



Vergangenheit und Zukunft des nordfriesischen Wattenmeeres

Kai Ahrendt

Büro für Umwelt und Küste, Kiel

Abstract

Investigations in the frame of the KFKI-Project "Sedimentinventory Northfrisian Waddensea" show, that the predominant amount of sediment was imported to the waddensea (more or less from the north sea) and came not from internal rearrangement. There is enough sediment inside the system for a growing of the higher parts of the wadden sea following a rising sea level. This leads to steepening of the relief and to coarser sediment. In the non-dyked areas a coarsening from the lower to the upper region (first meter) can be identified. Only where coastal protection measures take place, like dams, reclamation ditches, groynes etc. fine sediment will accumulate. The "biological integrity" of the waddensea will move to a mixed sediment mudflat and sand flat biocenosis. Due to rising sea level additional (upper) areas will be influenced by higher energy input and only coarse sediment can settle down, independent from the availability of fine sediment.

1 Einleitung

Kenntnisse der Sedimentdynamik vor der deutschen Nordseeküste sind von grundlegender Bedeutung für Maßnahmen des Insel- und Küstenschutzes sowie für die Stabilität des Wattenmeeres. Die Veränderungen des Meeresbodens resultieren aus dem Zusammenspiel von Sedimentverfügbarkeit und Energiespektrum aus Strömung und Welle, d. h. es muss umlagerungsfähiges Lockersediment in ausreichender Menge und Zusammensetzung vorhanden sein, um unter entsprechenden hydrodynamischen Bedingungen morphologische Strukturen aufbauen bzw. erhalten zu können. Dieses Formeninventar wird von Umlagerungsprozessen auf unterschiedlichen Zeitskalen gesteuert.

Weit zuverlässiger als kleinräumig oder über kurze Zeitspannen erfasste Messdaten gestatten Langzeitbilanzen eine Einschätzung der Auswirkungen des vermuteten Treibhauseffekts, der wahrscheinlich eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges nach sich zieht, auf die Stabilität bzw. Anpassungsfähigkeit des Systems Küste. Zudem schafft der Gezeitenhub morphologische Großformen, die an gewisse Korngrößenspektren gebunden sind (Hayes 1979, Ehlers 1988). Sind diese Korngrößen nicht vorhanden, kann sich zwangsläufig kein neues Gleichgewicht einstellen. Dasselbe gilt für die Sedimentmengen in Bezug auf das Mitwachsen der Wattflächen bei einem beschleunigt steigendem mittleren Meeresspiegel.

Im Folgenden sollen die Fragestellungen

- wie viel Sediment wurde nacheiszeitlich in das Gebiet eingetragen,
- woher stammt dieses Material,
- wie ist die granulometrische Zusammensetzung und
- stehen genügend Sedimente für ein Mitwachsen des Wattenmeeres bei einem Meeresspiegelanstieg zur Verfügung?

diskutiert werden.

Das Untersuchungsgebiet reicht von der Geestkante im Osten bis zur Außenküste der nordfriesischen Inseln bzw. den Außensänden im Westen sowie von der deutsch-dänischen Grenze im Norden bis zu

den Nehrungshaken Katharinenherd-Garding-Tating-St. Peter Ording vor Eiderstedt im Süden (Abb. 1).

