das vorhersagte Erosions- und Sedimentationsmuster im Tidebecken eine qualitative Übereinstimmung mit bereits vorhandenen, unabhängigen Untersuchungen aufweist.

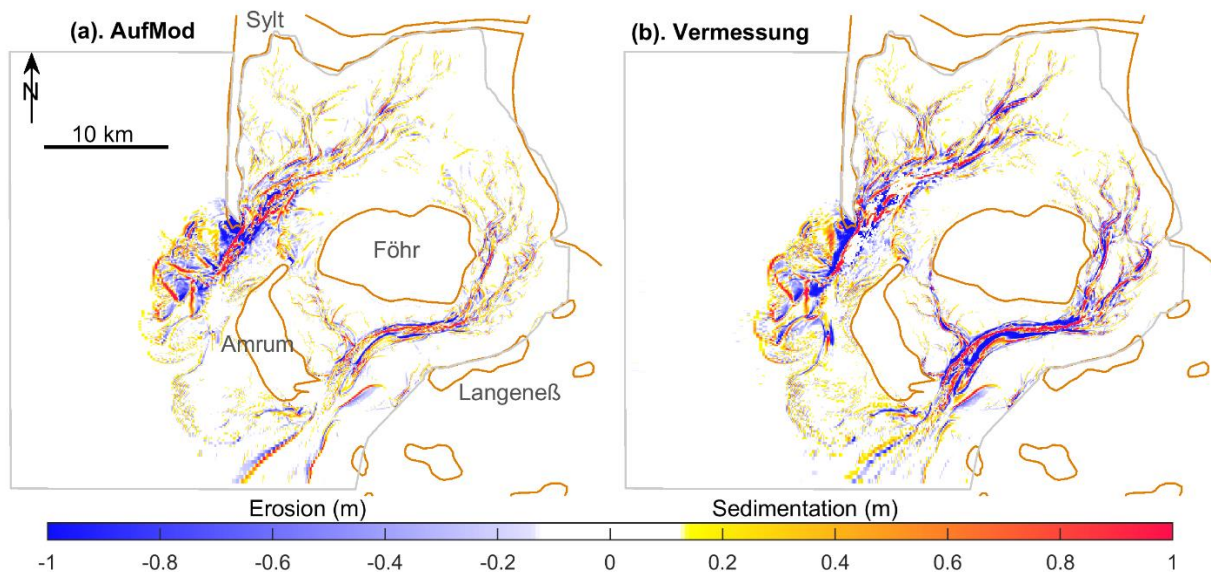


Abb. 43: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters bei einjährige Modellvorhersage über das Jahr 2018. (a) AufMod-Daten, (b) Kombi-Daten.

Um den Unterschied zwischen den Sedimentverteilungen besser darzustellen, sind die morphologischen Bodenentwicklungen an vier beispielhaft ausgewählten Standorten verglichen worden (Abb. 44): (A) Seegat, (B) östlich von Rantum, (C) südlich vom Hindenburgdamm und (D) zwischen Föhr und Langeneß. Im Seegat sind bei Verwendung der AufMod-Daten mehr Erosions- wie auch Sedimentationsflächen vorhanden als bei Nutzung der Kombi-Daten. In den Flächen mit der größten Sedimentfraktion (Sediment 4000 in Abb. 36) in den Kombi-Daten gibt es nur geringe Änderungen, jedoch ist mehr Sedimentation sowohl im westlichen als auch im südlichen Gebiet des Riffgats erkennbar. Östlich von Rantum zeigt sich ein fast ähnliches Erosionsmuster in beiden Sedimentverteilungen. Die Ergebnisse basierend auf den Kombi-Daten zeigen eine stärkere Erosion im südlichen Bereich sowie stärkere Sedimentation entlang der Priele verglichen zum AufMod-Datensatz. Betrachtet man die natürliche Umgebung mit Flora und Fauna, kann dort auch mit einer Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit gerechnet werden, was wiederum eine erhöhte Sedimentation ermöglicht. Ähnliche Merkmale sind südlich des Hindenburgdamms erkennbar; die Kombi-Daten zeigen auch hier eine erhöhte Sedimentation. Zwischen Insel Föhr und Hallig Langeneß zeigen sich stärkere Erosions- wie auch Sedimentationsflächen bei den verwendeten Kombi-Daten im Vergleich zum reinen AufMod-Ansatz. Dementsprechend besteht die Sedimentverteilung der Kombi-Daten aus mehr Feinanteilen, welche schneller erodierbar sind.

Sowohl in den AufMod-Daten als auch in den Kombi-Daten zeigt sich, dass sich die erodierten Sedimente der Platen und Prielränder scheinbar in den nahegelegenen Priele wieder abgelagert haben. Die Wassertiefe der Hauptpriele bleibt jedoch unverändert, was für geringere Ablagerungen spricht. Diese Prozesse sind deutlicher in den Kombi-Daten, welche im Vergleich zu den AufMod-Daten einen höheren Feinanteil besitzen, erkennbar. Die größten Änderungen sowohl am Riffbogen als auch den Hauptpriele traten während der Sturmperiode am 05. April 2018 (Abb. 34c) auf, in den Wattbereichen gab es die größten Veränderungen zum Zeitpunkt der Springfluten wie beispielsweise am 03. oder auch 18. April 2018 (Abb. 34a).

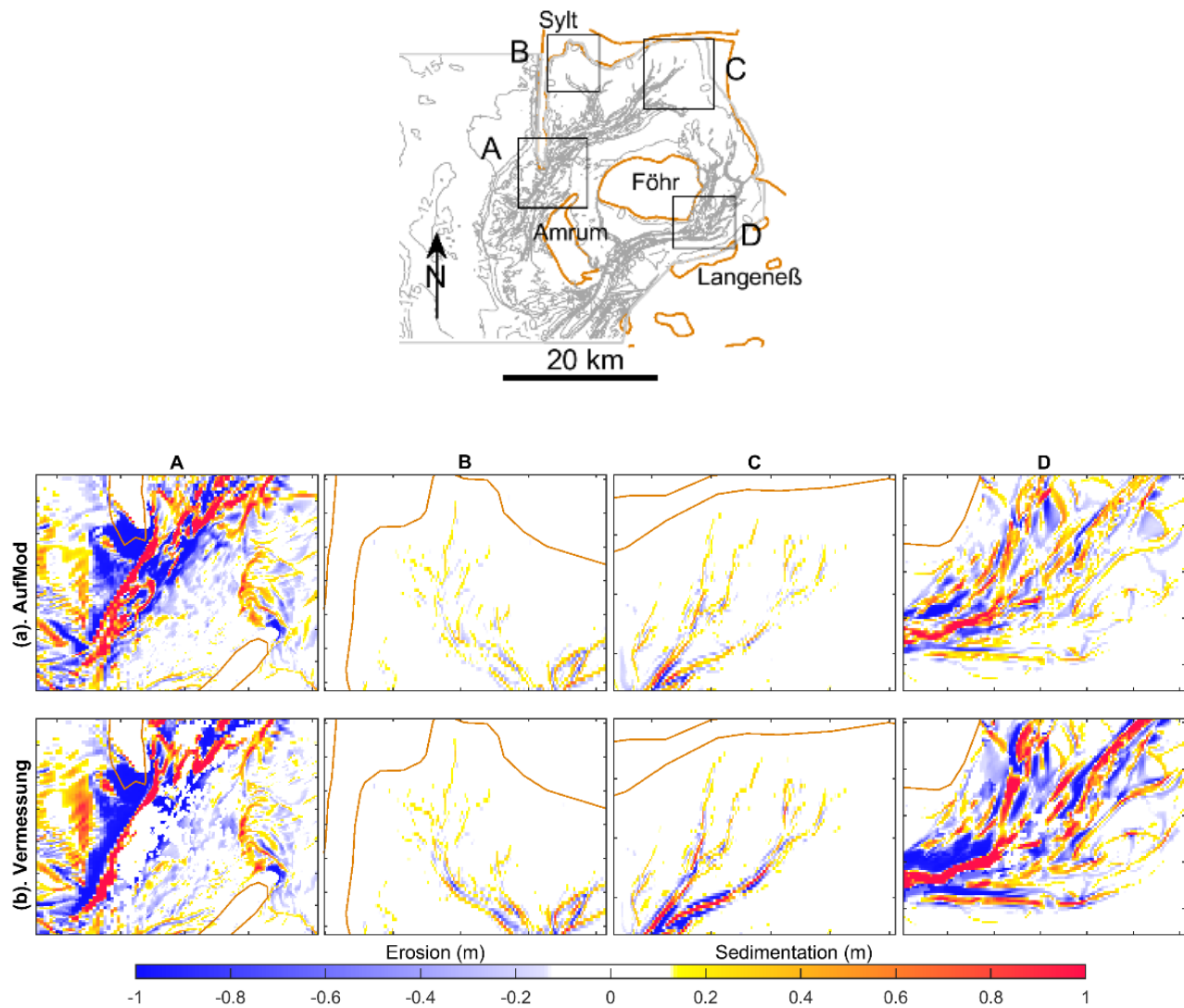


Abb. 44: Vergleich des Erosions- und Sedimentationsmusters an den ausgewählten Standorten: (A) Seegat, (B) östlich von Rantum, (C) südlich vom Hindenburgdamm und (D) zwischen Föhr und Langeneß. Einjährige Modellvorhersage über das Jahr 2018: (a) AufMod-Daten, (b) Kombi-Daten.

Die erodierten und abgelagerten Sedimentvolumen in der kompletten Modelldomäne (Abb. 45) weisen darauf hin, dass sich bei Verwendung der Sedimentverteilung aus den Kombi-Daten im Vergleich zur AufMod-Verteilung eine stärkere Bodenentwicklung ergibt: Es zeigt sich eine um 36 % stärkere Erosion sowie eine um 32 % höhere Sedimentation. Bei Betrachtung der Nettoveränderung (Pastellfarben) zeigt sich, dass Erosion und Sedimentation bei den AufMod-Daten im Gleichgewicht sind. Bei den Kombi-Daten ist ein Teil der erodierten Sedimente (4 %) durch die offenen Modellgrenzen verloren gegangen. Wie bereits erwähnt kann eine starke Bodenentwicklung in den mit höheren Schluff- und Feinanteilen verbundenen Kombi-Daten (siehe Abb. 35 und Abb. 36) erwartet werden, gleichzeitig können diese feinen Sedimentpartikel jedoch auch leichter durch die offenen Modellgrenzen heraustransportiert werden.

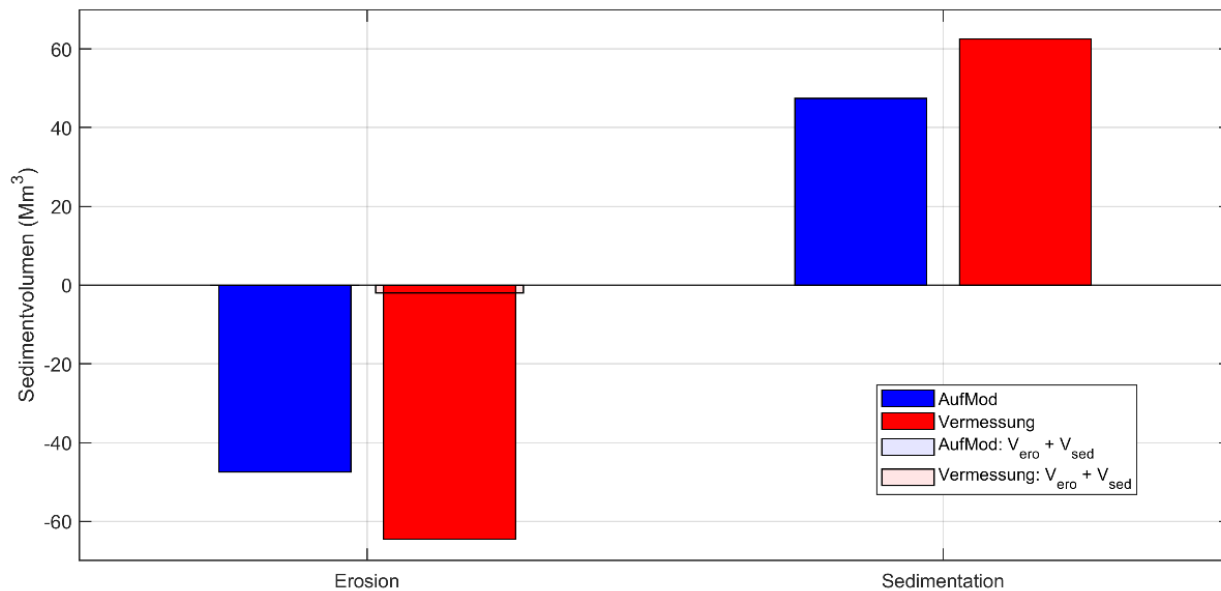


Abb. 45: Vergleich der Änderung von Erosions- und Sedimentations-Sedimentvolumen. Einjährige Modellvorhersage über 2018: AufMod-Daten (blau) und Kombi-Daten (rot). Pastellfarben zeigen die dazugehörigen Nettoveränderungen.

