

Ein Beitrag zur holozänen Entwicklung Nordfrieslands

Von KAI AHRENDT

Zusammenfassung

Für den Küstenabschnitt zwischen der deutsch-dänischen Grenze und einer Linie St. Peter-Ording–Garding–Katharinenherd–Husum wurden quali- und quantitative Untersuchungen über die postglaziale Sedimente und deren Kornverteilung durchgeführt. Ca. 19.000 Bohrdaten stand zur Verfügung, wovon ca. 6.500 für die weitere Auswertung berücksichtigt wurden. Die Geometrie des holozänen Akkumulationskeils wurde rekonstruiert. Mit den modernen EDV-technischen Hilfsmitteln wurde eine Gesamtbilanz des Sedimenteintrages in die Küstenregion erstellt. Des Weiteren wurden Massenbilanzen der granulometrisch unterschiedlichen Schichten der obersten drei Meter in einem ausgewählten Wattenzugsgebiet erstellt. Hieraus wurden Massenbilanzen erstellt, die es erlauben, die Sedimente nach Menge und Korngröße zu beurteilen. Anschließend wurde anhand von morphodynamischen Stabilitätskriterien die benötigten und freizusetzenden Sedimentmengen für die Aufrechterhaltung unterschiedlicher morphologischer Bereiche ermittelt. Als Ergebnisse können festgehalten werden:

- Die Volumenentwicklung des holozänen Akkumulationskeils von –20 m NN bis –5 m NN folgt einer logarithmischen Entwicklung (mit Ausnahme des Bereiches zwischen –10 m NN und –8 m NN);
- Maximal 10 % des holozänen Sedimentes stammen aus Erosion innerhalb des Untersuchungsraumes, d.h., 90 % müssen von außen (Nordsee) eingetragen worden sein;
- Die Entwässerung des Bereiches südlich einer Grenze Amrum–Föhr–Festland ist bis zur Tiefenlinie von ca. –6 m NN (ca. 5.000 v. Chr.) nach Westen verlaufen. Erst anschließend fand eine Entwässerung nach Norden statt;
- Hinweise auf eine glaziale Barriere im Bereich Amrum–Süderoog–Eiderstedt konnten nicht erbracht werden;
- Ca. 33 % des holozänen Sedimentvolumens sind eingedeicht und damit dem Sedimenthaushalt entzogen;
- Aus interner Umlagerung ständen genügend Sedimente für das Mitwachsen des Wattenmeeres zur Verfügung, was jedoch zu einer Versteilung des Reliefs führen würde mit einer Vergröberung der Kornzusammensetzung;
- Ein nennenswerter Sedimenteintrag von See her wird nicht mehr erwartet, da dort kaum noch Sedimente zur Verfügung stehen;
- Mittelfristig wird sich der heutige Charakter des Wattenmeeres ändern. Dabei wird sich das Verteilungsmuster der EU- und Sublitoralfächen verändern. Außerdem wird sich das Ökosystem in Richtung auf eine Sandfauna verschieben;
- In nicht eingedeichten Bereichen ist eine Vergröberung des Sedimentes im obersten Meter festzustellen, welches auf eine Verarmung an Feinkorn hinweist, was wiederum zu einer Habitatveränderung im Wattenmeer führt.

Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse des KFKI-Forschungsvorhabens „Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer“ (03KIS037) in zusammenfassender Form dar. Das Projekt wurde vom 1.7.2002 bis 30.5.2005 am GKKS-Forschungszentrum durchgeführt. Der Dank gilt dem Projektträger und dem BMBF für die finanzielle Unterstützung des Projektes sowie der konstruktiven Beratergruppe.

Summary

The sediment distribution and the postglacial sediment accumulation in the North Frisian Wadden Sea were analysed. The last 8000 years of the geological development was lighted on base of 6.000 (ca. 19.000 complete) boreholes in high resolution. The geometry of the Holocene accumulation wedge was reconstructed. This great amount of boreholes allowed an estimation of

the amount of eroded and resettled sediment in quality (grain size) and quantity. On base of modern computer-technic a balance of eroded/accumulated sediments was calculated. Additional the granulometric sediment distribution of the upper 3 m, in 1 meter interval, was determined. On basis of morphological stability criteria the amount of discharged material and the amount of required sediment for the maintenance of the stability of different units in the Wadden Sea (i. e. sandflat, mixed flat, mudflat) in the case of a sealevel rise where estimated and the availability was calculated. Different sealevel rises were considered.

The raw data where the official topographic data from Schleswig-Holstein, topographic data of the Wadden Sea from the LANU and the ALR. The topographical data where available in digital format. A 50 × 50 m grid was calculated on basis of this data. Geological information where available only on paper. 6.000 of 19.000 boreholes where digitised and recorded by specific software.

The results are:

- the Holocene volumetric development follows a logarithmic trend, with the exception of the region between -10 m NN and -8 m NN (German ordnance datum)
- maximal 10 % of the Holocene sediments come from internal erosion, 90 % came from outside (mostly from the North Sea)
- the dewatering southerly of a border Amrum-Föhr-mainland up to -6 m NN (ca. 5.000 BC) follows a westerly direction. After 5.000 BC the dewatering is North-West bonded
- a hint of a barrier in the area Amrum-Süderoog-Eiderstedt was not found
- ca. 33 % of the Holocene sediments are damped up and not available for remobilisation
- There is enough sediment inside the system for a growing of the higher part of the Wadden sea following a rising sea level. This leads to a steepening of the relief and to coarser sediment
- No appreciable import of sediment from the North Sea is expected because there is no available sediment
- The stability of the Wadden Sea is endangered in mid term, the ecosystem will evolve to a sand fauna and the distribution of eu- and sublitoral will change
- In the non-dyked areas the a coarsening from the lower to the upper region (first meter) can be identified.

I n h a l t

1. Einleitung	3
2. Kurzer Abriss der holozänen Entwicklung	3
3. Verwendeter Datenbestand.	5
4. Vorgehensweise	6
5. Auswertung	9
5.1 Digitale Erfassung	9
5.2 Erstellung des digitalen Geländemodells	9
5.3 Ermittlung der Holozänbasisfläche.	12
5.4 Ermittlung der Geländeoberfläche zu Beginn der nacheiszeitlichen Transgression. . .	13
5.5 Ermittlung der Sedimentzusammensetzung der obersten drei Meter	16
6. Ergebnisse	20
7. Diskussion.	27
8. Schriftenverzeichnis	31

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.

Im Unterschied zu dem ostfriesischen Küstenbereich (HOSELMANN u. STREIF, 1997, 1998) spielen hochaufragende glaziale und tertiäre Sedimentkörper in Nordfriesland eine wichtige Rolle in den postglazialen Sedimentationsabläufen. An der nordfriesischen Außenküste herrschen im Gegensatz zur niedersächsischen Küste klastische Sedimentserien vor. Es wurde erwartet, dass der von STREIF (1990) für die niedersächsische Küste postulierte „Bulldozer-Effekt“ (Sedimenttransport von der Nordsee durch die Wellenkraft Richtung Land) für das nordfriesische Wattenmeer nur bedingt zutrifft.

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 für das Mitwachsen der Wattflächen bei einem beschleunigt steigenden mittleren Meeresspiegel.

Das Untersuchungsgebiet reicht von der Geestkante im Osten bis zur deutsch-dänischen Grenze, der Außenküste der nordfriesischen Inseln und Außensände (bzw. der –10 m Tiefenlinie) bis nach Eiderstedt bis zur Grenze der Nehrungshaken Katharinenherd–Garding–Tating–St. Peter-Ording (Abb. 1).

2. 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 nachfolgende 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 hinterließen 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 Basaltorf. Danach wurde über der allmählich „ertrinkenden“ Pleistozänlandschaft mächtige holozäne Küstensedimente akkumuliert.

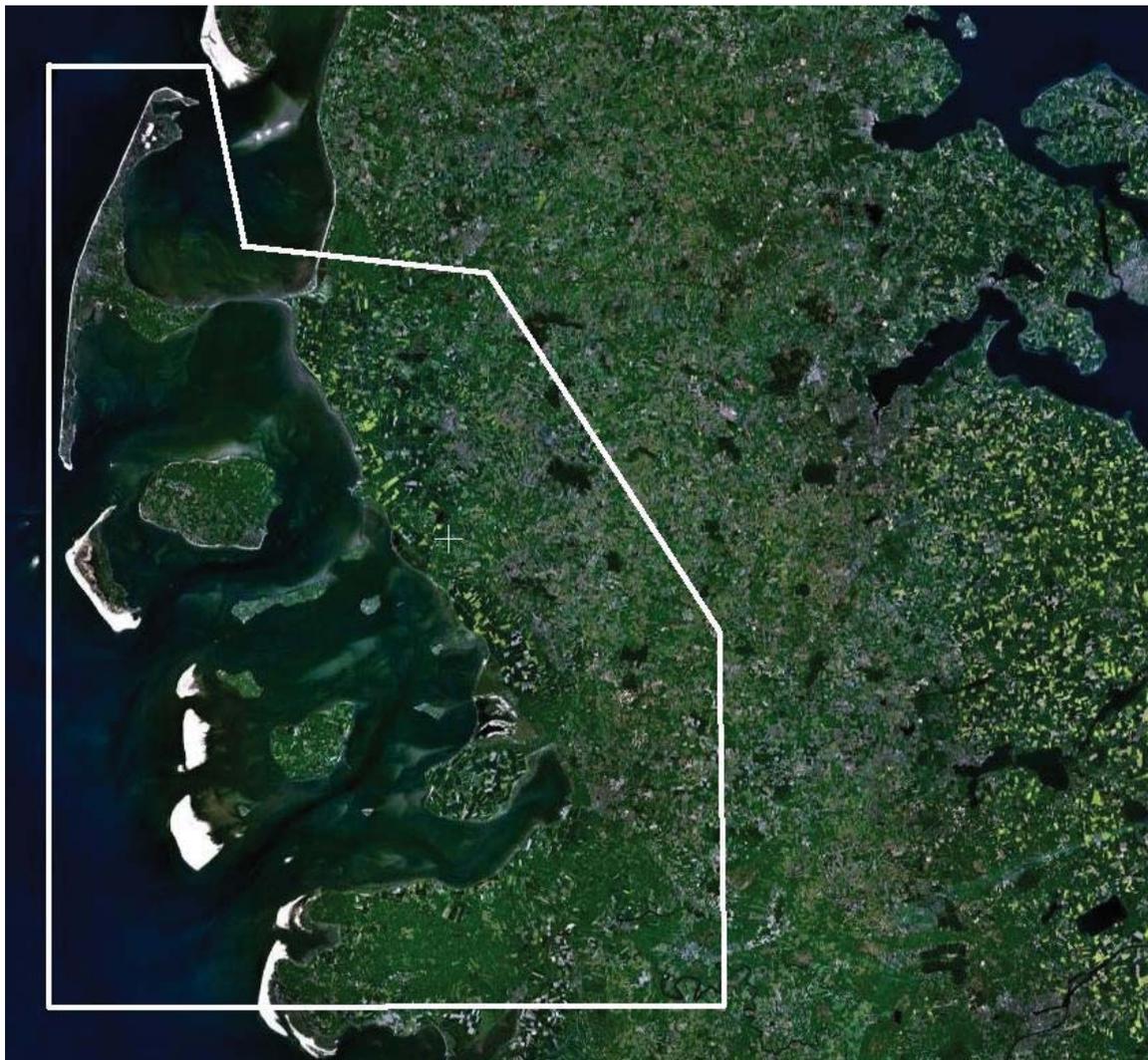


Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet

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, nordwestlich Eiderstedt und 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. So kam es im Schutze dieser Geestkerne und Nehrungen zu Stillwasserablagerungen, anderenorts entstanden Serien klastischer Sedimentwechsellagerungen aus Ton-Silt und Sand. Vollmarine Ablagerungen zeugen von temporären Meereseinbrüchen in diesen Raum.

Im ersten Jahrtausend nach Chr. kam es immer öfter zu Überflutungen. In dieser Zeitspanne begann der Mensch bereits massiv in den Naturraum einzugreifen. Erosionsprozesse traten in den Vordergrund.

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.

3. V e r w e n d e t e r D a t e n b e s t a n d

Für die Rekonstruktion der Holozänbasisfläche sowie die weitere geologische Entwicklung des Raumes wurden folgende Unterlagen verwandt:

- aktuelle Höhendaten
- Bohrdaten
- Karten und Tiefenpläne und
- geologische Profile.