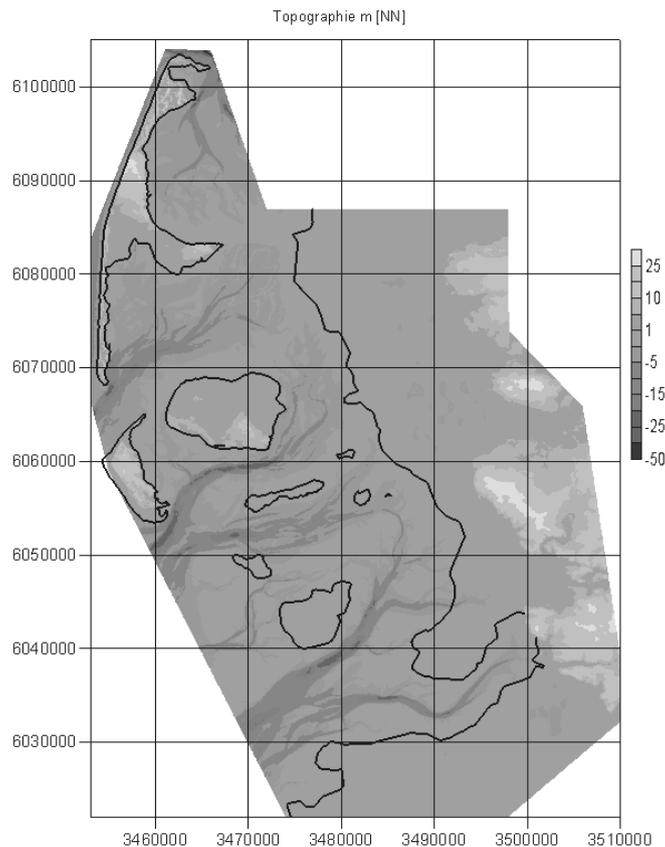


Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet

Kurzer Abriss der holozänen Entwicklung

Die sedimentologisch-morphologische Ausgangslage für die natürliche Gliederung Nordfrieslands wurde in der Saale-Eiszeit geschaffen. So wurden im Westen die Moränenkerne von Sylt, Amrum und Föhr sowie relativ hochaufragende sandige Geestsedimente zwischen Amrum und dem Gebiet der heutigen Außensände bis nach Eiderstedt abgelagert. Die weiter westlich gelegenen Mergel- und Sandablagerungen sind heute überwiegend abgetragen. Im Osten bilden die Lecker-, Bredstedter und Husumer Geest die Beckengrenze. Zwischen diese eiszeitlichen Ablagerungen transgredierte vor ca. 128.000 bis 117.000 Jahren das Eem-Meer. In der nachfolgenden Weichseleiszeit, die ihre Geschiebemergelablagerungen weiter im Osten hinterließen, flossen die Schmelzwässer vor allem durch die Schleswiger Vorgeest und die Treene-Eiderniederung nach Westen ab. Sie benutzten teilweise die vorgefundene Eem-Bucht zur Entwässerung zur Nordsee und hinterließ Sanderflächen unterschiedlicher Mächtigkeit. Mit dem weiteren Abschmelzen des Eises stieg der Meeresspiegel rasch an, und die Nordsee stieß immer weiter nach Osten vor. Zu Beginn der Transgressionsphase entstand in der vermoorten Oberfläche der Basistorf. Danach wurden über der allmählich „ertrinkenden“ Pleistozänlandschaft mächtige holozäne Küstensedimente akkumuliert. Im Bereich der „nordfriesischen Rinne“ kann dieser Sedimentkörper Mächtigkeiten von einigen Zehner Metern (max. Endtiefe $-23,8$ m NN) erreichen. Gegen die östlich gelegene Geestkante keilt dieser Sedimentkörper allmählich aus. Der Anstieg des Meeresspiegels erfolgte zunächst sehr rasch (bis zu 2 m/Jahrhundert). Ab 5.000 v. Chr. nahm die Anstiegsgeschwindigkeit jedoch merklich ab. Zeitweilig kam es zu see- und landwärtigem Verschieben der Küstenlinie. Dabei bildeten sich Torfe im Wechsel mit brackischen und lagunären Schluffen und Tonen. Saale-eiszeitliche Geestkerne westlich von Sylt, Amrum und

nordwestlich Eiderstedt sowie die daran anschließende Nehrungen (ab ca. 5.000 v. Chr. mit Verlangsamung des Meeresspiegelanstieges) schützten zeitweise den Bereich der heutigen Wattgebiete vor dem direkten Angriff des Meeres.

Im ersten Jahrtausend nach Chr. kam es immer öfter zu Überflutungen. Um 1000 n. Chr. begannen die Menschen, das Land teilweise zu bedeichen, zu entwässern und zu kultivieren. Diese Areale wurden dann in großen Teilen durch die verheerende Sturmflut von 1362 überflutet. Das Meer drang damals bis an den Geestrand vor und lagerte die junge Marsch über dem Torf ab. Dieser tief gelegene Bereich bot nun gute Voraussetzungen für die Salzwiesenbildung (König 1987), so dass in Teilbereichen eine sehr schnelle Wiederbedeichung erfolgen konnte.

Ein weiterer gravierender Einschnitt in das Landschaftsbild erfolgte durch die Sturmflut von 1634. Durch diese Sturmflut wurden erneut große Teile Nordfrieslands überflutet, die in der Folgezeit teilweise jedoch wieder eingedeicht werden konnten. Die großen Prielsysteme, die bei dieser Sturmflut entstanden, bestimmen heute noch das Bild des Wattenmeeres.

Verwendeter Datenbestand

Die wichtigste digital verfügbare Datenbasis für die heutige Topographie bildete das Allgemeine Liegenschaftskataster (ALK) mit einer Auflösung von 10 m x 10 m und einer Höhengenaugigkeit von ± 10 cm sowie die ATKIS-Daten des Landes Schleswig-Holstein.

Für die Wattbereiche konnte auf das digitale Geländemodell des nordfriesischen Wattenmeeres des LANU mit einer Maschenweite von 50 m x 50 m zurückgegriffen werden. Das Geländemodell umfasst den gesamten nordfriesischen Wattenmeerraum und wurde auf der Grundlage der Höheninformationen folgender Kartenwerke erstellt (Spiegel 1997, S. 22):

- KFKI Küstenkarten 1:25000 von 1976/78
- dänische Wattkarten 1:10.000 von 1976
- deutschen Wattkarten 1:10.000 aus den siebziger Jahren

In dieses Geländemodell wurden aktuelle digitale Daten des ALR-Husum aus dem Raum Sylt/Amrum, Eiderstedt, Pellworm und Föhr aus den Jahren 1999 bis 2002 integriert.

Auskunft über die Mächtigkeit und den internen Aufbau des holozänen Akkumulationskeils lieferten 18.848 Bohrungen des LANU. Hinzu kommen die Daten des ALR und der Universität Kiel. Die größte Datendichte ist auf dem Festland sowie den Inseln und Halligen vorhanden. Im Mittel sind dies für eine TK 25 ca. 850 Bohrungen. Nur an der westlichen Begrenzung des Untersuchungsgebietes liegt die Dichte der Bohrungen darunter.

Die Kernbeschreibung erfolgte überwiegend durch anerkannte Wissenschaftler der „Forschungsstelle Westküste“ (aufgegangen im ALR) sowie des LANU. Sie bieten eine verlässliche Grundlage für die stratigraphische Einstufung. Pollenanalytische und mikropaläontologische Untersuchungen standen bei der zeitlichen Einstufung im Vordergrund. 14C-Altersdatierungen wurden nur in Einzelfällen durchgeführt.

Zusammen mit den Bohrdaten bildeten thematische Karten einen weiteren Teil des Datenbestandes. Hierbei handelt es sich um Karten aus Veröffentlichungen, Berichten des ALR, zahlreiche Gutachten des LANU und Arbeitskarten des Instituts für Geowissenschaften, des geographischen Instituts und des Instituts für Ur- und Frühgeschichte der Universität Kiel. Der Gesamtdatenbestand beläuft sich auf über 20.000 Bohrungen.

Vorgehensweise

Neben der Überführung der analogen in digitale Informationen spielte vor allem die Einpassung sämtlicher geologischer Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem eine große Rolle. Da bis auf wenige Ausnahmen alle geologischen Daten im Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem vorlagen, wurden alle Informationen auf dieses Koordinatensystem bezogen.

Bevor die Daten digital erfasst werden konnten, waren z.T. umfangreiche Vorarbeiten notwendig, da möglichst alle Datensätze berücksichtigt werden sollten. So wurden als erstes die Unterlagen hinsichtlich ihrer Qualität überprüft und fehlende Angaben ergänzt. Als vollständig galten nur Datensätze, welche die für das Erstellen der Holozänbasisfläche notwendigen Informationen beinhalteten. Das waren:

- Gauß-Krüger Koordinatenangaben
- Angabe der Bohransatzhöhe auf NN bezogen oder auf NN umrechenbar
- petrographische Beschreibung
- stratigraphische Einstufung
- sowie die für die Ermittlung der Basisfläche notwendige Endtiefe

Grundlage für die Koordinatenermittlung bzw. die Visualisierung der Bohrlokation ist im ALR die TK 25 (1:25.000). Die Lagegenauigkeit der angegebenen Bohrlokation beträgt ± 10 m. Teilweise waren jedoch die original eingemessenen Koordinaten auf den Bohrprotokollen vorhanden.