Die einjährige morphologische Vorhersage deutet darauf hin, dass es im südlichen Bereich des Tidebeckens, anders als im nördlichen Teil, eine starke Bodenentwicklung in Form von Erosion gegeben hat. Diese Beobachtung gilt für beide betrachteten Sedimentverteilungen, auch wenn die Verwendung der Kombi-Daten auf Grund des höheren Feinanteils eine höhere Bodenentwicklung zeigt als die AufMod-Daten. Die Analyse der Bathymetriedaten von 1998 bis 2016 zeigt im Vergleich zum südlichen Teil des Tidebeckens hingegen eine höhere Erosion sowie eine ausgeprägtere Bodendynamik im nördlichen Bereich (Benninghoff und Winter, 2019). Eine Studie basierend auf Bathymetriedaten der Jahre 1998 bis 2022 zeigt im südlichen Bereich eine ausgeprägtere Bodendynamik als im nördlichen Teil (Miao et al., 2025). Diese langfristige morphologische Änderung stimmt qualitativ mit der aktuellen Modellvorhersage überein, welche eine ähnliche Tendenz zeigt. Hierzu ist anzumerken, dass das FAS-Modell nur über einen Sommermonat simuliert wurde, weshalb saisonale Änderungen der Randbedingungen nicht berücksichtigt werden. Im Winter treten hohe Wasserstände und höhere Wellenhöhen auf als im Sommer, was zu einer stärkeren Strömung und einem damit einhergehenden gesteigerten Sedimenttransport mit resultierender Bodenentwicklung führt. Wie bereits bei den OEMS-Ergebnissen erwähnt, sollten für den Betrachtungszeitraum repräsentative Randbedingungen gewählt werden, um die einjährige oder auch langfristige morphologische Entwicklung zu simulieren.

7.1.2.2 Großräumige Sedimenttransporte

Die kumulierten Sedimenttransporte am Seegat (Abb. 46a) sowie den ausgewählten Querschnitten im Wattbereich (Abb. 46b-e) zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Sedimentkarten von AufMod und denen basierend auf den Kombi-Daten (Abb. 46). Wie zuvor herausgestellt hängt der kumulierte Sedimenttransport nicht nur von der initialen Sedimentverteilung, sondern auch von den in jedem Zeitschritt berechneten morphologischen Änderungen und der sich daraus ergebenden neuen Sedimentverteilung ab.

Obwohl die Kombi-Daten höhere Transporte an allen Querschnitten zeigen, weisen beide Sedimentverteilungen eine ähnliche Tendenz auf. Der Sedimentverlust am Seegat ist in den Kombi-

Daten mehr als doppelt so hoch verglichen zu den AufMod-Daten, welche an der Position den höchsten Sedimenttransport aller Querschnitte zeigen. An Position Watt 1 findet ein Sedimenttransport in östliche Richtung statt. Die Sensitivität des Transports zur Tidebewegung ist in den Kombi-Daten, bedingt durch die feineren Sedimente (Abb. 35 und Abb. 36), deutlich höher als in den AufMod-Daten. An den übrigen Querschnitten zeigt sich ein Sedimenttransport in das Wattenmeer; an Position Watt 2 und Watt 4 in nördliche Richtung, an Position Watt 3 in östliche Richtung. Position Watt 2 und Watt 3 weisen dabei einen mehr als dreifachen Sedimenttransport in den Kombi-Daten verglichen zu den AufMod-Daten auf. Einen ähnlichen Unterschied zeigt auch die Nettoveränderung im Wattbecken (Abb. 46f). Es scheint, dass der Sedimenttransport rund um die Insel Föhr eine Drehung gegen den Uhrzeigesinn vollzieht. Auf Grund des geringeren Anteils verfügbarer Feinsedimente ist der Sedimenttransport an den Positionen Watt 1 und Watt 4 in beiden Sedimentverteilungen um jeweils eine Größenordnung geringer als an den übrigen Querschnitten.

Wie auch in der Sedimentverteilung des OEMS-Modells enthalten die Kombi-Daten einen höheren Schluff-Anteil in den initialen Sedimentdaten (Sediment Mud in Abb. 36) im Vergleich zu den AufMod-Daten (Fraktion 1 in Abb. 35), welcher primär zum Sedimenttransport beiträgt. Daher sind hohe Sedimenttransporte bei der Nutzung der Kombi-Daten zu erwarten. Anders als im OEMS-Gebiet weist die Sedimentverteilung aus Kombi-Daten im FAS-Gebiet nur kleine Lücken auf, weshalb hier der Einfluss auf Sedimenttransport und morphologische Änderungen besser ausgewertet werden kann.

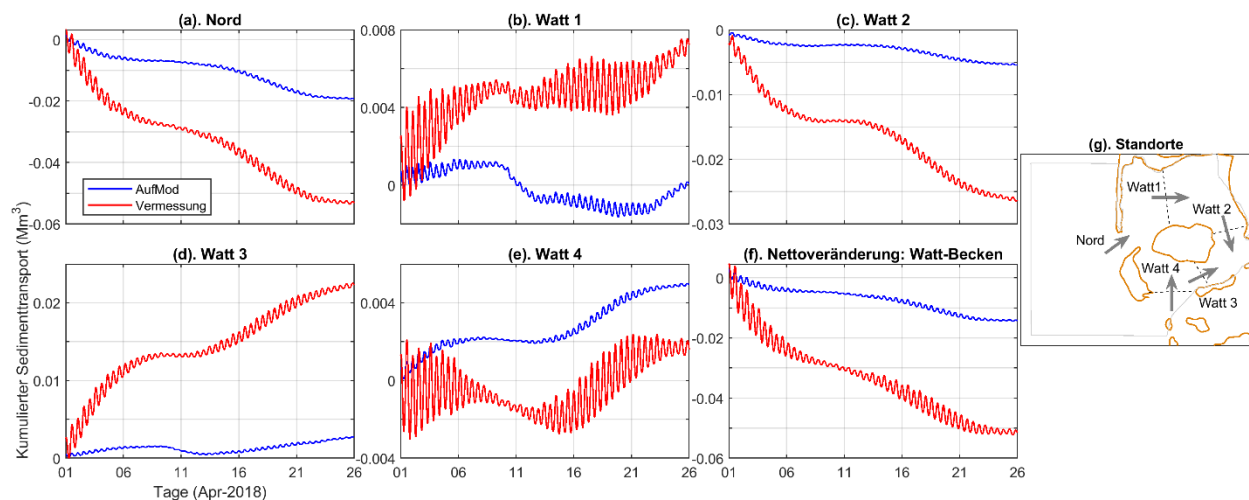


Abb. 46: Kumulativer Sedimenttransport im Wattbereich: (a) Nord, (b) Watt 1, (c) Watt 2. (d) Watt 3, (e) Watt 4 und (f) Nettoveränderung des Sedimenttransportvolumen im Wattbecken. Blau: AufMod-Daten, rot: Kombi-Daten. Die Pfeile zeigen die positive Richtung des Sedimenttransports (g).

Die ausgewerteten Sedimenttransporte an den Querschnitten wurden mit den vorhandenen Studien verglichen. Seit langer Zeit ist bekannt, dass im Hauptpriel zwischen Sylt und Amrum ein seewärtiger Sedimenttransport auftritt (Ahrendt, 1994). Dieses ist in einer aktualisierten Studie mittels numerischer Modellierung überprüft worden (Soares et al., 2025). Nach derzeitigen Ergebnissen tritt auch am Querschnitt Nord ein seewärtiger Sedimenttransport auf. Auch zeigt Soares et al. (2025) mit einer schematisierten Darstellung, dass im Bereich von Watt 1 ein Sedimenttransport in östliche Richtung, wie auch in den WASCO-Modellerggebnissen erkennbar, stattfindet. Im Bereich von Watt 2 gibt es einen Sedimenttransport in Richtung Norden (Siefert et al., 1980; Gräwe et al., 2016; Soares et al., 2025), was

dem WASCO-Transportmuster entspricht. Die Richtung des Sedimenttransports an den Positionen Watt 3 (östlich) und Watt 4 (nördlich) entspricht ebenfalls den Ergebnissen von Soares et al. (2025). Zusammenfassend zeigen die in WASCO erzielten Modellergebnisse hinsichtlich des Sedimenttransports eine gute qualitative Übereinstimmung mit den vorhandenen Studien.

Vergleichbar zu den Analysen des niedersächsischen Untersuchungsgebietes weisen sowohl die Sedimenttransporte als auch die Bodenentwicklung eine klare Abhängigkeit zur verwendeten Sedimentverteilung auf. Um die Plausibilität der Ergebnisse besser auszuwerten ist ein Vergleich mit gemessenen Daten sinnvoll, jedoch standen im Laufe des Projekts keine weitere Datensätze für einen Vergleich zur Verfügung. Aufgrund der vorhandenen Studien und der intuitiven Erkenntnisse zeigen die Ergebnisse basierend auf den Kombi-Daten jedoch eine zuverlässige Bodenentwicklung im Wattbereich (Abb. 45).

7.1.2.3 Reproduktion der Trübungsentwicklung

Wie bereits für das OEMS-Modell wurde die beobachtete Trübung aus Fernerkundungsdaten mit den Modellergebnissen verglichen, um die Vorhersagbarkeit des FAS-Modells mit unterschiedlichen Sedimentverteilungen zu überprüfen. Dazu wurde ein Zeitpunkt am 23. April 2018 um 12:45 Uhr entsprechend der Verfügbarkeit und Eignung der Fernerkundungsdaten ausgewählt. Zu diesem Zeitpunkt herrscht Hochwasser im Tidebecken-Bereich sowie dem nördlichen Seegebiet, im südlichen Seegebiet herrschte Niedrigwasser bei südwestlichem Wind (10,6 m/s). Somit sind im nordöstlichen Tidebecken-Bereich hohe Trübungswerte zu erwarten.

Die Fernerkundungsdaten zeigen eine höhere Trübung im nördlichen Tidebecken (Abb. 47a). Darüber hinaus sind hohe Trübungen entlang Normalnulls erkennbar. Die trockengefallenen Bereiche im Tidebecken besitzen keine Werte. Rund um die Riffgaten sowie vor Amrum zeigt sich eine hohe Trübung, was auch in den Kombi-Daten (Abb. 47b) erkennbar ist. In den nordöstlichen und nördlichen Bereichen gibt es eine hohe Trübung, weiterhin sind hohe Werte vor Amrum, zwischen Amrum und Föhr sowie zwischen Föhr und dem Festland sowohl in den Modelldaten als auch in der Fernerkundung deutlich erkennbar. Allerdings scheint es im Allgemeinen so, dass die Trübung in den Prielen überschätzt und auf den Platen unterschätzt wird. In den Ergebnissen basierend auf den AufMod-Daten sind die Trübungswerte über das komplette Modellgebiet deutlich geringer, einzig der nordöstliche Bereich zeigt vergleichsweise hohe Werte (Abb. 47c). Es zeigt sich auch hier, dass eine Verwendung von Kombi-Daten aus Hydroakustik und Fernerkundung in der Modellierung zu einer deutlich besseren Abbildung der Gewässertrübung führt, was den großen Einfluss der initialen Sedimentverteilung in der Modellierung noch einmal unterstreicht.

Für die Praxis hat diese Untersuchung gezeigt, dass die gemessenen Kombi-Daten eine bessere Grundlage als Eingangsdaten für die numerische Modellierung bieten und die numerische Modellierung der Sedimentverteilung dynamische Prozesse in der Verteilung abbilden kann. Somit stellen sie ein grundsätzlich geeignetes Werkzeug zur Beurteilung von Veränderungen in der Sedimentverteilung dar. Dies führt zu einer wesentlichen höheren Belastbarkeit der Modellergebnisse, was gerade bei Auswirkungsprognosen von wichtiger Bedeutung sein kann.

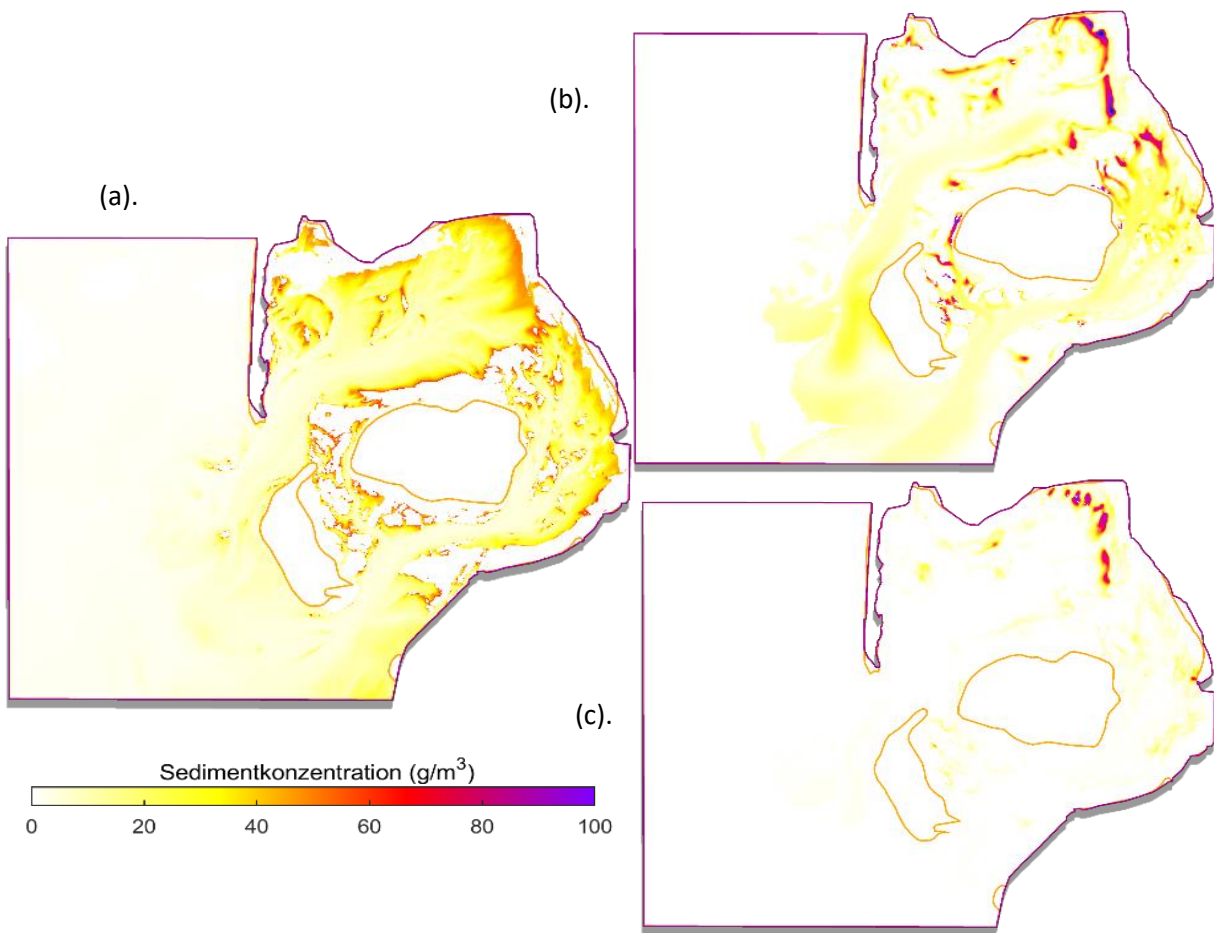


Abb. 47: Vergleich zwischen beobachteter und durch Modellierung vorhergesagter Trübung am 23. April 2018 um 12:45 Uhr. (a) Fernerkundungsdaten, (b) Kombi-Daten, (c) AufMod-Daten.