Die wichtigste digital verfügbare Datenbasis für die heutige Topographie bildete das Allgemeine Liegenschaftskataster (ALK) mit einer Auflösung von $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ und einer Höhengenaugigkeit von $\pm 10\text{ cm}$ sowie die ATKIS-Daten des Landes Schleswig-Holstein.

Für die Wattbereiche konnte auf das digitale Geländemodell des nordfriesischen Wattenmeeres des LANU zurückgegriffen werden. Dieses Geländemodell liegt als ARC/INFO-GRID in einer Maschenweite von $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ vor und bezieht sich wie das terrestrische Höhenmodell von NF auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Das Geländemodell umfasst den gesamten nordfriesischen Wattenmeerraum und wurde durch Krigging-Interpolation, unter zugrundelegen der Höheninformationen folgender Kartenwerke erstellt (SPIEGEL 1997, S. 22):

- KFKI (Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurwesen) Küstenkarten 1:25.000 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 stratigraphischen Einstufung. Pollenanalytische und mikropaläontologische Untersuchungen standen bei der zeitlichen Einstufung im Vordergrund. ^{14}C -Altersdatierungen wurden nur in Einzelfällen durchgeführt.

Die Bohrdaten des ALR werden in Aktenordnern verwaltet. Insgesamt wurden aus dem ALR-Archiv 3.993 Bohrdaten ausgewertet. Die meisten der Bohrergebnisse wurden

von höchst erfahrenen Geologen wie K. GRIPP, W. G. SIMON und E. DITTMER bearbeitet.

Sämtliche Bohrdaten des ALR liegen analog vor und sind in die TK 25 eingetragen und mit Koordinaten versehen. Die Lagegenauigkeit beträgt ± 10 m. Es finden sich hier unter anderem detaillierte Angaben über Schichteinteilung, Schichtbeschreibungen, eingemessenen Standort (in Gauß-Krüger- und UTM-Koordinaten), Bohransatzhöhe sowie den Grund der Bohrerkundung und das ausführende Bohrunternehmen wieder. Allerdings fehlten bei diversen Datensätzen für diese Arbeit wichtige Informationen, und zwar hinsichtlich der nivellierten Ansatzhöhe des Bohrstandorts und z. T. der geologischen Zuordnung der einzelnen Schichten.

Ein weiterer Bohrdatenbestand bildet das Bohrkataster des Instituts für Ur- und Frühgeschichte der Universität Kiel. Die seitens Dr. D. HOFFMANN zur Verfügung gestellten Bohrdaten weisen mit insgesamt 2.360 Datensätzen den größten zusammenhängenden Anteil des gesamten Bohrdatenbestandes auf. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse aus Untersuchungen des Küstenholozäns zwischen Sylt und Föhr. Diese Arbeiten wurden in den Jahren zwischen 1965–1968 sowie 1970–1974 durchgeführt und umfassen die geologischen Erkundungen sowohl der Sylter Marsch als auch des Wattbereiches der Rantumer Bucht. Diese Daten wurden bereits von PESCH (2000) digital erfasst.

Im LANU liegen keine originalen analogen Bohrprotokolle mehr vor. Die Bohrprotokolle sind verfilmt worden und werden im Landesarchiv in Schleswig gelagert. Das LANU unterscheidet auf Grundlage der Lagegenauigkeit zwischen Bohrungen, die auf der TK 25 verzeichnet werden, und welchen, die auf die DGK5 eingetragen werden. Letztere sind im Gelände genau eingemessen worden. Vielfach wurden die Bohrungen von Dr. TEMMLER, LANU, direkt bearbeitet oder aber die vorhandenen Bohrprotokolle wurden von ihm akribisch überarbeitet. Neben den Bohrprotokollen sind dazugehörige Gutachten analog vorhanden, die ebenfalls zur Auswertung zur Verfügung standen. Abb. 2 zeigt ein Beispiel von im LANU vorhandenen Bohrprotokollen. Die Daten des ALR und des LANU sind vielfach identisch, jedoch im LANU größtenteils überarbeitet wurden.

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.

4. V o r g e h e n s w e i s e

Neben der Überführung der analogen in digitale Informationen spielte vor allem die Einpassung sämtlicher geologischer Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem eine große Rolle. Die Erstellung der Holozänbasisfläche wie auch die Rekonstruktion der geologischen Entwicklung konnten erst auf der Basis eines georeferenzierten Datenbestandes erfolgen. Da bis auf wenige Ausnahmen alle geologischen Daten im Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem vorlagen, wurden alle Informationen auf dieses Koordinatensystem bezogen.

Die aus der Bohrdatenbank exportierten Tabellen bildeten den wichtigsten Teil des in die Interpolationsberechnungen eingehenden Datenbestandes. 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 Daten-

1517/4

Schichtenverzeichnis

Ort: Pellworm, Wattenmeer 107/75 -P-

Bohrung / Schürf Nr. _____ Zeit **3-4**

Mächtigkeit In m	Entnommene Proben		A1) Benennung und Beschreibung der Schicht
	Nr.	Tiefe	A2) Ergänzende Bemerkung
S 18 4			- 0,41 NN
0,00 - 5,00	1	2,50	Ton, schwach-schluffig , ^{organisch} , sehr schwach feinsandig , ^{Feinsand-} streifen, Muschelreste, breiig, feucht , grau, (Klei mit Wattsandstreifen)
5,00 - 11,10	2	8,00	Feinsand, Kleilagen, Muschelreste, mitteldicht, feucht grau, ^{kalzig} (Wattsand mit Kleilagen ~ 3 : 1)
11,10 - 12,50	3	12,00	Feinsand, sehr schwach ^{mittel} mittelsandig, Muschelreste, mitteldicht , ^{kalzig} feucht, grau, (Wattsand)
12,50 - 16,80	4	15,00	Ton, schwach-schluffig , ^{organisch} , Feinsandstreifen, Muschelreste, ^{kalzig} weich bis steif, feucht, grau, (Klei)
16,80 - 25,00	5 6 7	18,00 21,00 24,00	Feinsand, sehr schwach ^{bis Feinsand} mittelsandig, dicht , feucht, gelb ^{braunlich grau} , ^{kalzig} (Pflanzl.)
S 17 3			-- 0,33 NN
0,00 - 5,50	1	2,50	Ton, schwach-schluffig , ^{organisch} , schwach feinsandig , Feinsandstreifen, Muschelreste, ^{kalzig} breiig , feucht, grau, ^{schwarz} , (Klei mit Wattsandstreifen)
5,50 - 11,50	2	8,00	Feinsand, Kleilagen, Muschelreste, mitteldicht , ^{kalzig} feucht, grau, (Wattsand mit Kleilagen ~ 3 : 1)
11,50 - 12,80	3	12,00	Feinsand, sehr schwach ^{mittel} mittelsandig, Muschelreste, mitteldicht , ^{kalzig} feucht, grau, (Wattsand)
12,80 - 17,00	4	15,00	Ton, schwach-schluffig , ^{organisch} , Feinsandstreifen, Muschelreste, ^{kalzig} weich bis steif, feucht, grau, (Klei mit Wattsandstreifen)
17,00 - 25,00	5 6 7	19,00 22,00 24,50	Feinsand, sehr schwach ^{bis Feinsand} mittelsandig, dicht , feucht, gelb ^{braungrau} , ^{kalzig}

Abb. 2: Ein von Dr. TEMMLER überarbeitetes Protokoll des LANU mit persönlichen Ergänzungen und Hervorhebungen

sätze, die die für das Erstellen der Holozänbasisfläche notwendigen Informationen beinhalten. 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.

Aufgrund der Tatsache, dass die Daten im ALR analog vorlagen und diese nicht erst reproduziert werden mussten, wurde im ersten Schritt auf diese Daten zurückgegriffen. Ein weiterer Vorteil war, dass in den Bohrprotokollen bereits die Koordinaten eingetragen waren. 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. Daher wurden der komplette Datenbestand sowie die Lagekarten im ALR kopiert und für die weitere Bearbeitung ins eigene Büro überführt. Dies war arbeitsaufwendig, hatte aber den Vorteil, dass zu jeder Zeit auf die Originaldaten zurückgegriffen werden konnte, was sich für das vorliegende Projekt als unverzichtbar herausstellte.

Die Daten des LANU werden auf Mikrofilm vorgehalten, die Originale im Landesarchiv in Schleswig gelagert. Dies bedeutet, dass Kopien nicht direkt vom Original vorgenommen werden konnten. Ferner arbeitet das LANU 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. Daher wurden alle TK's und DGK's im LANU kopiert und ins Büro überführt. Hier wurden analoge Listen der Bohrungen aufgestellt, die für die weitere Bearbeitung näher ausgewertet werden sollten. Kriterien waren:

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

Nach dieser Vorauswahl wurden die verfilmten Bohrdaten unter dem Sichtgerät im LANU auf ihre Aussagekraft hin bewertet. Bei „Punktwolken“ wurden die tiefsten Bohrungen ausgewählt und die anderen verworfen. Anschließend wurden die ausgewählten Bohrungen auf Papier reproduziert und zur weiteren Bearbeitung ins eigene Büro überführt. Hier 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. Nahezu alle Bohrungen wurden von fachlich anerkannten Geologen bearbeitet. Größtenteils wurden ältere Bohrungen auch noch von Dr. TEMMLER (LANU) überarbeitet, so dass eine qualitativ hochwertige Datenbasis vorhanden war.

Vielfach konnten Koordinaten und Ansatzhöhen auch den dazugehörigen Gutachten, die ebenfalls kopiert wurden, 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 Isolinenplan 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 aufwie-

sen. Die analogen Karten wurden anschließend digitalisiert und der Datenbasis für die digitale Erstellung der Karten hinzugefügt.

In GeoDin wurde die Herkunft der Daten (Lagegenauigkeit, Ansatzhöhe, Höhe des Reliefs, Endteufe etc.) codiert sowie weitere Codierungen in der aus GeoDin exportierten Excel-Tabelle (Abb. 4) eingefügt. Dies sind vor allem Informationen zur Sedimentbeschaffenheit (Basissedimente, Torfe, Bodenbildung, Lithologisches Ordnungsprinzip, marine/nicht marine Basis etc.).

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

5. Auswertung

5.1 Digitale Erfassung

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 begonnen werden.

GeoDin stellt die in geologischen Landesämtern oder Äquivalenten üblicher Weise verwandte Software zur Verwaltung von Bohdaten dar. Unterschiede in der Anforderung an Nomenklatur, geologische Schlüssel oder geologische Besonderheiten der einzelnen Bundesländer sind bereits überwiegend in GeoDin berücksichtigt. Neben dBase und Access Datenbankformat beinhaltet GeoDin Datenaustauschroutinen zu ARC-GIS und SURFER. Daher wurde diese Software als Datenbank verwandt.

5.2 Erstellung des digitalen Geländemodells (DGM)

Für die Erstellung des digitalen Geländemodells wurden die Daten in ARC Info der offiziellen digitalen Geländeaufnahme des Landesvermessungsamtes Schleswig-Holsteins aus dem Gesamtcover SH als Punkt-Cover (10 m × 10 m) extrahiert. Deiche wurden manuell entfernt. Zu diesem Punktcover wurden die offiziellen digitalen Daten der KFKI-Karte von 1974/76 (LANU-SH) des Wattenmeeres eingeladen. Teilbereiche wurden durch hochauflösende Vermessungen aus den Jahren 1996–2000, die vom ALR-Husum zu Verfügung gestellt wurden, ergänzt. Aus diesen Daten wurde ein 50 m × 50 m Raster generiert (Abb. 5), welches somit größer ist, als die Ursprungsdaten. Verständlicherweise weist das Variogramm daher eine optimale Form auf.