Die Daten des LANU werden auf Mikrofilm vorgehalten, die Originale im Landesarchiv in Schleswig gelagert. Das LANU arbeitet auf zwei Maßstabsebenen. Für nicht eingemessene oder ungenaue Koordinaten dient die TK 25 als Grundlage. Für eingemessene Bohrungen bildet die DGK 5 die Basis, wobei sämtliche Bohrungen in diesen Karten vermerkt sind. Es wurden analoge Listen der Bohrungen aufgestellt, die für die weitere Bearbeitung näher ausgewertet wurden. Kriterien waren:

- Ausschluss von „Punktwolken“
- Entfernungstoleranz > 100 m
- Bei Deichtrassen keine Bohrungen durch den Deichkörper, wenn andere zur Verfügung standen

Nach dieser Vorauswahl wurden die Bohrdaten auf ihre Aussagekraft hin bewertet. Bei „Punktwolken“ wurden die tiefsten Bohrungen ausgewählt und die anderen verworfen. Anschließend wurden die Daten überarbeitet und fehlende Informationen ergänzt. Fehlende Koordinaten wurden je nach Lagegenauigkeit der TK 25 (± 10 m) oder DGK5 (± 1 m) entnommen. Fehlende Ansatzhöhen wurden ebenfalls diesen Karten entnommen, soweit möglich aus der DGK5.

Qualitätsmerkmale waren die Angabe der Lage im Gelände sowie deren Ermittlung, die Angabe des Höhenansatzpunktes sowie dessen Ermittlung, das Erreichen der Holozänbasis, die Qualität und Auflösung der Schichtenbeschreibung sowie der Name des Bearbeiters.

Vielfach konnten Koordinaten und Ansatzhöhen auch den dazugehörigen Gutachten entnommen werden. Parallel wurden fehlende stratigraphische Einstufungen ergänzt, soweit dieses eindeutig möglich war. Ebenso wurde die petrographische Zusammensetzung der obersten drei Meter anhand der angegebenen Mächtigkeit (in Prozentangaben Sand, Anteil $< 63 \mu\text{m}$ und Torf) bestimmt. Anschließend wurden die Daten mit dem Datenerfassungsprogramm GeoDin digital aufgenommen.

Nachdem die digitale Erfassung im ersten Schritt abgeschlossen war, wurden die Daten geplottet und ein handgezeichneter Isolinienplan erstellt. Parallel wurden digitale Karten mit dem Programm SURFER8 erstellt. Anhand des jetzt vorliegenden Datenmaterials war es möglich, die holozäne Basis in den Bohrungen zu bestimmen, die vorher nicht eindeutig waren. Die Holozänbasis wurde dort angenommen, wo in den Profilbeschreibungen eine Schichtgrenze vermerkt war und wo Nachbarbohrungen eine eindeutige Zuordnung aufwiesen. Die analogen Karten wurden anschließend digitalisiert und der Datenbasis für die digitale Erstellung der Karten hinzugefügt.

Als weiterer Schritt folgte die Variogrammanalyse als Grundlage für das Kriging-Verfahren. Über das Kriging-Verfahren wurde die Tiefenlage der Holozänbasis sowie die Verteilung der Sedimentzusammensetzung der obersten drei Meter ermittelt.

2 Auswertung

Nachdem sämtliche Bohrprotokolle soweit vorbereitet waren, dass alle notwendigen Stammdaten (i. e. Koordinaten, Ansatzhöhe, stratigraphische Einstufung) auf den Datenblättern eingetragen waren, konnte mit der digitalen Erfassung des fachspezifischen Programms GeoDin begonnen werden.

Für die Erstellung des digitalen Geländemodells wurden die oben angegebenen Grundlagen verwendet. Aus diesen Daten wurde über das Kriging-Verfahren ein 50 m x 50 m Raster generiert (Abb. 1), welches somit gröber ist, als die Ursprungsdaten. Verständlicherweise weiß das Variogramm daher eine optimale Form auf.

Die Datenbasis für die Ermittlung der Holozänbasis ist auf dem Festland und den Inseln am dichtesten. Größere Datenlücken liegen nördlich des Hindenburgdammes sowie im Bereich Sylt-Ost, Föhrer Schulter und Friedrich-Wilhelm-Lübcke Koog vor (Abb. 2). Aufgrund der unterschiedlichen Ziele der Bohrungen erreichen nicht alle die Holozänbasis. Für Bohrungen, die eindeutig die Holozänbasis nicht erreicht haben, wurde die Basis dort angenommen, wo sie in den nächstliegenden Bohrungen erreicht wurde bzw. es wurde anhand des vorgefundenen pleistozänen Reliefs eine nach geologischem Sachverstand plausible Tiefe angenommen. Für Bohrungen, die tief genug waren aber bei denen keine eindeutige Grenze aus den Bohrprotokollen abgelesen werden konnte, wurde die Grenze dort angenommen, wo ein Fazieswechsel, also eine Schichtgrenze, in einer plausiblen Tiefe ausgewiesen war.

Diese Tiefenangaben wurden als Punktcover geplottet und anschließend die Tiefenlinien per Hand eingezeichnet. Parallel wurde ein erstes Variogramm berechnet und auf dieser Basis die Tiefenlage der pleistozänen Oberfläche digital ermittelt. Ein Vergleich beider Darstellungen machte die offensichtliche Fehlinterpretation der digitalen Ermittlung der Holozänbasis deutlich. In diversen Iterationsschritten wurden Stützstellen gesetzt, bis die digital ermittelte Holozänbasis mit der analog ermittelten übereinstimmte.

Diese Daten stellen die Basis für die Ermittlung der Qualität der errechneten holozänen Basis dar. Für jeden dieser Werte wurde die Abweichung des rechnerisch ermittelten Wertes vom Originalwert bestimmt, die sogenannten „Residuals“. Hierbei ergab sich eine maximale Abweichung von 3,2 m allerdings bei einer mittleren Abweichung von nur $\pm 0,2$ m. Die Abweichung von 3,2 m des errechneten Wertes vom vorgegeben liegt ganz am Rande des Untersuchungsgebietes im Listland.

