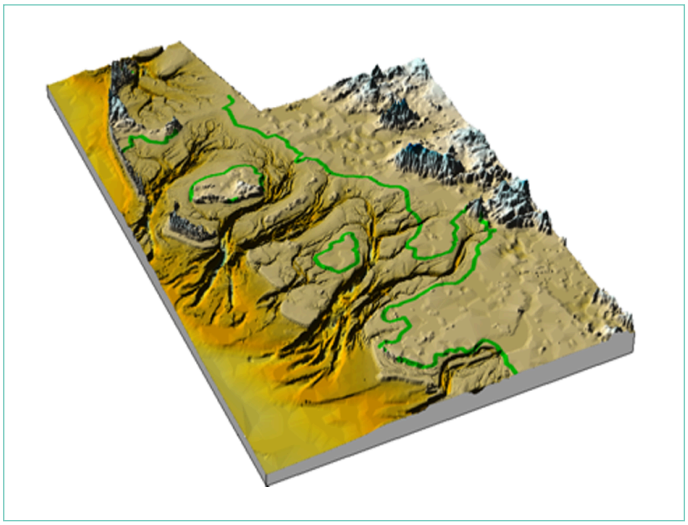
50 Jahre
1956 - 2006

GKSS
FORSCHUNGSZENTRUM
in der HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer

Abschlussbericht zum KFKI-Projekt 03KIS037



Autoren:

K. Ahrendt
D. Eppel
S. Ludwig

ISSN 0344-9629

HELMHOLTZ GEMEINSCHAFT

GKSS ist Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren e.V.

wissen schafft nutzen

GKSS 2006/1

GKSS 2006/1

Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer

Abschlussbericht zum KFKI-Projekt 03KIS037

Autoren:

K. Ahrendt

(Büro für Umwelt und Küste, Kiel)

D. Eppel

(GKSS, Institut für Küstenforschung)

S. Ludwig

(Büro für Umwelt und Küste, Kiel)

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH • Geesthacht • 2006

Die Berichte der GKSS werden kostenlos abgegeben.
The delivery of the GKSS reports is free of charge.

Anforderungen/Requests:

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
Bibliothek/Library
Postfach 11 60
D-21494 Geesthacht
Germany
Fax.: (49) 04152/871717

Als Manuskript vervielfältigt.
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.

ISSN 0344-9629

GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH · Telefon (04152)87-0
Max-Planck-Straße 1 · D-21502 Geesthacht / Postfach 11 60 · D-21494 Geesthacht

GKSS 2006/1

Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer

Abschlussbericht zum KFKI-Projekt 03KIS037

Kai Ahrendt, Dieter Eppel, Sandra Ludwig

82 Seiten mit 45 Abbildungen und 4 Tabellen

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 Sedimentakkumulation und deren kornanalytische Zusammensetzung durchgeführt. Dabei wurde die geologische Entwicklung der nordfriesischen Marsch und des vorgelagerten Wattenmeeres einschließlich der Inseln und Halligen der letzten 8000 Jahre hochauflösend analysiert und unterschiedliche Meeresspiegelanstiegsraten berücksichtigt. Eine hohe Anzahl von Bohrdaten stand zur Verfügung, die durch Erosion freigesetzten und durch Ablagerung akkumulierten Sedimente nach Qualität und Quantität zu bestimmen. 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 erstellt. Es wurden Karten entworfen, die die granulometrische Zusammensetzung der oberen drei Meter des Wattbodens (der für Sedimentumlagerung zur Verfügung steht) hochauflösend darstellen. Hieraus wurden Massenbilanzen erstellt, die es erlauben, die Sedimente nach Quantität und Qualität zu beurteilen. Anschließend wurde anhand von morphodynamischen Stabilitätskriterien (hypsometrische Kurven, z. B. SPIEGEL 1997) die benötigten und freigesetzten Sedimentmengen für die Aufrechterhaltung der Stabilität des Wattenmeeres ermittelt. Die Sedimentverfügbarkeit für den Aufbau unterschiedlicher morphologischer Einheiten wurde ermittelt und Abschätzungen über die mittelfristige Stabilität des Wattenmeeres, u a. auch bei veränderten hydrodynamischen Randbedingungen sowie Anstieg des Meeresspiegels, abgeleitet. Die mögliche Reaktion des Systems auf veränderte Meeresspiegelstände und hydrographische Veränderungen wird beschrieben und beurteilt.

Als Ergebnisse können festgehalten werden:

- Die Volumenentwicklung des holozänen Beckens folgt einer logarithmischen Entwicklung (mit Ausnahme des Bereiches zwischen -10 m NN und -8 m NN).
- Maximal 10 % des heutigen holozänen Sedimentes stammen aus der Erosion aus dem Wattenmeer, d. h. über 90 % müssen von außen eingetragen worden sein.
- Die Entwässerung des Bereiches südlich einer Grenze Amrum–Föhr–Festland ist bis zur Tiefenlinie von ca. -6 m NN (ca. 5000 v. Chr.) nach Westen verlaufen. Erst anschließend fand eine Entwässerung nach Norden statt.
- Einen Hinweis auf eine Barriere im Bereich Amrum-Süderoog-Eiderstedt kann nicht erbracht werden;
- Ca. 33 % des holozänen Sedimentes sind eingedeicht und damit dem Sedimenthaushalt entzogen;
- Aus interner Umlagerung ständen genügend Sedimente für das Mitwachsen des Wattenmeeres zur Verfügung, welches jedoch zu einer Versteilung des Reliefs führen würde mit einer Vergröberung des Kornzusammensetzung.
- Ein nennenswerter Sedimenteintrag von See her wird nicht mehr erwartet, da dort kaum noch Sedimente zur Verfügung stehen.
- Mittelfristig ist der Bestand des Wattenmeeres in seiner heutigen Ausbildung gefährdet.

Ausgangsdaten waren topographische Daten des LVA SH, topographische Daten des LANU SH und des ALR Husums sowie geologische Daten des LANU SH und des ALR Husums. Sämtliche topographische Daten lagen in digitaler Form vor, mussten aber für das Projekt aufbereitet werden. Geologische Informationen lagen ausschließlich in analoger Form vor. Durch fachspezifische Software wurden die Daten im Projekt verarbeitet. Damit diese Daten aber auch weiteren Nutzern zur Verfügung gestellt werden können, wurden im ersten Schritt Excel-Tabellen erzeugt, die nur die wesentlichen Informationen enthalten. Für die weitere Verwertung in NOKIS werden alle digital erzeugten Karten georeferenziert zur Verfügung gestellt.

Sediments of the Wadden Sea: Sediment inventory North Frisian Wadden Sea

Abstract

The postglacial sediment accumulation between the German-Danish border and the peninsula Eiderstedt was analysed. The amount of sediment in quality (sediment distribution) and quantity (amount of sediment in different layers) was estimated. The development of North Frisian including the Wadden Sea over the last 8000 years was analysed in high resolution Different sea level rises were considered. A high amount of coring data were available (ca. 18.000). The geometry of the Holocene accumulation wedge was reconstructed. On basis of modern edv-technical instruments a complete balance of sediment input/output/erosion of the region was developed. Additional, sediment balances of the different upper 3 meters of sediment were developed. Maps were generated which shows the sediment distribution of the upper 3 meters in meter steps. On basis of morphological stability criteria the amount of discharged material and the amount of required sediment for the maintenance of the stability of the Wadden Sea was estimated. The possible reaction of the system to rising sea level and hydrographical changes are described.

As results can be stated out:

- The development of the Holocene volume of the basin follows a logarithmic function (except the region between -10 m and -8 m NN).
- Not more than 10 % of the Holocene sediment came from the Wadden Sea itself, that means, that over 90 % derived from outside, mostly from the North Sea.
- The dewatering southerly of a border Amrum–Föhr–Mainland up to a depth of ca. -6 m NN (ca. 5000 B.C.) follows a westerly direction. After 5000 B.C. the dewatering took place to the north.
- There are no hints of a barrier Amrum–Süderoog–Eiderstedt.
- 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 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.

There is a high interest (7 requests) in the data from a lot of authorities and institutes (f. e. BAW, KFKI, ALR, LANU, WSD, AWI etc.). For a better and easier use of the data, excel schedules where developed with the most significant information. The results and maps will be available interactive on the NOKIS website.

Manuskripteingang in TDB: 7. Februar 2006

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT

1 EINLEITUNG 11

2 STAND DES WISSENS 13

3 DATENLAGE 16
3.1 Topographie 16
3.2 Bohrdaten 17
3.3 Kartenmaterial 24
3.4 Vorgehensweise 24
3.5 Bewertung der Daten 28

4 AUSWERTUNG 28
4.1 Digitale Erfassung 30
4.2 Edv-technische Auswertung 35
4.3 Erstellung des digitalen Geländemodells 39
4.4 Ermittlung der holozänen Basis 42
4.5 Ermittlung der Geländeoberfläche zu Beginn der nacheiszeitlichen Transgression 42
4.6 Ermittlung der Sedimentzusammensetzung der obersten drei Meter 43

5 ERGEBNISSE 54

LITERATUR 75

ANHANG 81
Statistiken

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Übersicht über das Untersuchungsgebiet mit Nummer und Lage der TK's.	12
Abbildung 2:	Bohrprotokoll vom ALR Husum mit persönlichen Eintragungen und Hervorhebungen.	19
Abbildung 3:	Ein von TEMMLER überarbeitetes Protokoll des LANU der Bohrung Nr. 4 auf Blatt 21 der TK 1319 mit persönlichen Ergänzungen und Hervorhebungen.	21
Abbildung 4a:	Deckblatt der Bohrungen Nr. 4 bis Nr. 10 auf der TK 1318 Blatt 2 aus dem LANU-Archiv.	22
Abbildung 4b:	Bohrprotokoll der Bohrung Nr. 4 auf der TK 1318, Blatt 2 mit persönlichen Ergänzungen und Hervorhebungen.	23
Abbildung 5:	Handzeichnung der Tiefenlage der holozänen Basis.	26
Abbildung 6:	Flussdiagramm.	28
Abbildung 7:	Stammdateneingabemaske GeoDin.	31
Abbildung 8:	Schichtenbeschreibungseingabemaske GeoDin.	32
Abbildung 9:	Auszug aus dem Stammdatenblatt von GeoDin.	33
Abbildung 10:	Auszug aus der aus GeoDin Datenbank erzeugten Tabelle.	34
Abbildung 11:	Beispiel eines Semivariogramm.	36
Abbildung 12:	Sphärische, Gauß'sches und experimentelles Variogramm.	37
Abbildung 13:	Abschätzung Blockwertes mit Hilfe des Krigging-Verfahrens.	38
Abbildung 14:	DGM des Untersuchungsgebietes.	40
Abbildung 15:	3D-Darstellung des Untersuchungsgebietes.	41
Abbildung 16:	Variogramm der Datenbasis für die Erstellung des DGM.	41
Abbildung 17:	Verteilung der Bohrungen.	44
Abbildung 18:	Übersicht über die Bohrungen, die die holozäne Basis erreicht haben (ohne Daten HOFFMANN welche nahezu alle die holozäne Basis erreichen).	45
Abbildung 19:	Variogramm der Daten für die Berechnung der holozänen Basis.	46
Abbildung 20:	Residuals der pleistozänen Oberfläche.	47
Abbildung 21:	Datenbasis für die Ermittlung der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression.	48
Abbildung 22:	Variogramm der Daten für die Ermittlung der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression.	49
Abbildung 23:	Residuals der holozänen Basis zu Beginn der Transgression.	50
Abbildung 24:	Variogramm des obersten Meters, Sandanteil.	51
Abbildung 25:	Variogramm des obersten Meters, Kleianteil.	51
Abbildung 26:	Variogramm der obersten zwei Meter, Sandanteil.	52
Abbildung 27:	Variogramm der obersten zwei Meter, Kleianteil.	52
Abbildung 28:	Variogramm der obersten drei Meter, Sandanteil.	53
Abbildung 29:	Variogramm der obersten drei Meter, Kleianteil.	53
Abbildung 30:	Tiefenlage der heutigen Holozänbasis.	55
Abbildung 31:	3D-Darstellung der heutigen Holozänbasis.	56

Abbildung 32: Entwicklung des Fassungsvolumens. 56
Abbildung 33: Vermutete Tiefenlage der Holozänbasis zu Beginn der Transgression. 57
Abbildung 34: 3D-Darstellung der vermuteten Tiefenlage der Holozänbasis zu Beginn der Transgression. 58
Abbildung 35: Übersichtkarte Volumengrenze. 59
Abbildung 36: Prozentualer Sandanteil im obersten Meter. 61
Abbildung 37: Prozentualer Kleianteil im obersten Meter. 62
Abbildung 38: Prozentualer Sandanteil in den obersten zwei Metern. 63
Abbildung 39: Prozentualer Kleianteil in den obersten zwei Metern. 64
Abbildung 40: Prozentualer Sandanteil in den obersten drei Metern. 65
Abbildung 41: Prozentualer Kleianteil in den obersten drei Metern. 66
Abbildung 42: Eindeichungskarte mit Testgebiet. 68
Abbildung 43: Ausschnitt aus der Geologischen Übersichtskarte CC1518 Flensburg. 69
Abbildung 44: Ausschnitt aus der Bodenübersichtskarte CC1518 Flensburg. 70
Abbildung 45: Meeresspiegelanstiegskurve. 73

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Volumenbilanzen. 60
Tabelle 2: Korngrößenanteile der obersten drei Meter. 71
Tabelle 3: Flächenanteil nach Sedimenttyp. 72
Tabelle 4: Benötige Sedimentmengen nach erwarteter Geländeerhöhung. 72

VORWORT

Das Projekt wurde am 26.06.2002 rückwirkend zum 31.05.2005 mit einer Laufzeit von 3 Jahren bewilligt. Zum 1.7.2002 wurde der Sachbearbeiter, Herr Dr. Kai Ahrendt, Dipl. Geologe, eingestellt. Herr Dr. Kai Ahrendt verfügt über langjährige Erfahrung über die geologische Entwicklung des Nordfriesischen Wattenmeeres und beschäftigt sich seit über 20 Jahren mit der angesprochenen Problematik. Sehr gute Kontakte zu Ämtern und potentiellen Datenlieferern ließen eine effiziente Bearbeitung des Projektes zu. Aufgrund tarifrechtlicher Rahmenbedingungen war eine Beschäftigung von Herrn Dr. Ahrendt über den 30.06.2003 nicht möglich. Das Projekt wurde daher mit Auftrag vom 01.08.2003 an das Büro für Umwelt und Küste, Inh. Dr. Kai Ahrendt, aufgrund des dort vorhandenen Sachverstandes vergeben. Neben Herrn Dr. Ahrendt wurde das Projekt von Frau Gunilla Kaiser, Dipl. Geographin sowie Fr. Sandra Ludwig, Dipl. Geologin bearbeitet.

Unser Dank gilt der KFKI-Beratergruppe, die durch ihre aufgeschlossene und konstruktive Kritik sehr zum Gelingen dieses Projektes beigetragen hat. Herr Dr. Liebsch-Dörschner gestattete den ungehinderten Zugang zum Archiv des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. Das Personal stand immer mit Rat und Tat zur Seite. Ferner möchten wir uns bei dem Geographischen Institut der Universität Kiel für die kooperative Zusammenarbeit sowie bei dem Amt für ländliche Räume in Husum für die Bereitstellung von Daten bedanken.

1 EINLEITUNG

Die Kenntnisse der Sedimentdynamik vor der deutschen Nordseeküste ist von grundlegender Bedeutung im Zusammenhang mit Maßnahmen des Insel- und Küstenschutzes, küstenwasserbaulicher Tätigkeiten sowie der Beurteilung von Standsicherheiten maritimer Bauwerke und der Stabilität des Wattenmeeres. Die Veränderungen des Meeresbodens resultieren aus dem Zusammenspiel von Sedimentverfügbarkeit und Energiespektrum des Transportmediums, d. h. es muss genügend umlagerungsfähiges Lockersediment in ausreichender Menge und Zusammensetzung vorhanden sein, um unter entsprechenden hydrodynamischen Bedingungen morphologische Strukturen aufbauen zu können. Dieses Formeninventar wird von Umlagerungsprozessen auf unterschiedlichen Zeitskalen gesteuert.

Im Unterschied zu dem ostfriesischen Küstenbereich spielen hochaufragende glaziale und tertiäre Sedimentkörper in Nordfriesland eine wichtigere Rolle in den postglazialen Sedimentationsabläufen. Einerseits schützten diese Ablagerungen an der Außenküste den Bereich der nordfriesischen Rinne lange Zeit vor direktem Meereseinfluss aus Westen, andererseits stellten die Ablagerungen eine, wenn nicht die wichtigste Sedimentquelle für das Auffüllen des nordfriesischen Küstenraumes dar. An der nordfriesischen Außenküste herrschen im Gegensatz zur niedersächsischen Küste klastische Sedimentserien vor. Es wurde erwartete, 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.

Über den Vergleich dieser unterschiedlichen Grundvoraussetzungen in den Sedimentabfolgen zwischen Nordfriesland und dem östlichen Niedersachsen wird erwartet, tiefere Einblicke über die gesetzmäßigen Zusammenhänge zwischen den sich ändernden Raten des Meeresspiegelanstieges einerseits und der Sedimentfixierung im Akkumulationsgebiet einer relativ offenen und andererseits einer relativ geschützten Küstenregion zu bekommen.

Weit zuverlässiger als kleinräumig oder über kurze Zeitspannen erfasste Messdaten, gestatten Langzeitbilanzen eine Einschätzung der Auswirkungen vom vermuteten Treibhauseffekt, der wahrscheinlich eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges nach sich zieht, auf die Stabilität bzw. Anpassungsfähigkeit des Systems Küste. Ein höherer Gezeitenhub z. B. ruft andere morphologische Großformen hervor, 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. Die Sedimentstabilität und die Stabilität morphologischer Formen stellt dabei ein wichtiges Element dar.

Die zu erlangenden Erkenntnisse ergeben eine erheblich verbesserte quantitative Datenbasis für praxisbezogene Überlegungen in Hinblick auf naturnahen Küstenschutz der Zukunft, und es ergeben sich neue methodische Ansätze zum Thema Klimafolgenforschung.

Die bei der Bilanzierung zu lösende Aufgabe lässt sich folgendermaßen umreißen: Zunächst geht es darum, die holozänen Sedimente, die über dem wellig gegliederten, mit präholozänen Aufragungen unterbrochenen Untergrund akkumuliert sind, volumetrisch zu erfassen. 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 und umfasst 30 TK 25 und damit eine überschaubare Größenordnung (Abb. 1).