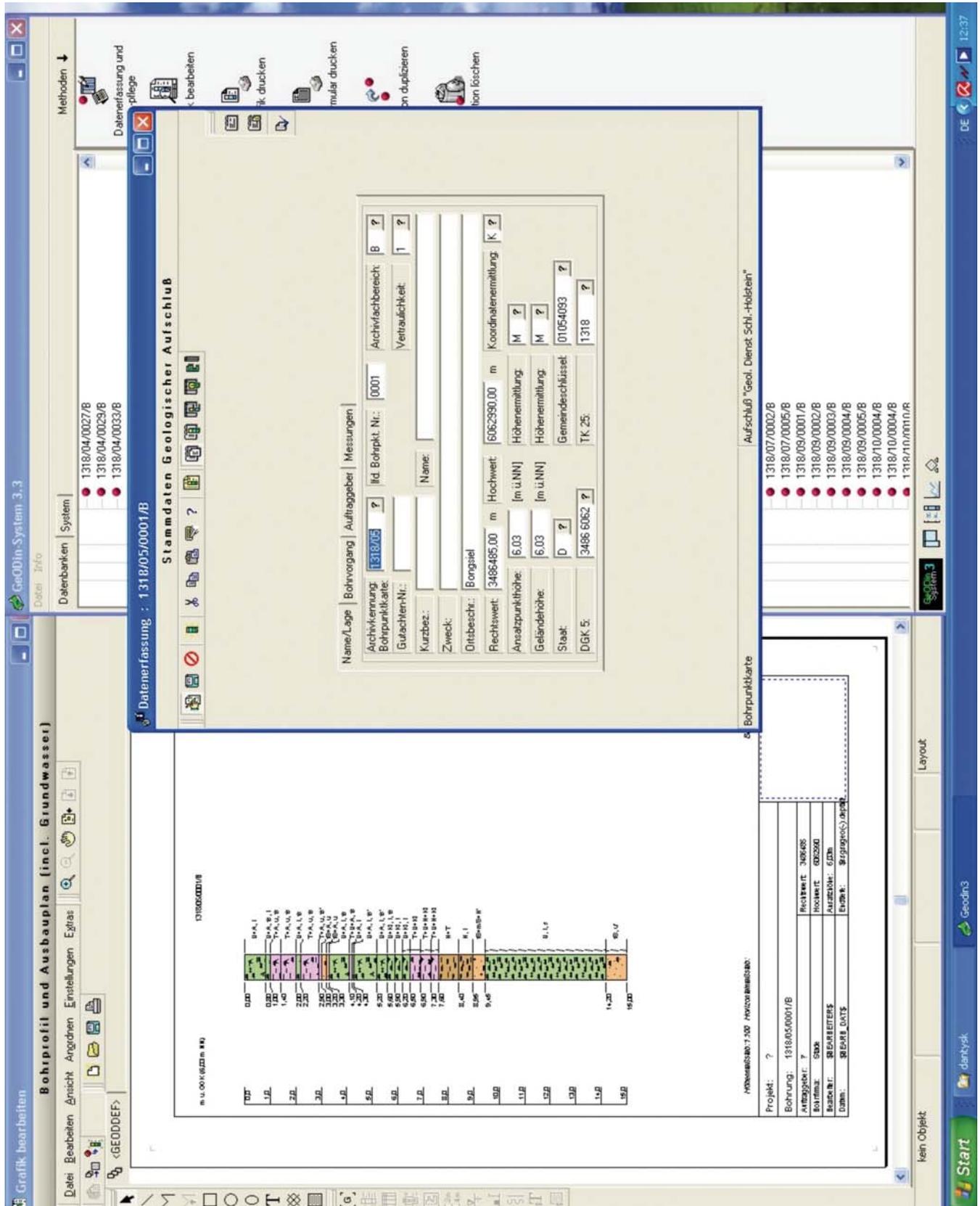


Abb. 3: Stammdateneingabemaske GeoDin

Microsoft Excel - endversion-qb-heute-update.xls

Datei Bearbeiten Ansicht Einfügen Format Extras Daten Fenster Hilfe Acrobak PDF Creator

Times New Roman 10

1238

A	B	C	D	E	F	G	H	I	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	Lfd	LOCID	XCOORD	YCOORD	AHÖHE [m] NN	ETIEFE [m]	LONG NAME	qb-Basis [m] Ansatzhöhe	K.ziffer Ansatzhöhe	2mS%	2mK%	2mO%	3mS%	3mK%	3mO%	Residuals qb-heute	Lithologie als Zs
288	287	3454630	6081985	3,36	8,90	11,5/170059/	5,70	0	100	0	0	77	23	0	-0,00507036	X1	110
289	288	3455335	6081080	3,37	7,90	11,5/170060/	6,90	0	100	0	0	100	0	0	-0,05947238	X2	120
290	289	3454595	6080635	3,89	6,90	11,5/170062/	4,35	0	100	0	0	83	17	0	0,1004444	X1	110
291	290	3453020	6080535	1,53	3,90	11,5/170065/	3,60	0	1	99	0	14	86	0	0,06511626	X1	110
292	291	3454740	6081480	3,36	6,90	11,5/170071/	5,40	0	39	61	0	26	74	0	0,13407993	X1	110
293	292	3454885	6081765	3,95	7,90	11,5/170074/	6,78	0	0	100	0	0	97	3	-0,00396575	Y2T1	221
294	293	3454315	6080350	8,70	18,00	11,5/170003/	6,00	0	100	0	0	77	23	0	0,24419594	X1	110
295	294	3457135	6081455	-0,50	7,90	11,5/180006/	5,30	1	100	0	0	77	20	3	-0,04651552	Y2T1	221
296	295	3457425	6081865	-0,50	3,50	11,5/180007/	4,00	1	80	20	0	83	17	0	-0,34405895	X1	110
297	296	3457525	6081175	-0,50	8,00	11,5/180008/	4,50	1	75	25	0	83	17	0	-0,03396849	Y2T2	222
298	297	3457830	6081555	-0,50	6,00	11,5/180009/	4,00	1	100	0	0	80	0	0	-0,46583751	Y2T1	221
299	298	3456320	6081940	-0,50	8,20	11,5/180014/	4,70	1	100	0	0	100	0	0	-0,23024587	X1	110
300	299	3454260	6079990	3,50	12,50	11,5/230035/	3,20	1	100	0	0	100	0	0	0,07110273	X1	110
301	300	3454680	6079535	2,88	4,90	11,5/230037/	3,50	0	85	15	0	58	42	0	0,00325512	X1	110
302	301	3454020	6079850	1,46	4,90	11,5/230038/	4,42	0	50	50	0	33	67	0	-0,14414663	X1	110
303	302	3454820	6079095	1,44	3,90	11,5/230041/	3,00	0	87	13	0	92	8	0	0,07426362	X1	110
304	303	3454840	6079510	2,22	4,90	11,5/230042/	2,72	0	40	60	0	50	50	0	0,0406105	X1	110
305	304	3454820	6078615	1,70	7,90	11,5/230046/	6,34	0	90	10	0	93	7	0	-0,04648498	X1	110
306	305	3454390	6078180	3,07	7,90	11,5/230048/	6,54	0	100	0	0	100	0	0	0,0983524	X1	110
307	306	3454520	6078530	2,49	8,90	11,5/230050/	8,00	0	96	4	0	97	3	0	-0,1648272	X1	110
308	307	3454660	6077630	1,14	6,90	11,5/290038/	5,50	0	79	21	0	80	20	0	-0,01168334	X1	110
309	308	3454660	6076450	2,27	6,90	11,5/290041/	5,72	0	100	0	0	100	0	0	0,02679573	X1	110
310	309	3454605	6076710	2,39	6,90	11,5/290042/	5,73	0	100	0	0	95	5	0	0,03714368	X1	110
311	310	3453030	6076750	0,72	6,90	11,5/290048/	6,40	0	100	0	0	100	0	0	-0,09630844	X1	110
312	311	3455000	6076515	1,17	5,90	11,5/290049/	5,60	0	100	0	0	100	0	0	0,0457685	X1	110
313	312	3454870	6076145	1,18	6,90	11,5/290050/	5,90	0	100	0	0	83	17	0	-0,04805789	X1	110
314	313	3454910	6076975	1,04	5,90	11,5/290051/	5,90	0	100	0	0	92	8	0	0,0038455	X1	110
315	314	3454935	6075630	0,79	5,90	11,5/350037/	4,72	0	100	0	0	100	0	0	0,03763917	X1	110
316	315	3454905	6075375	1,56	5,90	11,5/350038/	5,34	0	100	0	0	100	0	0	0,02301349	X1	110
317	316	3454746	6074685	0,66	5,90	11,5/350039/	5,10	0	100	0	0	100	0	0	-0,03748704	X1	110
318	317	3454600	6074360	2,01	6,90	11,5/350040/	6,00	0	97	3	0	93	7	0	-0,01440958	X1	110
319	318	3454640	6074100	2,06	6,90	11,5/350041/	5,30	0	100	0	0	95	5	0	0,03272021	X1	110
320	319	3454920	6075030	1,69	5,90	11,5/350042/	5,38	0	100	0	0	93	7	0	0,01396276	X1	110
321	320	3454530	6074985	1,98	6,90	11,5/350043/	5,90	0	100	0	0	100	0	0	0,04177377	X1	110
322	321	3453890	6082695	-0,15	5,30	11,5/9059/	4,30	0	55	15	30	37	10	53	0,04576593	X2	120
323	322	3454427	6075293	3,06	20,00	11,5/8016/	8,15	0	92	0	8	95	0	5	-0,08230798	X3	130

alle end-residual damals1/

Zeichnen AutoFormen Datenbearbeitung

Microsoft Excel - end...

Bereit

12:58

Abb. 4: Auszug aus der aus GeoDin Datenbank erzeugten Tabelle

5.3 Ermittlung der Holozänbasisfläche

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. 6). Aufgrund der unterschiedlichen Ziele der Bohrungen erreichen nicht alle die Holozänbasis (Abb. 7). Für Bohrungen, die eindeutig die Holozänbasis nicht erreicht haben, wurde die

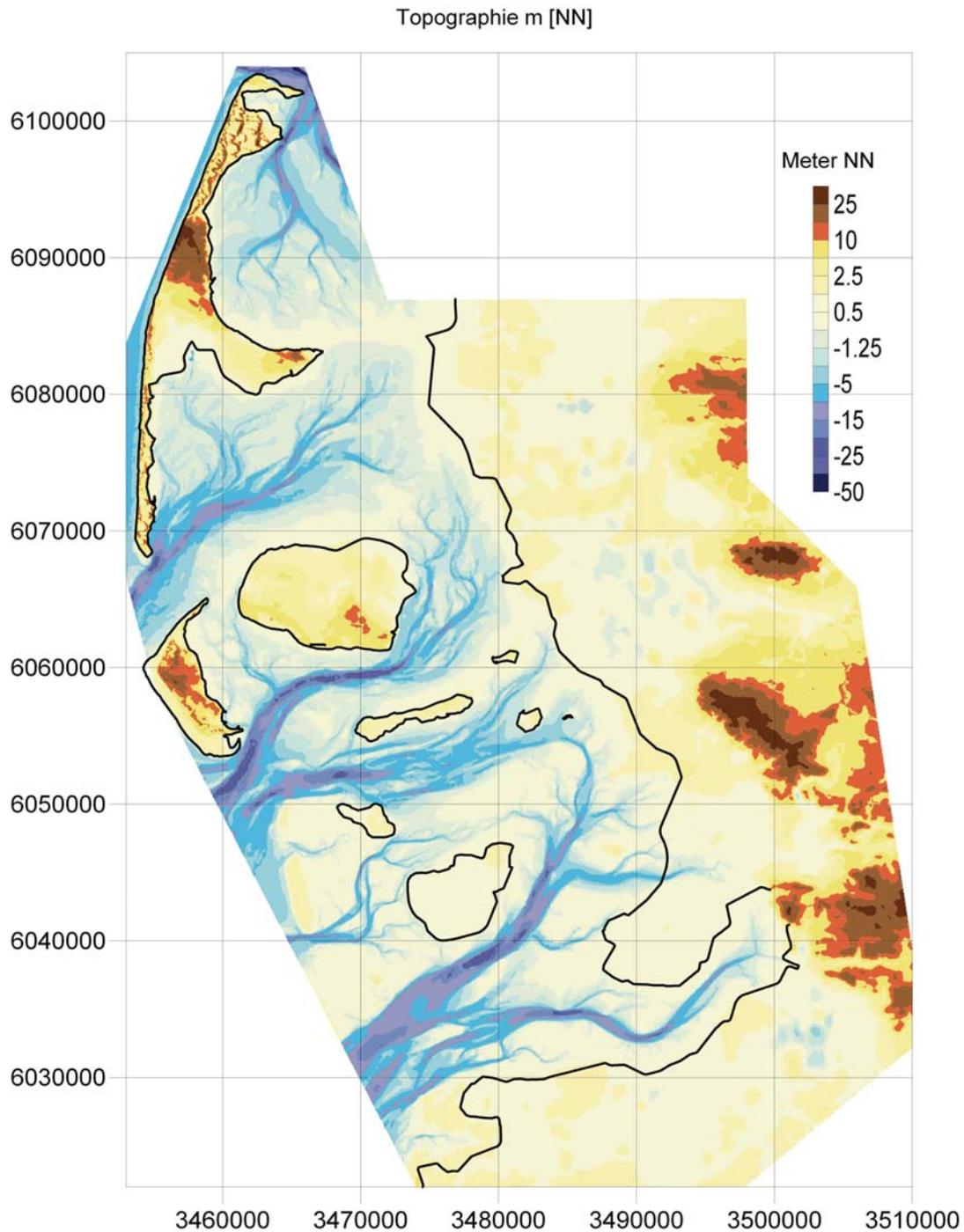


Abb. 5: DGM des Untersuchungsgebietes

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. Das zugehörige Variogramm ist in Abb. 8 dargestellt.