Die heutige Geländeoberfläche konnte anhand der verfügbaren Daten erfolgreich konstruiert werden. Sie stellt das Ergebnis einer mehrere 1.000 Jahre andauernden Veränderung des Ausgangsreliefs dar. Für die Beurteilung von Sedimenteinträgen und Umlagerungen musste das pleistozäne Ausgangsrelief zum Zeitpunkt vor dem Eindringen des Nordseewassers rekonstruiert werden. Folgende Kriterien wurden für die Annahme einer nicht durch die Nordsee erodierten Geländeoberfläche getroffen:

- Bodenbildungshorizont; dieser häufig angetroffene Horizont stellt die postglaziale erste Bodenbildung durch Klimaerwärmung dar. Dieser Horizont wird von Geschiebeablagerungen oder fluviatilen Sedimenten unterlagert.
- Basistorf; diese Ablagerung ist durch Stauwasser in Küstennähe oder aber in Senken ebenso durch Stauwasser entstanden, bevor die Nordsee diese Bereiche mit marinen Sedimenten überdeckte.
- Stark humose Basissedimente; diese sind größtenteils mit Bodenbildungshorizonten vergesellschaftet. Größtenteils wird es sich hier um die Ansätze von Bodenbildungshorizonten handeln, die aber nicht als solche in der Kernansprache vermerkt sind.

Sämtliche Bohrungen wurden entsprechend den oben angetroffenen Schichten codiert und anschließend geplottet. Bohrungen, die die Holozänbasis nicht erreichen oder aber keinen der angesprochenen Horizonte aufweisen, wurden anhand benachbarter Bohrungen entsprechend in ihrem Höhenniveau einem plausiblen „Basis-Relief“ angeglichen. Einschnitte durch tiefe Priele in die pleistozäne Basisfläche traten nur selten auf und wurden durch Stützwerte, die sich an benachbarten Bohrungen orientierten, angeglichen. Das weitere Vorgehen entspricht dem der Ermittlung der

heutigen holozänen Basis. Aufgrund dieser Datenbasis wurde das Variogramm erzeugt und die pleistozäne Ausgangsbasis ermittelt. Anschließend wurden wiederum die Residuals errechnet. Die Standardabweichung beträgt wiederum ca. 0,2 m mit den gleichen Extremabweichungen von 3,2 m in den gleichen Bohrungen wie bei der Ermittlung der heutigen Holozänbasis.

Für Sedimentumlagerungen im Wattenmeer wurde ein Szenario angenommen, dass in naher Zukunft maximal die obersten drei Meter oberhalb –5 m NN einer Erosion unterliegen werden. Somit galt es, die sedimentologische Zusammensetzung zu ermitteln. Siebkurven standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung. In den Protokollen wird zwischen tonig/siltigen und sandigen Sedimenten unterschieden. Die vertikale Auflösung beträgt maximal einen Zentimeter. Vielfach wurde aber eindeutig nur in 5 bis 10 cm Einstufungen unterschieden. Die Schichtmächtigkeit beträgt vielfach über einen Meter. So wurde auch aus arbeitstechnischen Gründen die sedimentologische Zusammensetzung auf Meterschichten bezogen und in Prozenten angegeben. Neben Sand und Silt/Ton ($<63 \mu\text{m}$) wurde noch der organische Bestandteil ermittelt. Dieser wurde allerdings, da er keine Rolle spielte und eine digitale Ermittlung der Verteilung keinen Sinn machte, nicht weiter betrachtet. Im ersten Meter konnten somit die Schichtstärken direkt in Prozent angegeben werden. Der zweite und dritte Meter der Bohrprofile wurde ebenfalls auf die Gesamtverfügbarkeit an Sediment bezogen, da, wenn Material aus dem zweiten Meter freigesetzt werden würde, bereits der erste Meter erodiert worden ist. Somit beziehen sich die Prozentangaben immer auf die betrachtete Gesamtsäule des Sedimentes. Aufschüttungen wie z. B. Deiche oder Warften wurden aus der Betrachtung ausgeschlossen, da es sich hierbei um lokal begrenzte Sedimentvorkommen handelt. Mit diesen Daten wurden die Variogramme errechnet und anschließend über das Kriging-Verfahren die sedimentologische Zusammensetzung ermittelt.

Die Standardabweichungen der Residuals liegen zwischen 3,2 % und 3,6 %.

3 Ergebnisse

Die Höhenlage der heutigen pleistozänen Oberfläche ist in Abb. 3 dargestellt. Der erste Kontakt des steigenden Meeresspiegels mit der Region erfolgte über das Lister Tief vor mehr als 8.000 Jahren. Die Entwässerung des Hinterlandes nördlich einer Grenze Amrum-Föhr-Festland erfolgte über das Lister Tief in nord-westlicher Richtung. Südlich dieses Bereiches erfolgte die Transgression ca. 500 Jahre später. Die Entwässerung dieses Raumes erfolgte mehr oder minder direkt Richtung Westen. Die Einzugsgebiete der Lecker- und Soholmer Au und der Wiedau waren durch eine Wasserscheide getrennt.