7.2 Einsatz von Fernerkundung zur Dokumentation morphologischer Entwicklungen

7.2.1 Die Entwicklung der Juister Balje

7.2.1.1 Morphologische Veränderungen

Im Rückseitenwatt von Juist haben sich während der letzten 40 Jahre deutliche Veränderungen vollzogen (Meyer, 2013). Im Rückseitenwatt südlich des Inselhafens kam es zu einer großräumigen Verlandung. Diese führte zu einer veränderten Entwässerung dieses Wattbereiches. Lange Zeit erfolgte die Entwässerung über die Juister Balje. Mit zunehmender Verlandung verlagerte sich die Entwässerung und erfolgt heute über die Memmertbalje. Diese Entwicklung hat auch das heutige Defizit an der Sedimentzufuhr im Bereich des Billriffs zur Folge.

Diese Entwicklung lässt sich mit Hilfe der Satellitendaten seit 1987 gut dokumentieren. Abb. 48 zeigt Einzelaufnahmen zu Niedrigwasserzeiten für die Jahre 1987, 1997, 2006, 2018 und 2025 (~10-Jahres-Intervall). Dabei sind die Aufnahmen von 1987, 1997 und 2006 vom Landsat-5 TM-Sensor, während die Aufnahmen von 2018 und 2025 vom Sentinel-2 MSI-Sensor stammen. Die schwarzen Linien in den Abbildungen zeigen die jeweiligen extrahierten Wasserlinien der entsprechenden Aufnahme. Die

Aufnahme von 1997 weist einen höheren Wasserstand auf und ist daher nicht unmittelbar vergleichbar, wurde aber zwecks der Vollständigkeit der Zeitabstände hinzugenommen. Auf den Satellitenbildern lässt sich der Rückgang und die Verlandung der Juister Balje sehr gut nachvollziehen. Dies verdeutlicht und unterstreicht die Verwendung von Fernerkundungsdaten zur qualitativen Beschreibung von langfristigen und großräumigen morphologischen Prozessen.

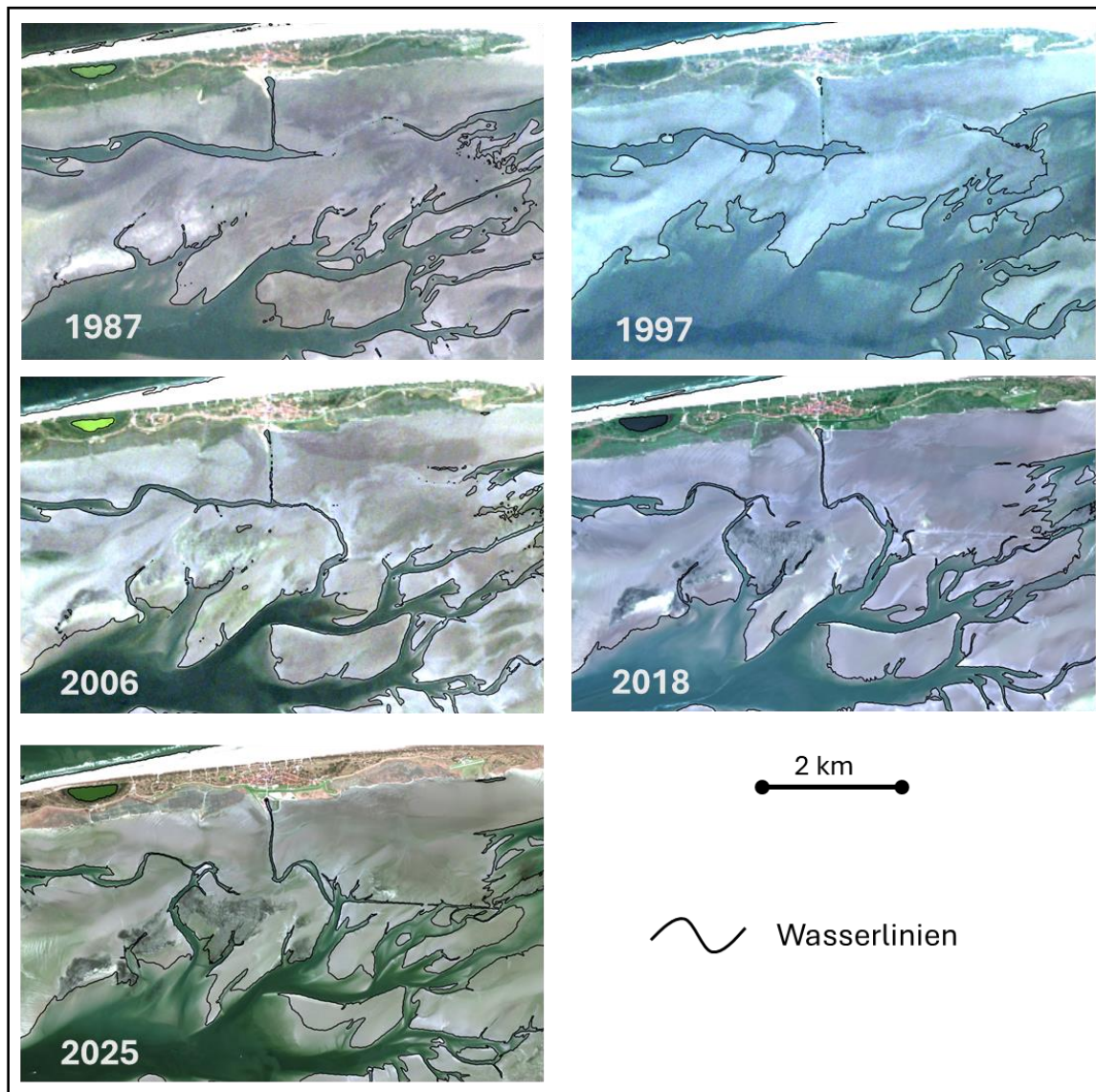


Abb. 48: Veränderung der Prielverläufe im Juister Rückseitenwatt zwischen 1987 und 2025 in ~10-Jahres-Abständen. Die Wasserstände sind nicht alle identisch, insbesondere die Aufnahme von 1997 hat einen höheren Wasserstand als die anderen Aufnahmen, ist aber wegen der vollständigen Zeitreihendarstellung mit aufgenommen worden.

Um die aktuelleren Entwicklungen des Juister Rückseitenwatts zu betrachten, sind alle wolkenfreien Sentinel-2-Aufnahmen aus dem Zeitraum 2017 bis 2024 herangezogen worden, um den Tideflächenindex zu berechnen. Abb. 49 zeigt das Juister Rückseitenwatt, wobei die braunen Flächen seltener überflutet werden als die blauen. Beim Vergleich von 2023/2024 mit dem Zustand 2018/2019 zeigen sich Bereiche, in denen Prielverlagerungen stattgefunden haben (Abb. 50 und Abb. 51). Blaue Bereiche deuten auf Erosion hin, rote Bereiche auf Akkumulation.

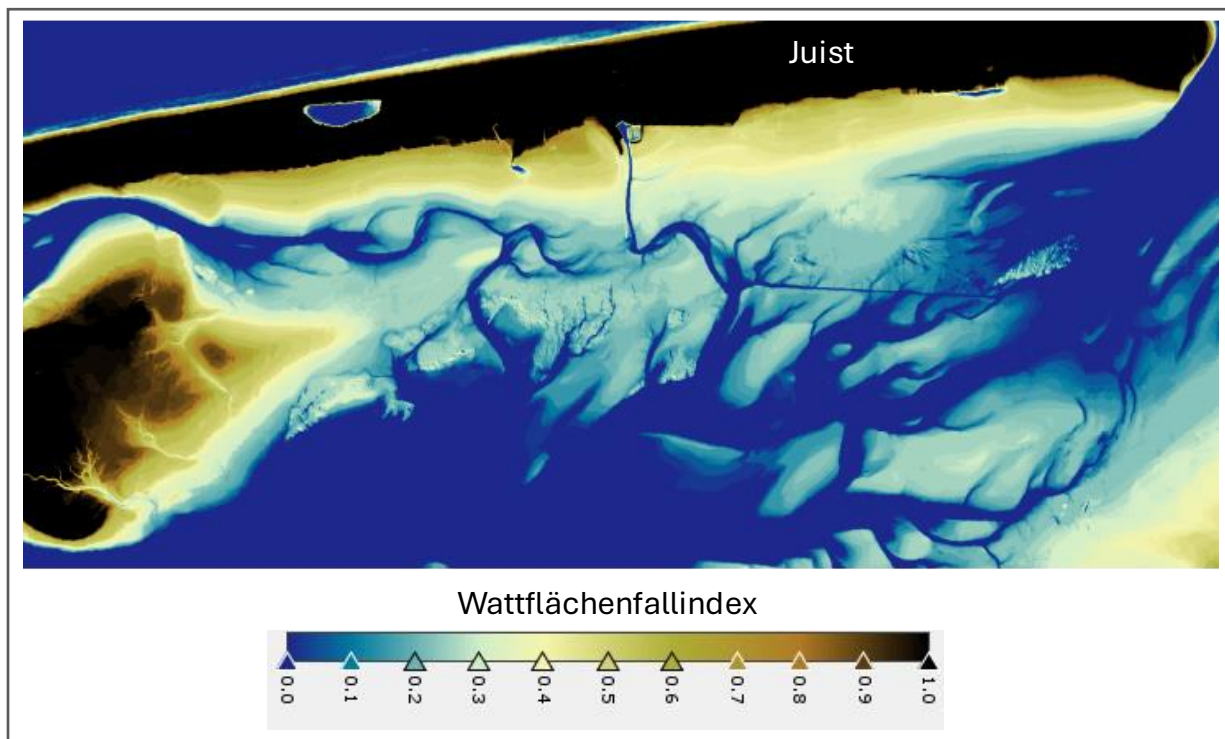


Abb. 49: Wattflächenindex Rückseitenwatt Juist von 2017 – 2024.

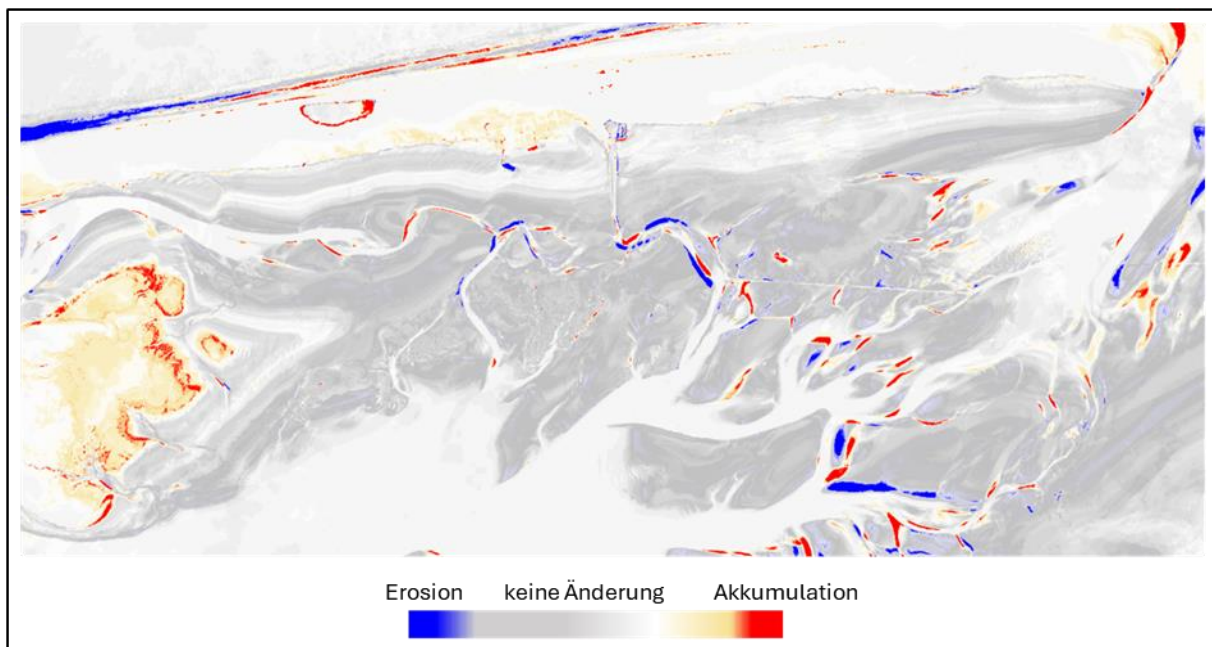


Abb. 50: Änderungen zwischen 2018/2019 und 2022/2024. Blaue Bereiche deuten auf Erosion hin, rote Bereiche auf Akkumulation.