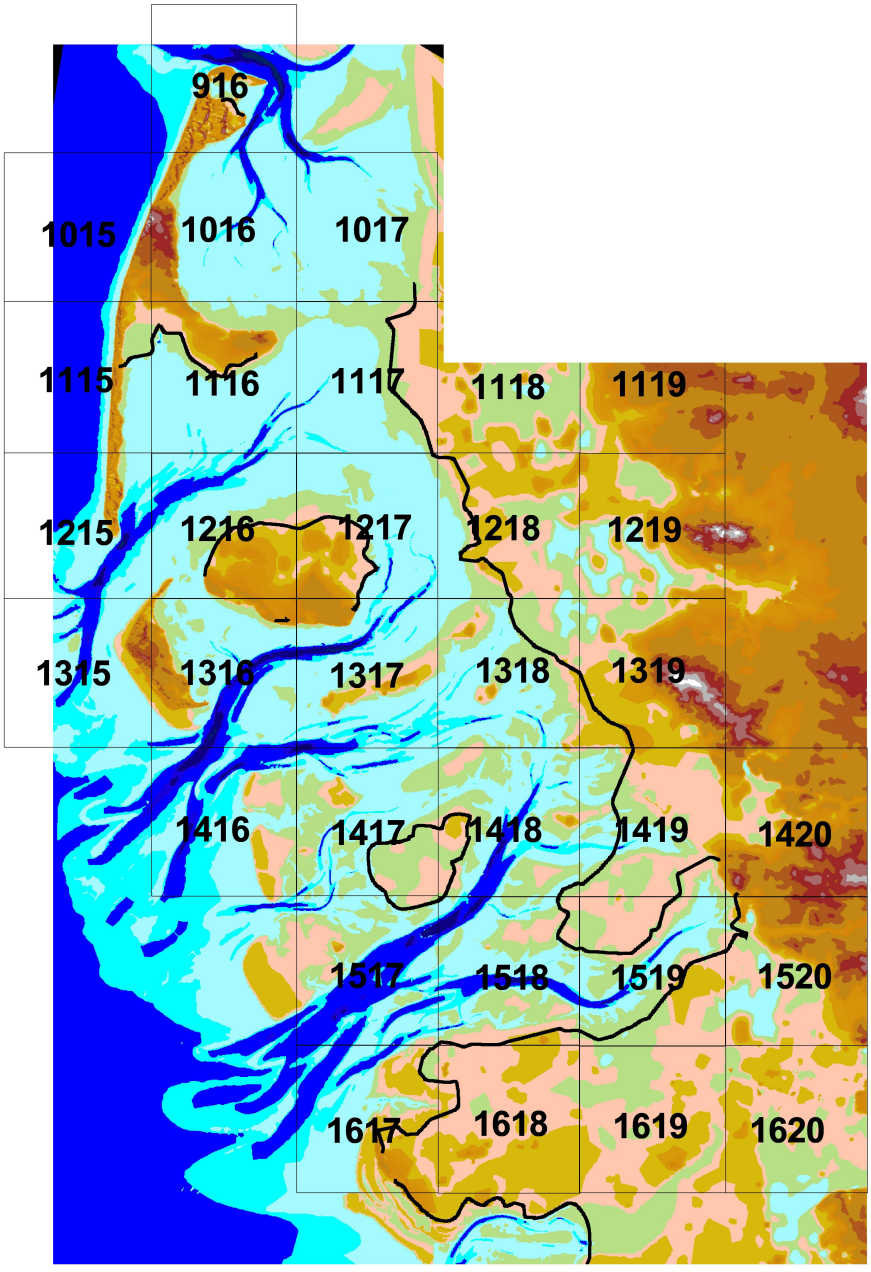


Abbildung 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet mit Nummer und Lage der TK's.

Anhand der Gleichgewichtskriterien (SPIEGEL 1997, WITEZ et al. 1998) sollen die Sedimente nach Qualität und Quantität bestimmt werden, die für eine morphologische Anpassung an sich verändernde hydrodynamische Rahmenbedingungen benötigt werden.

Die Ergebnisse werden in Karten und in digitaler Form vorgelegt und so für Fragestellungen des Küstenwasserbaus mit Bezug auf Materialumlagerung wie auch für die Modellierungen der Sedimentumlagerungen im Küstenraum zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse liefern eine wesentlich bessere Datengrundlage für zukünftige Forschungsvorhaben im Küstenraum, vor allem für morphologische Langfristprognosen zur Stabilität des Wattenmeeres (z. B. das KFKI-Forschungsvorhaben: Morphologische Langfristprognose für das System Tidebecken-Außensände am Beispiel Sylts und der Dithmarscher Bucht, Förderkennzeichen MTK 0605, Prof. Zanke).

2 STAND DES WISSENS

Die sedimentologisch-morphologische Ausgangslage für die natürliche Gliederung Nordfrieslands wird durch die 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 in die vorgefundene Hohlform das Eem-Meer. Hierbei handelt es sich in den oberen Sequenzen um tonig/sandige Ablagerungen. Diese sind großräumig unter dem nordfriesischen Wattenmeer vorhanden. Die nachfolgende Weichseleiszeit, die ihre Geschiebemergelablagerungen weiter im Osten hinterließ, entwässerte vor allem durch die Schleswiger Vorgeest und die Treene-Eiderniederung während der Abschmelzphase. Sie benutzte 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. Als Basis zu Beginn der Transgressionsphase entstand eine vermoorte Oberfläche, der Basistorf. Über dieser allmählich „ertrinkenden“ Pleistozänlandschaft wurden später erhebliche Sedimentmengen akkumuliert. Im Bereich der „nordfriesischen Rinne“ kann dieser Sedimentkörper Mächtigkeiten von einigen Zehner Metern 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 5000 v. Chr. nahm die Anstiegsgeschwindigkeit jedoch merklich ab. Zeitweilig kam es sogar zu einer Küstenlinienverschiebung nach Westen. In dieser Phase relativer Meeresspiegelschwankungen mit mehrfachem see- und landwärtigem Verschieben der Küstenlinie bildeten sich Torfe im Wechsel mit brackischen und lagunären Schluffen und Tonen. Saale-eiszeitliche Geestkerne westlich von Sylt, Amrum und nordwestlich Eiderstedt und daran anschließende Nehrungen schützten zeitweise den Bereich des heutigen Wattenmeeres vor dem direkten Angriff des Meeres. So kam es im Schutze dieser Nehrungen zu Stillwasserablagerungen, anderenorts entstanden Serien klastischer Sedimentwechsellagerungen aus Ton-Silt und Sand. Vollmarine Ablagerungen zeugen von Meereseinbrüchen in diesen Raum.

Die Geestkerne lieferten neben den Sedimenten aus den Fließgewässern des Festlandes das für den Aufbau des Wattenmeeres und der Vorgeest notwendige Material. Der gesamte Raum verlandete und vermoorte.

Im ersten Jahrtausend nach Chr. wurde die westliche Barriere allmählich immer öfter überflutet. Zu diesem Zeitpunkt begann der Mensch bereits massiv in den Naturraum einzugreifen. In der zweiten Hälfte des ersten nachchristlichen Jahrtausends hatte sich ein entscheidender Wandel im Sedimentationsverhalten vollzogen. Die Sinkstoffe nahmen merklich ab und kamen nicht mehr von der Nordsee sondern stammten nun aus dem Raume selbst und Erosionsprozesse überwiegten.

Um 1000 n. Chr. begannen die sich hier ansiedelnden Menschen das Land teilweise zu bedeichen und über Entwässerungssysteme das Land zu kultivieren. Die durch den Meerwasserkontakt versalzenen Torfe wurden ab Mitte des 11. Jahrhunderts n. Chr. durch friesische Kolonisten zur Salztorfgewinnung abgebaut. Durch den Abbau des Torfes und Setzung durch Entwässerung desselben wurde die Landoberfläche tiefer gelegt (Verfehnung). Dieses so entstandene tiefgelegene Sietland wurde dann in großen Teilen durch die verheerende Sturmflut von 1362 überflutet. Das Meer drang bis an den Geestrand vor und lagerte die junge Marsch über dem Torf ab. Dieser sehr flache 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 durch diese Sturmfluten entstanden, bestimmen heute noch das Bild des Wattenmeeres. Die Sedimentakkumulation im Küstenbereich vollzog sich bis vor ca. 5000 Jahren in einem quasi-kontinuierlichen Prozess, der allerdings durch klimatisch bestimmte Meeresspiegelschwankungen, in der Umgebung der ehemaligen Insel Alt-Nordstrand auch durch vielfache Umlagerungen zwischenzeitlich entstandener Priele, überlagert und in seiner Dynamik verändert wurde.

Der interne sedimentologische Aufbau Nordfrieslands und des Wattenmeeres ist vielfach Untersuchungsgegenstand gewesen. Für die vorliegende Fragestellung der Sedimentbilanzierung sind diese Untersuchungen allerdings größtenteils nicht hochauflösend genug oder aber lokal begrenzt. Zu den wichtigsten Arbeiten der großräumigen Darstellung gehören z.B. die Arbeiten von BANTELMANN (1939), BANTELMANN & FISCHER (1966), BRESSAU & SCHMIDT (1979), DITTMER (1941a,b, 1952), PRANGE (1967), SIMON (1941), STREIF & KÖSTER (1978), TEMMLER (1995). Lokale oder Oberflächeninformationen sind in den Arbeiten von AHRENDT (1989, 1992, 1994), AHRENDT & TABAT (1994), BAYERL (1992), BERNER et al. (1986), DIETZ & HECK (1952), EL-SAYED (1977), GRIPP & BECKER (1940), GRIPP & SIMON (1940), HIGELKE, HOFFMANN & MÜLLER-WILLE (1982), HOFFMANN (1974a,b, 1988), KÖSTER (1974), LÜNEBURG (1969), OSTENDORF (1943), TIETZE (1983, 1984) u. a. enthalten.

Neben diesen Veröffentlichungen stehen zahlreiche Unterlagen im Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Abteilung Geologie, zur Verfügung. Hierzu gehören vor allem die Aufschlussbohrungen für Küstenschutzmaßnahmen, die in den entsprechenden

Gutachten niedergelegt sind. So sind große Teilbereiche des nordfriesischen Untergrundes hervorragend aufgeschlossen. Im ALR (Amt für ländliche Räume, Husum) sind ebenfalls im Bohrarchiv ältere Aufnahmen und Berichte verfügbar. Neben diesen Unterlagen stehen noch zahlreiche weitere Unterlagen zur Verfügung. Hierzu gehören Berichte und Arbeiten der Universität Kiel, wie z. B. AHRENDT & KÖSTER (1986), ARSENOGLOU (1971), AZHAR (1974), BERNER (1981), ELROD (1973), HIGELKE (1995), KAUFHOLD (1980), KÖSTER (1980), KÖSTER, AUSTEN, AUSTEN, BAYERL, & RICKLEFS (1995), NOMMENSEN (1982), ELWERT & SCHNEIDER (1979) etc. oder die des LANU. Eine Arbeit von FALK (2002) zeigt zwei Profile durch das Untersuchungsgebiet.

Aus anderen Bereichen liegen bereits Ergebnisse über Sedimentbilanzen vor. Dies betrifft den Bereich zwischen Weser und Ems (HOSELMANN & STREIF 1997, 1998; STREIF, 1998) sowie das Küstenvorfeld der deutschen Bucht von den Inseln bis zur -20 m Tiefenlinie (FIGGE 1998). Die Genese des Niedersächsischen Wattenmeeres unterscheidet sich allerdings grundlegend von der Schleswig-Holsteinischen. In Niedersachsen ist nach STREIF (1990) das Sediment von der Nordsee in die Küstenregion transportiert worden. Hier stehen noch genügend Sedimente für den Aufbau von Akkumulationskörpern zur Verfügung wohingegen in Schleswig-Holstein abrasive Prozesse auch heute noch überwiegen. Hier stammen die Sedimente überwiegend aus der Erosion der Geschiebemergelablagerungen. Untersuchungen von FIGGE (1998) zeigten, dass im Küstenvorfeld nur relativ wenig holozänes Lockersediment zur Verfügung steht und es im Wattenmeer selbst zu interner Umlagerung kommt.

In der Vergangenheit wurde vielfach versucht, die morphologische Stabilität anhand von statistischen Gleichgewichtsbeziehungen zwischen dem Tidevolumen der Watteinzugsgebiete und dem entsprechenden Durchflussquerschnitt des Seegatts zu erfassen (RENGER 1979, FERK 1995, SPIEGEL 1997, WITEZ et al. 1998). Alle diese Ansätze haben jedoch gemein, dass es rein theoretische Beziehungen sind die über realen Sedimentaustausch, Sedimentverfügbarkeit und Sedimentmobilisierung keine Aussagen machen bzw. diese nicht in die Betrachtungen mit einbeziehen. Wenn für die durch diese Gleichgewichtsbedingungen ermittelten morphologischen Einheiten, z. B. Sandwatt, kein entsprechendes Sediment zur Verfügung steht, können sich diese auch nicht bilden. Ansätze quantitativer Betrachtungen von Akkumulationsprozessen im Küstengebiet wurden bisher nur vereinzelt durchgeführt (BRESSAU & SCHMIDT 1979, BARCKHAUSEN et al. 1977). Ein Umstand hierfür liegt meist in dem ohne Edv-technischer Hilfsmittel kaum zu bewerkstelligenden Arbeitsaufwand und in der früher nur lückenhaft vorhandenen Datenbasis die sich nachteilig auf die Ergebnisse auswirkt. Durch vielfältige Untersuchungen in der betrachteten Region ist die heutige Datenbasis jedoch um ein vielfaches größer.

Aufbereitete Daten, in denen die Gesamtmächtigkeit holozäner Schichtenabfolgen sowie die Teilmächtigkeiten der sie aufbauenden klastischen und organischen Schichten in homogenisierter Form vorgehalten werden, waren bisher praktisch nicht vorhanden. Erst durch das DFG-Teilprojekt „Sedimentbilanz Küste“ von Dr. Streif/NLfB ist es gelungen, eine derartige Datenbasis aufzubauen. In dem KFKI Projekt "Materialinventur an der deutschen Nordseeküste" von Dr. Figge/BSH wurde eine andere Vorgehensweise angewandt. Ausgehend von

geophysikalischen Untersuchungen des Küstenvorfeldes wurde anhand unterschiedlicher Lagerungsdichte die Holozänbasis bestimmt (Einpassung der Reflektoren über Kernbohrungen). Hierbei kam es insbesondere im Übergangsbereich vom Off-shore zum Near-shore Bereich zu gewissen Unsicherheiten über die stratigraphische Einordnung der Reflektoren. Basisdaten, die nach ihrer Art und Dichte für eine regionale Sedimentbilanz geeignet sind, werden praktisch nur in geologischen Diensten vorgehalten. Da prozessorientierte Bilanzbetrachtungen jedoch außerhalb der originären amtlichen geologischen Landesaufnahme liegen, wurden derartige Arbeitsansätze dort bislang in der Regel nicht verfolgt. Erschwerend kam bisher hinzu, dass ohne Edv-technische Unterstützung der Arbeitsaufwand nicht zu bewerkstelligen war.

In jüngster Zeit sind jedoch erhebliche Fortschritte bei der Sammlung von Bohrdaten, bei der Klassifizierung und Kodierung der Schichtenfolgen des Küstenholozäns sowie bei der Edv-technischen Bearbeitung umfangreicher Datensätze erzielt worden. Mit dem Symbolschlüssel Geologie (BARCKHAUSEN et al. 1977, PREUSS et al. 1991) wurden die Voraussetzungen einer Edv-technischen Dokumentation und Verarbeitung der Schichtenverzeichnisse von Bohrungen geschaffen. Darüber hinaus sind seit Einführung des lithologischen Ordnungsprinzips (BARCKHAUSEN et al. 1977) systematische Klassifizierungen aller Schichtenfolgen des Küstenholozäns in Sequenzen und Profiltypen möglich, wobei gleichzeitig eine Homogenisierung von Schichtenbeschreibungen unterschiedlichster Qualität erzielt wird. FALK (2002) wandte dieses Prinzip für die Auswertung von zwei Profilen mit Erfolg in Nordfriesland an.

PESCH (2000) konnte z. B. für die Insel Sylt (Begrenzung heutige Hochwasserlinie) anhand Edv-technischer Aufbereitung von Bohrdaten ein holozänes Sedimentvolumen von 1.200.000.000 m³ ermitteln. Die Rantumer Bucht mit der hochliegenden Pleistozänoberfläche weist nur 640.000.000 m³ holozänes Sediment auf. Hier wird deutlich wie unterschiedlich die Entwicklung einzelner Regionen gewesen ist. Dies schlägt sich auch heute noch in der morphologischen Entwicklung nieder.

3 DATENLAGE

Der zur Erstellung der holozänen Basis und Rekonstruktion der geologischen Entwicklung verwendete geologische Datenbestand lässt sich folgendermaßen strukturieren:

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

3.1 Topographie

Für das Projekt standen die Deutsche Grundkarte (DGK5) im Maßstab 1:5.000 sowie die Topographische Karte (TK25) im Maßstab 1:25.000, diese georeferenziert, zur Verfügung.

Die wichtigste digitale Datenbasis bildet jedoch das Allgemeine Liegenschaftskataster (ALK) mit einer Auflösung von 10 m x 10 m sowie die ATKIS-Daten des Landes Schleswig-Holstein.

Für die Wattbereiche konnte auf das digitale Geländemodell des nordfriesischen Wattenmeeres des LANU (SPIEGEL 1997, WITEZ 2000) zurückgegriffen werden.
Dieses Geländemodell liegt als ARC/INFO-GRID in einer Maschenweite von 50 m x 50 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 zugrunde legen der Höheninformationen folgender Kartenwerke erstellt (SPIEGEL 1997, S. 22):

- der KFKI (Kuratorium für Forschung und Küsteningenieurswesen)-Küstenkarten 1:25000 von 1976/78,
- der dänischen Wattkarten 1:10.000 von 1976,
- der deutschen Wattkarten 1:10.000 aus den siebziger Jahren. In dieses Modell wurden aktuelle digitale Daten des ALR-Husum aus dem Raum Sylt/Amrum, Eiderstedt, Pellworm und Föhr aus den Jahren 1999 bis 2002 integriert.

3.2 Bohrdaten

Für die Durchführung des Projektes standen ca. 18848 Bohrungen des LANU zur Verfügung. Hinzu kommen die Daten des ALR, BSH, Universität Kiel, Kreis- und Gemeindebehörden, Energieversorger, Windparkbetreiber etc. Die größte Datendichte ist auf dem Festland sowie den Inseln und Halligen vorhanden. Im Mittel sind dies für eine TK 25 ca. 850 Bohrungen. Die Auswertung des Bohrbestandes der TK 25 ergab eine Anzahl von Bohrungen im Mittel zwischen 500 und 1000 je Blatt. Nur an der westlichen Begrenzung des Untersuchungsgebietes liegt die Dichte der Bohrungen darunter.

Die Kernansprache erfolgte überwiegend durch anerkannte Wissenschaftler der „Forschungsstelle Westküste“ (aufgegangen im ALR) sowie des LANU und bieten eine überzeugende Qualität der Ansprache und stratigraphischen Einstufung. Pollenanalytische und mikropaläontologische Untersuchungen standen bei der zeitlichen Einstufung im Vordergrund. ^{14}C-Altersdatierungen wurden nur in Einzelfällen durchgeführt. Da die Meeresspiegelhöhe zu konkreten Zeitpunkten jedoch relativ genau bekannt ist, können hierüber die entsprechenden Korrelationen zwischen Meeresspiegelanstiegsraten und Sedimentationseigenschaften vorgenommen werden.

Diesen sogenannten Kernbohrungen ist gemein, dass die Gesteins- und/oder Bodenproben im zylindrischen Hohlraum des Bohrers zu Tage gefördert werden, um dann im Labor durch unterschiedliche analytische Verfahren (wie z. B. Sieb- und Schlämmanalysen) ausgewertet zu werden. Die aus diesen Verfahren stammenden Ergebnisse werden dann mitsamt der im Gelände ermittelten Bohransatzhöhe und des genauen Standorts der Bohrung in einem Bohrprotokoll festgehalten.

Die für den betrachteten Raum zusammengestellten Bohrdaten wiesen z. T. erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Qualität dieser Bohrprotokolle auf, wobei sich gemäß der Herkunft der bearbeiteten Unterlagen drei Bezugsquellen unterscheiden.