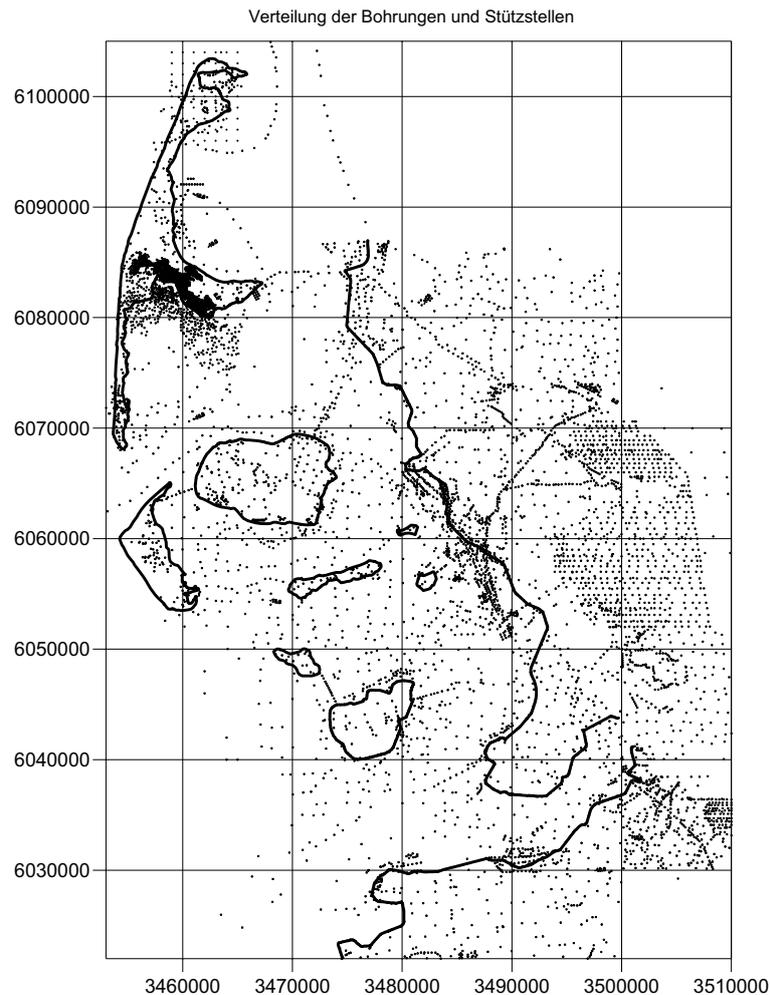


Abb. 2: Verteilung der Bohrungen und Stützstellen

Deutlich sind die Unterschiede zwischen dem nördlichen und dem zentralen bzw. südlichen Bereich von Nordfriesland zu erkennen. Herrschen im Norden die heute noch vorhandenen Geschiebemergelkomplexe von Sylt-Amrum-Föhr vor, so fehlen im südlich anschließenden Bereich entsprechende pleistozäne Hochlagen. Erst vor ca. 6.800 Jahren entwickelten sich mit der Überflutung der Föhrer Schulter die Voraussetzungen für das heutige Wattenmeer. Eine westliche Barriere zwischen Amrum und Eiderstedt kann bis zu diesem Zeitpunkt nicht nachgewiesen werden. Falls es eine solche gegeben haben sollte, wird diese erst durch die Entlastung dieses Bereiches auf Grund des nun nach Norden abfließenden Wasser entstanden sein können. Mit der Abnahme der Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstieges um ca. 6.500 v. h. konnte es anschließend zur Verlandung des Bereiches kommen.

Das Fassungsvermögen des betrachteten Bereiches (Abb. 4) zeigt einen nahezu ausgeglichenen Verlauf mit Ausnahme des Bereiches zwischen -9 und -8 m. Es scheint eine Art „Gleichgewichtsbedienung“, also eine Abhängigkeit von Fassungsvermögen zu Meeresspiegelanstieg, zu geben. Die nicht kontinuierliche Zunahme des Fassungsvermögens zwischen -9 und -8 m kann evtl. mit dem Bereich der Föhrer Schulter in Verbindung gebracht werden. Erst nach Überflutung dieses relativ widerstandsfähigen Bereiches gleicht sich das Fassungsvermögen der ursprünglichen Form wieder an.