Ein ähnliches Muster zeigt sich beim Vergleich mit der sechsjährigen, gemessenen Entwicklung an den Prielen (Abb. 52).

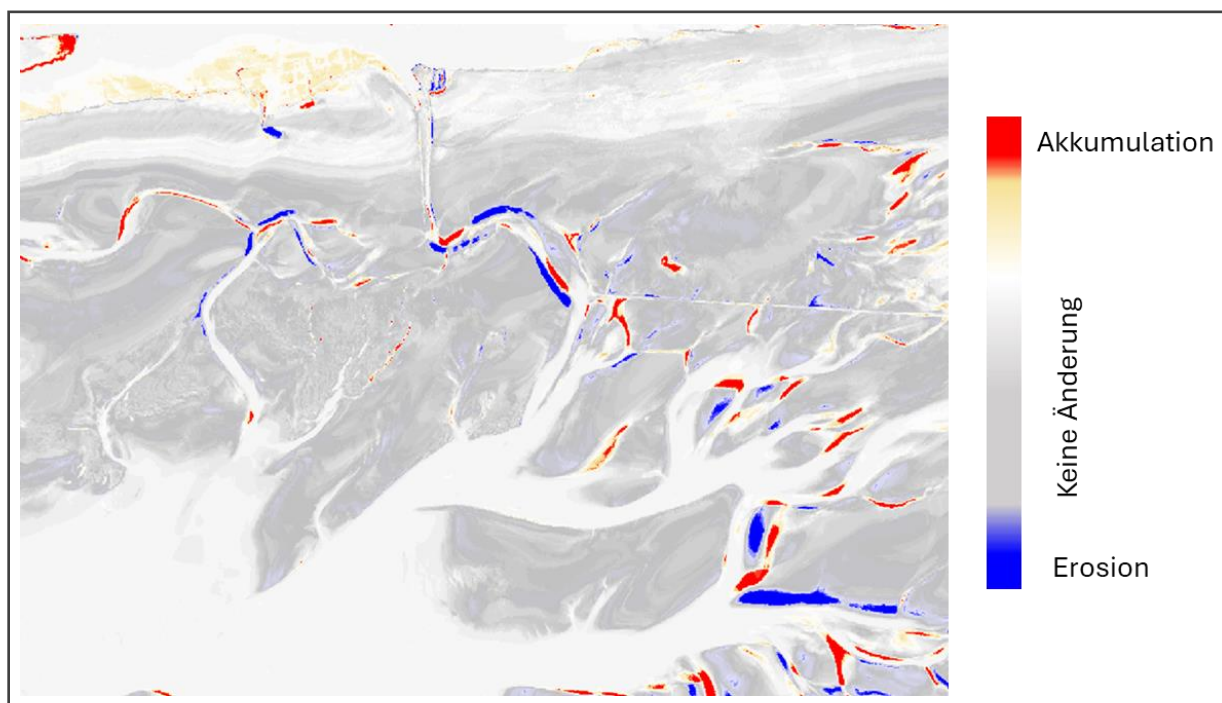


Abb. 51: Erosions- und Akkumulationsbereiche zwischen 2018/2019 und 2023/2024 südlich von Juist aus Sentinel-2-Aufnahmen.

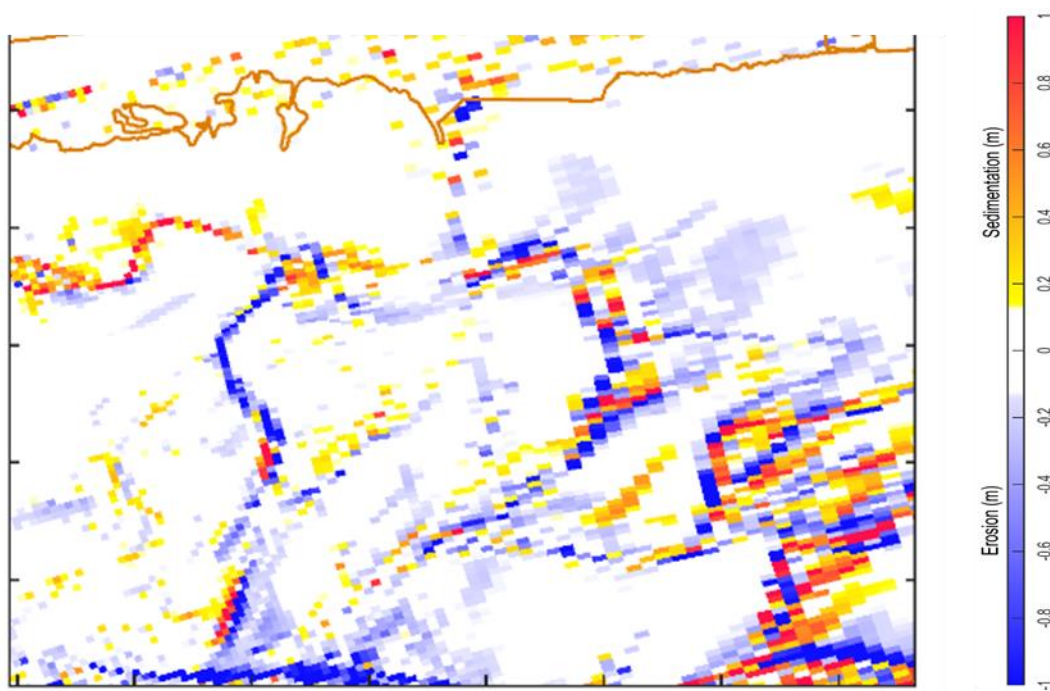


Abb. 52: Erosions- und Akkumulationsbereiche zwischen 2015 und 2021 (sechsjährige Entwicklung aus den DGM-W).

7.2.1.2 Veränderung der Oberflächensedimente im Juister Rückseitenwatt

Aufgrund der deutlichen Veränderung des Prielsystems im Juister Rückseitenwatt wurde auch betrachtet, wie sich die Sedimentverteilung im Gebiet verändert hat. Abb. 53 zeigt die Klassifizierung der Sedimente nach WASCO-Einteilung in Feinsande und Feinsedimente für drei verschiedene Zeiten. Es ist eine Zunahme des Feinsediments (Fraktion $<63\ \mu\text{m}$ $>10\%$) von 2006 bis 2018 im östlichen Bereich südlich von Juist erkennbar sowie eine Zunahme des Feinsediments südlich der Juister Balje. Die Klassifizierung von 2020/2022 bestätigt diese Zunahmen.

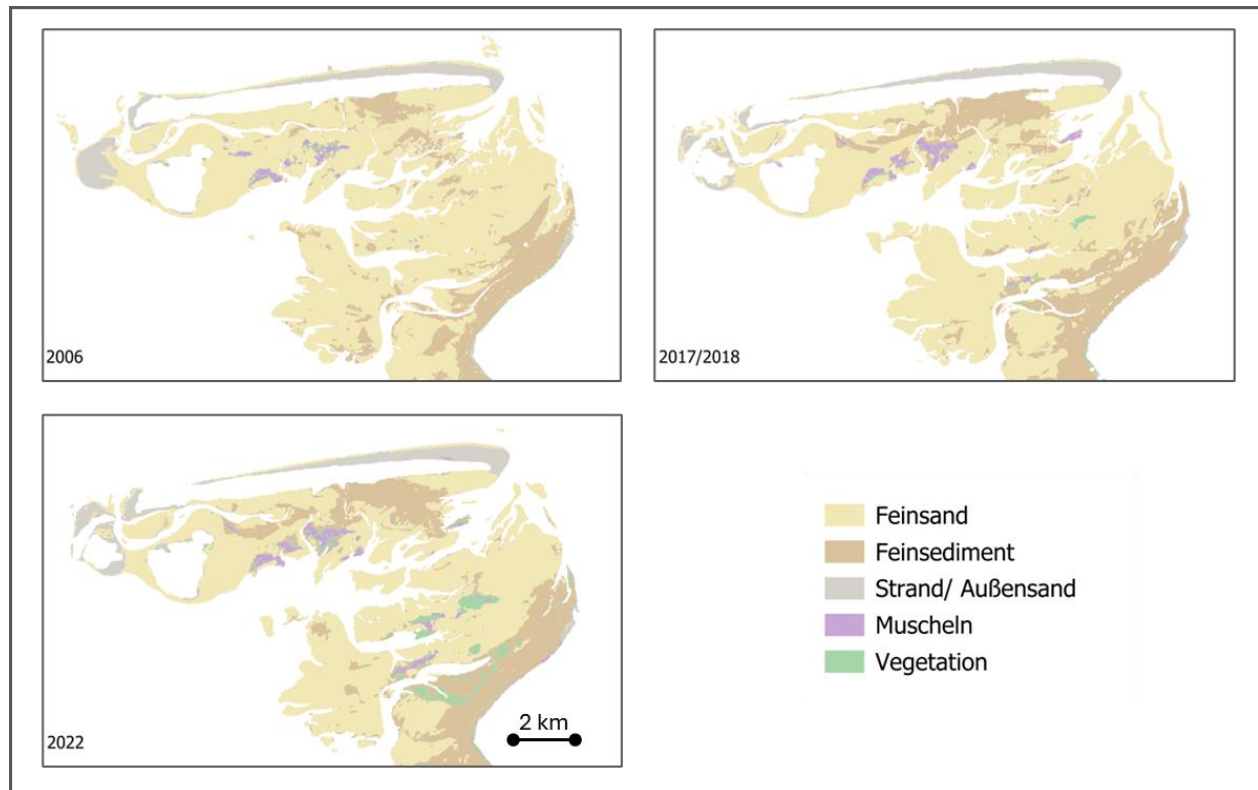


Abb. 53: Sedimentverteilung im Juister Rückseitenwatt für drei verschiedenen Zeitspannen (2006, 2018, 2020/2022).

Aus dieser Darstellung lässt sich ebenfalls feststellen, dass die Oberflächensedimentverteilung aus den Fernerkundungsdaten geeignet sind, um die langfristigen und großräumigen Änderungen in den Sedimentverteilungen zu dokumentieren. Möchte man noch einmal in die detailliertere Klasseneinteilung schauen, bietet sich die feinere Abstufung in optische Klassen an.

7.3 Eignung der Fernerkundung zur Detektion von Seegraswiesen

Seegraswiesen sind wichtige Indikatoren für die Wasserqualität und spielen eine wesentliche Rolle für die Stabilität des Sediments sowie als Lebensraum für Jungfische und benthische Arten. Die Stabilität des Sediments ist ein entscheidender Standortfaktor für die Wiederansiedlung von Seegras. Seegras wird zudem unter anderem durch erhöhte Nährstoffeinträge, Trübung des Wassers, Wellenexposition und starke Strömungen (Dolch et al., 2015). Neben den oben aufgeführten Sedimentinformationen sind für die Analyse dieser Wechselwirkungen Angaben zu Schwebstoffen oder Trübung sowie zur

Verifizierung die durch Begehungen und Befliegungen ausgewiesenen Seegrasflächen und Transektdaten relevant.

In Schleswig-Holstein erfolgt das Seegras-Monitoring am Alfred-Wegener-Institut (AWI) auf List in Form der 1/6-Kartierung (vorliegende Daten: 2015-2022). Das bedeutet, dass jedes Jahr ein anderes Gebiet durch Begehungen kartiert wird, bis nach 6 Jahren alle Seegrasflächen des schleswig-holsteinischen Eulitorals kartiert sind. Bei der 1/6-Kartierung wird die Seegraswiese entlang der 5 %- und 20 %-Bedeckungsgrenze kartiert. Die Merkmale innerhalb dieser Flächen werden durch Transekte erfasst. Die flächenhafte Darstellung der Seegras-Verbreitung beinhaltet neben der Verteilung der Seegrasarten die Bedeckungsgrade in mehr als 5 %, mehr als 20 % und mehr als 60 % (Dolch et al., 2015). Neben der flächenhaften Erfassung liegen auch detaillierte Kartierungen an Transektpunkten vor, die weitere Einteilungen der Seegrasdichte vornehmen und weitere Informationen über den Zustand der Seegraswiesen liefern. Flächenhafte Kartierungsergebnisse wurden für Niedersachsen über MDI-NI für 2003, 2008, 2013 und 2019 bezogen. Neben der Unterscheidung der Seegrasarten werden die Bedeckungsgrade in <1 %, 1-4 %, 5-20 %, 21-40 % und 41-60 % unterteilt. Zudem liegen wie auch in Schleswig-Holstein Daten aus Transektbegehungen vor.

Bei den „Makroalgen“ werden die aus dem Pazifik eingeschleppte Rotalge *Gracilaria vermiculophylla* sowie die Grünalgen der Gattungen *Ulva*, *Enteromorpha* und *Chaetomorpha* unterschieden. In der Regel werden die zwei Algen aufgeführt, die am häufigsten vertreten sind (Dolch et al., 2015).