Diese Daten stellen die Basis für die Ermittlung der Qualität der errechneten holozänen Basis dar. Für jeden dieser Werte wurde die Abweichung des rechen-technisch ermittelten Wertes vom Originalwert bestimmt, die so genannten „Residuals“ (Abb. 9). 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 vorgegebenen liegt ganz am Rande des Untersuchungsgebietes im Listland.

5.4 Ermittlung der Geländeoberfläche zu Beginn der nacheiszeitlichen Transgression

Die heutige Geländeoberfläche konnte anhand der verfügbaren Daten erfolgreich rekonstruiert werden. Sie stellt aber das Ergebnis einer mehrere 1.000 Jahre andauernden Veränderung des Ausgangsreliefs dar. Für die Beurteilung von Sedimenteinträgen und Umlagerungen musste jedoch 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.
- Basaltorf; 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 erreichten oder aber keinen der angesprochenen Horizonte aufweisen, wurden anhand benachbarter Bohrungen entsprechend in ihrem Höhengiveau einem plausiblen „Basis-Relief“ angeglichen (Abb. 10). Einschnitt 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 (Abb. 11). Die Standardabweichung

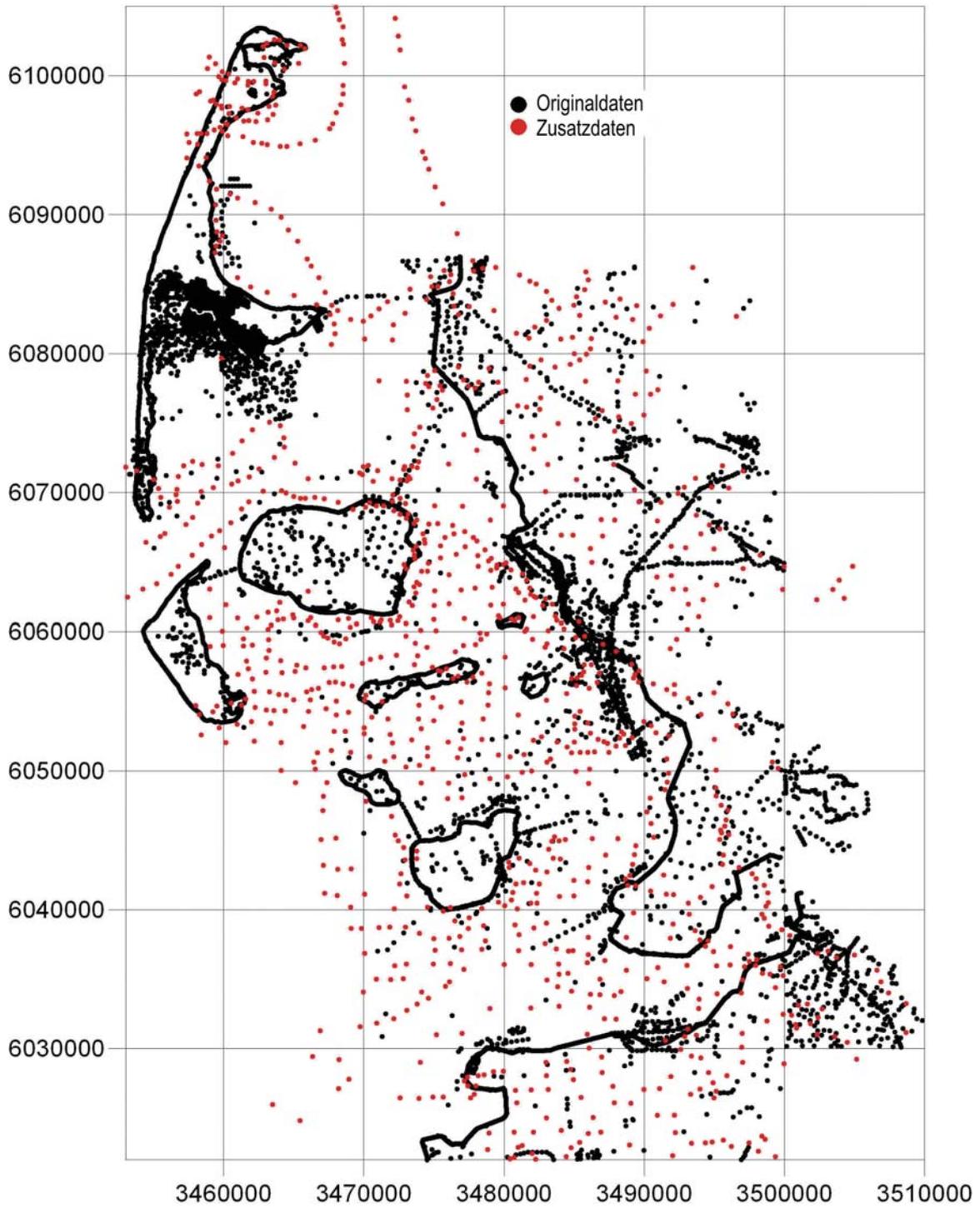


Abb. 6: Verteilung der Bohrungen

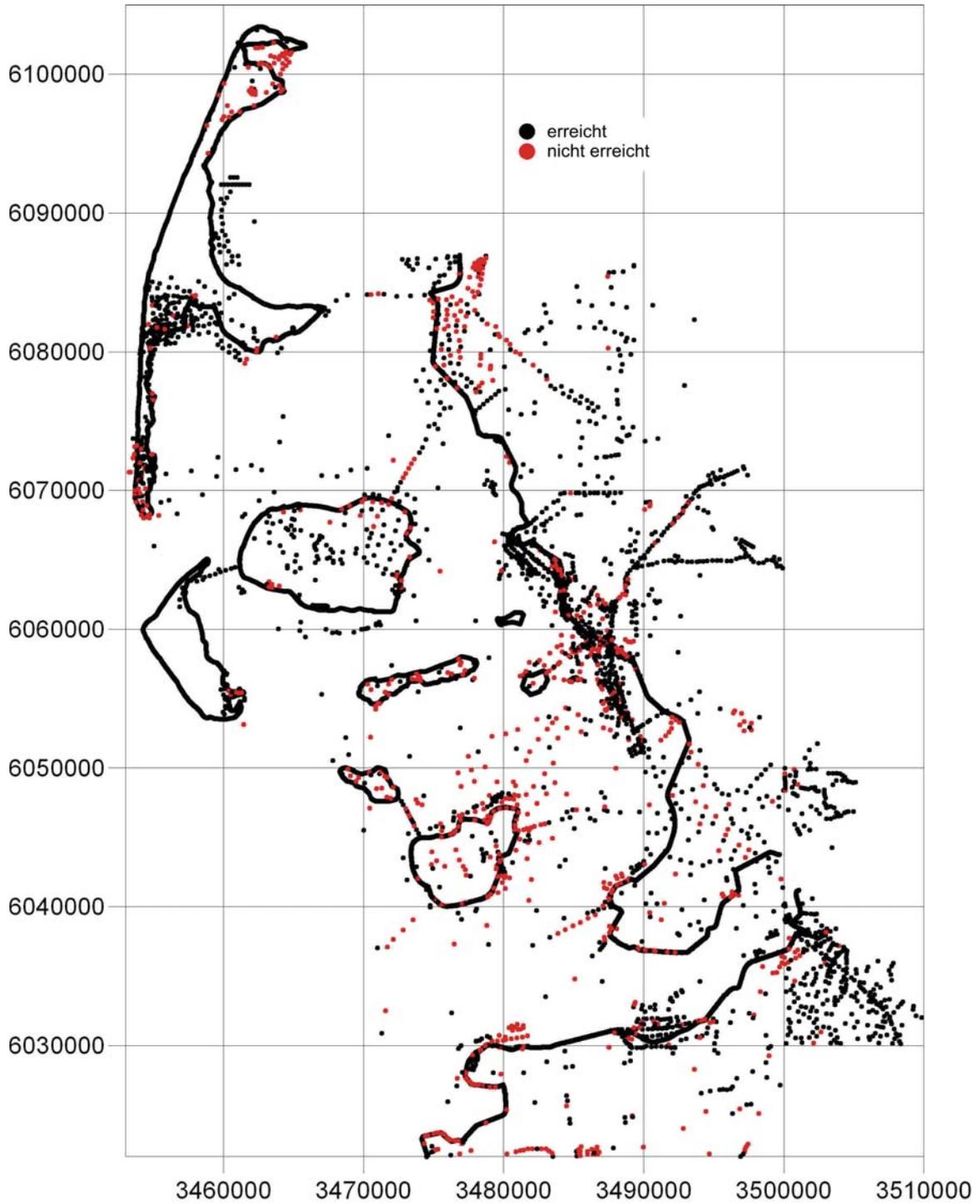


Abb. 7: Übersicht über die Bohrungen, die die Holozänbasis erreicht haben

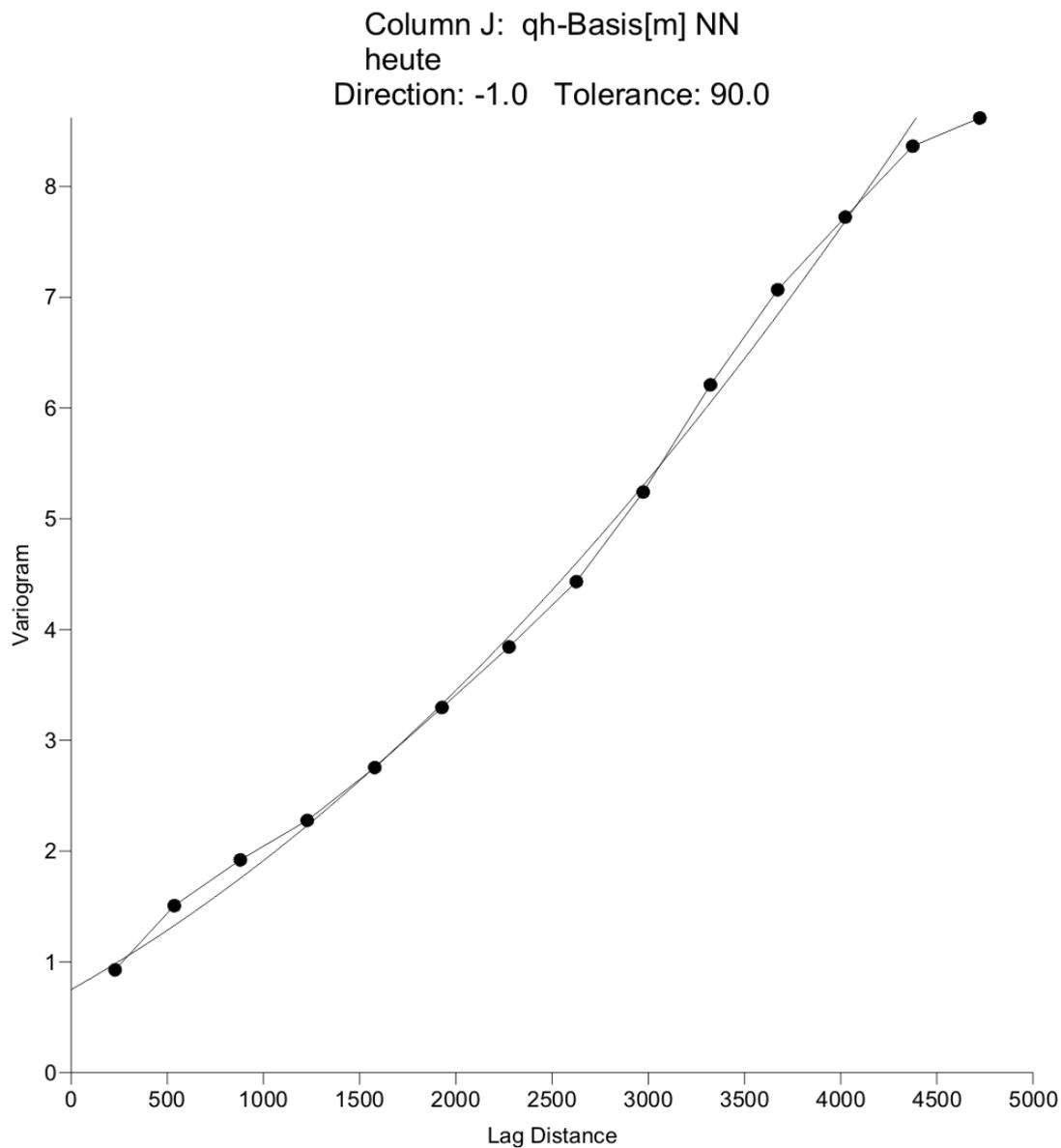


Abb. 8: Variogramm der Daten für die Berechnung der holozänen Basis

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.