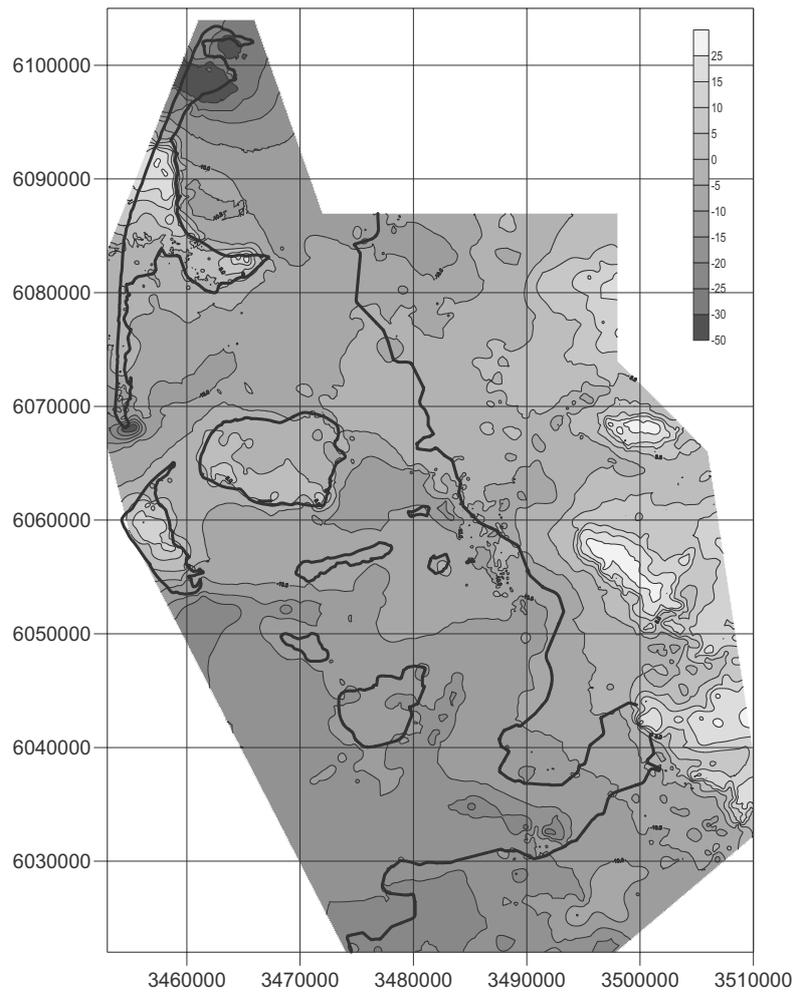


Abb. 3: Tiefenlage der heutigen Holozänbasis

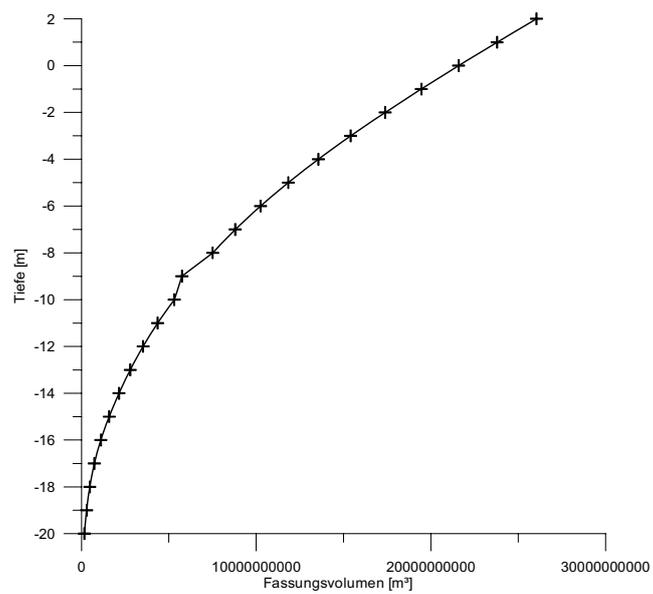


Abb. 4: Fassungsvolumen des Untersuchungsraumes

Für die Beurteilung der Sedimentbilanz wurde der Bereich nördlich des Hindenburgdammes aus der Betrachtung ausgenommen, da hier die Datenlage am unsichersten ist. Tabelle 1 gibt den Überblick über die vorhandenen Sedimentmengen wieder. Das heutige Volumen, also die reale Sedimentmenge, beträgt $19,867 \times 10^9 \text{ m}^3$. Dem stehen $1,828 \times 10^9 \text{ m}^3$ erodiertes Volumen, also die Differenz zwischen der Ausgangsbasis zu Beginn der Transgression und dem heutigen Volumen gegenüber. Dies entspricht nur 9,2 % des heute vorhandenen Volumens. Aus interner Umlagerung stammen somit maximal 9,2 %. Über 90,8 % des Sedimentvolumens müssen somit von außen eingetragen worden sein. Da keine größeren Flusszuflüsse vorhanden sind, muss dieses Material von der offenen Nordsee eingetragen worden sein (s.a. Hoselmann & Streif 1997). Bei einer Annahme, dass das nordfriesische Wattenmeer ehemals bis NN im Durchschnitt aufgelandet war, reduziert sich die interne Umlagerung auf 8,5 %.

Dem Sedimenthaushalt sind durch Eindeichung ca. 33,47 % des marinen Sedimentes entzogen. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Sedimente hinter den Festlandsdeichen, die einer Mobilisierung nicht zur Verfügung stehen, da davon ausgegangen wird, dass diese Bereiche auch mittelfristig dem direkten Meereseinfluss entzogen sein werden.

Tab. 1: Volumenbilanzen [m^3]

| Bezugshorizont | Volumen |
|---|----------------------|
| Heutiges holozänes Volumen, bezogen auf aktuelle Oberfläche | $19,867 \times 10^9$ |
| Holozänes Fassungsvermögen auf 0 m NN bezogen | $21,592 \times 10^9$ |
| Holozänes Fassungsvermögen auf 1 m NN bezogen | $23,792 \times 10^9$ |
| Holozänes Fassungsvermögen auf 2 m NN bezogen | $26,047 \times 10^9$ |
| Erodiertes pleistozänes Volumen | $1,828 \times 10^9$ |
| Erodiertes Volumen bezogen auf heutiges holozänes Volumen | 9,2 % |
| Erodiertes Volumen bezogen auf NN Volumen | 8,5 % |
| Eingedeichtes holozänes Volumen | $6,65 \times 10^9$ |
| Eingedeichtes Volumen bezogen auf holozänes Volumen | 33,47 % |

Die sedimentologische Zusammensetzung des obersten Meters des Untersuchungsraumes ist in Abb. 5 beispielhaft dargestellt. Im obersten Meter herrschen in Geestnähe sowie in Eiderstedt die tonig-siltigen Sedimente vor. Westlich der heutigen Seedeichlinie werden die Sedimente relativ schnell gröber, mit Ausnahme der Bereiche um die Inseln und Halligen. Hier machen sich deutlich die ehemaligen Landgewinnungsmaßnahmen bemerkbar. Diese Tendenz setzt sich auch bis in zwei Meter Tiefe fort. Bei der Betrachtung der obersten drei Meter scheinen dann schon die älteren und etwas feineren Sedimente durch. So ist z. B. zwischen Föhr und Hindenburgdamm sowie Oland-Festland eine Verfeinerung dieser Bereiche festzustellen. Die oberen zwei Meter scheinen somit einem höheren Energieeinfluss ausgeliefert gewesen zu sein, als die unterlagernden. Dieses würde auch der oben angesprochenen Zunahme des Energieeintrages entsprechen, dass die oberen Sedimente aufgrund nachchristlicher Zunahme von Sturmflutereignissen entsprechend an Feinkorn verarmt sind.

Für die Ermittlung der Sedimente nach Qualität und Quantität wurde aufgrund des guten Datenbestandes das Einzugsgebiet der Norderaue gewählt. Die Kornzusammensetzung an der aktuellen Oberfläche wurde der geologischen Übersichtskarte CC1518 Flensburg bzw. der Bodenkarte CC1518 Flensburg entnommen. In der geologischen Karte sind 71 % als Sand ausgewiesen, wohingegen die Bodenkarte 84 % Sand ausweist. In der Ton/Silt Fraktion herrscht eine Übereinstimmung von 72 % und in der Sandfraktion von 83 %. Diese Unterschiede sind auf

unterschiedliche Aufnahmemethoden und unterschiedliche Zielrichtungen der Karten zurückzuführen. Außerdem spielt der Aufnahmezeitpunkt der Oberflächensedimente eine entscheidende Rolle. Für die Gesamtbetrachtung eines möglichen zukünftigen Trends in der sedimentologischen Entwicklung können diese Abweichungen als akzeptabel angesehen werden.