In Schleswig-Holstein wird seit einigen Jahren eine fernerkundliche Erfassung der Seegraswiesen parallel zur Bodenkartierung durchgeführt. Aus diesen Arbeiten stammen auch die Übersetzung des Vegetationsindizes auf die Dichteklasse der Seegraswiesen (z.B. Stelzer & Smollich, 2023).

In vorangegangenen Arbeiten konnte gezeigt werden, dass Seegraswiesen ab einer Dichte von 40 % gut mit Satellitendaten erfasst werden können. Weisen die Seegraswiesen eine dünnere Bedeckung auf, so zeigen die Ergebnisse höhere Unsicherheiten. Eine Unterscheidung zu Makroalgen ist spektral nicht möglich, aber durch Hinzunahme der zeitlichen Dimension können Makroalgen oft von Seegras unterschieden werden. Ein weitere Verwechslungsgefahr von dünnbesiedelten Seegraswiesen besteht mit dichtem Diatomeenbewuchs. Auch hier ist die Hinzunahme von weiteren Aufnahmen aus der Saison hilfreich, um eine Unterscheidung durchführen zu können.

7.3.1 Analyse der Veränderungen der Seegrasvorkommen im Amrumer Rückseitenwatt

Das Wattegebiet zwischen Amrum und Föhr ist sehr vielfältig. Dies gilt sowohl für die Verteilung von Sedimenttypen als auch für das Vorkommen der verschiedenen Habitate. Während im Amrumer Rückseitenwatt, insbesondere im Südwesten, durch die strömungsberuhigte Lage eher Feinsedimente vorherrschen, kommen auf den ausgedehnten Wattflächen hin zu den großen Prielsystemen überwiegend Feinsande vor. Abb. 54 zeigt die Sedimentverteilung aus der Klassifizierung mehrerer Landsat-Aufnahmen im Zeitraum 2020 – 2022. Es handelt sich hierbei um Aufnahmen vornehmlich aus dem Frühjahr.

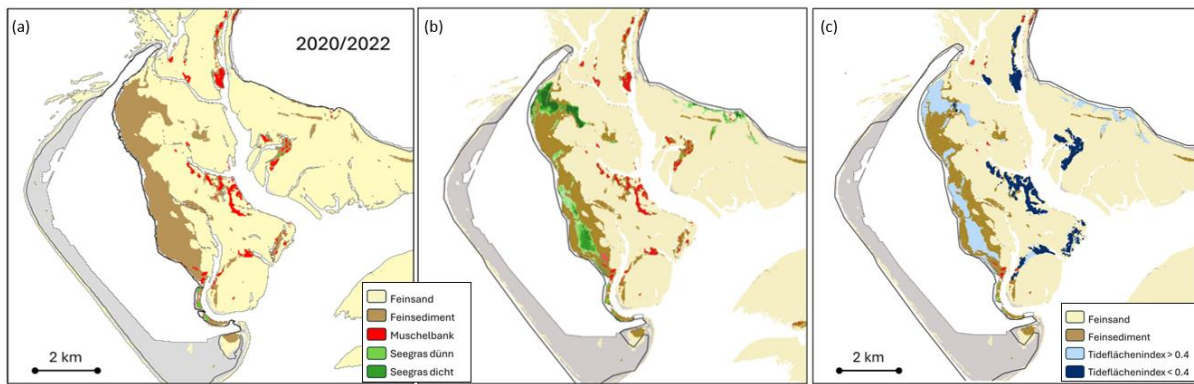


Abb. 54: Sedimentverteilung im Wattgebiet (a) ohne Seegras, (b) mit Seegrasvorkommen (Stand 2021) und (c) Überflutungshäufigkeit (Tideflächenindex) von Seegraswiesen (hellblau) und Muschelbänken (dunkelblau) zwischen Amrum und Föhr. Klassifizierung von Landsat-Aufnahmen im Zeitraum 2020 – 2022 (ohne Sommeraufnahmen).

Auf den höhergelegenen und geschützten Flächen kommen im Amrumer Rückseitenwatt und an der Küste von Föhr Seegraswiesen vor. In den tiefer gelegenen Bereichen befinden sich zahlreiche Muschel- und Austernbänke. In Abb. 54b und Abb. 54c sind die Seegrasflächen und Muschelbänke in Abhängigkeit ihrer Überflutungshäufigkeit dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Seegraswiesen seltener überflutet werden (Tideflächenindex > 0.4) als die Muschelbänke (Tideflächenindex < 0.4). Dies bedeutet, dass die Seegraswiesen in der Regel in weniger als 40 % der Aufnahmen überflutet waren, während die Muschelbänke in mehr als 40 % der verwendeten Aufnahmen überflutet waren.

Die Entwicklung der Seegraswiesen im Amrumer Rückseitenwatt der letzten zehn Jahre zeigt, dass sowohl die Dichte als auch die Ausdehnung, mit Ausnahme vom Jahr 2023, abnehmen (Abb. 55).

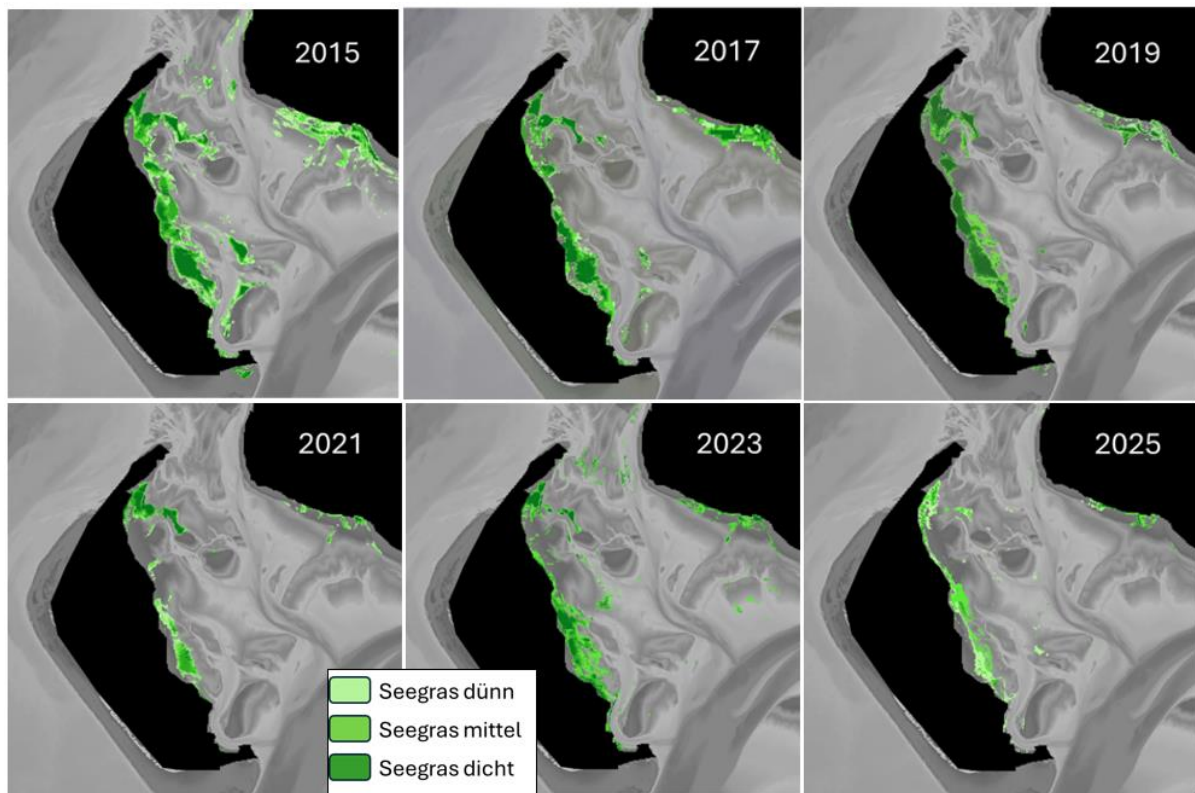


Abb. 55: Entwicklung der Seegraswiese des Amrumer Rückseitenwatts, dargestellt im zwei-Jahres-Rhythmus. Klassifizierungen von Sentinel-2- und Landsat-8/9-Aufnahmen. Hintergrundbild: Bathymetrie 2020 (BAW 2022, Lepper et al. 2025).

In dem betrachteten Gebiet gab es in 2015 und in 2021 jeweils Geländeerhebungen durch die 1/6-Kartierung des Seegrasmonitoring (durchgeführt durch T. Dolch, AWI). Die Umrandung der Seegraswiesen mit einer Dichte >20 % sind in Abb. 56 über die Seegraskartierung gelegt. Es ist auch hier erkennbar, dass eine Abnahme der Ausdehnung zwischen 2015 und 2021 vorhanden ist. Es fällt aber auch auf, dass die Seegrasklassifizierung aus den Satellitendaten nicht alle Flächen erfasst, die im Gelände als Seegraswiese kartiert wurde. Dies deutet darauf hin, dass hier die untere Erfassungsgrenze der Satellitenauswertung erreicht ist.

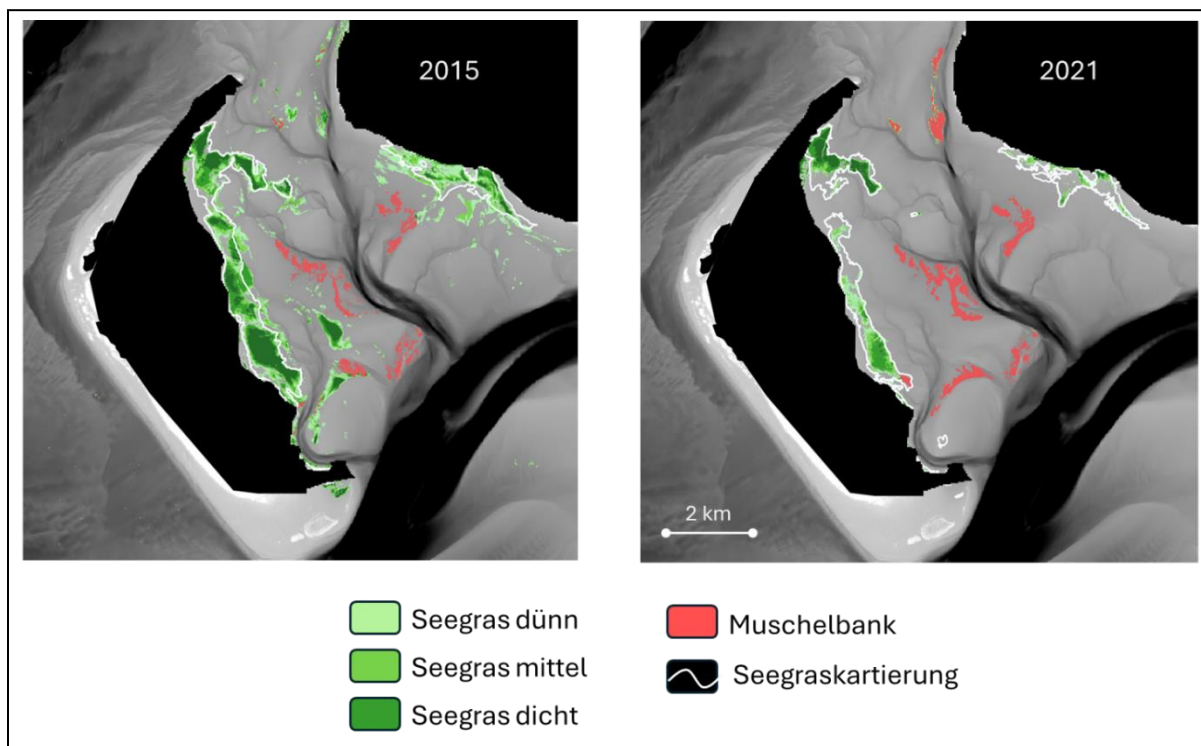


Abb. 56: Seegrassklassifizierung von 2015 (links) und 2021 (rechts), überlagert mit der Seegrassumrandung 20% aus dem Seegrassmonitoring. Geländeaufnahme: AWI, Hintergrundbild: Bathymetrie 2020 (BAW 2022, Lepper et al. 2025).

Auf der Suche nach einer möglichen Ursache für den Rückgang der Seegrasswiesen bietet die Fernerkundung ebenfalls die Betrachtung der Oberflächensedimentverteilung. Im Gelände wurde festgestellt, dass der Anteil des Feinsediments im Amrumer Rückseitenwatt zunimmt (Aussage J. Kohlus, Nationalparkverwaltung Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer). Dies könnte auf eine Phase zunehmender Sedimentdeposition hindeuten und damit eine Ursache für die Veränderungen der Seegrasswiesen in diesem Gebiet sein. In den Klassifizierungen des Sediments aus den Satellitendaten ist dieser Trend, zumindest zwischen 2014/2016 und 2020/2022 (Abb. 57), nicht unmittelbar ablesbar, was aber auch an der gewählten Einteilung der Sedimente in $<10\%$ und $>10\%$ Feinanteil liegen kann. Somit ist eine Verschiebung von höheren Feinanteilen hier nicht sichtbar. Hier zeigt sich, dass gerade bei der Betrachtung von Seegrasswiesen kleinräumigere Veränderungen entscheidend sein können. Daher ist für solche Fälle mit einer detaillierteren Klassifizierung zu arbeiten.