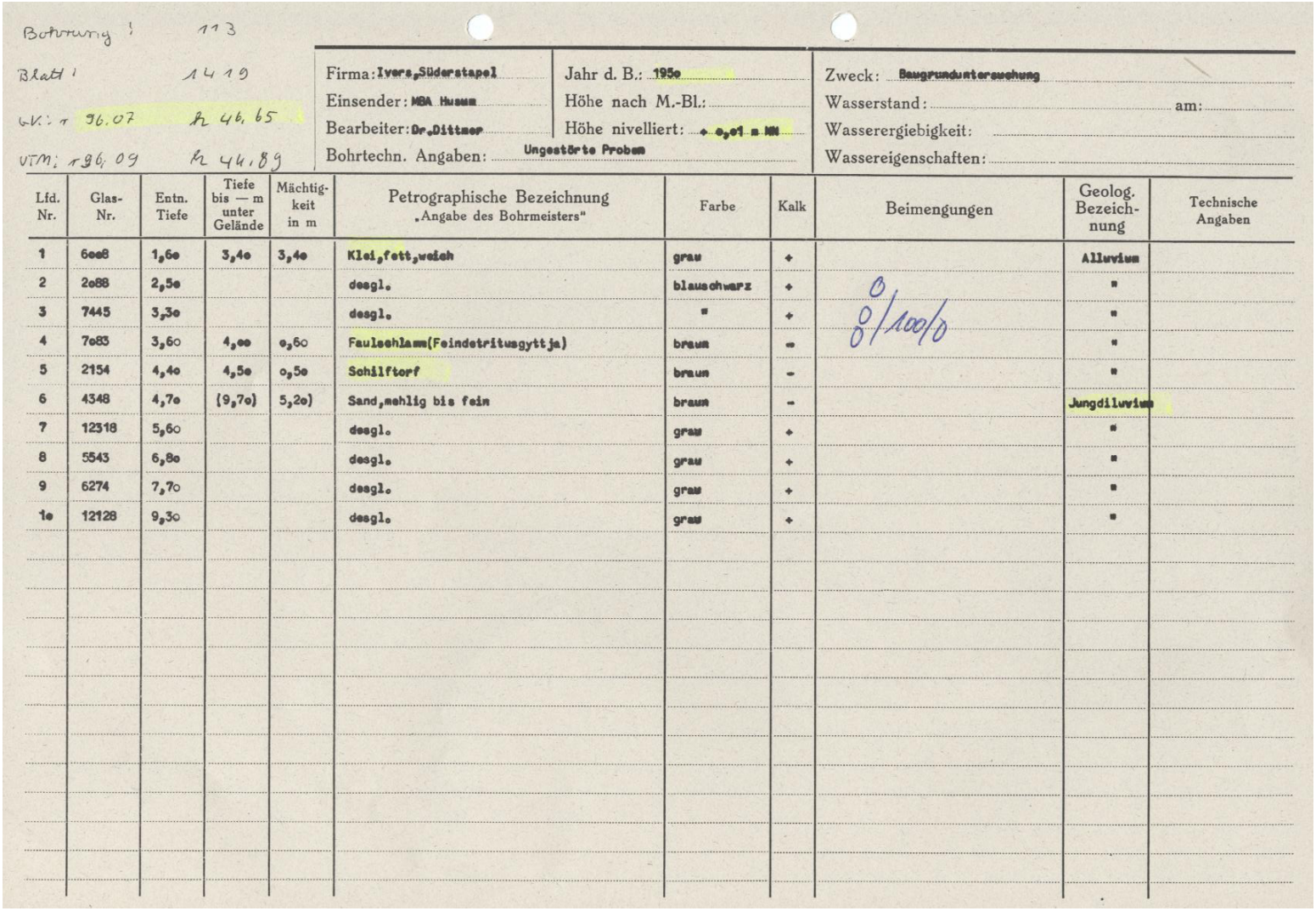
Neben dem LANU werden die meisten der an der schleswig-holsteinischen Westküste vorliegenden Bohrdaten vom ALR in Husum in Aktenordnern verwaltet. Die für den nordfriesischen Raum zutreffenden Exemplare konnten für diese Arbeit verwertet werden und beliefen sich insgesamt auf 3993 Bohrdaten. Die meisten der Bohrergebnisse wurden von Geologen wie K. GRIPP, W.G. SIMON und E. DITTMER bearbeitet.

Die Gründe für die Durchführung der Bohrungen sind sehr unterschiedlich. Daher weist der Datenbestand hinsichtlich der die Bohruntersuchungen in Auftrag gebenden Institutionen eine sehr große Heterogenität auf. Aus einer näheren Betrachtung des Datenmaterials lassen sich zusammenfassend folgende Zielsetzungen der Bohrarbeiten herausgreifen:

- Baugrunduntersuchungen;
- Arbeiten, die aus Gründen der Wasserversorgung durchgeführt wurden (Bau von Beobachtungsbrunnen, Trinkwassererschließung);
- Arbeiten aus Gründen der Küstensicherung (Bau von Tetrapodenlängswerken, Deichbau und -verstärkung);
- wissenschaftliche Projekte.

Sämtliche Bohrungen liegen analog vor und sind in die TK 25 eingetragen und mit Koordinaten versehen. Die Lagegenauigkeit beträgt ± 10 m.

Ein Beispiel eines vollständigen Bohrprotokolls von 1937 ist in Abbildung 2 dargestellt. Es finden sich hier unter anderem detaillierte Angaben über Schichteinteilung, dem genauen eingemessenen Standort (in Gauß-Krüger- und UTM-Koordinaten), der Bohransatzhöhe sowie dem Grund der Bohrerkundung und dem ausführenden 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.



Bohrung: 113
Blatt: 1419
GK: r 96.07 h 46.65
UTM: r 96.09 h 44.89

Firma: Ivers, Süderstapel
Einsender: MBA Husum
Bearbeiter: Dr. Dittmer
Bohrtechn. Angaben: Ungestörte Proben

Jahr d. B.: 195o
Höhe nach M.-Bl.:
Höhe nivelliert: + o,o1 m NN

Zweck: Baugrunduntersuchung
Wasserstand: am:
Wassererglebigkeit:
Wassereigenschaften:

Lfd. Nr.	Glas-Nr.	Entn. Tiefe	Tiefe bis — m unter Gelände	Mächtigkeit in m	Petrographische Bezeichnung „Angabe des Bohrmeisters"	Farbe	Kalk	Beimengungen	Geolog. Bezeichnung	Technische Angaben
1	6o68	1,6o	3,4o	3,4o	Klei, fett, weich	grau	+		Alluvium	
2	2o88	2,5o			desgl.	blauschwarz	+	0	"	
3	7445	3,3o			desgl.	"	+	0/100/0	"	
4	7o83	3,6o	4,oo	o,6o	Faulschlamm (Feindetritusgyttja)	braun	-		"	
5	2154	4,4o	4,5o	o,5o	Schilftorf	braun	-		"	
6	4348	4,7o	(9,7o)	5,2o)	Sand, mehlig bis fein	braun	-		Jungdiluvium	
7	12318	5,6o			desgl.	grau	+		"	
8	5543	6,8o			desgl.	grau	+		"	
9	6274	7,7o			desgl.	grau	+		"	
1o	12128	9,3o			desgl.	grau	+		"	

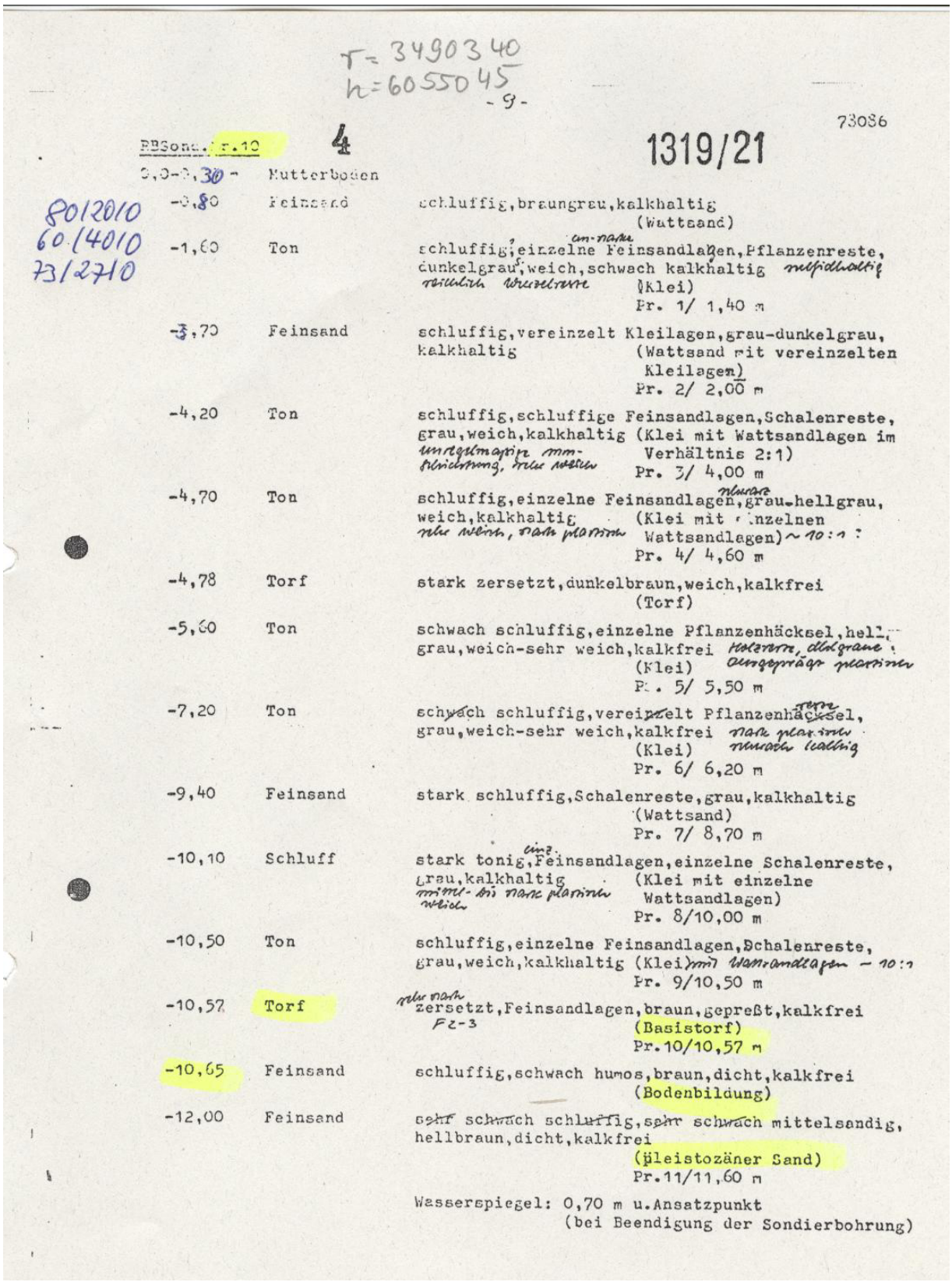
Abbildung 2: Bohrprotokoll vom ALR Husum mit persönlichen Eintragungen und Hervorhebungen.

Ein weiterer Bohrdatenbestand bildet das Bohrkataster des Instituts für Ur- und Frühgeschichte der Universität Kiel. Die seitens Dr. HOFFMANN zur Verfügung gestellten Bohrdaten weisen mit insgesamt 2360 Datensätzen den größten zusammenhängenden Anteil des gesamten Bohrdatenbestandes auf. Hierbei handelt es sich um Ergebnisse aus Untersuchungen zum Küstenholozän zwischen Sylt und Föhr. Die 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. Die Bohrerkundungen zielten auf eine Untersuchung des holozänen Schichtaufbaus ab, mit maximalen Bohrtiefen von 11 m und durchschnittlichen von 6 m (HOFFMANN, 1980, S. 91). So sind neben der für diese Arbeit wichtigen Angabe über die Oberkante der Geest, also der Grenze zwischen präholozänen und holozänen Sedimenten, auch z. B. Torf- und Kleivorkommen hinsichtlich Tiefe und Mächtigkeit dokumentiert.

Im Vergleich zu dem oben gezeigten Protokoll sind die einzelnen Angaben und Untersuchungsergebnisse hier tabellarisch aufgeführt. Auch diese Bohrdaten sind in Gauß-Krüger-Koordinaten angegeben, allerdings wurden bei der Dokumentation der Ergebnisse Koordinatenangaben und die übrigen Bohrinformationen auf unterschiedlichen Blättern protokolliert.

Der Datenbestand erwies sich bis auf die 382 im Wattbereich befindlichen Bohrdaten als vollständig. Hier fehlten die Koordinatenangaben, die allerdings auf einem von Dr. HOFFMANN mitgelieferten Lageplan aufgezeichnet waren. Diese Daten wurden bereits von PESCH (2000) digital erfasst.

Im LANU liegen keine originalen analogen Bohrprotokolle mehr vor. Die Bohrprotokolle sind verfilmt worden und wurden anschließend im Landesarchiv in Schleswig gelagert. Das LANU unterscheidet auf Grundlage der Lagegenauigkeit zwischen Bohrungen, die auf der TK 25 verzeichnet werden und welche, die auf die DGK5 eingetragen werden. Bohrungen, die auf die DGK5 eingetragen werden, sind im Gelände eingemessen worden. Vielfach wurden die Bohrungen von Dr. TEMMLER, LANU, direkt angesprochen oder aber die vorhandenen Bohrprotokolle akribisch genau überarbeitet. Neben den Bohrprotokollen sind dazugehörige Gutachten analog vorhanden, die ebenfalls zur Auswertung zur Verfügung standen. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen exemplarische Beispiele von dem im LANU vorhandenen Bohrprotokollen.



r = 3490340
h = 6055045
- 9 -

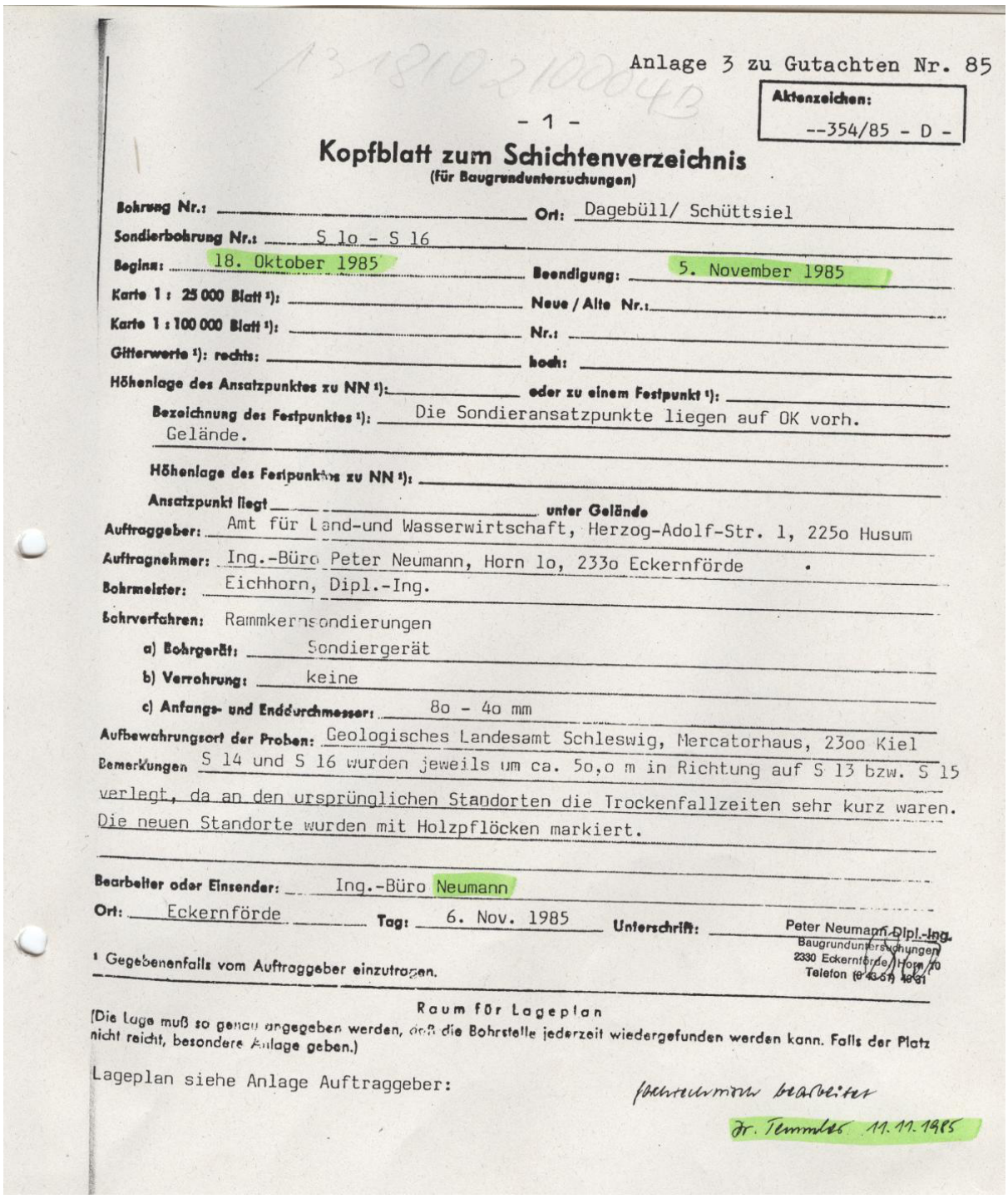
73086

RBSond. Nr.10 4 1319/21

0,0-0,30	Mutterboden	
-0,80	Feinsand	schluffig, braungrau, kalkhaltig (Wattsand)
-1,60	Ton	schluffig, einzelne Feinsandlagen, Pflanzenreste, dunkelgrau, weich, schwach kalkhaltig (Klei) Pr. 1/ 1,40 m
-3,70	Feinsand	schluffig, vereinzelt Kleilagen, grau-dunkelgrau, kalkhaltig (Wattsand mit vereinzelten Kleilagen) Pr. 2/ 2,00 m
-4,20	Ton	schluffig, schluffige Feinsandlagen, Schalenreste, grau, weich, kalkhaltig (Klei mit Wattsandlagen im Verhältnis 2:1) Pr. 3/ 4,00 m
-4,70	Ton	schluffig, einzelne Feinsandlagen, grau-hellgrau, weich, kalkhaltig (Klei mit einzelnen Wattsandlagen) Pr. 4/ 4,60 m
-4,78	Torf	stark zersetzt, dunkelbraun, weich, kalkfrei (Torf)
-5,60	Ton	schwach schluffig, einzelne Pflanzenhäcksel, hellgrau, weich-sehr weich, kalkfrei (Klei) Pr. 5/ 5,50 m
-7,20	Ton	schwach schluffig, vereinzelt Pflanzenhäcksel, grau, weich-sehr weich, kalkfrei (Klei) Pr. 6/ 6,20 m
-9,40	Feinsand	stark schluffig, Schalenreste, grau, kalkhaltig (Wattsand) Pr. 7/ 8,70 m
-10,10	Schluff	stark tonig, Feinsandlagen, einzelne Schalenreste, grau, kalkhaltig (Klei mit einzelne Wattsandlagen) Pr. 8/10,00 m
-10,50	Ton	schluffig, einzelne Feinsandlagen, Schalenreste, grau, weich, kalkhaltig (Klei) Pr. 9/10,50 m
-10,57	Torf	zersetzt, Feinsandlagen, braun, gepreßt, kalkfrei (Basistorf) Pr. 10/10,57 m
-10,65	Feinsand	schluffig, schwach humos, braun, dicht, kalkfrei (Bodenbildung)
-12,00	Feinsand	sehr schwach schluffig, sehr schwach mittelsandig, hellbraun, dicht, kalkfrei (pleistozäner Sand) Pr. 11/11,60 m

Wasserspiegel: 0,70 m u. Ansatzpunkt (bei Beendigung der Sondierbohrung)

Abbildung 3: Ein von TEMMLER überarbeitetes Protokoll des LANU der Bohrung Nr. 4 auf Blatt 21 der TK 1319 mit persönlichen Ergänzungen und Hervorhebungen.



Anlage 3 zu Gutachten Nr. 85

Aktenzeichen: --354/85 - D -

- 1 -

Kopfblatt zum Schichtenverzeichnis

(für Baugrunduntersuchungen)

Bohrung Nr.: _____ Ort: Dagebüll/ Schüttsiel

Sondierbohrung Nr.: S 1o - S 16

Beginn: 18. Oktober 1985 Beendigung: 5. November 1985

Karte 1 : 25 000 Blatt [1]): _____ Neue / Alte Nr.: _____

Karte 1 : 100 000 Blatt [1]): _____ Nr.: _____

Gitterwerte [1]): rechts: _____ hoch: _____

Höhenlage des Ansatzpunktes zu NN [1]): _____ oder zu einem Festpunkt [1]): _____

Bezeichnung des Festpunktes [1]): Die Sondieransatzpunkte liegen auf OK vorh. Gelände.

Höhenlage des Festpunktes zu NN [1]): _____

Ansatzpunkt liegt _____ unter Gelände

Auftraggeber: Amt für Land-und Wasserwirtschaft, Herzog-Adolf-Str. 1, 225o Husum

Auftragnehmer: Ing.-Büro Peter Neumann, Horn 1o, 233o Eckernförde

Bohrmeister: Eichhorn, Dipl.-Ing.

Bohrverfahren: Rammkernsondierungen

a) Bohrgerät: Sondiergerät

b) Verrohrung: keine

c) Anfangs- und Enddurchmesser: 8o - 4o mm

Aufbewahrungsort der Proben: Geologisches Landesamt Schleswig, Mercatorhaus, 23oo Kiel

Bemerkungen: S 14 und S 16 wurden jeweils um ca. 5o,o m in Richtung auf S 13 bzw. S 15 verlegt, da an den ursprünglichen Standorten die Trockenfallzeiten sehr kurz waren. Die neuen Standorte wurden mit Holzpflöcken markiert.