5.5 Ermittlung der Sedimentzusammensetzung der obersten drei Meter

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

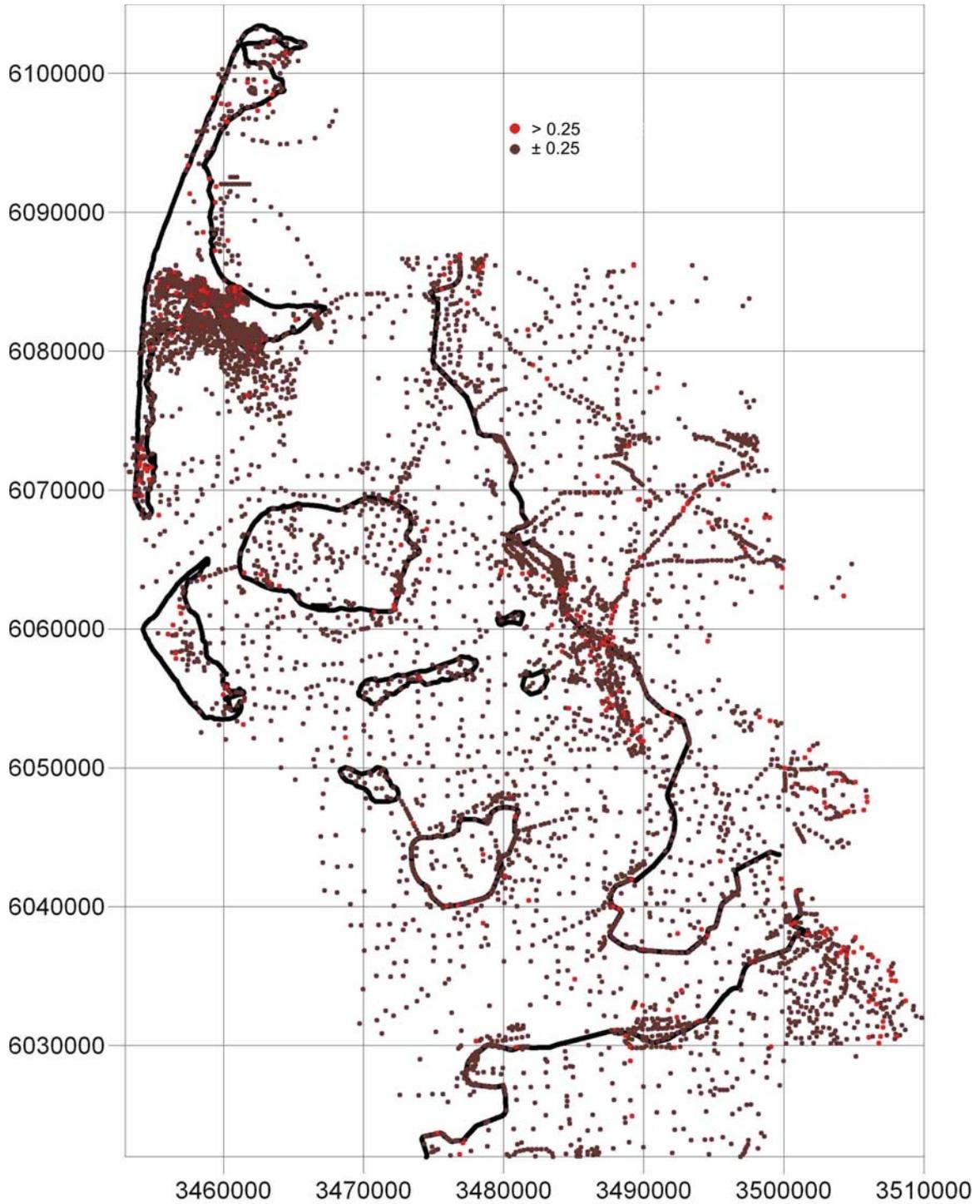


Abb. 9: Residuals (Abweichung des berechneten Wertes vom Originalwert) der heutigen pleistozänen Geländeoberfläche in Metern

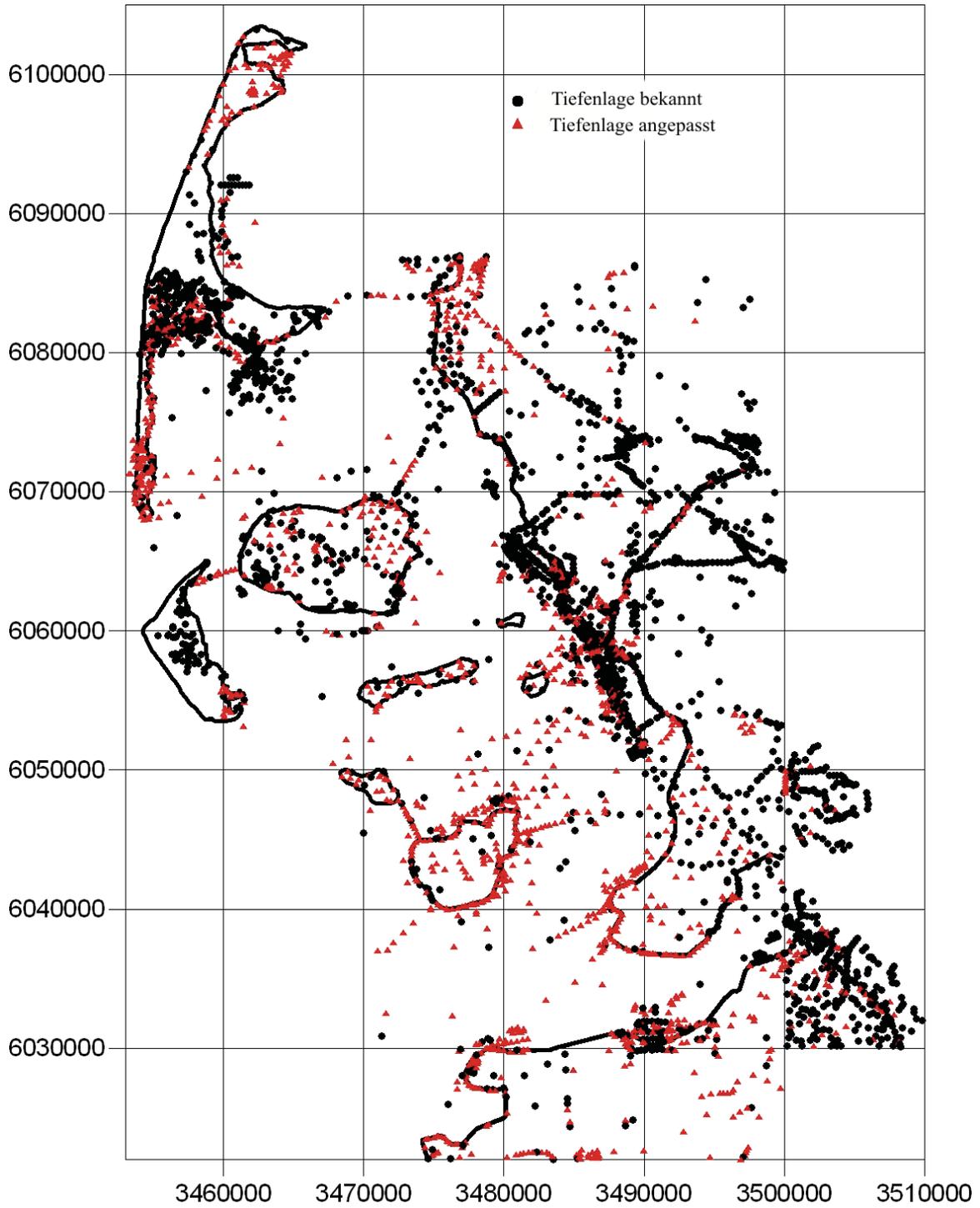


Abb. 10: Datenbasis für die Ermittlung der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression

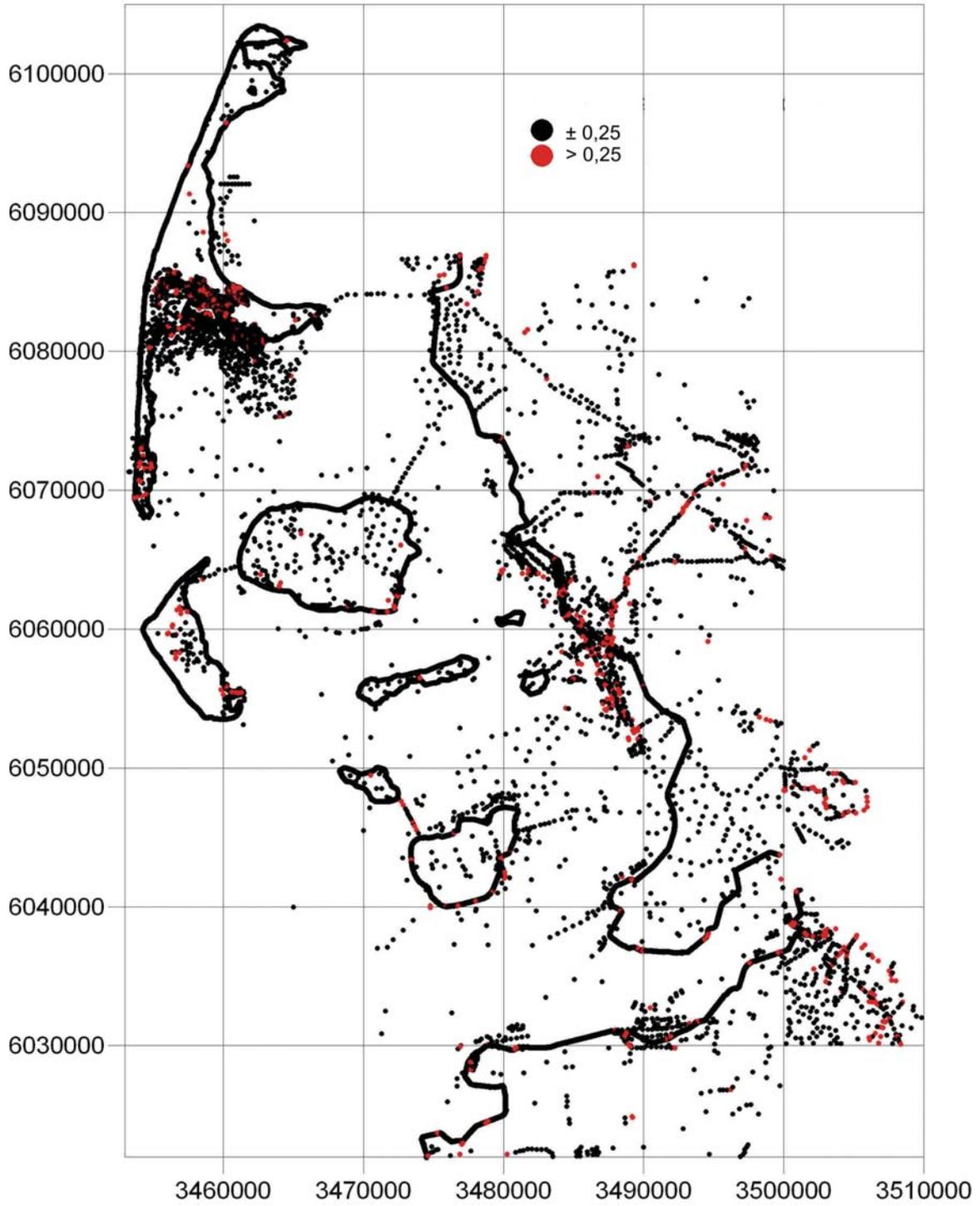


Abb. 11: Residuals (Abweichung der berechneten Werte von den Originalwerten) der Holozänbasis zu Beginn der Transgression in Metern

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 Krigging-Verfahren die sedimentologische Zusammensetzung ermittelt.