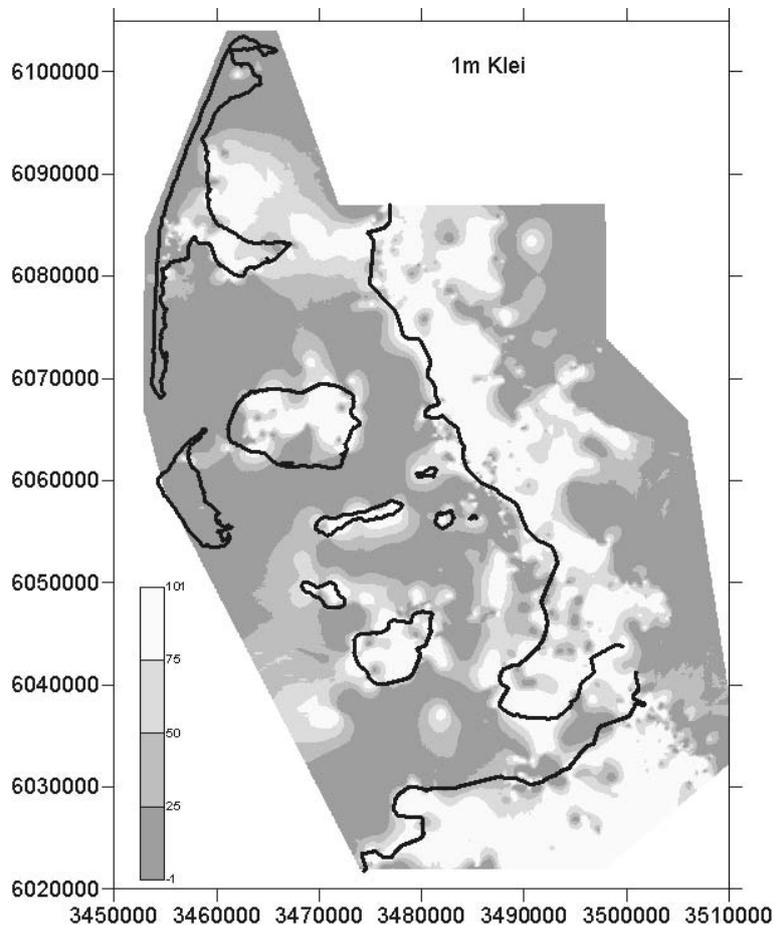


Abb. 5: Prozentualer Kleianteil im obersten Meter

In Tabelle 2 sind die sich aus der vorhergehenden Analyse ergebenden Sand- und Tonanteile in dem Gebiet nach den ersten drei Metern und in unterschiedlichen Höhenstufen zwischen -1 m und -5 m angegeben. Als Szenario wurde angenommen, dass in diesen Bereichen mittelfristig Erosion auftritt und es in den Bereichen zwischen -1 m und $+2$ m NN zu entsprechenden Sedimentationen kommen kann. In Tabelle 3 sind die unter Annahme von unterschiedlichen Anstiegsraten benötigten Sedimentmengen nach Qualität und Quantität angegeben. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt deutlich, dass für interne Umlagerung genügend Sediment zur Verfügung gestellt werden könnte.

4 Diskussion

Wie aus den obigen Untersuchungen ersichtlich, kam das Material bisher überwiegend aus der Nordsee und nicht aus interner Umlagerung. Auch wenn die benötigten Mengen im Verhältnis zur möglichen Erosion der Prielränder relativ gering sind, wird erwartet, dass besonders das Feinkorn nur noch in den Bereichen zur Ablagerung kommt, wo entsprechende Küstenschutzmaßnahmen, wie z.B. Lahnungen, Gruppen oder Verbindungsdämme durchgeführt werden. D.h., dass die „biologische Integrität“ des Wattenmeeres sich in Richtung Biozönosen des Misch- bis Sandwattes verschieben wird. Durch den steigenden Meeresspiegel werden Flächen, die heute noch als relativ stabil gelten, in

den Bereich der Erosion kommen. Unabhängig von der Sedimentverfügbarkeit können sich die obersten Bereiche des Wattenmeeres nur mit sandigem Material auffüllen. Dieser Prozess wird auch von Flemming & Bartholomä (2002) beschrieben. Der von Streif (1990) beschriebene „Bulldozereffekt“, d.h., das Herantransportieren von Sedimenten aus der Nordsee Richtung Wattenmeer setzt voraus, dass genügend Sedimente in entsprechenden Tiefen vorhanden sind. Früher kamen hier vor allem die eiszeitlichen Ablagerungen als Liefergebiete in Frage. Diese sind heute jedoch abgetragen. Die Kartierung von Figge (1998) weist nur einen geringmächtigen Sedimentschleier, bestehend aus Sanden, über einem dichter gelagerten Untergrund auf. Zurzeit scheint sich hier eine Art „Gleichgewicht“ zwischen Wassertiefe und hydrodynamischer Energie (i.e. Wellenenergie) vorhanden zu sein, so dass überwiegend ein küstenparalleler Sedimenttransport stattfindet. Da das heutige Gefälle aufgrund der künstlichen Fixierung der Ostgrenze des Wattenmeeres steiler ist (z.B. Verkürzung der Distanz zur ca. -10 m Tiefenlinie von 40 km auf 32 km auf Höhe des Beltringhardener Kooges) als das postglaziale bzw. vorchristliche (ca. 1.700 – 1.000 v. Chr.), kann seewärtiges Material kaum noch ins Wattenmeer eingetragen werden. Nennenswerte Materialmengen ständen nur in den Inselkernen von Amrum, Sylt und Föhr zur Verfügung. Gerade diese Kombination macht aber zum Beispiel durch Sandvorspülungen den Küstenschutz für die Geestkerninseln kalkulierbarer gegenüber den eher unkalkulierbaren Bereichen des Wattenmeeres.

Es wird erwartet, dass mittelfristig die eulitoralen Flächen abnehmen werden und sich die Sedimentzusammensetzung vergrößern wird. Dies hat entsprechende ökologische und küstenschutztechnische Auswirkungen. Konnte das Wattenmeer von 5.000 bis 1.000 v.h. anscheinend problemlos mitwachsen, so ist seitdem eine Erosionstendenz zu verzeichnen. Spätestens die Sturmflut von 1362 markiert diesen Wendepunkt in der Sedimentbilanz. Seit diesem Zeitpunkt sind zwar große Teile des Wattenmeeres aufgelandet und eingedeicht worden, der nichteingedeichte Bereich wird aber seitdem erodiert, wie die großen Prielläufe der heutigen Zeit zeigen. Ohne anthropogene Maßnahmen wird somit die Vergrößerung der Sedimente und die Erosion durch die großen Prielsysteme weitergehen. Auffällig ist auf den Karten der Sedimentverteilung, dass nur in Bereichen nördlich vom Hindenburgdamm und auf den hohen Wattrücken noch feineres Material anzutreffen ist. Dies würde bedeuten, dass Dämme vom Festland nach Föhr-Amrum und nach Pellworm sowie verstärkte Vorlandarbeiten hier kurzfristig die Feinkornsedimentation fördern könnten und damit zur Erhöhung der Biodiversität und zur Stabilisierung des Wattenmeeres beitragen können. Mittelfristig werden aber auch diese Maßnahmen der Erosion bei steigendem Meeresspiegel nicht entgegenwirken können.