Bearbeiter oder Einsender: Ing.-Büro Neumann

Ort: Eckernförde Tag: 6. Nov. 1985 Unterschrift: Peter Neumann Dipl.-Ing. Baugrunduntersuchungen 2330 Eckernförde/Horn 10 Telefon (0 43 51) 46 31

[1] Gegebenenfalls vom Auftraggeber einzutragen.

Raum für Lageplan

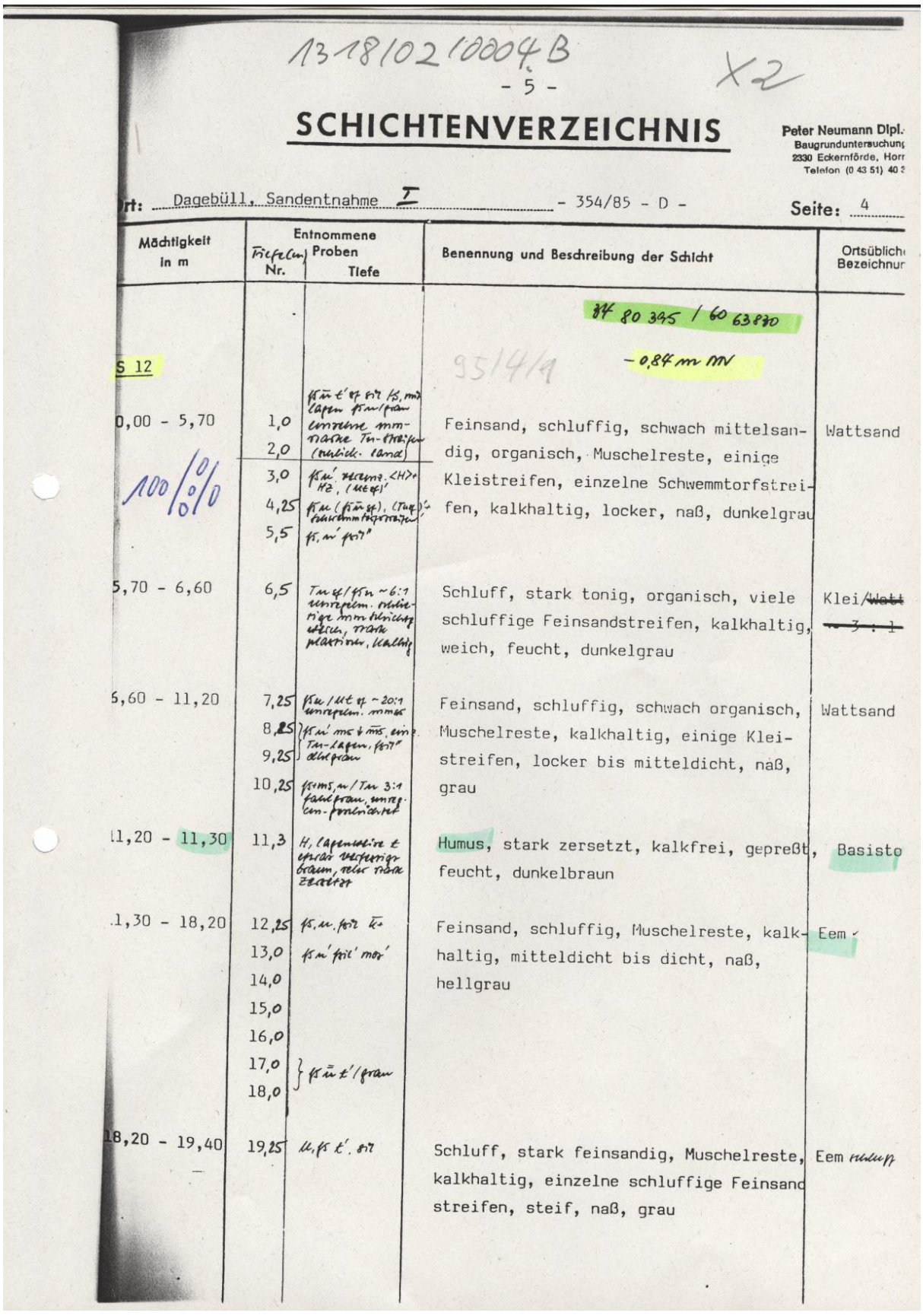
(Die Lage muß so genau angegeben werden, daß die Bohrstelle jederzeit wiedergefunden werden kann. Falls der Platz nicht reicht, besondere Anlage geben.)

Lageplan siehe Anlage Auftraggeber:

fachtechnisch bearbeitet

Dr. Temmler 11.11.1985

Abbildung 4a: Deckblatt der Bohrungen Nr. 4 bis Nr. 10 auf der TK 1318 Blatt 2 aus dem LANU-Archiv.



1318102 10004 B

- 5 -

X2

SCHICHTENVERZEICHNIS

Peter Neumann Dipl.
Baugrunduntersuchung
2330 Eckernförde, Horr
Telefon (0 43 51) 40 2

Ort: Dagebüll, Sandentnahme I - 354/85 - D - Seite: 4

Mächtigkeit in m	Entnommene Proben Tiefe (Tiefe cm) Nr.	Tiefe	Benennung und Beschreibung der Schicht	Ortsüblich Bezeichnur
			84 80 345 / 60 63880	
S 12			9514/1 -0,84 m NN	
0,00 - 5,70	1,0	fS ü t' gf fs, mS lagen fS ü/grau einzelne mm-starke Tn-Streifen (teilweise rötlich)	Feinsand, schluffig, schwach mittelsandig, organisch, Muschelreste, einige Kleistreifen, einzelne Schwemmtorfstreifen, kalkhaltig, locker, naß, dunkelgrau	Wattsand
	2,0			
100 %	3,0	fS ü' vereinz. <H> Hz, (Mu gf)'		
	4,25	fS ü (fS ü gf), (Tn gf)' Schwemmtorfstreifen		
	5,5	fS, ü' fest"		
5,70 - 6,60	6,5	Tn gf/fS ü ~6:1 unregelm. schlierige mm bis cm dicke, mürbe plastisch, kalkhalt	Schluff, stark tonig, organisch, viele schluffige Feinsandstreifen, kalkhaltig, weich, feucht, dunkelgrau	Klei/~~Watt~~ ~~~ 3 : 1~~
6,60 - 11,20	7,25	fS ü/Mu gf ~20:1 unregelm. mm-s	Feinsand, schluffig, schwach organisch, Muschelreste, kalkhaltig, einige Kleistreifen, locker bis mitteldicht, naß, grau	Wattsand
	8,25	fS ü' ms & ms, einz. Tn-Lagen, fest"		
	9,25	dkl grau		
	10,25	fS ms, ü/Tn 3:1 fahlbraun, unregelm. cm-lenticular		
11,20 - 11,30	11,3	H, Lagen/cm t, grau verfestigt braun, sehr mürbe zerdrückt	Humus, stark zersetzt, kalkfrei, gepreßt, feucht, dunkelbraun	Basisto
11,30 - 18,20	12,25	fS, ü, fest k~	Feinsand, schluffig, Muschelreste, kalkhaltig, mitteldicht bis dicht, naß, hellgrau	Eem
	13,0	fS ü' fest' mür'		
	14,0			
	15,0			
	16,0			
	17,0	fS ü t'/grau		
	18,0			
18,20 - 19,40	19,25	U, fS t', st?	Schluff, stark feinsandig, Muschelreste, kalkhaltig, einzelne schluffige Feinsandstreifen, steif, naß, grau	Eem reduz?

Abbildung 4b: Bohrprotokoll der Bohrung Nr. 4 auf der TK 1318 Blatt 2 mit persönlichen Ergänzungen und Hervorhebungen.

3.3 Kartenmaterial

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

3.4 Vorgehensweise

Neben der Überführung der analogen in digitale Information spielte vor allem die Einpassung sämtlicher geologischer Daten in ein gemeinsames Koordinatensystem, eine gewisse Rolle. Die Erstellung der holozänen Basisfläche 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, wurde sich auch auf dieses Koordinatensystem bezogen.

Die aus GeoDin exportierte Bohrdatenbank (SHSTMLOC.DBF) bildete den wichtigsten Teil des in die Interpolationsberechnungen eingehenden Datenbestandes. Bevor diese 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 die Datensätze, die die für das Erstellen der holozänen Basisfläche notwendigen Informationen beinhalteten. Das sind:

- Koordinatenangaben,
- Angabe der Bohransatzhöhe auf NN bezogen oder auf NN umrechenbar,
- petrographische Ansprache,
- stratigraphische Einstufung,
- sowie die für die Ermittlung der Basisfläche notwendige Endtiefe.

Aufgrund der Tatsache, dass die Daten im ALR analog vorliegen und diese nicht erst reproduziert werden mussten, wurde im ersten Schritt auf diese Daten zurückgegriffen. Ein weiterer Vorteil war, dass auf den Bohrprotokollen bereits die Koordinaten eingetragen waren. Grundlage für die Koordinatenermittlung bzw. die Visualisierung der Lage im Raum ist im ALR die TK 25 (1:25.000). Die Lagegenauigkeit der angegebenen Koordinaten beträgt ±10 m. Teilweise waren jedoch die original eingemessenen Koordinaten auf den Bohrprotokollen vorhanden. Daher wurde 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, welches sich für das vorliegende Projekt als unverzichtbar herausstellte.

Die Daten im LANU sind folgendermaßen organisiert: Sämtliche Bohrprotokolle werden verfilmt und die Originale im Landesarchiv in Schleswig gelagert. Dies bedeutet, dass analoge Kopien nicht direkt vom Original vorgenommen werden können. 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. Sämtliche Bohrungen sind in diesen Karten vermerkt. 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 Haufenbildungen,
- Entfernungstoleranz <100 m,
- bei Deichtrassen keine Bohrungen durch den Deichkörper, wenn andere zur Verfügung standen.

Nach dieser Vorauswahl wurden die Bohrungen unter dem Sichtgerät auf ihre Aussagekraft hin bewertet (s. w. o.). Bei „Wolkenbildung" wurden die tiefsten Bohrungen ausgewählt. Anschließend wurden die Bohrungen auf Papier reproduziert und zur weiteren Bearbeitung ins eigene Büro überführt. Hier wurden die Daten überarbeitet und die fehlenden 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, wo möglich der DGK5. Vielfach konnten Koordinaten und Ansatzhöhen auch den dazugehörigen Gutachten, die ebenfalls kopiert wurden, entnommen werden. Parallel wurden fehlende stratigraphische Einstufungen ergänzt, die eindeutig zuzuordnen waren. Ebenso wurde die petrographische Zusammensetzung der obersten drei Meter bestimmt. Anschließend konnte mit der digitalen Aufnahme der Bohrungen begonnen werden.

Nachdem die digitale Erfassung im ersten Schritt abgeschlossen war, wurden die Daten geplottet und Isolinien analog erstellt (Abb. 5). Parallel wurden digitale Karten erstellt (s. w. u.). Anhand des jetzt vorliegenden Datenmateriales war es möglich, die restlichen fehlenden stratigraphischen Einstufungen vorzunehmen die vorher nicht eindeutig waren. Die holozäne Basis 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 bei der digitalen Erstellung der Karten berücksichtigt.

In GeoDin wurde die Herkunft der Daten (Lagegenauigkeit, Ansatzhöhe, Höhe des Reliefs, Endteufe etc.) codiert sowie weitere Codierungen in der aus GeoDin exportierten Excell-Tabelle 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. Näheres hierzu wird in Kapitel 4.2 erläutert.
Über das Kriggingverfahren wurde die holozäne Höhenlage der Sedimentbasis ermittelt sowie die Verteilung der Sedimentzusammensetzung der obersten drei Meter.

Eine Besonderheit im Hinblick auf die Digitalisierung und Georeferenzierung der Bohrdaten bildeten die von Dr. HOFFMANN durchgeführten 382 Bohruntersuchungen im Sylter Watt südlich des Marschbereiches. Die Gauß-Krüger-Koordinaten konnten hier nur aus einem

Lageplan abgelesen werden. Da das einzelne Ablesen und Dokumentieren von Koordinaten aus einer Karte ein sehr mühsamer und langwieriger Prozess ist, wurden die Lagepläne in ArcView digital erfasst und anschließend georeferenziert. Die einzelnen Bohrpunkte konnten



Abbildung 5: Handzeichnung der Tiefenlage der holozänen Basis.

so durch die Erstellung eines Punktthemas einzeln abdigitalisiert werden und die Koordinaten der einzelnen Punkte in der Attributtabelle des Punktthemas hinzugefügt werden. Diese Tabelle konnte nun als ASCII-Datensatz exportiert werden, um in Excel den anderen Bohrdaten hinzugefügt und mit den jeweiligen Angaben über Bohransatzhöhe, OK_Geest und Name ergänzt zu werden.
Am Ende der hier geschilderten Arbeiten lag somit eine alle vollständigen und vervollständigten Bohrdaten enthaltende Datenbank vor.

Im einzelnen wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Sichtung und Auswahl des umfangreichen Datenmateriales im Geologischen Landes-Archiv des LANU (Landesamt für Natur und Umwelt), von der Universität zu Kiel, im ALR (Amt für ländliche Räume), aus der Literatur und zusätzlicher Daten von Externen (z. B. Windkraftanlagen Betreiber, Strom- und Wasserversorger, Kreis- und Gemeindebehörden etc.).
- Erstellung von Bohrpunktkarten.
- Erweiterung eines vom LANU erstellten DGM (digitales Geländemodell) des nordfriesischen Wattenmeeres um die Bereiche oberhalb MTHW auf Basis DGK5 bzw. TK 25 und ATKIS-Daten.
- Edv-technische Aufbereitung der Bohrdaten im GeoDin-Format und Übergabe zu ARC-Info/VIEW und SURFER8.
- Edv-technische Verdichtung der Bohrdaten mittels krigging.
- Erstellung von Isolininenkarten in digitaler Form und Ermittlung der co-varianz bzw. der Fehlerabweichung.
- Vergleich mit analogen Karten und Bearbeitung der digitalen Basis bis eine ausreichende (Fehlerabweichung < 1 %) Übereinstimmung erzielt werden konnte.
- Ermittlung der Gesamtvolumina des postglazialen Akkumulationskörpers.
- Ermittlung der Volumina einzelner Einheiten sowie Erstellung von Raum-Zeit Diagrammen.
- Ermittlung der für die Anpassung des Wattenmeeres an einen sich verändernden Meeresspiegel nach Gleichgewichtskriterien (z. B. hypsometrische Kurven) benötigten Sedimentmengen und Kornzusammensetzungen.
- Vergleichen der unterschiedlichen Grundvoraussetzungen in Niedersachsen und Nordfriesland für die postglaziale Sedimentakkumulation; Vergleichen der Ergebnisse der Projekte „Bilanzierung der holozänen Sedimentakkumulation im Küstenraum zwischen Emsmündung und Unterweser“ vom NLfB-Hannover und „Materialinventur an der deutschen Nordseeküste“ der BSH; Ermittlung der Beziehungen zwischen Meeresspiegelschwankungen und Sedimenteintrag.

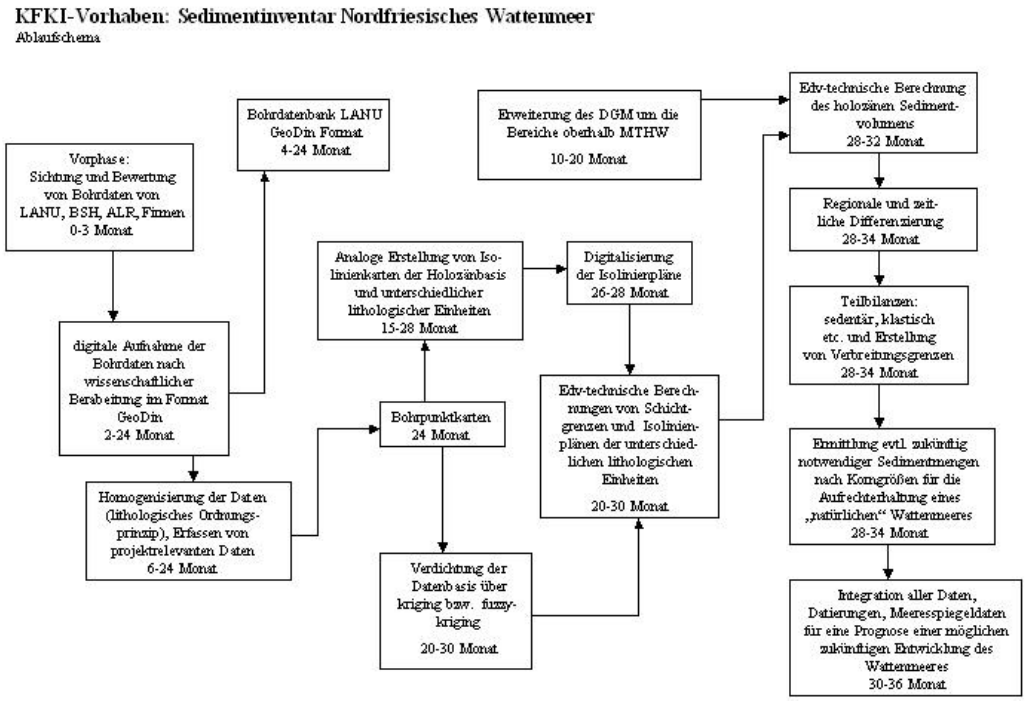


Abbildung 6: Flussdiagramm.

3.5 Bewertung der Daten

Bohruntersuchungen verlaufen, je nach angestrebter Bohrtiefe und bestimmter standortspezifischer Rahmenbedingunge z. B. Konsistenz des Untergrunds), gemäß unterschied-licher technischer Verfahren. Während bei sehr geringen Tiefen oftmals die Verwendung von Pürkauer-Bohrern ausreicht, kommen zur Erschließung größerer Tiefen maschinell ausgereiftere Verfahren zum Einsatz (Ramm-, Rotations- oder Druckbohrverfahren) oder aber auch geophysikalische Methoden. Je nach eingesetzter Technik ist die Qualität der Bohransprache unterschiedlich. Geophysikalische Untersuchungen wurden dann zur Hilfe gezogen, wenn keine anderen Informationen verfügbar waren oder zur Verdichtung von vorhandenen Informationen. Überwiegend wurden die Bohrungen jedoch als Rammbohrungen ausgeführt. Qualitätsmerkmale waren die Angabe der Lage im Gelände sowie deren Ermittlung, die Angabe des Höhenansatzpunktes sowie dessen Ermittlung, das Erreichen der holozänen Basis, 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.

4 AUSWERTUNG

Für die Auswertung standen als technische Hilfsmittel zur Verfügung:
A0-Scanner, A0-Plotter, A0 Kopierer, Windows XP-Pro-Rechner mit Doppelprozessor, gespiegelte Festplatte, Speichermedium am Geographischen Institut und am Rechenzentrum

der Universität Kiel für Sicherheitskopien sowie ein Reproduktionsgerät für die verfilmten Bohrungen des LANU's.

Als Software wurden u. a. verwendet:

ArcView GIS 3.2 a, ArcGis 8 und ArcInfo

Während mit dem Coverage in ARC/INFO ein echtes topologisches Datenformat vorliegt, werden Geometrie- und Sachinformationen in ArcView GIS in den sogenannten Shape-Files gespeichert. Bei diesen handelt es sich um ein nicht-topologisches Datenformat. Dennoch sind, aufgrund der speziellen Softwarearchitektur und des Moduls *Spatial Analyst*, die in der Definition vorausgesetzten Bearbeitungs-, Analyse- und Modellierungsmöglichkeiten gegeben. Shape-Files können prinzipiell in Punkt-, Linien- und Polygonform vorliegen und bestehen aus drei Komponenten:

.shp der Datei, in der die Geometrie des Objekts (bzw. der Objekte) gespeichert ist;
.shx der Datei, in der der Index der Objektgeometrie gespeichert ist;
.dbf der dBASE-Datei, in der die Attributinformationen der Objekte gespeichert sind.

Weiterhin können noch sach- und raumbezogene ArcView Indizes in speziellen Dateien gespeichert werden. Die Datenverwaltung erfolgt hier somit in Form einzelner Dateien zugeordneten Tabellen.

Die Shape-Dateien können direkt von SURFER übernommen werden, wo bei allerdings die dreidimensionale Information verloren geht. Ebenso können die Tabellen direkt weiter verarbeitet werden.