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

6. E r g e b n i s s e

Die Höhenlage der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression ist in Abb. 14, die heutige in Abb. 12 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 nordwestlicher 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.

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.

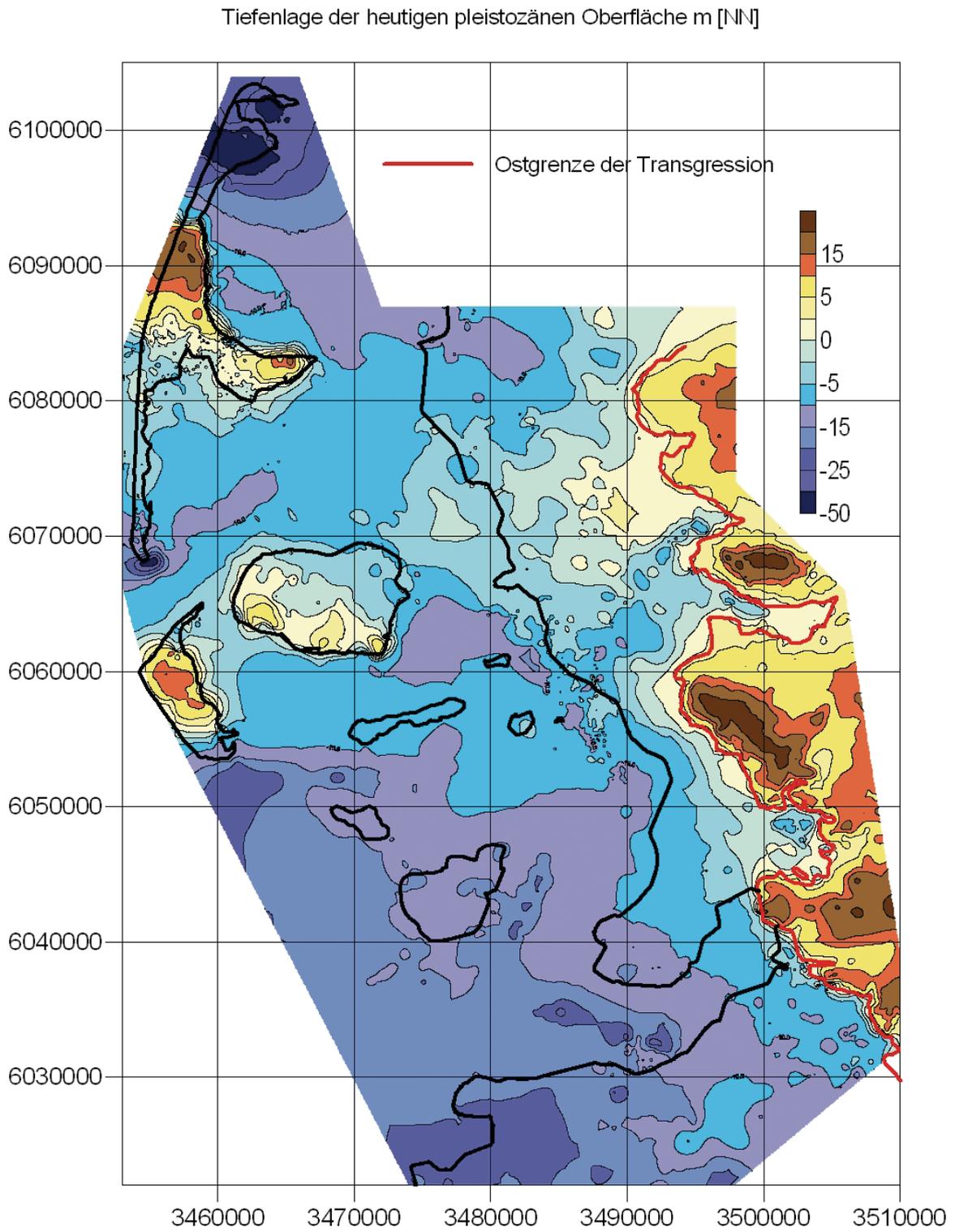


Abb. 12: Tiefenlage der heutigen Holozänbasis

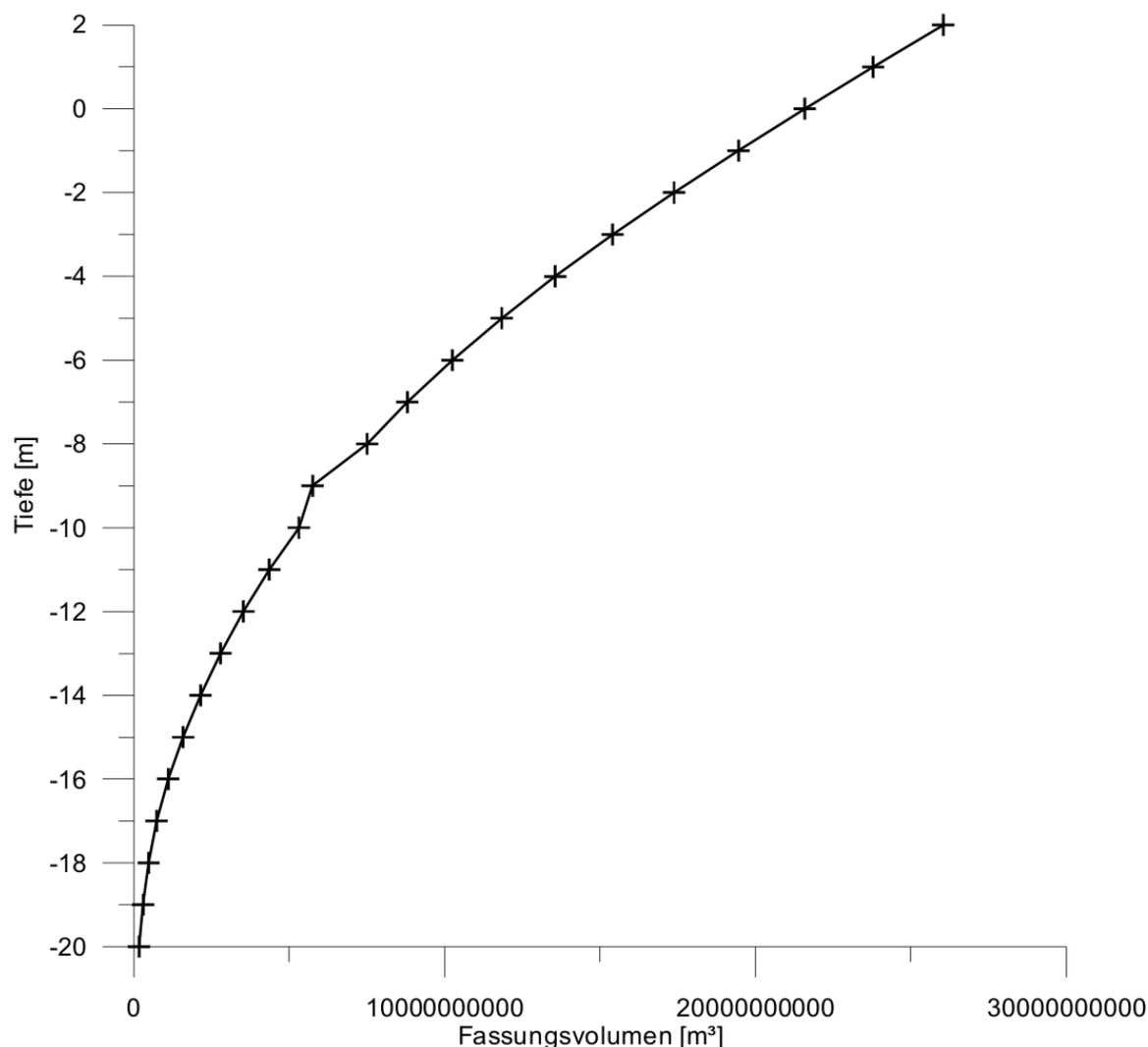


Abb. 13: Fassungsvolumen des Untersuchungsraumes

Das Fassungsvolumen des betrachteten Bereiches (Abb. 13) zeigt einen nahezu ausgeglichenen Verlauf mit Ausnahme des Bereiches zwischen -9 und -8 m. Es scheint eine Art „Gleichgewichtsbedienung“, also eine Abhängigkeit von Fassungsvolumen zu Meeresspiegelanstieg, zu geben. Die nicht kontinuierliche Zunahme des Fassungsvolumens zwischen -9 und -8 m kann evtl. mit dem Bereich der Föhler Schulter in Verbindung gebracht werden. Erst nach Überflutung dieses relativ widerstandsfähigen Bereiches gleicht sich das Fassungsvolumen der ursprünglichen Form wieder an.

Für die Beurteilung der Sedimentbilanz wurde der Bereich nördlich des Hindenburgdammes aus der Betrachtung ausgenommen, da hier die Datenlage am unsichersten ist. Der betrachtete Bereich ist in Abb. 16 dargestellt.

Tabelle 1 gibt den Überblick über die vorhandenen Sedimentmengen wieder. Das heutige Volumen, also die reale Sedimentmenge beträgt $19,867 \times 10^9$ m³. Dem stehen $1,828 \times 10^9$ m³ erodiertes Volumen, also die Differenz zwischen der Ausgangsbasis zu Beginn der Transgression und dem heutigen Volumen gegenüber. Dies entspricht nur 9,2 % des heutigen vorhandenen Volumen. Aus interner Umlagerung stammen somit maximal 9,2 %.