Eine Alternative zu diesen Möglichkeiten stellt die kontrollierte Ausdehnung des Wattenmeeres nach Osten dar. Eine dem klimabedingten Meeresspiegelanstieg angepasste Landnutzung sollte dabei im Vordergrund stehen. Landwirtschaftliche Anpassung an semi-marine Bereiche bei gleichzeitigem Erhalt des Wattenmeeres durch neuen Flutraum würde nicht nur eine kulturhistorische Bereicherung des Bereiches darstellen, sondern auch neue und nachhaltigere Einkommensmöglichkeiten in der Region sowohl für die Landwirtschaft aber auch für den Tourismussektor sowie im weiteren Sinne durch Aquakultur auch der Fischereiwirtschaft schaffen.

Tab.2: Korngrößenanteile der obersten drei Meter

| | |
|--|----------------|
| Sandanteil im oberster Meter | m ³ |
| Zwischen –4 m und –5 m: | 903102,31 |
| Zwischen –3 m und –4 m: | 973663,90 |
| Zwischen –3 m und –2 m: | 1771681,28 |
| Zwischen –2 m und –1 m: | 4115260,47 |
| | |
| Sandanteil in den obersten zwei Metern | m ³ |
| Zwischen –4 m und –5 m: | 1904198,4 |
| Zwischen –3 m und –4 m: | 1934711,6 |
| Zwischen –3 m und –2 m: | 3485584,0 |
| Zwischen –2 m und –1 m: | 8700428,0 |
| | |
| Sandanteil in den obersten drei Metern | m ³ |
| Zwischen –4 m und –5 m: | 2807210,4 |
| Zwischen –3 m und –4 m: | 2845269,0 |
| Zwischen –3 m und –2 m: | 5045182,26 |
| Zwischen –2 m und –1 m: | 12556484,7 |
| | |
| Anteil <0,63mm im obersten Meter | m ³ |
| Zwischen –4 m und –5 m: | 83486,00 |
| Zwischen –3 m und –4 m: | 157869,10 |
| Zwischen –3 m und –2 m: | 311322,20 |
| Zwischen –2 m und –1 m: | 688960,60 |
| | |
| Anteil <0,36mm in den obersten zwei Metern | m ³ |
| Zwischen –4 m und –5 m: | 206895,4 |
| Zwischen –3 m und –4 m: | 341388,4 |
| Zwischen –3 m und –2 m: | 663178,6 |
| Zwischen –2 m und –1 m: | 146179,8 |
| | |
| Anteil <0,63mm in den obersten drei Metern | m ³ |
| Zwischen –4 m und –5 m: | 331401,0 |
| Zwischen –3 m und –4 m: | 1509517,8 |
| Zwischen –3 m und –2 m: | 676055,4 |
| Zwischen –2 m und –1 m: | 2298100,5 |

Tab.3: Benötigte Sedimentmengen nach erwarteter Geländeerhöhung

| Erhöhung des Bodenniveaus um: | Ton zwischen -1 m und +2 m NN | Sand zwischen -1 m und +2 m NN | Ton zwischen -1 m und 0 m NN | Sand zwischen -1 m und 0 m NN | Ton zwischen 0 m und 1 m NN | Sand zwischen 0 m und 1 m NN | Ton zwischen 1 m und 2 m NN | Sand zwischen 1 m und 2 m NN |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 0,25 m | 637525 | 1827405 | 194452,5 | 1599195 | 367990 | 224227,5 | 75082,5 | 5927,5 |
| 0,5 m | 1275050 | 3654810 | 388905 | 3198590 | 735980 | 448455 | 150165 | 11855 |
| 0,75 m | 1912575 | 5482215 | 583357,5 | 4797885 | 1103970 | 672682,5 | 225247,5 | 17782,5 |
| 1,0 m | 2550100 | 7309620 | 777810 | 6397180 | 1471960 | 896910 | 300330 | 23710 |

Literatur

- Ehlers, J. (1988): *The Morphodynamics of the Wadden Sea*. 379 p., Balkema Verlag.
- Figge, K. (1998): *Materialinventur an der deutschen Nordseeküste*. - KFKI-Vorhaben FKZ 03 KIS 306, (unveröff.).
- Flemming, B. & A. Bartholomä (2002): *Sedimentation und Erosion an der Nordseeküste*. In : Lozan, J.L., E. Rachor, K. Reise, J. Sündermann & H. v. Westernhagen (eds.): *Warnsignale aus Nordsee und Wattenmeer*. S. 57-61.
- Hayes, M.O. (1979): *Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave Regime*. In: Leathermann (eds.): *Barrier Islands*.
- Hoselmann, C. & H. Streif (1997): *Bilanzierung der holozänen Sedimentakkumulation im niedersächsischen Küstenraum*. - Z. dt. geol. Ges. 148 (3-4), 431-445.
- König, D. (1987): *Historisches über Wattenmeer-Salzwiesen*. In: Kempf, N., J. Lamp & P. Prokosch (Hrsg.): *WWF Tagungsbericht 1- Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur*. Husumer Druck- und Verlagsgesellschaft, Husum, S. 31-70.
- Spiegel, F. (1997): *Die Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres: Morphologische Strukturen und Anpassungsbedarf bei weiter ansteigendem Meeresspiegel*. - Ber. Forschung. u. Technologiez. Westküste, 14, Büsum.
- Streif, H. (1990): *Das Ostfriesische Küstengebiet - Nordsee, Inseln, Watten und Marschen*. Samml. Geol. Führer, 57.

Adresse

Dr. Kai Ahrendt
 Büro für Umwelt und Küste
 Steinstr. 25
 D-24118 Kiel

ahrendt@iczm.de