Microsoft Excel 2000

Um eine Anzahl von über 18000 Bohrdaten effektiv bearbeiten zu können, wurde mit Microsoft Excel auf ein spezialisiertes Tabellenkalkulationsprogramm zurückgegriffen. Die Funktionen im Hinblick auf Erfassung und vor allem Bearbeitung tabellarischer Daten, wie z. B. Sortieren und Filtern, erlaubten eine einfachere und schnellere Handhabung des Datenmateriales als dies mit der verwendeten GIS-Software möglich war. Excel bietet eine große Auswahl an Datenexport-Optionen, wodurch die hier vorbereiteten Daten für ArcView GIS verfügbar gemacht werden konnten. Ein Nachteil stellt jedoch die Begrenztheit auf 65.000 Zeilen da zumal einige Datensätze mehr als 2 Millionen Datenzeilen enthalten.

SURFER for Windows (Version 8)

SURFER ist ein auf räumliche Interpolationsverfahren spezialisiertes Programm, das wie ArcView ein eigenes GRID-Format benutzt. Zur Erstellung zwei- und dreidimensionaler Flächen aus unregelmäßig verteilten Punktdaten bestehen in diesem Programm unterschiedliche Möglichkeiten, so auch die Anwendung des Krigging-Verfahrens. Der Grund, warum

auf diese Software zurückgegriffen wurde, hängt mit der hochwertigen graphischen Ausgabe von 3D-Flächendarstellungen zusammen. In diesem Programm ist außerdem nachvollziehbar, welche Rechenoptionen durchgeführt werden, da nahezu alle benötigten Parameter individuell eingestellt werden können. Die direkte Übergabe der Variogrammergebnisse in das Krigging-verfahren ist ebenfalls sehr benutzerfreundlich.

GEODIN 3 BZW. 4

GeoDin (http://www.geodin-system.com/german/startseite.html) stellt die in geologischen Landesämtern oder Äquivalenten üblicher Weise verwandte Software zur Verwaltung von geologischen Daten dar. Unterschiede in der Anforderung an Nomenklatur, geologische Schlüssel oder geologische Besonderheiten der einzelnen Bundesländer sind bereits überwiegend in GeoDin berücksichtigt. Grundlage der Datenverwaltung stellen drei unterschiedliche Speicherformate dar. Einerseits handelt es sich um ein GeoDin internes Format, welches durch Standardsoftware nicht weiter verarbeitet werden kann. Neben diesem Datenformat stehen aber auch noch dbase und Access-Formate zur Verfügung, auf die im vorliegenden Falle zurückgegriffen wurde. Des weiteren gibt es Übergaberoutinen zu den ebenfalls eingesetzten Programmen SURFER8 und ArcGis. Entgegen der Prospekt-beschreibung von GeoDin gehen jedoch die dreidimensionalen Informationen bei der Übergabe verloren.

4.1 Digitale Erfassung

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

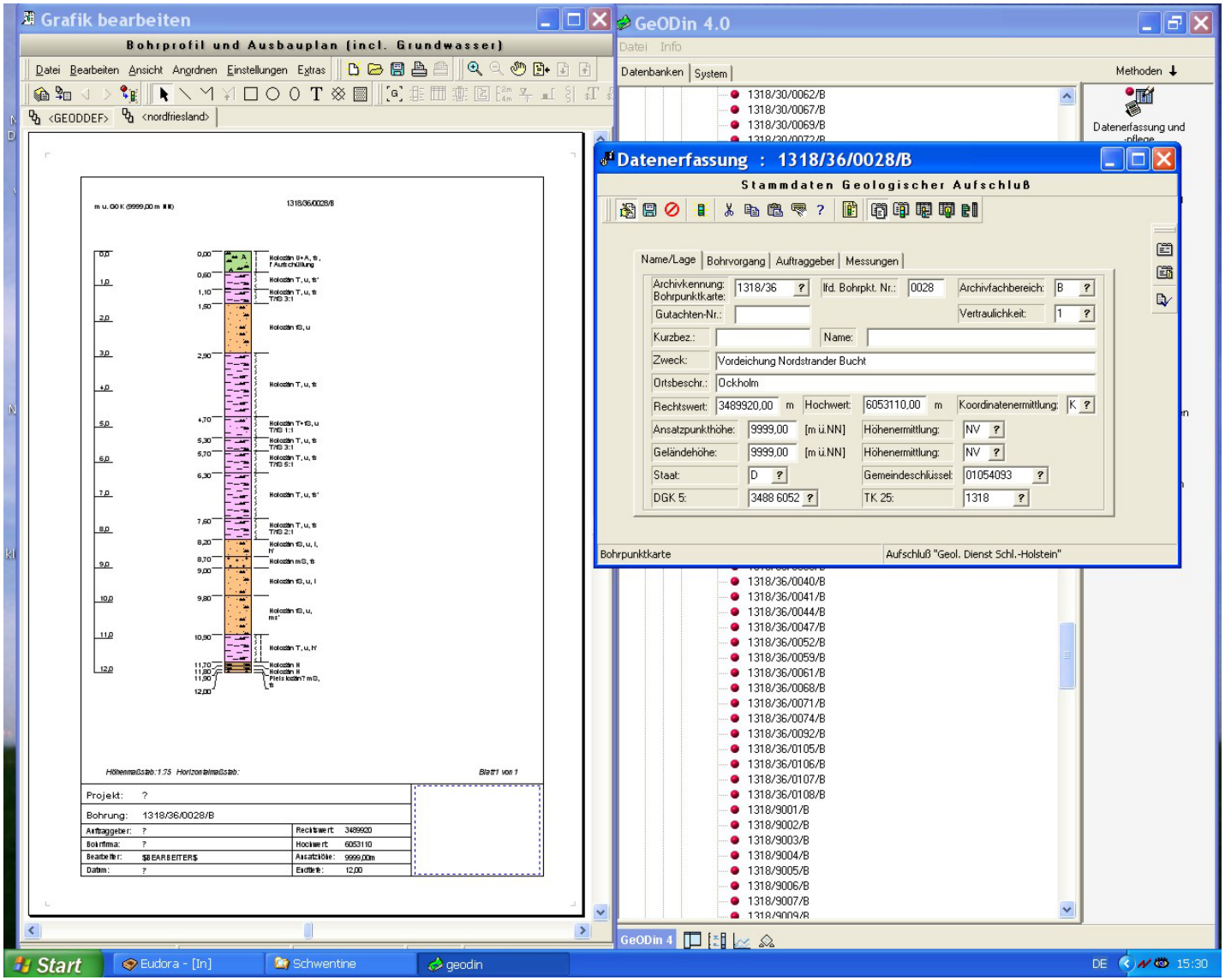


Abbildung 7: Stammdateneingabemaske GeoDin.

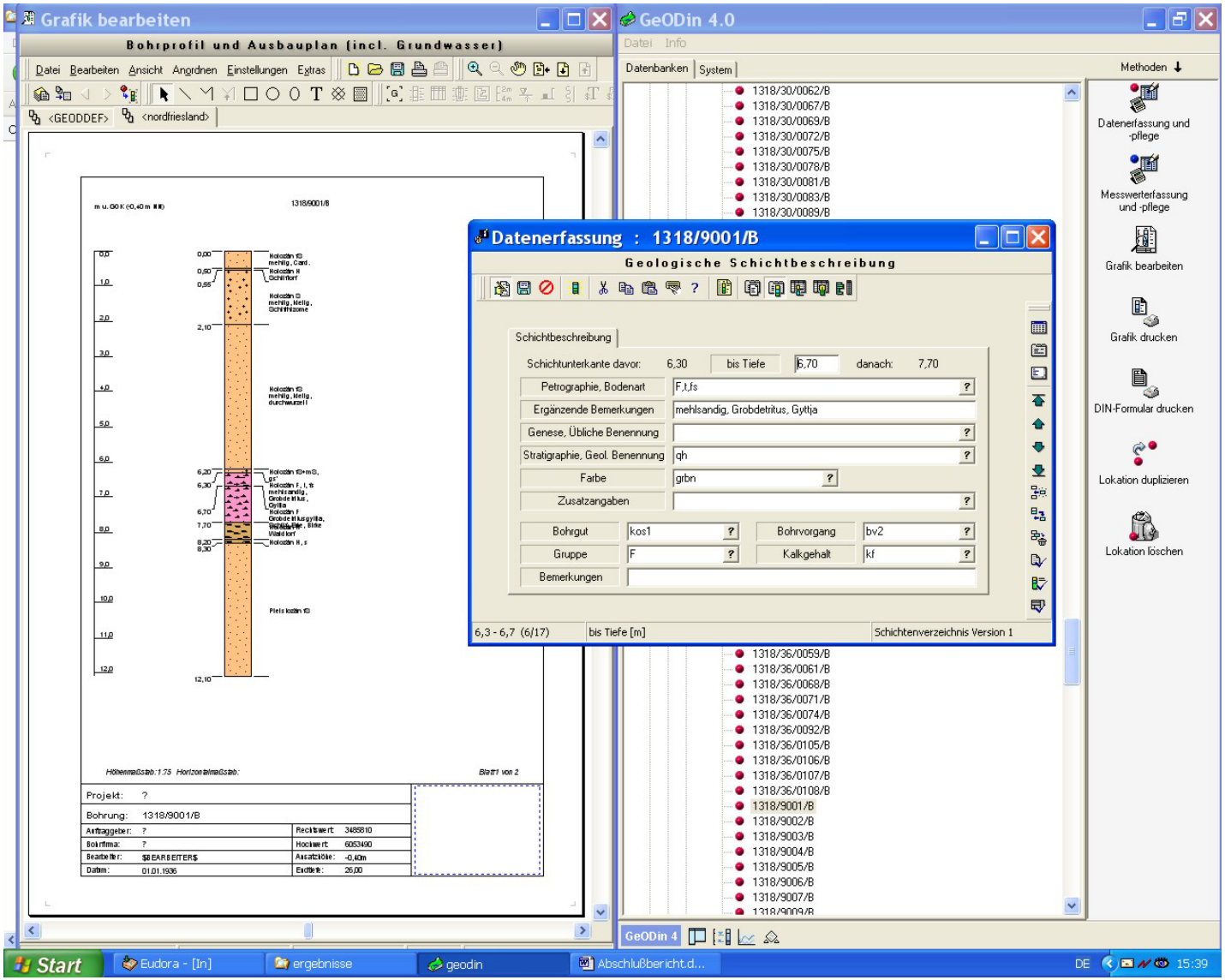
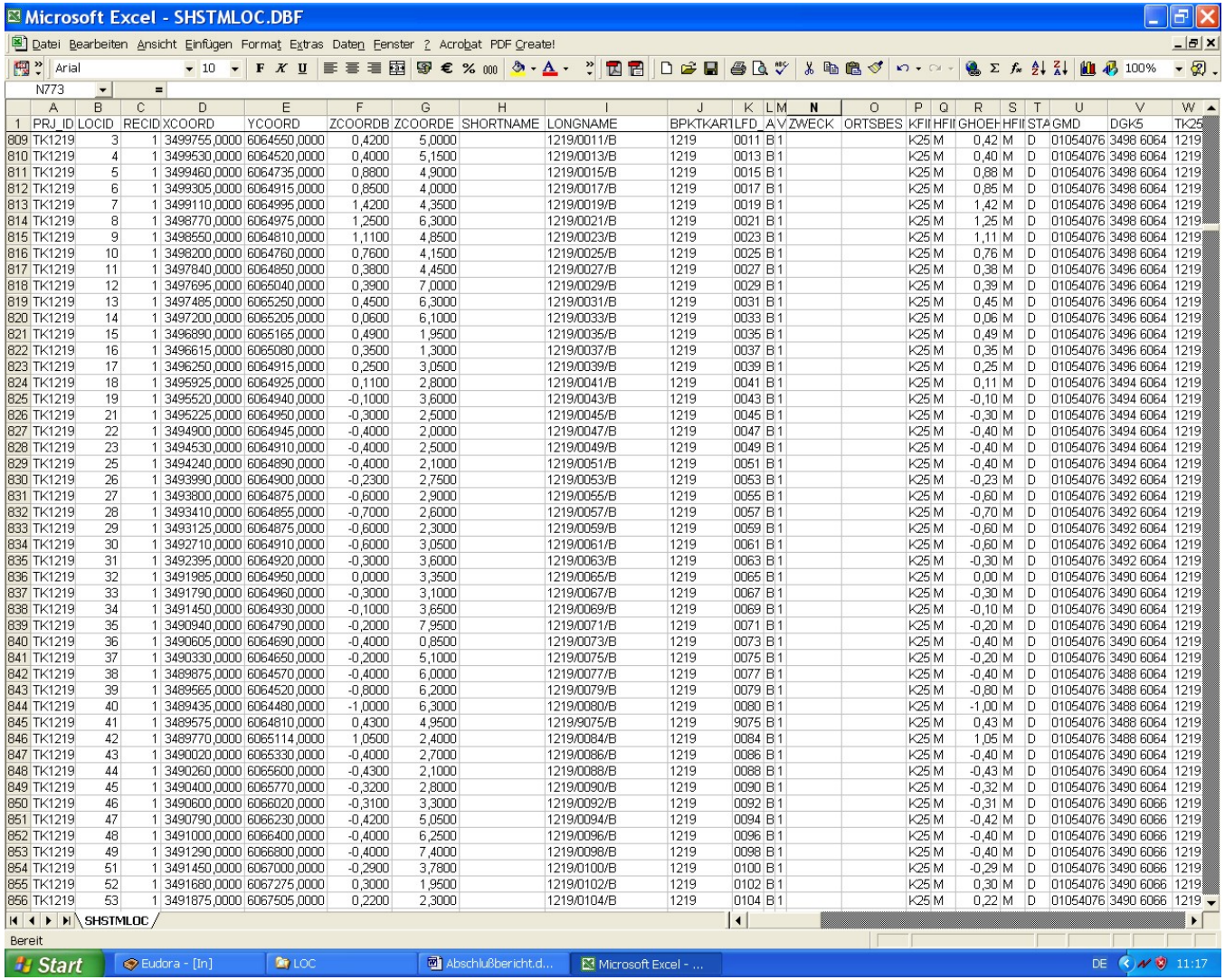
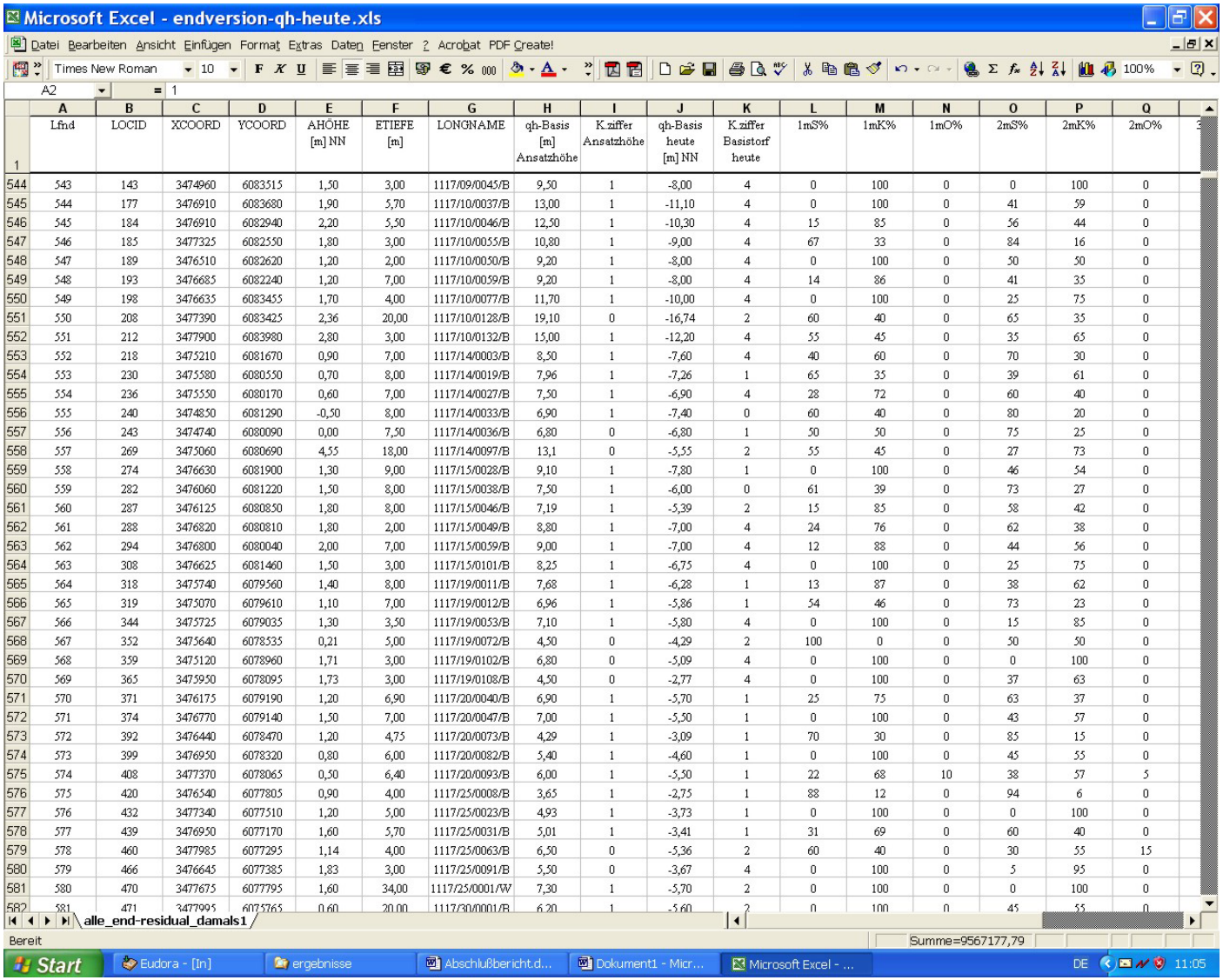