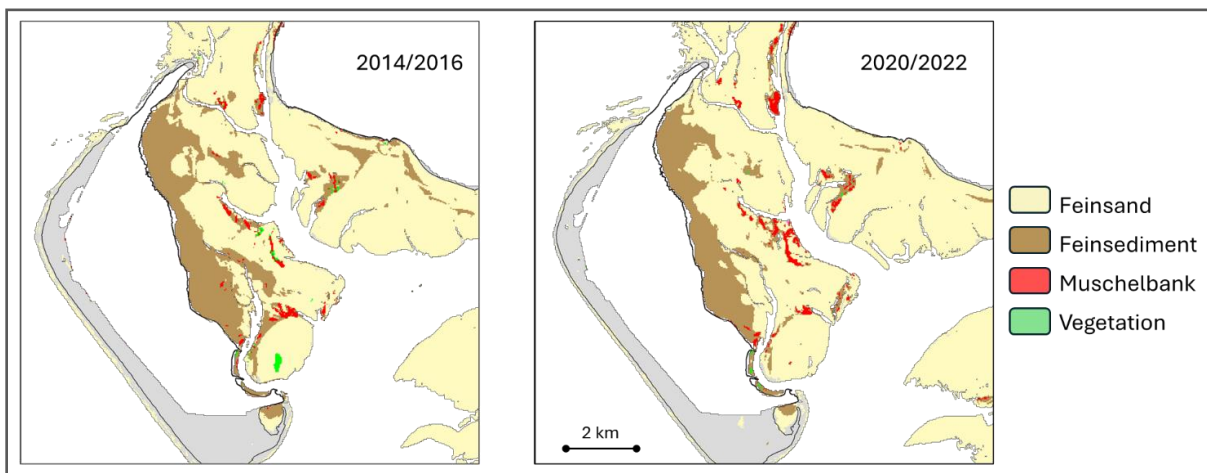


Abb. 57: Sedimentverteilung im Amrumer Rückseitenwatt nach WASCO-Code für die Zeiträume 2014/2016 und 2020/2022.

7.3.2 Entwicklung der Seegraswiese auf dem Randzel

Die Seegraswiese auf dem Randzel im Borkumer Rückseitenwatt ist in den letzten Jahren fast vollständig verschwunden. Gegenwärtig läuft eine Ursachenforschung, wie und in welchem Umfang sich das System geändert hat, so dass es zu diesem Rückgang gekommen ist. Es gibt jedoch wenig Informationen über die Ausprägung der Seegraswiese in den Jahren zwischen den Zeitpunkten des Monitoring (2013, 2019 und 2025). Daher wurde im Rahmen von WASCO die Entwicklung der Seegraswiese über die letzten Jahre mittels Satellitendaten genauer betrachtet. Da es sich um eine relativ kleine und am Ende sehr dünn bewachsene Seegraswiese handelt, sind hier, anders als sonst im Seegrasmonitoring, PlanetScope-Daten zum Einsatz gekommen. Diese haben eine höhere räumliche Auflösung, allerdings auch ein höheres räumliches Rauschen, was eine Klassifizierung der Daten erschwert. Dennoch bieten die Daten einen guten Einblick in die Entwicklung der Seegraswiese. So zeigt Abb. 58 die zeitliche Abfolge von PlanetScope-Aufnahmen von 2017 bis 2024 jeweils aus dem August oder September. Die Aufnahmen bilden die Seegraswiese auf dem Randzel ab und zeigen diese auf der linken Seite als Falschfarbdarstellung, in der vegetationsbestandene Flächen rot erscheinen. Die rechte Seite zeigt Klassifikationen dieser Aufnahmen, in denen verschiedene Vegetationsdichteklassen und Muschelflächen dargestellt sind. Es wird hier explizit nicht zwischen Seegraswiese und Makro- oder Mikroalgen differenziert, da die Dichte der Bedeckung teilweise zu gering für eine explizite Differenzierung ist.

Es ist in der zeitlichen Abfolge zu erkennen, dass sich die Seegraswiese auf dem Randzel in den vergangenen Jahren deutlich verändert hat. Zunächst gab es eine Entwicklung von einer zentrierten Seegraswiese (2017) hin zu einer Seegraswiese mit länglichen Strukturen um dieses Zentrum herum (bis 2022). Diese verschwinden zwischen 2022 und 2023 fast vollständig, zurück bleibt eine kleine Seegraswiese mit sehr dünnem Bewuchs am südlichen Rand der ehemaligen Lokation. Ebenso könnte in 2023 im nordwestlichen Bereich noch ein Überbleibsel der ursprünglichen Seegraswiese zu verzeichnen sein.

Die Klassifizierungen zeigen diese Entwicklungen auch, wobei eine spektrale Trennung zwischen dünn bestandener Seegraswiese und mit Diatomeen bewachsenen Flächen nicht direkt möglich ist. Daher sind die Klassifizierungen ein Anhaltspunkt, aber die Interpretation der RGB-Aufnahmen geben einen besseren Eindruck der Situation.

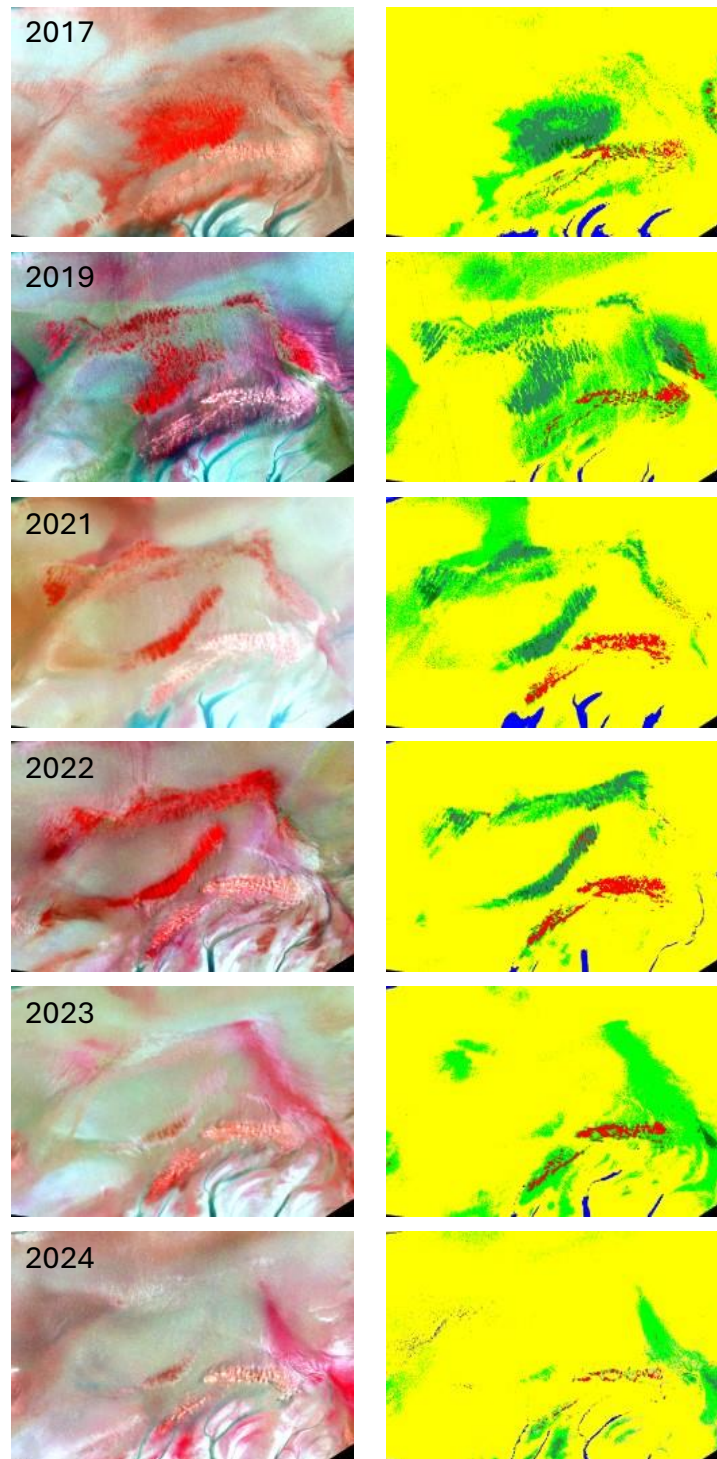


Abb. 58: Entwicklung der Seegraswiese auf dem Randzel. Links: Falschfarbbild der PlanetScope-Aufnahmen. Vegetationsbestandene Flächen sind in Rot erkennbar. Rechts: Klassifizierung der PlanetScope-Aufnahmen mit Vegetationsbestand (grün) und Muschelvorkommen (rot).

Für 2019 liegen Seegraskartierungen vor, die in Abb. 59 (oben) auf der rechten Seite dargestellt sind. Dort befindet sich eine dichte Seegraswiese im zentralen Bereich, der allerdings nicht ganz die Form nachzeichnet, wie es das Satellitenbild vermuten lassen würde. Auf der anderen Seite gibt es Bereiche mit einem Bedeckungsgrad von 5-20 %, bei denen im Satellitenbild keine Seegraswiese erkennbar ist. Eine weitere Geländeerhebung fand im Jahr 2025 statt. Der Vergleich zwischen Satellitenbild und den neuen Monitoringdaten ist im unteren Bereich von Abb. 59 dargestellt. Die kartierte Seegrasfläche weist eine kleinere Fläche auf, die überwiegend eine Dichte von <20 % aufweist. In der PlanetScope-Aufnahme kann diese Seegraswiese nicht detektiert werden. Dies deutet darauf hin, dass Seegraswiesen mit einem Bedeckungsgrad von <20 % durch PlanetScope-Daten nicht erfasst werden können. Dies ist auch der Fall in Sentinel-2-Aufnahmen.

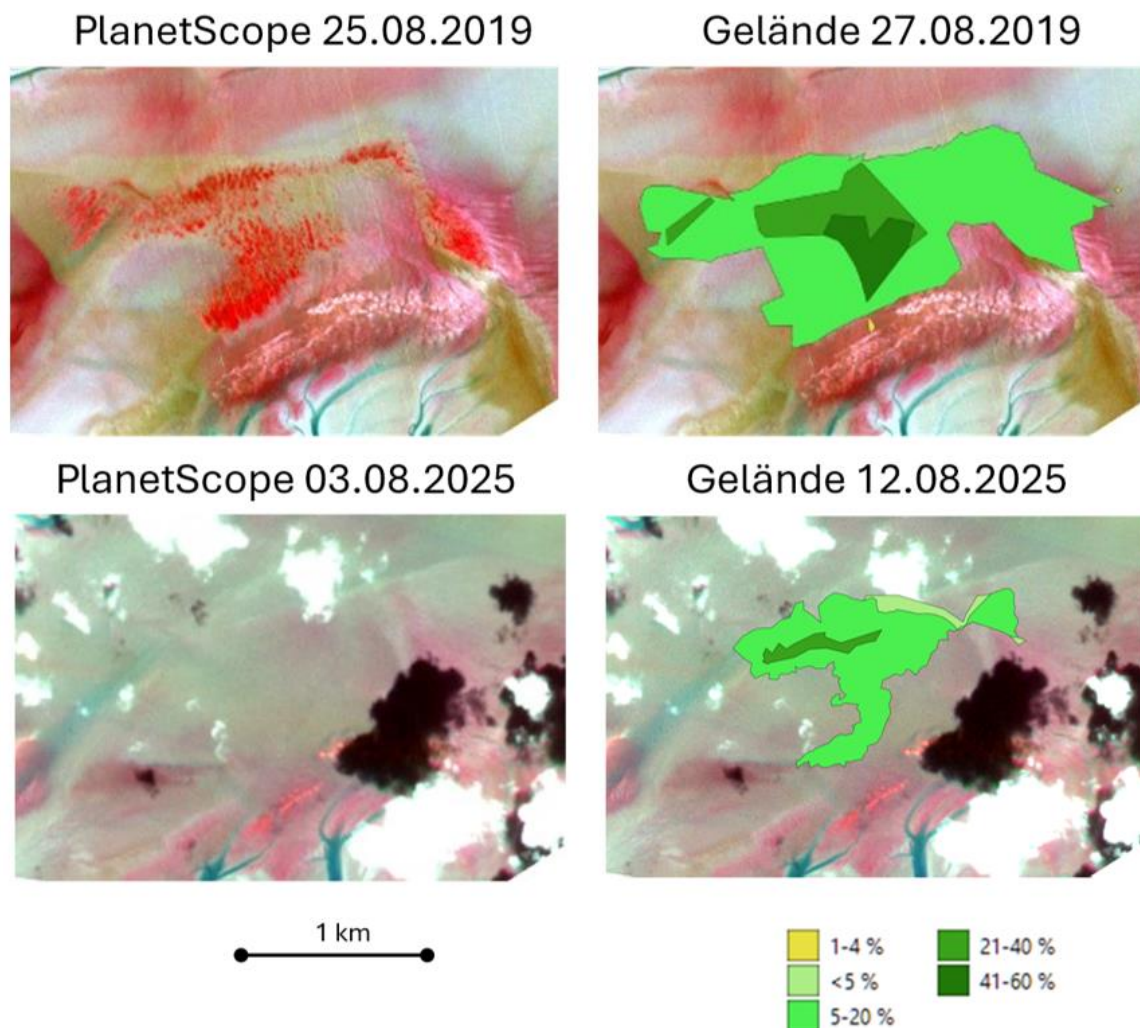


Abb. 59: Falschfarbendarstellung der PlanetScope-Aufnahmen (links), überlagert mit der Bodenkartierung (rechts).