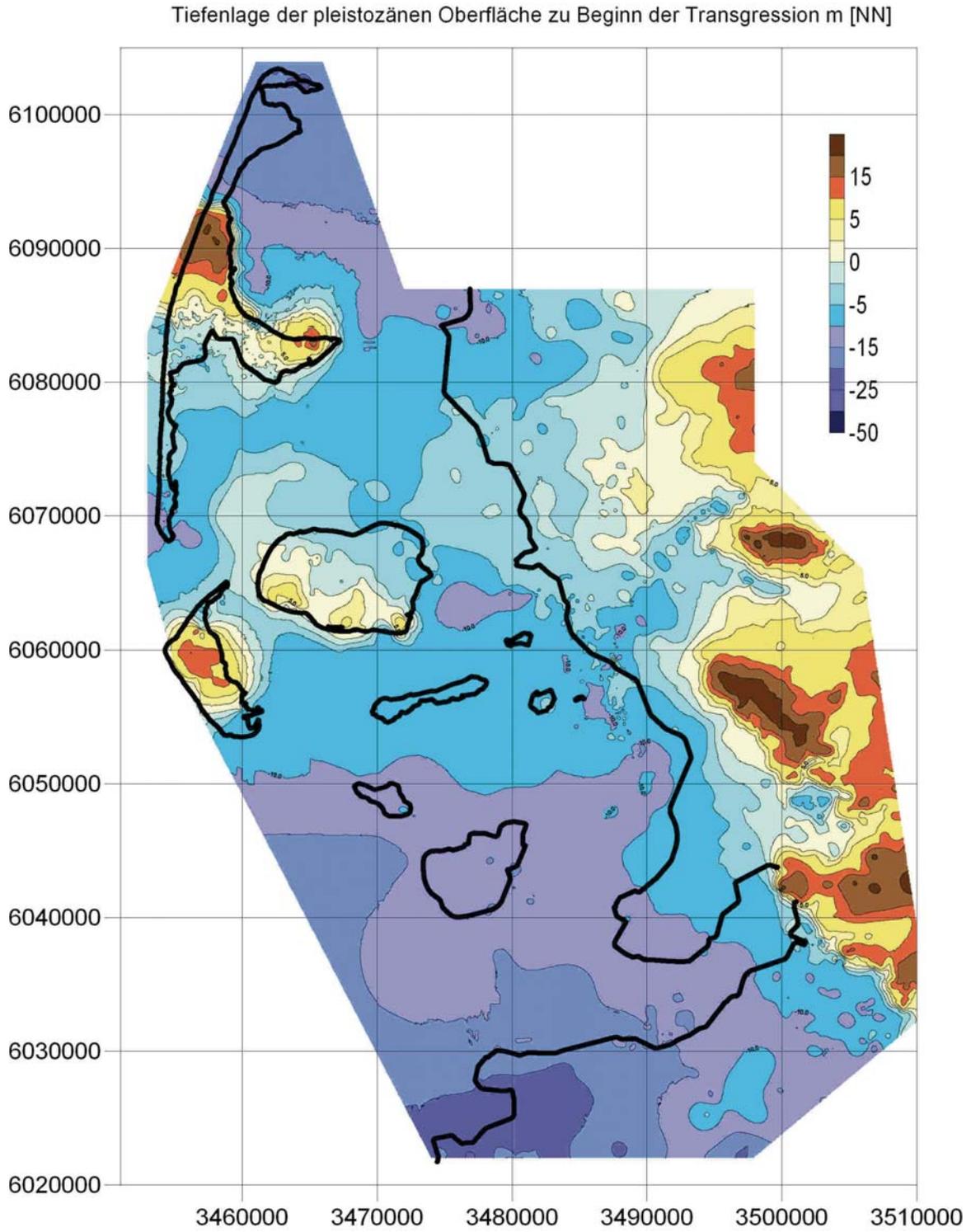


Abb. 14: Vermutete Tiefenlage der Holozänbasis zu Beginn der Transgression

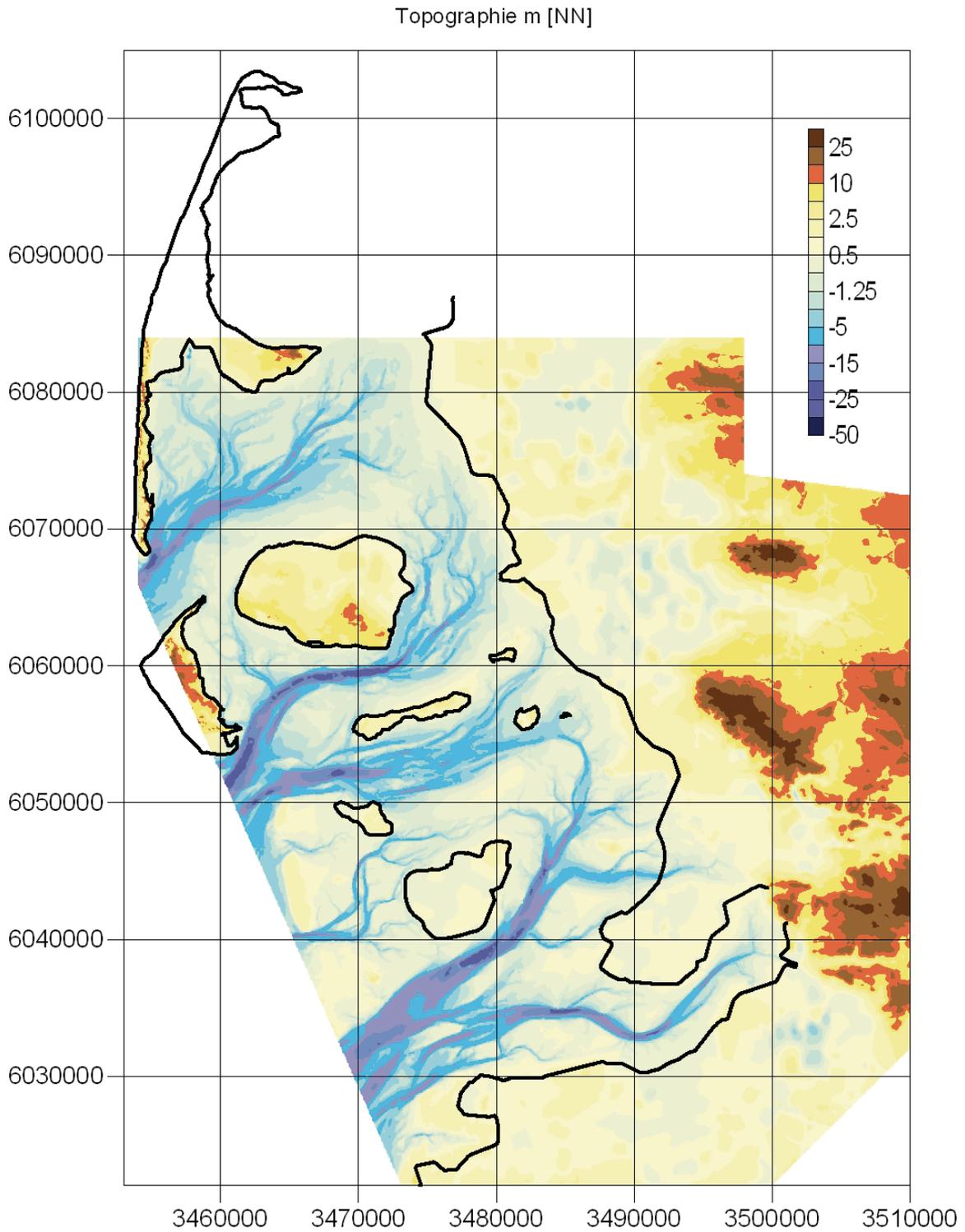


Abb. 15: Untersuchungsgebiet zur Volumenermittlung

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 u. 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 [m³]

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 der obersten drei Meter des Untersuchungsraumes ist in Abb. 16 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 (Abb. 17) gewählt. Die Kornzusammensetzung an der aktuellen Oberfläche wurde der geologischen Übersichtskarte CC1518 Flensburg bzw. der Bodenkarte CC1518 Flensburg entnommen. Beide Karten wurden digital erfasst und georeferenziert. Anschließend wurden die Flächen der einzelnen Sediment- bzw. Bodentypen erfasst und in die Klassen Ton/Silt und Sand eingeteilt

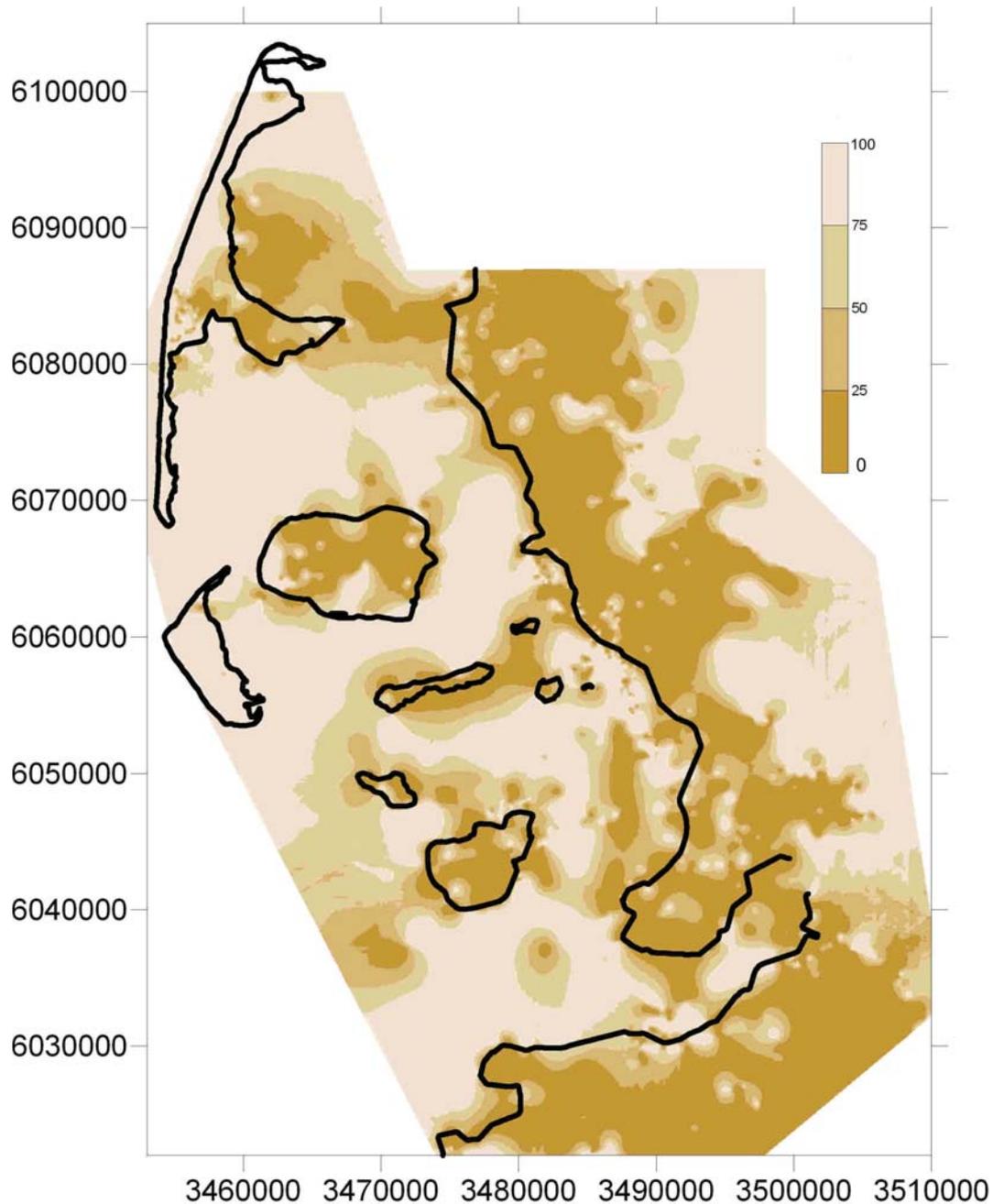


Abb. 16: Prozentualer Sandanteil im obersten Meter

(s. Tab. 3). Es ergibt sich eine Flächenübereinstimmung von 97 %. 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.

In Tab. 2 sind die aus der vorhergehenden Analysen sich 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 Tab. 4 sind die unter Annahme von unterschiedlichen Anstiegsraten benötigten Sedimentmengen nach Qualität und Quantität angegeben. Ein Vergleich der Tab. 2 u. 4 zeigt deutlich, dass für interne Umlagerung genügend Sediment zur Verfügung gestellt werden könnte.