Abbildung 8: Schichtenbeschreibungseingabemaske GeoDin.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	PRJ_ID	LOCID	RECID	XCOORD	YCOORD	ZCOORDB	ZCOORDE	SHORTNAME	LONGNAME	BPKTKART	LFD_A	V		ZWECK	ORTSBES	KFII	HFII	GHOEH	HFII	STA	GMD	DGK5	TK25
809	TK1219	3	1	3499755,0000	6064550,0000	0,4200	5,0000		1219/0011/B	1219	0011	B	1			K25	M	0,42	M	D	01054076	3498 6064	1219
810	TK1219	4	1	3499530,0000	6064520,0000	0,4000	5,1500		1219/0013/B	1219	0013	B	1			K25	M	0,40	M	D	01054076	3498 6064	1219
811	TK1219	5	1	3499460,0000	6064735,0000	0,8800	4,9000		1219/0015/B	1219	0015	B	1			K25	M	0,88	M	D	01054076	3498 6064	1219
812	TK1219	6	1	3499305,0000	6064915,0000	0,8500	4,0000		1219/0017/B	1219	0017	B	1			K25	M	0,85	M	D	01054076	3498 6064	1219
813	TK1219	7	1	3499110,0000	6064995,0000	1,4200	4,3500		1219/0019/B	1219	0019	B	1			K25	M	1,42	M	D	01054076	3498 6064	1219
814	TK1219	8	1	3498770,0000	6064975,0000	1,2500	6,3000		1219/0021/B	1219	0021	B	1			K25	M	1,25	M	D	01054076	3498 6064	1219
815	TK1219	9	1	3498550,0000	6064810,0000	1,1100	4,8500		1219/0023/B	1219	0023	B	1			K25	M	1,11	M	D	01054076	3498 6064	1219
816	TK1219	10	1	3498200,0000	6064760,0000	0,7600	4,1500		1219/0025/B	1219	0025	B	1			K25	M	0,76	M	D	01054076	3498 6064	1219
817	TK1219	11	1	3497840,0000	6064850,0000	0,3800	4,4500		1219/0027/B	1219	0027	B	1			K25	M	0,38	M	D	01054076	3496 6064	1219
818	TK1219	12	1	3497695,0000	6065040,0000	0,3900	7,0000		1219/0029/B	1219	0029	B	1			K25	M	0,39	M	D	01054076	3496 6064	1219
819	TK1219	13	1	3497485,0000	6065250,0000	0,4500	6,3000		1219/0031/B	1219	0031	B	1			K25	M	0,45	M	D	01054076	3496 6064	1219
820	TK1219	14	1	3497200,0000	6065205,0000	0,0600	6,1000		1219/0033/B	1219	0033	B	1			K25	M	0,06	M	D	01054076	3496 6064	1219
821	TK1219	15	1	3496890,0000	6065165,0000	0,4900	1,9500		1219/0035/B	1219	0035	B	1			K25	M	0,49	M	D	01054076	3496 6064	1219
822	TK1219	16	1	3496615,0000	6065080,0000	0,3500	1,3000		1219/0037/B	1219	0037	B	1			K25	M	0,35	M	D	01054076	3496 6064	1219
823	TK1219	17	1	3496250,0000	6064915,0000	0,2500	3,0500		1219/0039/B	1219	0039	B	1			K25	M	0,25	M	D	01054076	3496 6064	1219
824	TK1219	18	1	3495925,0000	6064925,0000	0,1100	2,8000		1219/0041/B	1219	0041	B	1			K25	M	0,11	M	D	01054076	3494 6064	1219
825	TK1219	19	1	3495520,0000	6064940,0000	-0,1000	3,6000		1219/0043/B	1219	0043	B	1			K25	M	-0,10	M	D	01054076	3494 6064	1219
826	TK1219	21	1	3495225,0000	6064950,0000	-0,3000	2,5000		1219/0045/B	1219	0045	B	1			K25	M	-0,30	M	D	01054076	3494 6064	1219
827	TK1219	22	1	3494900,0000	6064945,0000	-0,4000	2,0000		1219/0047/B	1219	0047	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3494 6064	1219
828	TK1219	23	1	3494530,0000	6064910,0000	-0,4000	2,5000		1219/0049/B	1219	0049	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3494 6064	1219
829	TK1219	25	1	3494240,0000	6064890,0000	-0,4000	2,1000		1219/0051/B	1219	0051	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3494 6064	1219
830	TK1219	26	1	3493990,0000	6064900,0000	-0,2300	2,7500		1219/0053/B	1219	0053	B	1			K25	M	-0,23	M	D	01054076	3492 6064	1219
831	TK1219	27	1	3493800,0000	6064875,0000	-0,6000	2,9000		1219/0055/B	1219	0055	B	1			K25	M	-0,60	M	D	01054076	3492 6064	1219
832	TK1219	28	1	3493410,0000	6064855,0000	-0,7000	2,6000		1219/0057/B	1219	0057	B	1			K25	M	-0,70	M	D	01054076	3492 6064	1219
833	TK1219	29	1	3493125,0000	6064875,0000	-0,6000	2,3000		1219/0059/B	1219	0059	B	1			K25	M	-0,60	M	D	01054076	3492 6064	1219
834	TK1219	30	1	3492710,0000	6064910,0000	-0,6000	3,0500		1219/0061/B	1219	0061	B	1			K25	M	-0,60	M	D	01054076	3492 6064	1219
835	TK1219	31	1	3492395,0000	6064920,0000	-0,3000	3,6000		1219/0063/B	1219	0063	B	1			K25	M	-0,30	M	D	01054076	3492 6064	1219
836	TK1219	32	1	3491985,0000	6064950,0000	0,0000	3,3500		1219/0065/B	1219	0065	B	1			K25	M	0,00	M	D	01054076	3490 6064	1219
837	TK1219	33	1	3491790,0000	6064960,0000	-0,3000	3,1000		1219/0067/B	1219	0067	B	1			K25	M	-0,30	M	D	01054076	3490 6064	1219
838	TK1219	34	1	3491450,0000	6064930,0000	-0,1000	3,6500		1219/0069/B	1219	0069	B	1			K25	M	-0,10	M	D	01054076	3490 6064	1219
839	TK1219	35	1	3490940,0000	6064790,0000	-0,2000	7,9500		1219/0071/B	1219	0071	B	1			K25	M	-0,20	M	D	01054076	3490 6064	1219
840	TK1219	36	1	3490605,0000	6064690,0000	-0,4000	0,8500		1219/0073/B	1219	0073	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3490 6064	1219
841	TK1219	37	1	3490330,0000	6064650,0000	-0,2000	5,1000		1219/0075/B	1219	0075	B	1			K25	M	-0,20	M	D	01054076	3490 6064	1219
842	TK1219	38	1	3489875,0000	6064570,0000	-0,4000	6,0000		1219/0077/B	1219	0077	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3488 6064	1219
843	TK1219	39	1	3489565,0000	6064520,0000	-0,8000	6,2000		1219/0079/B	1219	0079	B	1			K25	M	-0,80	M	D	01054076	3488 6064	1219
844	TK1219	40	1	3489435,0000	6064480,0000	-1,0000	6,3000		1219/0080/B	1219	0080	B	1			K25	M	-1,00	M	D	01054076	3488 6064	1219
845	TK1219	41	1	3489575,0000	6064810,0000	0,4300	4,9500		1219/9075/B	1219	9075	B	1			K25	M	0,43	M	D	01054076	3488 6064	1219
846	TK1219	42	1	3489770,0000	6065114,0000	1,0500	2,4000		1219/0084/B	1219	0084	B	1			K25	M	1,05	M	D	01054076	3488 6064	1219
847	TK1219	43	1	3490020,0000	6065330,0000	-0,4000	2,7000		1219/0086/B	1219	0086	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3490 6064	1219
848	TK1219	44	1	3490260,0000	6065600,0000	-0,4300	2,1000		1219/0088/B	1219	0088	B	1			K25	M	-0,43	M	D	01054076	3490 6064	1219
849	TK1219	45	1	3490400,0000	6065770,0000	-0,3200	2,8000		1219/0090/B	1219	0090	B	1			K25	M	-0,32	M	D	01054076	3490 6064	1219
850	TK1219	46	1	3490600,0000	6066020,0000	-0,3100	3,3000		1219/0092/B	1219	0092	B	1			K25	M	-0,31	M	D	01054076	3490 6066	1219
851	TK1219	47	1	3490790,0000	6066230,0000	-0,4200	5,0500		1219/0094/B	1219	0094	B	1			K25	M	-0,42	M	D	01054076	3490 6066	1219
852	TK1219	48	1	3491000,0000	6066400,0000	-0,4000	6,2500		1219/0096/B	1219	0096	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3490 6066	1219
853	TK1219	49	1	3491290,0000	6066800,0000	-0,4000	7,4000		1219/0098/B	1219	0098	B	1			K25	M	-0,40	M	D	01054076	3490 6066	1219
854	TK1219	51	1	3491450,0000	6067000,0000	-0,2900	3,7800		1219/0100/B	1219	0100	B	1			K25	M	-0,29	M	D	01054076	3490 6066	1219
855	TK1219	52	1	3491680,0000	6067275,0000	0,3000	1,9500		1219/0102/B	1219	0102	B	1			K25	M	0,30	M	D	01054076	3490 6066	1219
856	TK1219	53	1	3491875,0000	6067505,0000	0,2200	2,3000		1219/0104/B	1219	0104	B	1			K25	M	0,22	M	D	01054076	3490 6066	1219

Abbildung 9: Auszug aus dem Stammdatenblatt von GeoDin.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Lfnd	LOCID	XCOORD	YCOORD	AHÖHE [m] NN	ETIEFE [m]	LONGNAME	qh-Basis [m] Ansatzhöhe	K.ziffer Ansatzhöhe	qh-Basis heute [m] NN	K.ziffer Basistorf heute	1mS%	1mK%	1mO%	2mS%	2mK%	2mO%
544	543	143	3474960	6083515	1,50	3,00	1117/09/0045/B	9,50	1	-8,00	4	0	100	0	0	100	0
545	544	177	3476910	6083680	1,90	5,70	1117/10/0037/B	13,00	1	-11,10	4	0	100	0	41	59	0
546	545	184	3476910	6082940	2,20	5,50	1117/10/0046/B	12,50	1	-10,30	4	15	85	0	56	44	0
547	546	185	3477325	6082550	1,80	3,00	1117/10/0055/B	10,80	1	-9,00	4	67	33	0	84	16	0
548	547	189	3476510	6082620	1,20	2,00	1117/10/0050/B	9,20	1	-8,00	4	0	100	0	50	50	0
549	548	193	3476685	6082240	1,20	7,00	1117/10/0059/B	9,20	1	-8,00	4	14	86	0	41	35	0
550	549	198	3476635	6083455	1,70	4,00	1117/10/0077/B	11,70	1	-10,00	4	0	100	0	25	75	0
551	550	208	3477390	6083425	2,36	20,00	1117/10/0128/B	19,10	0	-16,74	2	60	40	0	65	35	0
552	551	212	3477900	6083980	2,80	3,00	1117/10/0132/B	15,00	1	-12,20	4	55	45	0	35	65	0
553	552	218	3475210	6081670	0,90	7,00	1117/14/0003/B	8,50	1	-7,60	4	40	60	0	70	30	0
554	553	230	3475580	6080550	0,70	8,00	1117/14/0019/B	7,96	1	-7,26	1	65	35	0	39	61	0
555	554	236	3475550	6080170	0,60	7,00	1117/14/0027/B	7,50	1	-6,90	4	28	72	0	60	40	0
556	555	240	3474850	6081290	-0,50	8,00	1117/14/0033/B	6,90	1	-7,40	0	60	40	0	80	20	0
557	556	243	3474740	6080090	0,00	7,50	1117/14/0036/B	6,80	0	-6,80	1	50	50	0	75	25	0
558	557	269	3475060	6080690	4,55	18,00	1117/14/0097/B	13,1	0	-5,55	2	55	45	0	27	73	0
559	558	274	3476630	6081900	1,30	9,00	1117/15/0028/B	9,10	1	-7,80	1	0	100	0	46	54	0
560	559	282	3476060	6081220	1,50	8,00	1117/15/0038/B	7,50	1	-6,00	0	61	39	0	73	27	0
561	560	287	3476125	6080850	1,80	8,00	1117/15/0046/B	7,19	1	-5,39	2	15	85	0	58	42	0
562	561	288	3476820	6080810	1,80	2,00	1117/15/0049/B	8,80	1	-7,00	4	24	76	0	62	38	0
563	562	294	3476800	6080040	2,00	7,00	1117/15/0059/B	9,00	1	-7,00	4	12	88	0	44	56	0
564	563	308	3476625	6081460	1,50	3,00	1117/15/0101/B	8,25	1	-6,75	4	0	100	0	25	75	0
565	564	318	3475740	6079560	1,40	8,00	1117/19/0011/B	7,68	1	-6,28	1	13	87	0	38	62	0
566	565	319	3475070	6079610	1,10	7,00	1117/19/0012/B	6,96	1	-5,86	1	54	46	0	73	23	0
567	566	344	3475725	6079035	1,30	3,50	1117/19/0053/B	7,10	1	-5,80	4	0	100	0	15	85	0
568	567	352	3475640	6078535	0,21	5,00	1117/19/0072/B	4,50	0	-4,29	2	100	0	0	50	50	0
569	568	359	3475120	6078960	1,71	3,00	1117/19/0102/B	6,80	0	-5,09	4	0	100	0	0	100	0
570	569	365	3475950	6078095	1,73	3,00	1117/19/0108/B	4,50	0	-2,77	4	0	100	0	37	63	0
571	570	371	3476175	6079190	1,20	6,90	1117/20/0040/B	6,90	1	-5,70	1	25	75	0	63	37	0
572	571	374	3476770	6079140	1,50	7,00	1117/20/0047/B	7,00	1	-5,50	1	0	100	0	43	57	0
573	572	392	3476440	6078470	1,20	4,75	1117/20/0073/B	4,29	1	-3,09	1	70	30	0	85	15	0
574	573	399	3476950	6078320	0,80	6,00	1117/20/0082/B	5,40	1	-4,60	1	0	100	0	45	55	0
575	574	408	3477370	6078065	0,50	6,40	1117/20/0093/B	6,00	1	-5,50	1	22	68	10	38	57	5
576	575	420	3476540	6077805	0,90	4,00	1117/25/0008/B	3,65	1	-2,75	1	88	12	0	94	6	0
577	576	432	3477340	6077510	1,20	5,00	1117/25/0023/B	4,93	1	-3,73	1	0	100	0	0	100	0
578	577	439	3476950	6077170	1,60	5,70	1117/25/0031/B	5,01	1	-3,41	1	31	69	0	60	40	0
579	578	460	3477985	6077295	1,14	4,00	1117/25/0063/B	6,50	0	-5,36	2	60	40	0	30	55	15
580	579	466	3476645	6077385	1,83	3,00	1117/25/0091/B	5,50	0	-3,67	4	0	100	0	5	95	0
581	580	470	3477675	6077795	1,60	34,00	1117/25/0001/W	7,30	1	-5,70	2	0	100	0	0	100	0
582	581	471	3477995	6075765	0,60	20,00	1117/30/0001/B	6,20	1	-5,60	2	0	100	0	45	55	0

Abbildung 10: Auszug aus der aus der GeoDin Datenbank erzeugten Tabelle.

4.2 Edv-technische Auswertung

Ein Problem stellt die Entwicklung einer kontinuierlichen Flächendarstellung der holozänen Basis aus unregelmäßig verteilt und punktuell vorliegenden Bohrdaten dar. Um eine solche Fläche zu erstellen, existieren, auch in modernen Edv-Programmen, unterschiedliche Interpolationsmethoden mit deren Hilfe auf einem mehr oder weniger dichten Gitternetz Zwischenwerte berechnet werden können.

So gibt es beispielsweise das weit verbreitete *Triangulationsverfahren*, das aus den unregelmäßig verteilten Werten ein Dreiecksnetzwerk konstruiert, wobei die interpolierten Werte sich auf der Oberfläche dieser Dreiecke befinden. Bei einem weiteren Verfahren wird davon ausgegangen, dass jeder Eingabepunkt einen örtlichen Einfluss hat, der mit zunehmender Distanz abnimmt. Die Punkte, die sich näher an der Verarbeitungszelle befinden, werden so bei dieser Methode mehr gewichtet, als die, die weiter entfernt liegen (*IDW-Interpolationsmethode*).

Zur Erstellung der holozänen Basisfläche wurde mit dem *Kriging* eine sehr moderne Methode angewendet. Die Besonderheit des Krigging-Verfahrens gegenüber anderen Methoden besteht in einer der eigentlichen Interpolation vorweggenommenen räumlichen Analyse der Probenwerte. Diese *Variogrammanalyse* wird im folgenden genau wie das konventionelle Krigging-Verfahren kurz beschrieben. Diese Ausführungen vermögen allerdings nicht den gesamten theoretischen Unterbau dieser Verfahren zu erklären, dazu sei an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen.

Variogrammanalyse und Krigging sind geostatistische Verfahren, die auf der „Theorie der ortsabhängigen (oder regionalisierten) Variablen“ nach MATHERON (1971) aufbauen. Das Variogramm stellt in der angewandten Geostatistik das wichtigste Werkzeug dar, um die räumlichen Verteilungseigenschaften einer beliebigen Punktewolke rechnerisch zu quantifizieren und verdeutlicht so die räumliche Variabilität.

Zur Erstellung eines *(Semi-)Variogramms* werden innerhalb des betrachteten Raumes die halben, mittleren quadrierten Differenzen, oder *Semivarianzen*, der Messwerte von Punktepaaren mit gleichen Abständen h = 1d, 2d, ... berechnet und zur jeweiligen Entfernung in einem Koordinatensystem aufgetragen (AKIN 1983, S. 31). Das aus der Probenverteilung abgeleitete *experimentelle* Variogramm lässt sich somit gemäß folgender Formel berechnen:

$$(1)\quad \gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{1}^{n} \left[Z(x_i) - Z(x_{i+h}) \right]^2 \qquad \text{Akin (1983, S. 51)}$$

$\gamma(h)$ = Variogrammwerte für die unterschiedlichen jeweils gleichbleibenden Abstände (h-Werte)

$Z(x_i)$ = Wert der ortsabhängigen Variablen an einem Punkt

$Z(x_{i+h})$ = der von $Z(x_i)$ um den jeweiligen h-Wert entfernte Variablenwert

$N(h)$ = Anzahl der Wertepaare.

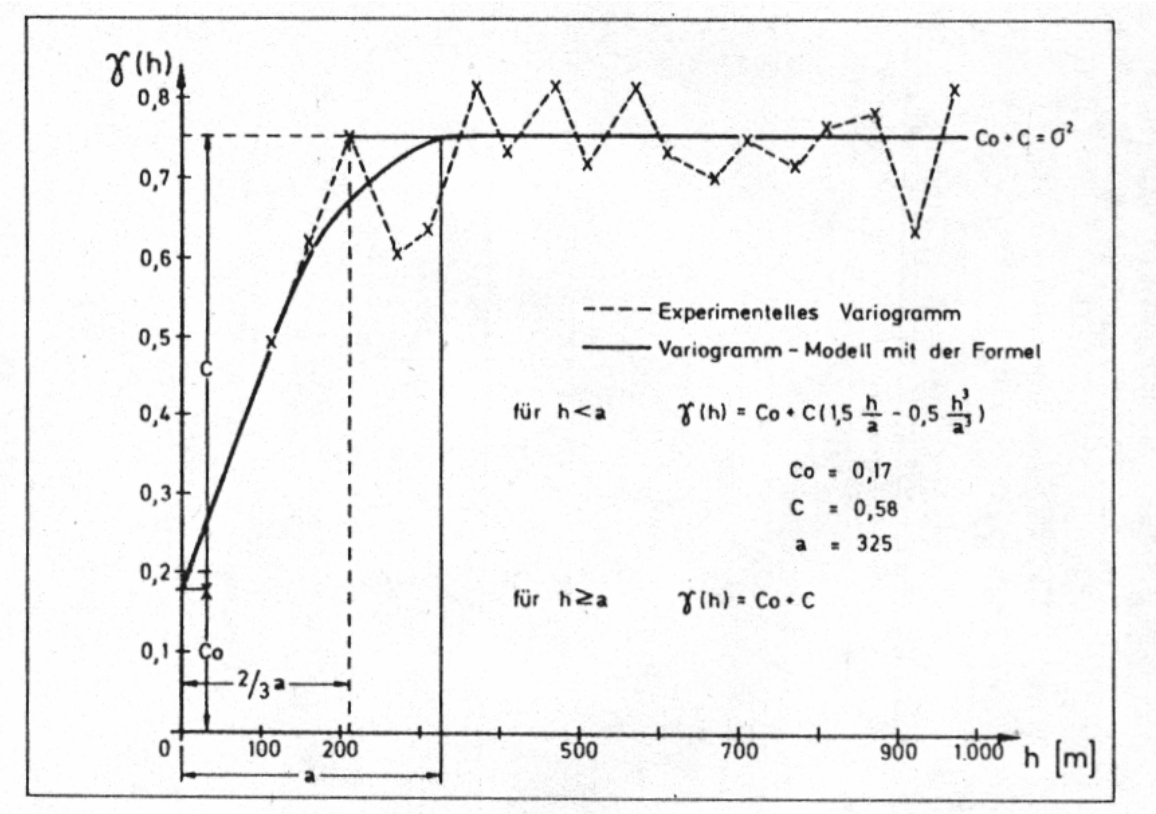


Abbildung 11: Beispiel eines Semivariogramms (Quelle: AKIN 1983, S. 55).

Ein mögliches experimentelles Semivariogramm zeigt sich in der Abbildung 11. In diesem vorliegenden Fall steigen die Werte der Semivarianzen vorerst stark an bevor, ab einer bestimmten Entfernung der Punkte zueinander, ein sogenannter *Schwellenwert c* (engl. *sill*) erreicht wird. Ab diesem Wert sind die untereinander verglichenen Proben soweit inhaltlich voneinander entfernt, dass sie in keiner räumlichen Beziehung mehr zueinander stehen und der Wert der Semivarianz den Betrag der statistischen Varianz annimmt.

Die dazugehörige Entfernung wird als *Reichweite*, *range* oder *length a* bezeichnet. Aufgrund der Tatsache, dass beim Abstand Null die einzelnen Werte jeweils nur mit sich selbst verglichen werden, muss man davon ausgehen, dass die Kurve durch den Ursprung geht. In der Praxis ist dies allerdings aufgrund von großer Variabilität auf kleinstem Raum oftmals nicht gegeben, so dass ein sogenannter *Nugget-Effekt*[1] c_o auftritt.