7.3.3 Saisonale Entwicklung von Seegraswiesen

Im herkömmlichen Monitoring werden die Seegraswiesen in den Sommermonaten mit Fokus auf August und September kartiert, wenn es zur maximalen Ausdehnung des Seegrases kommt. Durch Hinzunahme von Satellitendaten kann nun auch die Entwicklung der Seegraswiesen über die Saison dargestellt werden. Hierfür gibt es zwar meist innerhalb eines Jahres nicht genügend Niedrigwasseraufnahmen, aber wenn mehrere Jahre zusammen betrachtet werden, kann das Anwachsen und Absterben der Seegraswiesen sehr gut dargestellt werden. Abb. 60 zeigt im Ausschnitt die Seegraswiese nördlich von Hallig Langeneß am südlichen Rand des schleswig-holsteinischen Untersuchungsgebietes. Die Zeitreihe zeigt den monatlichen maximalen Vegetationsindikator aus den Jahren 2018 bis 2023. Es ist eine langsame Zunahme der Vegetationsdichte und Ausdehnung der Seegraswiese in den Frühjahrsmonaten erkennbar, welche ihre maximale Ausprägung im August und September erreicht. Danach gehen Vegetationsdichte und Ausdehnung der Seegraswiese relativ schnell zurück. Die Entwicklung der Seegraswiese ist in Abb. 61 dargestellt, um den beschriebenen Verlauf noch einmal zu verdeutlichen. Dies verdeutlicht noch einmal, wie wichtig der richtige Zeitpunkt der Satellitenaufnahme ist, um die maximale Ausdehnung der Seegraswiesen für das Monitoring zu erfassen.

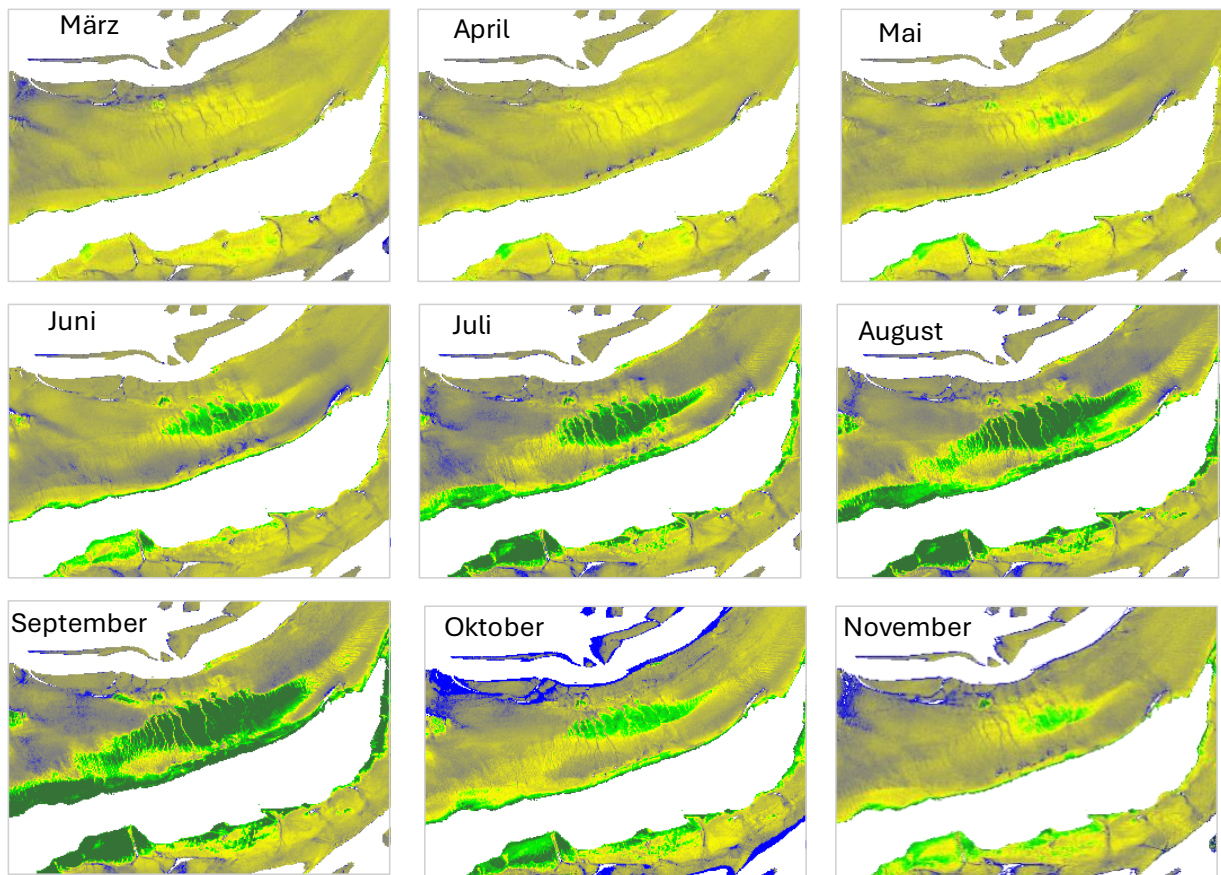


Abb. 60: Saisonale Entwicklung der Seegraswiese nördlich von Langeneß, Schleswig-Holstein, von März bis November.

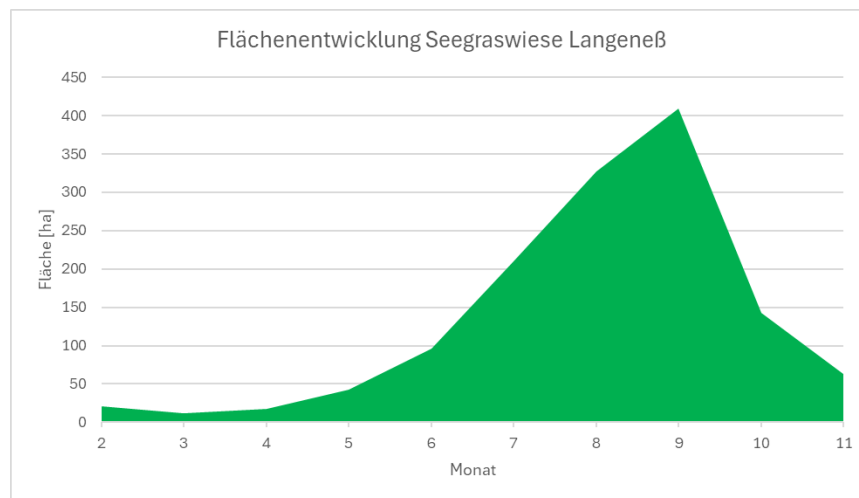


Abb. 61: Mittlere saisonale Flächenentwicklung der Seegraswiese nördlich von Langeneß, Schleswig-Holstein.

7.4 Analyse von Veränderungen der Muschelvorkommen im Eulitoral

Ähnlich komplexe Wechselwirkungen wie die zwischen Sedimenten und Seegras lassen sich auch für weitere Habitate wie Muschelbänke beschreiben, deren Detektion und Analyse der räumlich-zeitlichen Veränderung anhand von Satellitenaufnahmen möglich ist. Muschelbänke nehmen im Watt Ausgang von einzelnen Steinen und häufiger Verklumpungen von mehreren Muscheln. Auf die Dauer bilden sie stabile Bänke, die fast wie Felsstrukturen ein völlig anderes Biotop als die umgebenden Wattersande bilden. So bilden sie einen wichtigen Lebensraum für verschiedene Tier- und Pflanzenarten, die sonst kaum im Wattenmeer existieren können. Als Filtrierer übernehmen sie eine „klärende“ Rolle und entnehmen dem Wasser Nährstoffe; durch ihre Schalen binden sie Kohlendioxid. Durch Muschelbänke wird die Strömungsgeschwindigkeit herabgesetzt und Schwebstoffe lagern sich rascher ab, sodass sie auch als „ecosystem engineers“ bezeichnet werden (Stock, 2023).

Im Rahmen des Muschelmonitorings erfolgt unter anderem eine jährliche Abgrenzung und Flächenbestimmung der eulitoralischen Muschelbänke in kombinierter Weise aus Luftbildserien und der Vermessung der eulitoralischen Muschelbänke mithilfe von GPS-Geräten. Flächenhafte Daten aus dem Monitoring stehen über MDI-SH (2015-2018) und MDI-NI (2011-2020) bereit, wobei im schleswig-holsteinischen Datensatz zwischen Miesmuschel- und Austernbänken unterschieden wird. In Niedersachsen liegen mittlerweile ausschließlich Mischbänke vor, weshalb es im Datensatz keine nähere Unterscheidung gibt. Weitere aktuellere Datensätze hat die Nationalparkverwaltung im Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz für 2019, 2021 und 2022 bereitgestellt.

7.4.1 Entwicklung der Muschelbank südlich der Juister Balje aufgrund morphologischer Veränderungen

In Abschnitt 7.2 konnte gezeigt werden, wie sich die Juister Balje in den letzten ca. 40 Jahren verändert hat. Zusammenhängend damit kann auch die Entwicklung der Muschel- bzw. Austernbank im südlichen Anschluss betrachtet werden. In Abb. 62 sind die Klassifizierungen der Wattoberfläche ausgewählter Zeiträume dargestellt. Diese sind überlagert von den Umrandungen der Muschelbankvorkommen aus dem Muschelmonitoring der NLPV. Die Klassifizierungen in Abb. 62 basieren auf zusammengefassten

Aufnahmen verschiedener Aufnahmezeitpunkte. In Abb. 62 zeigt zudem, wie die Klassifizierung die Ausdehnung der Monitoringdaten reproduziert. Die Erfassbarkeit von Muscheln nimmt dabei im Übergang von Landsat-Aufnahmen mit ihren 30m-Auflösung zu Sentinel-2-Daten mit einer räumlichen Auflösung von 10m zu und die Übereinstimmung verbessert sich.

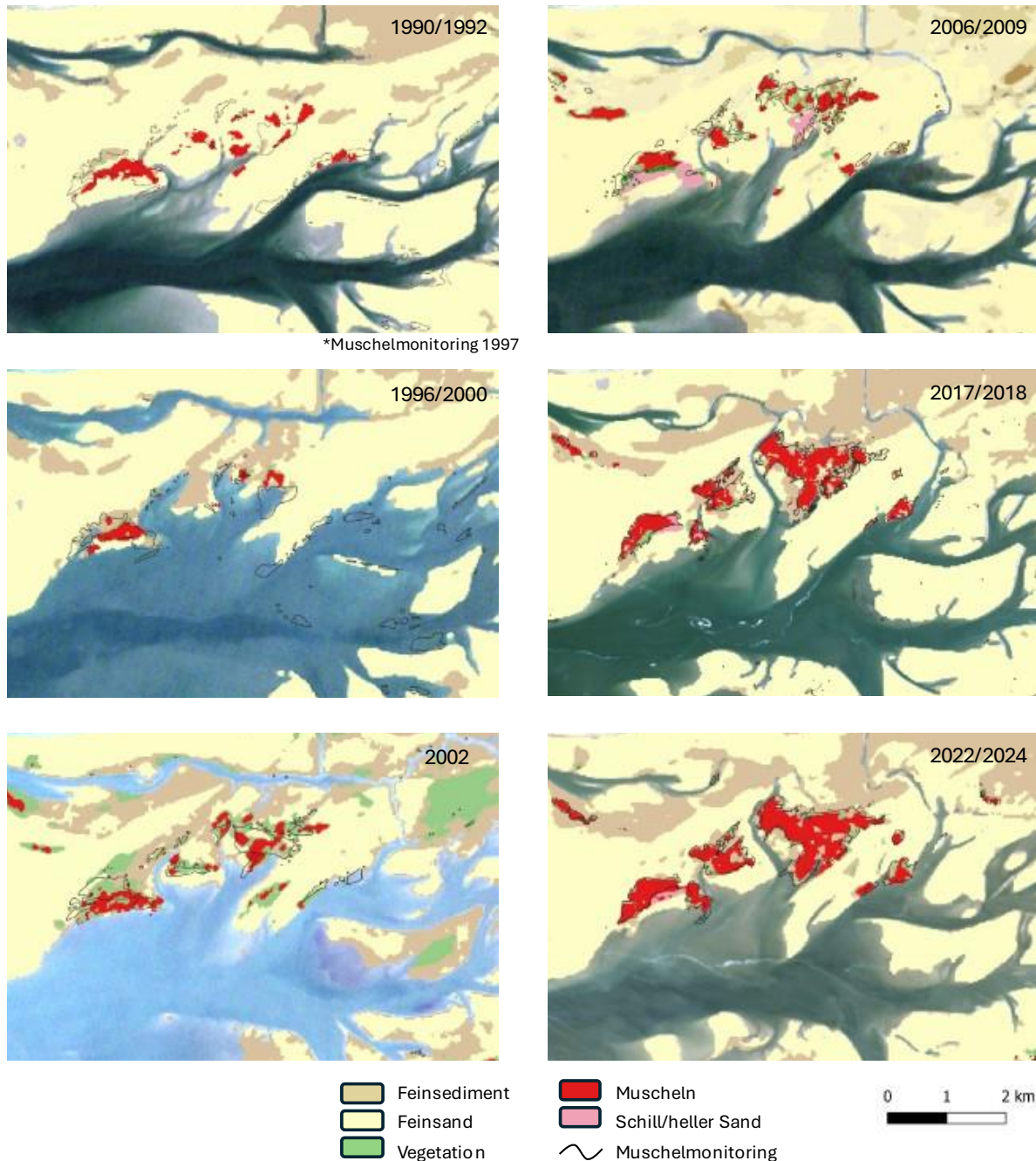


Abb. 62: Entwicklung der Muschelbank südlich der Juister Balje aus Klassifikationen von Landsat- und Sentinel-2-Satellitenaufnahmen. Die Klassifizierungen sind mit der Umrandung der Muschelbänke aus dem Muschelmonitoring überlagert.