7. Diskussion

Wie aber aus den obigen Untersuchungen ersichtlich ist, kam das Material bisher überwiegend aus der Nordsee und nicht aus interner Umlagerung. Auch wenn die benötigten Mengen relativ gering sind im Verhältnis zur möglichen Erosion der Prielränder, so wird erwartet, dass besonders das Feinkorn nur noch in den Bereichen zur Ablagerung kommt, wo entsprechende Küstenschutzmaßnahmen, z. B. Lahnungen, Grüppen, 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 die Bereiche, die heute noch als relativ stabil gelten, in den Bereich der Erosion kommen und die obersten Bereiche des Wattenmeeres können sich nur mit sandigem Material auffüllen, unabhängig von der Sedimentverfügbarkeit. Dieser Prozess wird auch von FLEMMING u. BARTHOLIMÄ (2002) beschrieben. Der von STREIF (1990) beschriebene „Bulldozer-Effekt“, 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 Ablagerung 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. Zur Zeit scheint sich hier eine Art „Gleichgewicht“ zwischen Wassertiefe und hydrodynamischer Energie (i. e. Wellenenergie) vorhanden zu sein, so dass überwiegend ein küstenparalleler Sedimenttransport stattfindet. Durch das heute vorhandene steilere Gefälle (z.B. auf Höhe des Beltringhardener Kooges Verkürzung der Strecke von 40 km auf 32 km zur ca. -10 m Tiefenlinie) gegenüber dem postglazialen bzw. vorchristlichem (ca. 1700–1000 v. Chr.), hervorgerufen durch die künstliche Fixierung der Ostgrenze des Wattenmeeres, 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 den Küstenschutz für die Geestkerninseln kalkulierbarer, zum Beispiel durch Sandvorspülungen, gegenüber den 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 5000 bis 1000 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

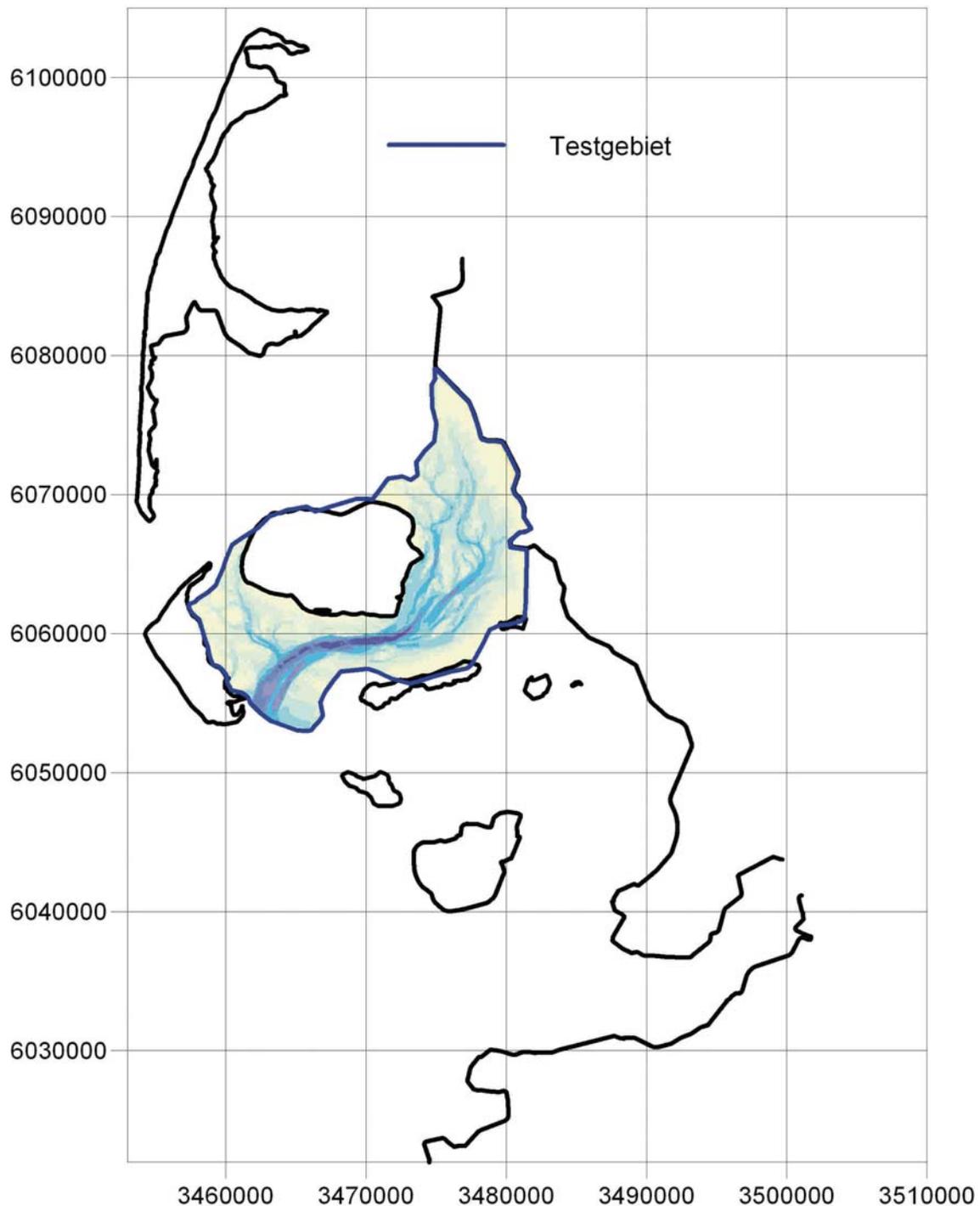


Abb. 17: Übersicht über das Testgebiet

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.

Tab. 2: Korngrößenanteile der obersten drei Meter

Sandanteil im obersten Meter	m³
Zwischen -4 m und -5 m:	903 102,31
Zwischen -3 m und -4 m:	973 663,90
Zwischen -3 m und -2 m:	1 771 681,28
Zwischen -2 m und -1 m:	4 115 260,47
Sandanteil in den obersten zwei Metern	m³
Zwischen -4 m und -5 m:	1 904 198,4
Zwischen -3 m und -4 m:	1 934 711,6
Zwischen -3 m und -2 m:	3 485 584,0
Zwischen -2 m und -1 m:	8 700 428,0
Sandanteil in den obersten drei Metern	m³
Zwischen -4 m und -5 m:	2 807 210,4
Zwischen -3 m und -4 m:	2 845 269,0
Zwischen -3 m und -2 m:	5 045 182,26
Zwischen -2 m und -1 m:	12 556 484,7
Anteil <0,63 mm im obersten Meter	m³
Zwischen -4 m und -5 m:	83 486,00
Zwischen -3 m und -4 m:	157 869,10
Zwischen -3 m und -2 m:	311 322,20
Zwischen -2 m und -1 m:	688 960,60
Anteil <0,63 mm in den obersten zwei Metern	m³
Zwischen -4 m und -5 m:	206 895,4
Zwischen -3 m und -4 m:	341 388,4
Zwischen -3 m und -2 m:	663 178,6
Zwischen -2 m und -1 m:	146 179,8
Anteil <0,63 mm in den obersten drei Metern	m³
Zwischen -4 m und -5 m:	331 401,0
Zwischen -3 m und -4 m:	1 509 517,8
Zwischen -3 m und -2 m:	676 055,4
Zwischen -2 m und -1 m:	2 298 100,5

Tab. 3: Flächenanteil nach Sedimenttyp

Fläche je Sedimenttyp zwischen -1 m NN und + 2 m NN nach Geologischer Übersichtskarte CC1518 Flensburg 1:200.000	m ²	Flächen je Bodenart zwischen -1 m NN und + 2 m NN nach Bodenübersichtskarte CC1518 Flensburg 1:200.000	m ²	Fläche je Sedimenttyp zwischen -1 m NN und 0 m NN	Fläche je Sedimenttyp zwischen 0 m NN und 1 m NN	Fläche je Sedimenttyp zwischen 1 m NN und 2 m NN
Tuswatbr_watt ton	576 810	14 Rohmarschen-Salzmarschen	1 162 190	55 550	495 370	25 890
Tuswa	1 406 120	15 ehemaliges Sandwatt	1 384 150	714 640	687 970	3 510
Li_marin-littoral	567 170	15 Sandwatt	5 084 890	7 620	288 620	270 930
Swahn_wattsand_niedermoortorf	840 310	16 ehemaliges Mischwatt	943 720	596 320	234 730	9 260
Swa-marine_brackische Ablagerung	5 340 410	16 Mischwatt	889 810	4 854 580	474 780	11 050
Msm_mittelsand	30	17 ehemaliges Schlickwatt	695 660	0	10	20
Fsuwa_wattsand	680 810			550 160	128 200	2 450
Fsm_feinsand	302 690			302 440	130	110
Fsfuhn_wattsand_niedermoor	145 400			86 060	59 060	280
Ton/Klei	2 550 100	Ton/Klei	1 857 850	777 810	1 471 960	300 330
Sand	7 309 620	Sand	8 302 570	6 397 180	896 910	23 710
Summe	10 160 420	Summe	9 859 220			

Tab. 4: 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	637 525	1 827 405	194 452,5	1 599 195	367 990	224 227,5	75 082,5	5 927,5
0,5 m	1 275 050	3 654 810	388 905	3 198 590	735 980	448 455	150 165	11 855
0,75 m	1 912 575	5 482 215	583 357,5	4 797 885	1 103 970	672 682,5	225 247,5	17 782,5
1,0 m	2 550 100	7 309 620	777 810	6 397 180	1 471 960	896 910	300 330	23 710

8. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- BARCKHAUSEN, H.; PREUSS, H. u. STREIF, H.: Ein lithologisches Ordnungsprinzip für das Küstenholozän und seine Darstellung in Form von Profiltypen. – Geol. Jb., Reihe A, 44: 45–77, 1977.
- EHLERS, J.: The Morphodynamics of the Wadden Sea. 379 S., Balkema Verlag, 1988.
- FIGGE, K.: Materialinventur an der deutschen Nordseeküste. – KFKI-Vorhaben FKZ 03 KIS 306, (unveröff.), 1998.
- HAYES, M. O.: Barrier Island Morphology as a Function of Tidal and Wave Regime. In: LEATHERMANN (Hrsg.): Barrier Islands, 1979.
- HOSELMANN, C. u. STREIF, H.: Bilanzierung der holozänen Sedimentakkumulation im niedersächsischen Küstenraum. – Z. dt. geol. Ges., 148 (3–4), 431–445, 1997.
- HOSELMANN, C. u. STREIF, H.: Methods Used in a Mass-Balance Study of Holocene Sediment Accumulation on the Southern North Sea Coast of Germany. – In: HARFF, J. et al. (Hrsg.): Modelling of sedimentary systems. 361–374, 1998.
- KÖNIG, D.: Historisches über Wattenmeer-Salzwiesen. In: N. KEMPF, J. LAMP and P. PROKOSCH (Editors), WWF Tagungsbericht 1 – Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur. Husumer Druck- und Verlagsgesellschaft, Husum, 31–70, 1987.
- PESCH, R.: Rekonstruktion der geologischen Entwicklung der Insel Sylt im Holozän mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems. Dipl.-Arb. Univ. Kiel, 90 S. (unveröff.), 2000.
- PREUSS, H.; VINKEN, R. u. VOSS, H.-H.: Symbolschlüssel Geologie. 328 S., 1991.
- SPIEGEL, F.: Die Tidebecken des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres: Morphologische Strukturen und Anpassungsbedarf bei weiter ansteigendem Meeresspiegel. – Ber. Forschung. u. Technologiez. Westküste, 14, Büsum, 1997.
- STREIF, H.: Die geologische Küstenkarte von Niedersachsen 1:25.000 – eine neue Planungsgrundlage für die Küstenregion. Z. f. angew. Geol., 44 (H4), 1998.
- STREIF, H.: Das Ostfriesische Küstengebiet – Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. Samml. Geol. Führer, 57, 1990.
- WITEZ, P.; BOCK, S. u. HOFSTEDE, J.: Modelluntersuchungen zur morphologischen Stabilität des Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg. BMBF Forschungsvorhaben MTK 0569 (unveröff.), 1998.

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet
Abbildung 2: Ein von „Dr. TEMMLER“ überarbeitetes Protokoll des LANU der Bohrung Nr. 4 auf Blatt 21 der TK 1319 mit persönlichen Ergänzungen und Hervorhebungen
Abbildung 3: Stammdateneingabemaske GeoDin
Abbildung 4: Auszug aus der aus GeoDin Datenbank erzeugten Tabelle
Abbildung 5: DGM des Untersuchungsgebietes
Abbildung 6: Verteilung der Bohrungen
Abbildung 7: Übersicht über die Bohrungen, die die Holozänbasis erreicht haben (ohne Daten HOFFMANN, welche nahezu alle die Holozänbasis erreichen)
Abbildung 8: Variogramm der Daten für die Berechnung der Holozänbasis
Abbildung 9: Residuals (Abweichung des Originalwertes vom errechneten) der pleistozänen Oberfläche
Abbildung 10: Datenbasis für die Ermittlung der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression
Abbildung 11: Variogramm der Daten für die Ermittlung der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression
Abbildung 12: Tiefenlage der heutigen Holozänbasis
Abbildung 13: Entwicklung des Fassungsvermögens
Abbildung 14: Vermutete Tiefenlage der Holozänbasis zu Beginn der Transgression
Abbildung 15: Übersichtskarte Volumengrenze
Abbildung 16: Prozentualer Sandanteil im obersten Meter
Abbildung 17: Eindeichungskarte mit Testgebiet

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Volumenbilanzen
Tabelle 2: Korngrößenanteile der obersten drei Meter
Tabelle 3: Flächenanteil nach Sedimenttyp
Tabelle 4: Benötigte Sedimentmengen nach erwarteter Geländeerhöhung