Zur Erstellung und Anwendung von Variogrammen sind spezielle Voraussetzungen notwendig, die von *der Hypothese der Stationarität* bzw. der *intrinsischen Hypothese* gebildet werden. So kann der an einem Ort gemessene Wert als die Realisierung einer bestimmten Zufallsfunktion angesehen werden. Die Hypothese der Stationarität unterstellt dieser Funktion, dass der zu erwartende Wert der betrachteten Variablen überall gleich, also

[1] Der Begriff Nugget-Effekt zeigt, dass analytische Verfahren aus der Lagerstättenprospektion stammt. In diesem Sinne verdeutlicht der Nugget-Effekt das Nebeneinanderliegen von taubem Erzgestein und hochhaltigen Goldnuggets.

ortsunabhängig, ist. Die intrinsische Hypothese bezieht sich auf die Differenzen der um den Abstand h entfernten Erwartungswerte und setzt voraus, das diese null sind und so die Varianz dieser Differenzen ausschließlich durch das Variogramm definiert ist (AKIN 1983, S. 58).

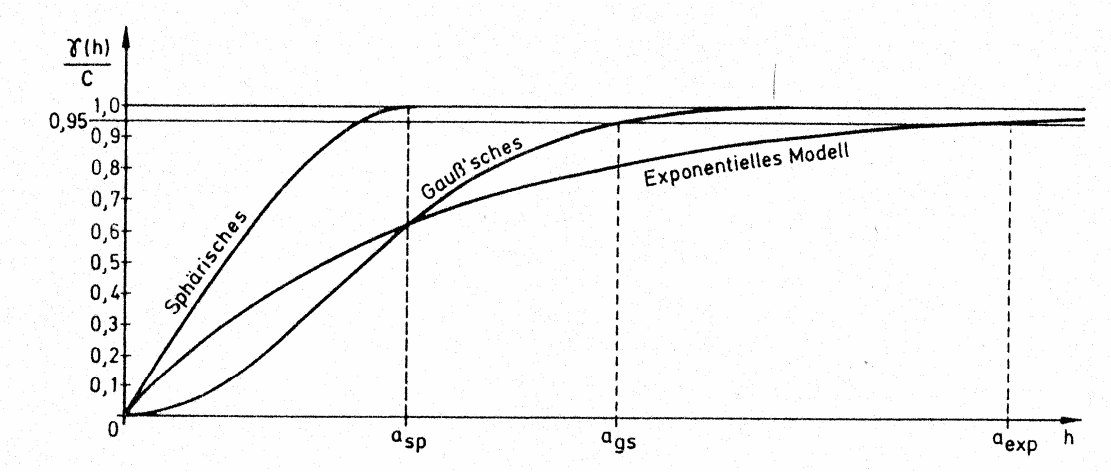


Abbildung 12: Sphärisches, Gauß´sches und exponentielles Variogramm-Modell (AKIN und SIEMENS 1988, S. 45).

Den experimentellen Variogrammen werden nun, zur Ermittlung der für das nachfolgend beschriebene Krigging-Verfahren nötigen Informationen, bestimmte Variogramm-Modelle (und auch Modellkombinationen) angepasst. Je nach Verlauf dieser Variogramme unterscheidet man *sphärische, exponentielle und Gauß´sche Modelle* (s. Abbildung 12). Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass sie sich, entsprechend der experimentellen Variogrammkurve, dem Schwellenwert asymptotisch annähern. Das sogenannte *lineare Modell* berücksichtigt diese Annäherung nicht und repräsentiert lediglich eine Gerade mit einer bestimmten Steigung α.

Das Krigging-Verfahren stellt das eigentliche Interpolationsverfahren dar, mit dem z. B. zusammenhängende Grenz- oder Schichtflächen generiert werden können. Hier wird in einem vorgegebenen Blockraster unter der Bedingung der Minimierung der Schätzvarianz für jeden Block eine optimale Abschätzung vorgenommen.
Ein weiteres wichtiges Nebenprodukt dieser Methode bildet die gleichzeitig durchführbare Fehlerermittlung, die sich in Form von *Krigging-Varianzen* der jeweiligen Blockwerte quantifizieren lässt.

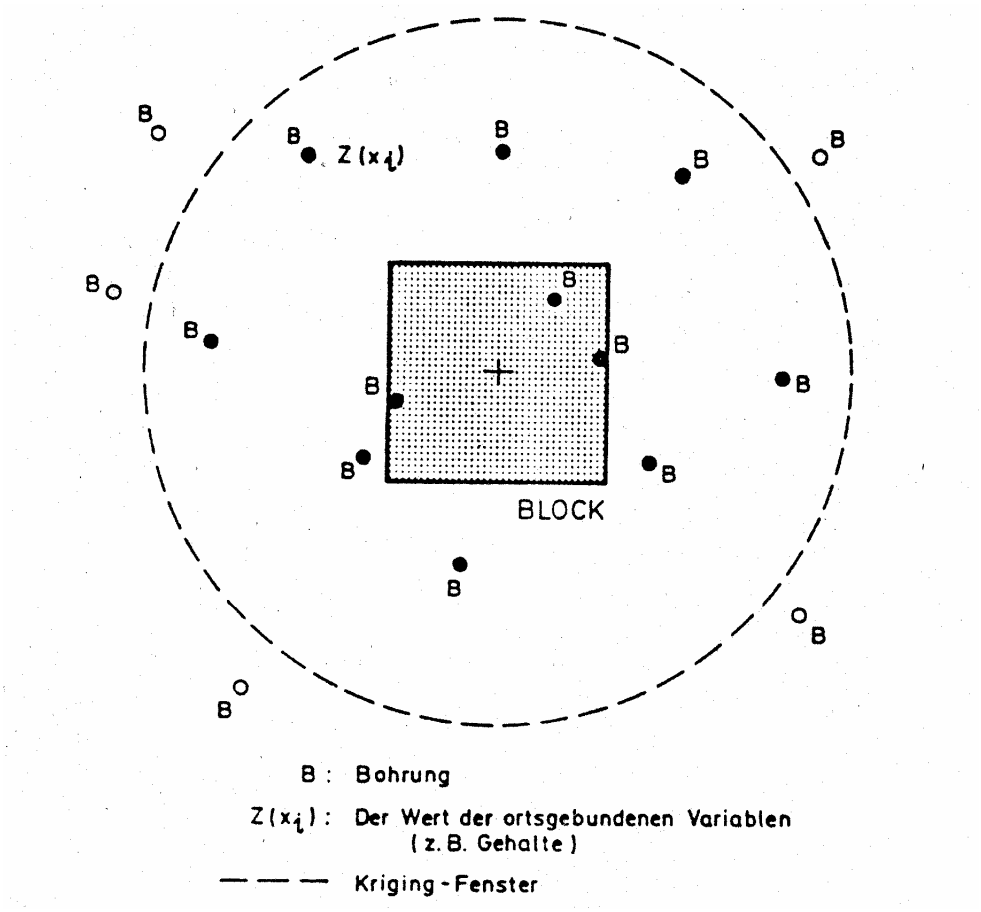


Abbildung 13: Abschätzung eines Blockwerts mit Hilfe des Krigging-Verfahrens (Quelle: AKIN 1983 S. 72).

Wie in Abbildung 13 zu sehen, werden den einem Block umliegenden Probenwerten bestimmte Wichtungsfaktoren λ_i, in Abhängigkeit von deren Entfernung, zugeordnet. Es werden hierbei nur diejenigen Punkte berücksichtigt, die innerhalb des Krigging-Fensters liegen. Das Ausmaß dieses Fensters ist identisch mit der im letzten Punkt erläuterten *Reichweite a*. Würde eine geringere Entfernung gewählt, das Krgiging-Fenster also einen kleineren Radius haben, würde dies einer pessimistischeren Einschätzung des Kenntnisstandes über die zu betrachtende Punktverteilung gleichkommen. Bei einer größeren Entfernung als *a* ist der Abstand der Proben untereinander so groß geworden, daß diese in keiner räumlichen Beziehung mehr zueinander stehen (AKIN und SIEMENS 1988, S. 54).

Durch Minimierung der Schätzvarianz (3) und unter Zugrundelegen der Tatsache, daß die Summe der Wichtungsfaktoren gleich eins ist (4), lassen sich für letztere mit Hilfe der Lagrange Technik die entsprechenden Werte ermitteln:

(3) $$\sigma_e^2 = \sigma_v^2 - 2\sum_1^n \lambda_i \sigma_{vx_i} + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \sigma_{x_i x_j}$$

(4) $$\sum_1^n \lambda_i = 1$$

aus AKIN und SIEMENS (1988, S. 73).

Hierbei stellen

σ_v^2 = die Blockvarianz bzw. die Varianz der Blockgehalte,

σ_{vx_i} = die Kovarianz zwischen dem Blockwert und den einzelnen Probenwerten,

$\sigma_{x_i x_j}$ = die Kovarianzen zwischen den einzelnen Probenwerten dar.

Unter Hinzunahme des *Lagrange-Faktors* μ, der zusammen mit den Wichtungsfaktoren bestimmt werden kann, können zusätzlich die Kriging-Varianzen mit folgender Formel berechnet werden:

$$\sigma_k^2 = \sigma_v^2 - \sum_i \lambda_i \sigma_{vx_i} - \mu$$ aus AKIN und SIEMENS (1988, S. 73).

Diese Krigging-Varianz beschreibt sozusagen die Zuverlässigkeit der ermittelten Werte. In diesem Sinne können Bereiche größerer Ungenauigkeit erkannt und zusätzliche Untersuchungs- und Prospektionsarbeiten eingeleitet werden.

4.3 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 x 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 x 50 m Raster generiert (Abb. 14 und 15), welches somit gröber ist, als die Ursprungsdaten. Verständlicher Weise weißt das Variogramm (Abb. 16) daher eine optimale Form auf.

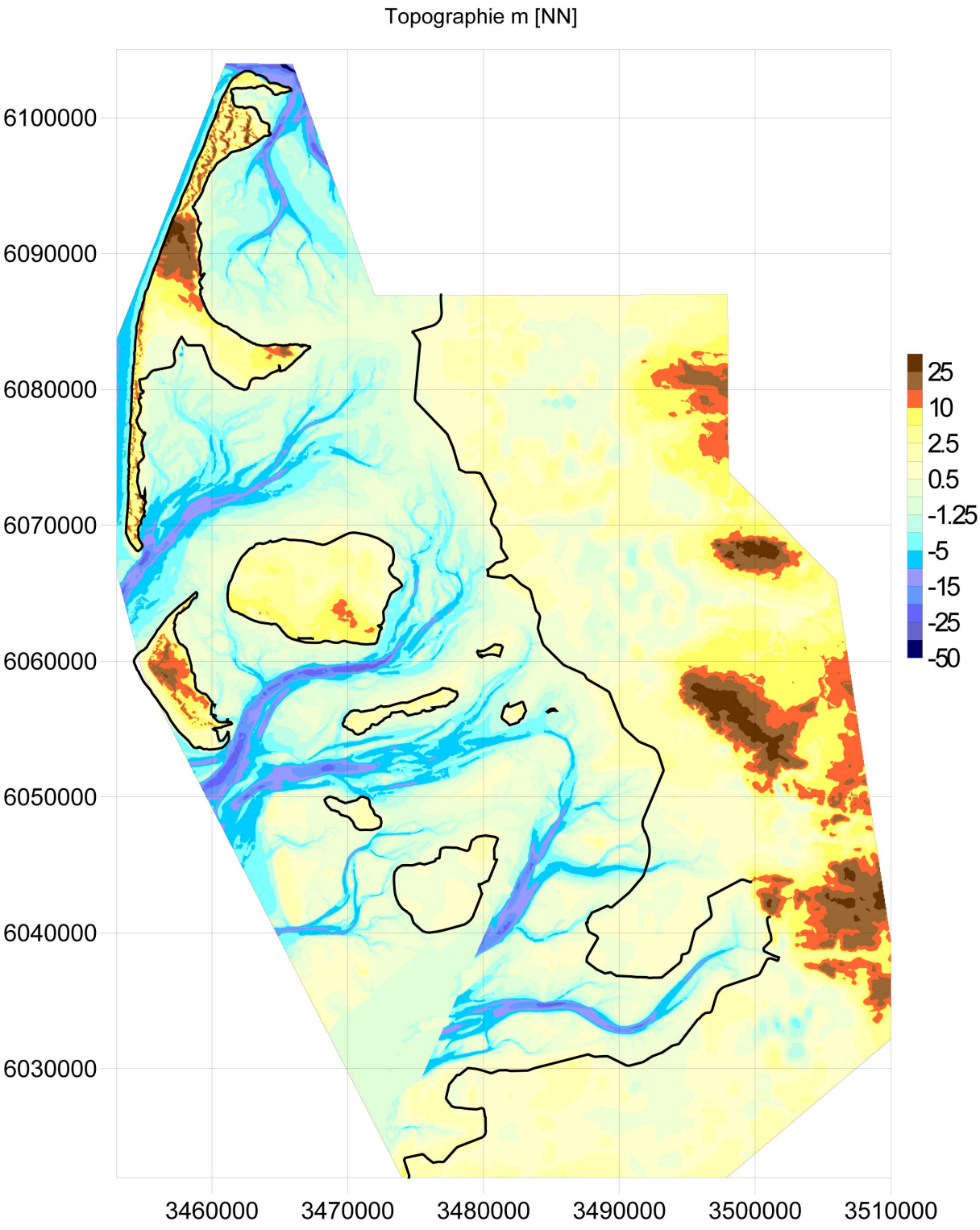


Abbildung 14: DGM des Untersuchungsgebietes.

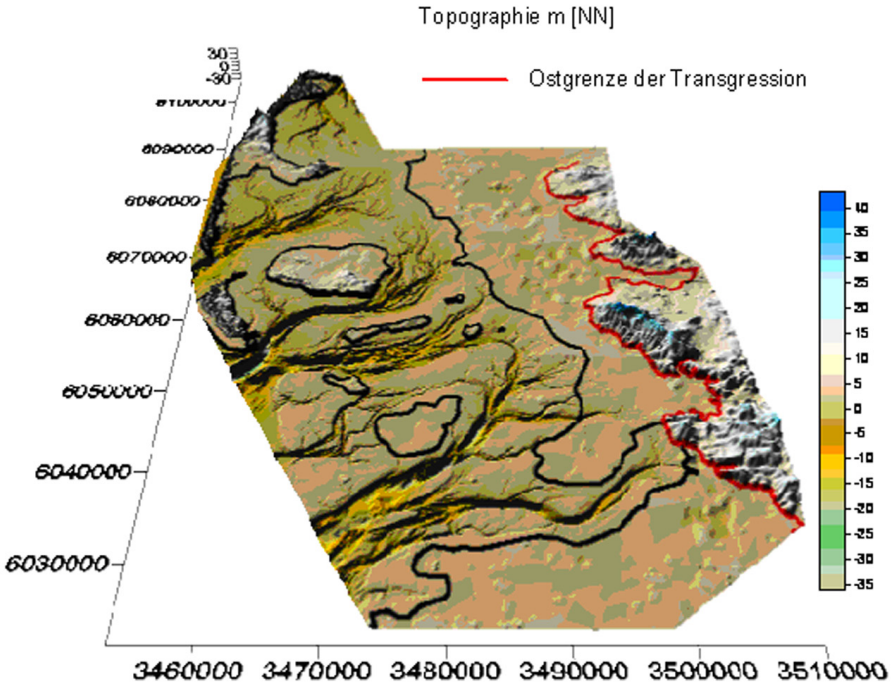


Abbildung 15: 3D-Darstellung des Untersuchungsgebietes.

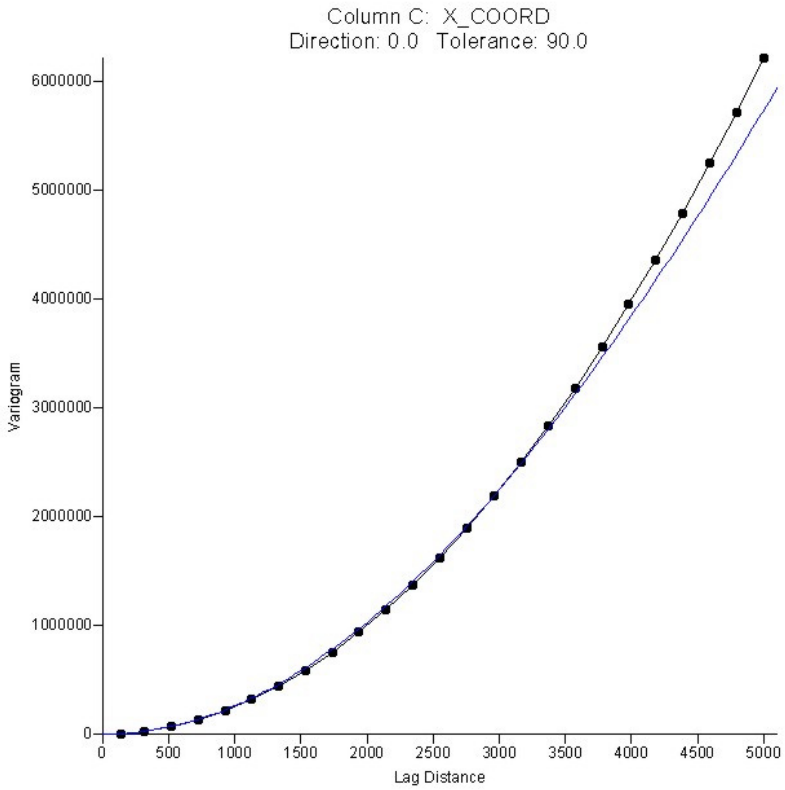


Abbildung 16: Variogramm der Datenbasis für die Erstellung des DGM.

4.4 Ermittlung der holozänen Basis

Die Datenbasis für die Ermittlung der holozänen Basis ist auf dem Festland und den Inseln am dichtesten. Wasserbohrungen und Bohrungen für Küstenschutzmaßnahmen stellen den größten Teil dar. In den Wattbereichen liegen Bohrungen vor, die aus wissenschaftlichen Gründen, für Sandentnahmeerkundungen oder für Versorgungsleitungen durchgeführt wurden. Größere Datenlücken liegen nördlich des Hindenburgdammes sowie im Bereich Sylt-Ost, Föhrer Schulter und Friedrich-Wilhelm-Lübcke Koog vor (Abb. 17). Aufgrund der unterschiedlichen Begründungen der Bohrungen erreichen nicht alle die holozäne Basis (Abb. 18). Für Bohrungen, die eindeutig die holozäne Basis 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 geologischen 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 Tiefenlage wurde als Punktcover geplottet und anschließend die Tiefenlinien per Hand eingezeichnet (Abb. 5). 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 holozänen Basis deutlich. In diversen Iterationsschritten wurden Stützstellen (Abb. 17) gesetzt, bis die digital ermittelte holozäne Basis mit der analog ermittelten übereinstimmte. Das zugehörige Variogramm ist in Abbildung 19 dargestellt.

Diese Daten stellen die Basis für die Ermittlung der Qualität der errechneten holozänen Basis dar. Für jeden dieser Werte wurde die Abweichung des rechentechnisch ermittelten Wertes bestimmt, die sogenannten „Residuals“ (Abb. 20). Hierbei ergab sich eine maximale Abweichung von 3,2 Metern allerdings bei einer mittleren Abweichung von nur ±0,2 m (s. Anhang). Die Abweichung von 3,2 m des errechneten Wertes vom vorgegeben liegt ganz am Rande des Untersuchungsgebietes im Listland.

4.5 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 1000 Jahre andauernden Veränderung es 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.

- Basistorf; diese Ablagerung ist durch Stauwasser in Küstennähe oder aber in Senken ebenso durch Stauwasser entstanden, bevor die Nordsee dieses Bereiche mit marinen Sedimenten überdeckte. Werden Torfe von marinen Sedimenten unterlagert, handelt es sich um Basaltorfe oder schwimmende Torfe die zu Zeiten relativen Meeresspiegelstillstandes oder Regressionen entstanden.

- 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 holozäne Basis nicht erreichten oder aber keinen der angesprochenen Horizonte aufweisen, wurden anhand benachbarter Bohrungen entsprechend in ihrem Höhenniveau einem plausiblem „Basis-Relief" angeglichen (Abb. 21). Das weitere Vorgehen entspricht dem der Ermittlung der heutigen holozänen Basis. Aufgrund dieser Datenbasis wurde das Variogramm erzeugt (Abb. 22) und die pleistozäne Ausgangsbasis ermittelt. Anschließend wurden wiederum die Residuals errechnet (Abb. 23). Die Standartabweichung beträgt wiederum ca. 0,2 m mit den gleichen Extremabweichungen von 3,2 m in den gleichen Bohrungen wie bei der Ermittlung der heutigen holozänen Basis (s. Anhang).