Literaturverzeichnis

- Ahrendt, K. (1994). Geologie und Küstenschutz am Beispiel Sylt. Berichte aus dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, 4. Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der Universität Kiel, Kiel, 136pp.
- BAW (2022). SMMS Bathymetrie (WMS). <https://datenrepository.baw.de/trefferanzeige?docuuid=114FFA10-83DC-4A99-B228-6CCF4147A1AF>
- Benninghoff, M. & Winter, C. (2019). Recent morphologic evolution of the German Wadden Sea, Scientific Reports 9, 9293. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45683-1>
- Bijleveld, A.I., Taccoma, M. & Koolhaas, A. (2024). SIBES dataset, NIOZ, V3. <https://doi.org/10.25850/nioz/7b.b.ug>
- BioConsult (2022). Offshore-Netzanbindungssystem BalWin1+2. Basisaufnahme Makrozoobenthos Wattenmeer. 45pp. 11_Materialband und Quellen/11_Materialband und Quellen/11_04_Ergebnisbericht_Benthos_12smz_Eulitoral/NOR-9-3_11_4_2_Ergebnisbericht-Benthos-Eulitoral.pdf
- Blott, S.J. & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- BSH (2016). Anleitung zur Kartierung des Meeresbodens mittels hochauflösender Sonare in den deutschen Meeresgebieten. BSH Nr. 7201. 147p. <https://www.bsh.de/download/Kartierung-des-Meeresboden.pdf>
- BSH (2025). Seegang. Aktuelle Messwerte in Nord- und Ostsee. https://www.bsh.de/DE/DATEN/Klima-und-Meer/Seegang/seegang_node.html
- Deltares (2026). 3D/2D Modelling Suite for Integral Water Solutions: Delft3D Hydro-Morphodynamics. User manual. Delft. 735pp.
- Dissanayake, P. & Wurpts, A. (2013). Modelling an anthropogenic effect of a tidal basin evolution applying tidal and wave boundary forcings: Ley Bay, East Frisian Wadden Sea. Coastal Engineering, Volume 82, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.005>
- Dissanayake, P., Amft, J. & Sibbertsen, P. (2024). Defining an exposure index along the Schleswig-Holstein Baltic Sea coast. Marine Geology, Volume 476, 107382. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2024.107382>
- Dolch, T., Buschbaum, C. & Reise, K. (2015). Seegras-Monitoring im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer 2014 – Forschungsbericht zur Bodenkartierung von Seegrasbeständen in ausgewählten Gebieten. LLUR, Flintbek, 95pp.
- DWD (2026). Open-Data-Server des Deutschen Wetterdienstes. <https://opendata.dwd.de>
- Figge, K. (1981). Begleitheft zur Karte der Sedimentkartierung in der Deutschen Bucht 1: 250.000 Nr. 2900. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg.
- Folk, R.L. (1954). The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. The Journal of Geology, Volume 62, Number 4. <https://doi.org/10.1086/626171>

- Gräwe U., Flöser, G., Gerkema, T., Duran-Matute, M., Badewien, T.H., Schulz, E. & Burchard, H. (2016). A numerical model for the entire Wadden Sea: skill assessment and analysis of hydrodynamics. *J. Geophys. Res. Oceans* 121, 5231–5251. <https://doi.org/10.1002/2016JC011655>
- Heinrich C., Feldens, P. & Schwarzer, K. (2017). Highly dynamic biological seabed alterations revealed by side scan sonar tracking of *Lanice conchilega* beds offshore the island of Sylt (German Bight). *Geo-Marine Letters*, Volume 37, 289-303. <https://doi.org/10.1007/s00367-016-0477-z>
- Heyer, H. & Schrottke, K. (2013). Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht - AufMod. Gemeinsamer Abschlussbericht für das Gesamtprojekt mit Beiträgen aus allen 7 Teilprojekten. <https://doi.org/10.2314/GBV:780783271>
- Ismail, K., Huvenne, V.A.I., Masson, D.G. (2015). Objective automated classification technique for marine landscape mapping in submarine canyons. *Marine Geology*, Volume 362 (2015), 17-32. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.01.006>
- Kühn, S., Schückel, U., Trampe, A. & Heubel, K. (2024). WATthochDrei: Untersuchungen zur räumlichen Verbreitung und Veränderungen sublitoraler Habitats, ihrer benthischen Lebensgemeinschaften und Entwicklung einer Methodik zu Erfassung der Unterwasserschall-Landschaft im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer. Abschlussbericht 70 S. FTZ Westküste der CAU Kiel. Hannover: Technische Informationsbibliothek. <https://doi.org/10.34657/19486>
- Lepper, R., Lorenz, M., Milbradt, P. & Pineda, D. (2025). TrilaWatt: Wattflächen (2015-2021) [Data set]. Bundesanstalt für Wasserbau. <https://doi.org/10.48437/5a882d-b3a571>
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M. & Stelling, G.S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model, *Coastal Engineering*, Volume 51, Issue 8-9, 883-915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- Lucier, V. (2008). Object-oriented classification of side scan sonar data for mapping benthic marine habitats. *International Journal of Remote Sensing*, 29(3), 905-921. <https://doi.org/10.1080/01431160701311309>
- Mascioli, F. & Kunde, T. (2017). Grain size characterization of subtidal sediments of Lower Saxony. Unveröffentlichter Forschungsbericht 01/2017. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Forschungsstelle Küste. 21pp.
- Mascioli, F. & Kunde, T. (2021). Sedimentkartierung in der niedersächsischen Nordsee und im Wattenmeer. In: *Hydrographische Nachrichten* 120. Rostock: Deutsche Hydrographische Gesellschaft e.V.. 24-31. <https://doi.org/10.23784/HN120-03>
- Mehta, A.J. (1986). Introduction. In *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. A.J. Mehta (Ed.). <https://doi.org/10.1029/LN014p0001>
- Meyer, C. (2013). Morphologische Entwicklung und Sedimentbilanz des Tidebeckens der Osterems. Unveröffentlichter Untersuchungsbericht 02/2013. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Forschungsstelle Küste. 18pp.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1948). Formulas for bed load transport. In: *Proceedings of the 2nd Congress IAHR*, Delft, Volume 2, 39-64.

- Miao, B., Arlinghaus, P., Ho-Hagemann, H.T.M., Schrum, C. & Zhang, W. (2025). Misconception of coastal morphological resilience caused by inconsistent resolution in bathymetry mapping, *Communications earth and environments* 6, 904. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02974-y>
- Oberrecht, D., Nordhaus, I., Merk, V., Galiforni, F., Persichini, G., Kunde, T., Shiravani, G., Herbst, G., Scheiffarth, G., Winter, C., Wurpts, A. (2024). Erstellung von Grundlagen für eine Strategie zum ökologischen Sedimentmanagement an der Ems (SediEms), Abschlussbericht, 143pp.
- Oberrecht (2021). Development of a Numerical Modelling Approach for Large-Scale Fluid Mud Flow in Estuarine Environments. Doktorarbeit, Leibniz Universität Hannover, Hannover, 118pp. <https://doi.org/10.15488/10488>
- Oberrecht (2025). Hydro-morphodynamisches Modell: Ems-Dollart Modell 2015. Modellvalidierungsdokument. Version 1.4. Unveröffentlichter Untersuchungsbericht 01/2025. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Forschungsstelle Küste. 89pp
- Ricklefs, K. & Arp, D. (2011). Identifizierung mariner Lebensraumtypen nach FFH im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer. CAU Kiel, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste. Unveröffentlichter Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der CAU Kiel.
- Ricklefs, K. & Scheffler, M. (2013). Identifizierung mariner Lebensraumtypen nach FFH im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer (Norderau). CAU Kiel, Forschungs- und Technologiezentrum Westküste. Unveröffentlichter Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der CAU Kiel.
- Ricklefs, K. & Scheffler, M. (2014). Identifizierung mariner Lebensraumtypen nach FFH im schleswig-holsteinischen Wattenmeer (Heverstrom und Süderau). Büsum. Unveröffentlichter Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der CAU Kiel.
- Ricklefs, K. & Stage, M. (2015). Identifizierung mariner Lebensraumtypen nach FFH im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer (Außeneider). Unveröffentlichter Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der CAU Kiel.
- Ricklefs, K., Stage, M. (2017). Identifizierung mariner Lebensraumtypen nach FFH im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer (Seegebiete westlich Amrums und westlich Eiderstedts). Unveröffentlichter Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der CAU Kiel. 72pp.
- Ricklefs, K. & Trampe, A. (2019). BALancing SEDiment deficits in the WADden Sea BASEWAD. Abschlussbericht zu den sedimentologischen Untersuchungen im Projekt Basewad. 133p.
- Ricklefs, K. & Trampe, A. (2021). Beschreibung der Vorgehensweise bei der sonarbasierten Detektion und Kartierung sublitoraler Muschelhabitate, Sedimente und „Riff-Strukturen“ im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer. Unveröffentlichter Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der CAU Kiel. 61pp.
- Roelvink, J.A. (2006). Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering*, Volume 53. Issue 2-3. 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.015>
- Scholz, J., Stelzer, K. & Lebreton, C. (2025). Historische Analyse der Lichtverfügbarkeit mittels Fernerkundungsdaten im niedersächsischen Watten- und Küstenmeer, Abschlussbericht des Vorhabens CXQ6YYHRYBN. Bericht erstellt im Auftrag des NLWKN. 64pp.

- Schwarzer, K. Ricklefs, K. & Herrmann, M. (2010). Flächendeckende Erfassung geogener und biogener Strukturen im Sublitoral des „Sylter Rückseitenwatts“ Unveröffentlichter Bericht aus dem Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel, 54pp.
- Schwemmer, P., Eskildsen, K., Enners, L., Horn, S., Wittbrodt, K., Stage, M., Binder, K., Büttger, H., Ruales, A., Stelzer, K., Asmus, H., Asmus, R., Garthe, S., Kohlus, J., Reimers, H.C., Ricklefs, K. & Schwarzer, K. (2017). Vom Sediment zum Top-Prädator. STopp Abschlussbericht. https://www.nationalpark-wattenmeer.de/wp-content/uploads/2020/04/stopp-abschlussbericht_online_version.pdf
- Siefert, W., Fahse, H., Miessner, F., Richter, H.-H., Taubert, A. & Wieland, P. (1980). Die Strömungsverhältnisse vor der Westküste Schleswig-Holsteins - Ergebnisse eines KFKI-Messprogramms. In: Die Küste, 35:147-186.
- Smith, J.D. & McLean, S.R. (1977). Spatially averaged flow over a wavy surface. Journal of Geophysical Research, Volume 82, Number 12. 1735-1746. <https://doi.org/10.1029/JC082i012p01735>
- Soares, C. C., Galiforni-Silva, F. & Winter, C. (2024). Representative residual transport pathways in a mixed-energy open tidal system, Journal of Sea Research, Volume 201, 102530. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102530>
- Stelzer, K. & Smollich, S. (2023). Erfassung von Seegraswiesen im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer mittels Fernerkundungsdaten. Endbericht der Seegraserfassung 2021-2022. Unveröffentlichter Bericht. Nationalparkverwaltung Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer.
- Stelzer, K. & Trampe, A. (2022). Synthese der Sublitoral- und Eulitoral-Kartierungen der Nordseesedimente durch opto-akustische Kopplung von Hydroakustik und multispektraler Fernerkundung. Abschlussbericht „Synthese Nordsee“ Unveröffentlichter Bericht.
- Stock, M. (2023). Muschelbank-Monitoring für eine nachhaltige Fischerei. <https://www.nationalpark-wattenmeer.de/wissensbeitrag/muschelbankmonitoring/>
- Trampe, A. & Ricklefs, K. (2022). Identifizierung mariner Lebensraumtypen nach FFH im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer (Gröde, Holmer Fähre, inneres Hörnumtief, Strandley). Unveröffentlichter Bericht Forschungs- und Technologiezentrum Westküste der CAU Kiel. 128pp.
- Valerius, J., Feldmann, J., van Zoest, M., Milbradt, P. & Zeiler, M. (2013a). Dokumentation sedimentologischer Produkte des Funktionalen Bodenmodells des Projekts AufMod, Dateiformat: Textfiles (CSV, XYZ). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg. 8pp.
- Valerius, J., Feldmann, J., van Zoest, M., Milbradt, P. & Zeiler, M. (2013b). Dokumentation morphologischer Produkte des Funktionalen Bodenmodells des Projekts AufMod, Dateiformat: Textfiles (CSV, XYZ). Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg. 11pp.
- Van der Zande, D., Stelzer, K., Lebreton, C., Dille, A., Shevchuk, R., Santos, J., Böttcher, M., Vanhellemont, Q. & Scholze, J. (2025). Quality Information Document for High resolution Ocean Colour Products. <https://documentation.marine.copernicus.eu/QUID/CMEMS-OC-QUID-009-201to212.pdf>
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R. & van Ormondt, M. (2004). Description of TRANSPOR2004 and Implementation in Delft3D-ONLINE. Delft Hydraulics Report, Z3748.00. 77pp.
- Van Rijn, L.C. (1993). Principles in sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. AQUA Publications, the Netherlands. 535pp.

- Verboom, G.K., de Ronde, J.G. & van Dijk, R.P. (1992).* A fine grid tidal flow and storm surge model of the North Sea. *Continental Shelf Research*, Volume 12, Issue 2-3. 213-233. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(92\)90030-N](https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90030-N)
- Wentworth, C.K. (1922).* A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.
- WMO (2008).* Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8. Edition 7. 681pp.