4.6 Ermittlung der Sedimentzusammensetzung der obersten drei Meter

Für Sedimentumlagerungen im Wattenmeer wurde angenommen, dass in naher Zukunft maximal die obersten drei Meter 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 der 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 Klei/Ton (<63 µm) 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 Prozente angegeben werden. Der zweite und dritte Meter des Bohrprofils 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 (Abb. 24–29) und anschließend über das Krigging-Verfahren die sedimentologische Zusammensetzung ermittelt.

Die Standardabweichungen der Residuals liegen zwischen 3,2 % und 3,6 % (s. Anhang).

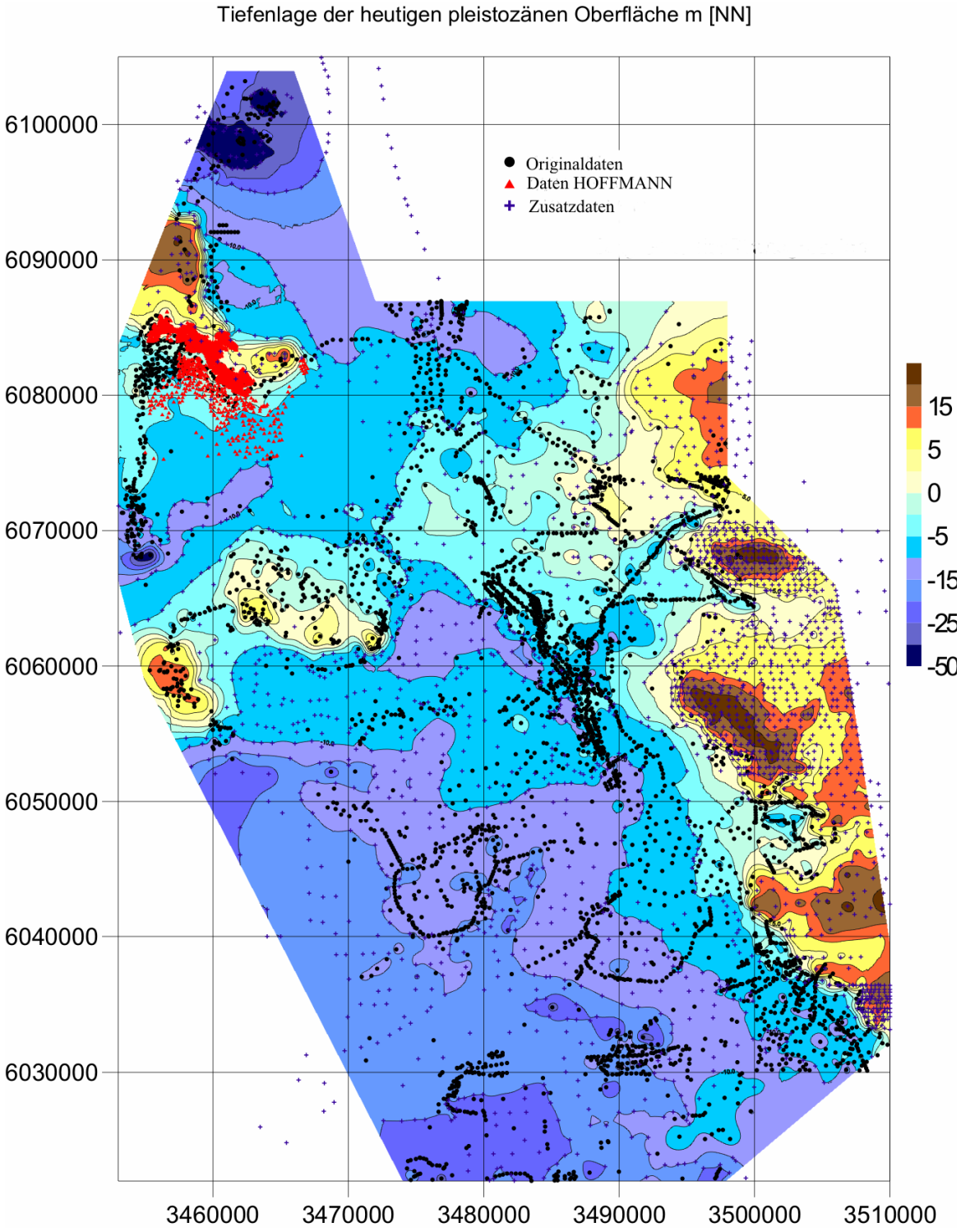


Abb. 17: Verteilung der Bohrungen.

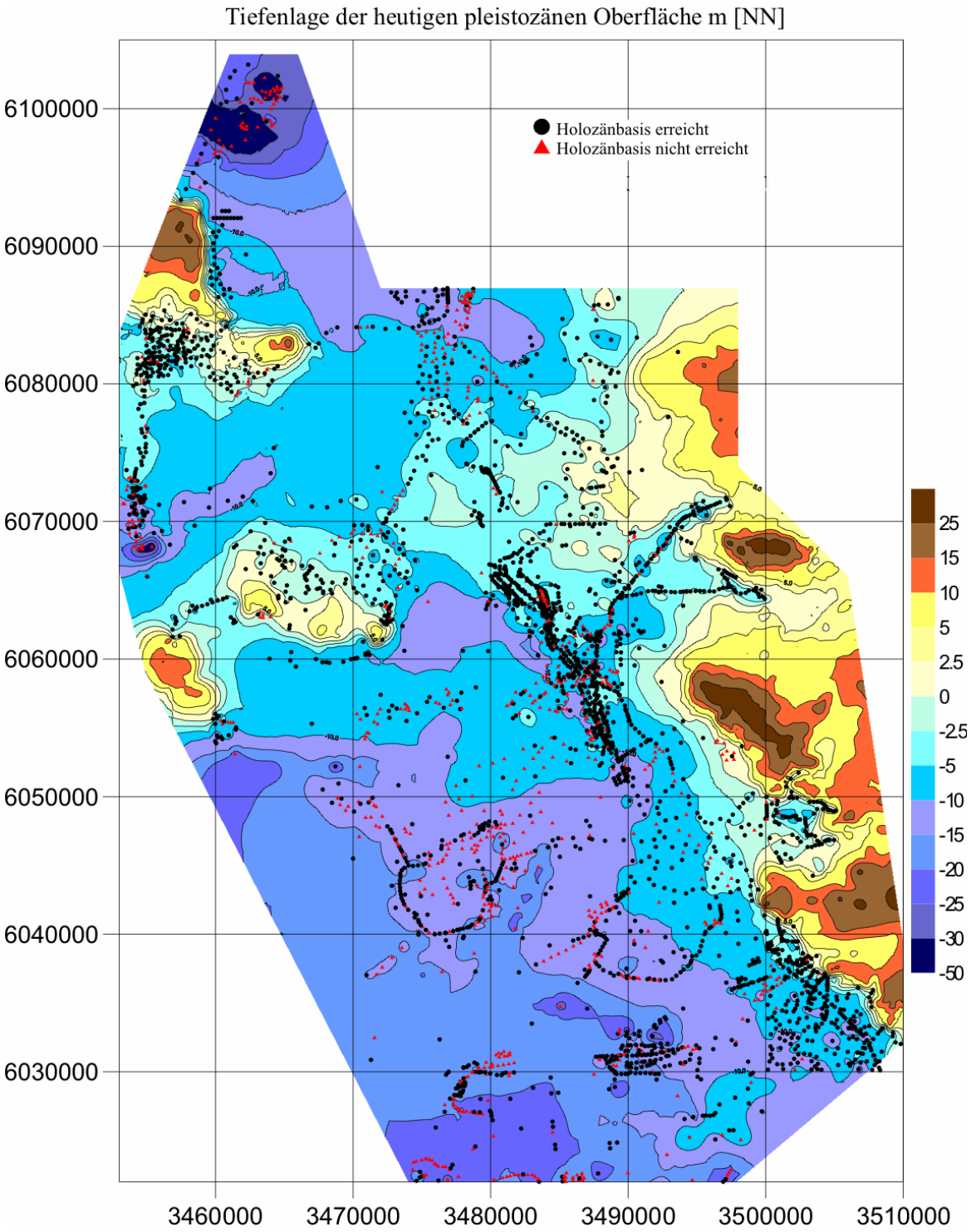


Abbildung. 18: Übersicht über die Bohrungen, die die holozäne Basis erreicht haben (ohne Daten HOFFMANN welche nahezu alle die holozäne Basis erreicht haben).

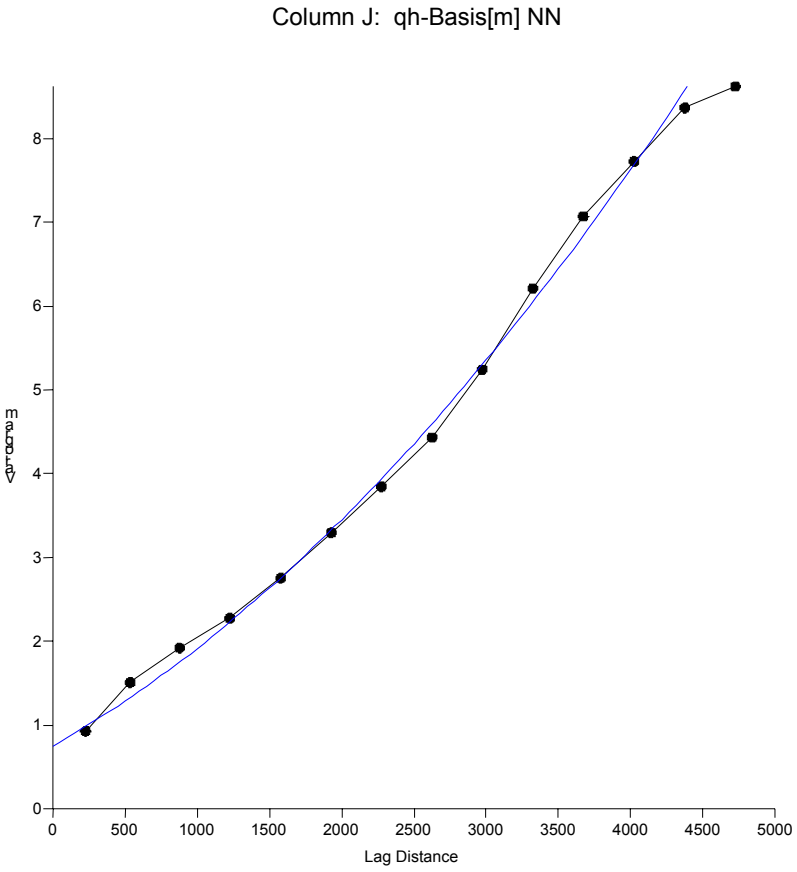


Abbildung 19: Variogramm der Daten für die Berechnung der holozänen Basis.

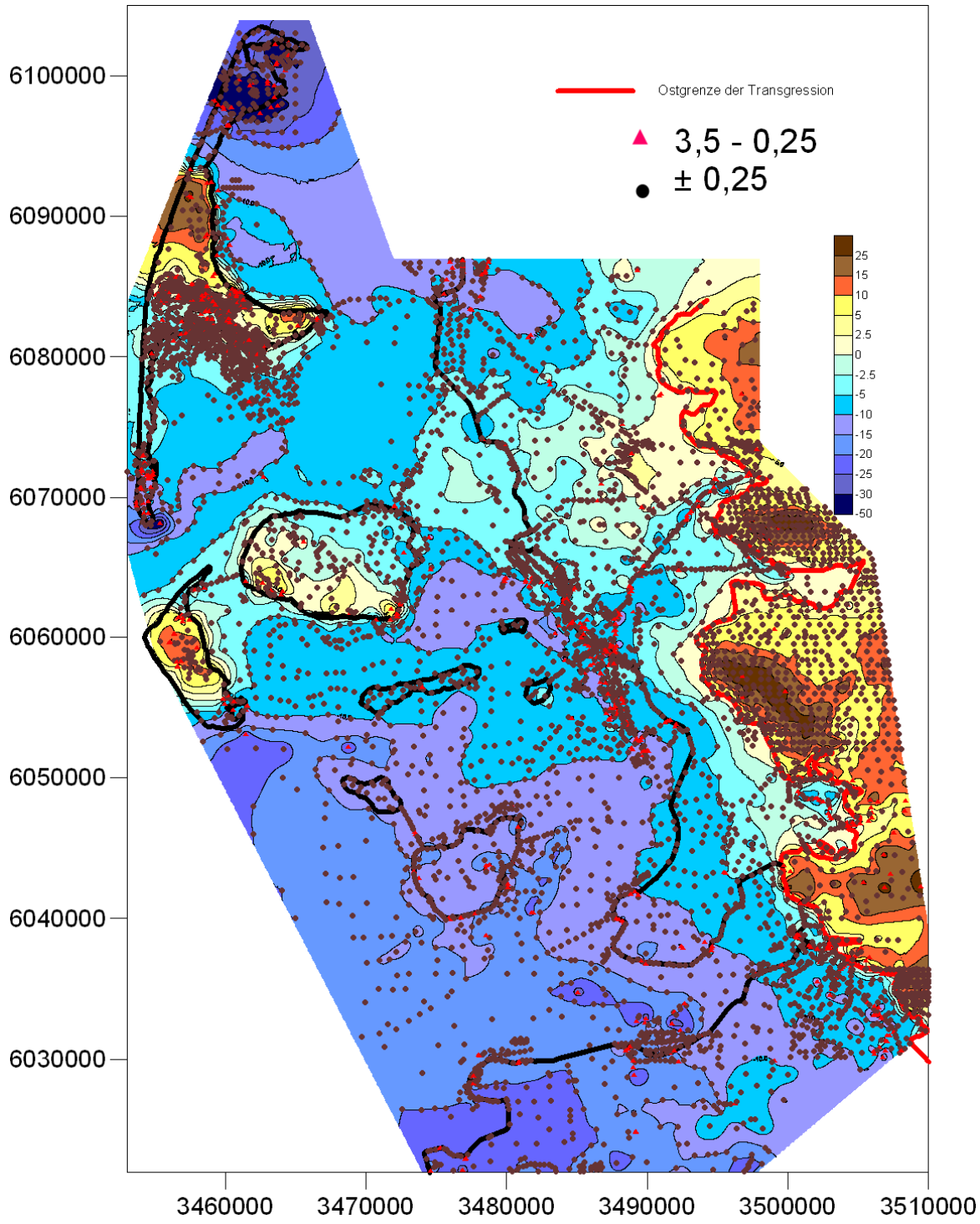


Abbildung. 20: Residuals der holozänen Basis; Abweichung des berechneten Wertes vom Originalwert in Metern.

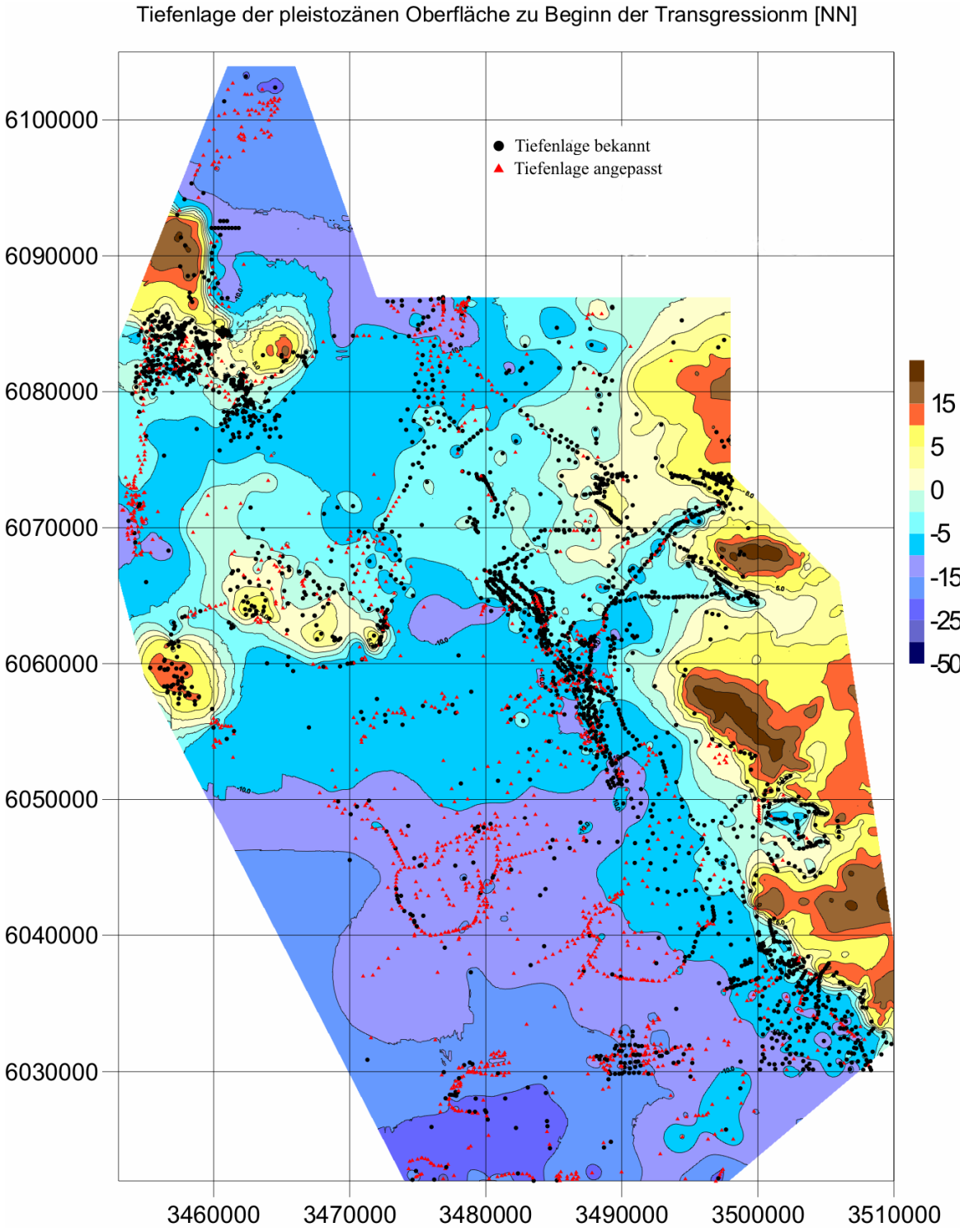


Abbildung 21: Datenbasis für die Ermittlung der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression.

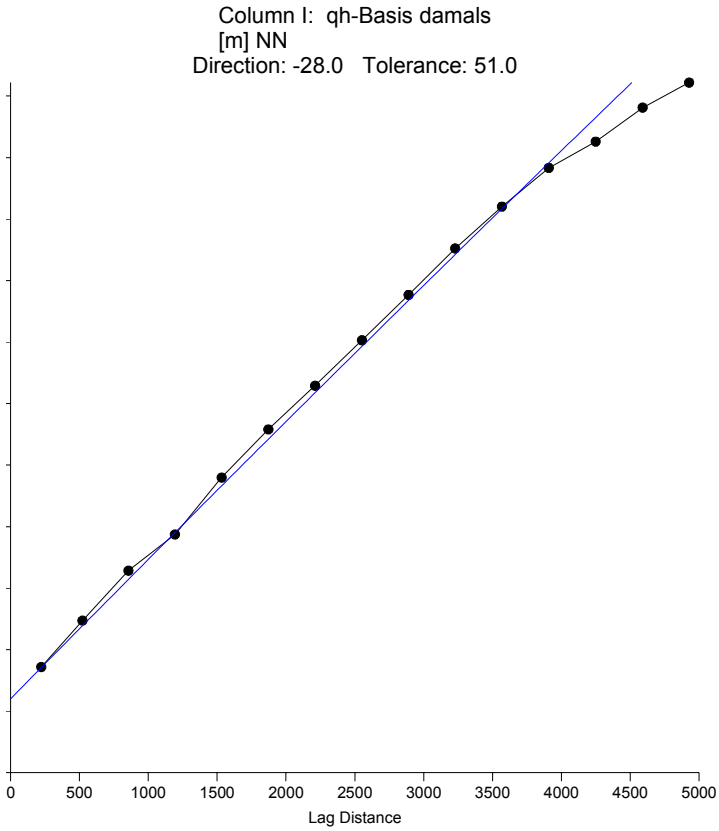


Abbildung 22: Variogramm der Daten für die Ermittlung der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression.

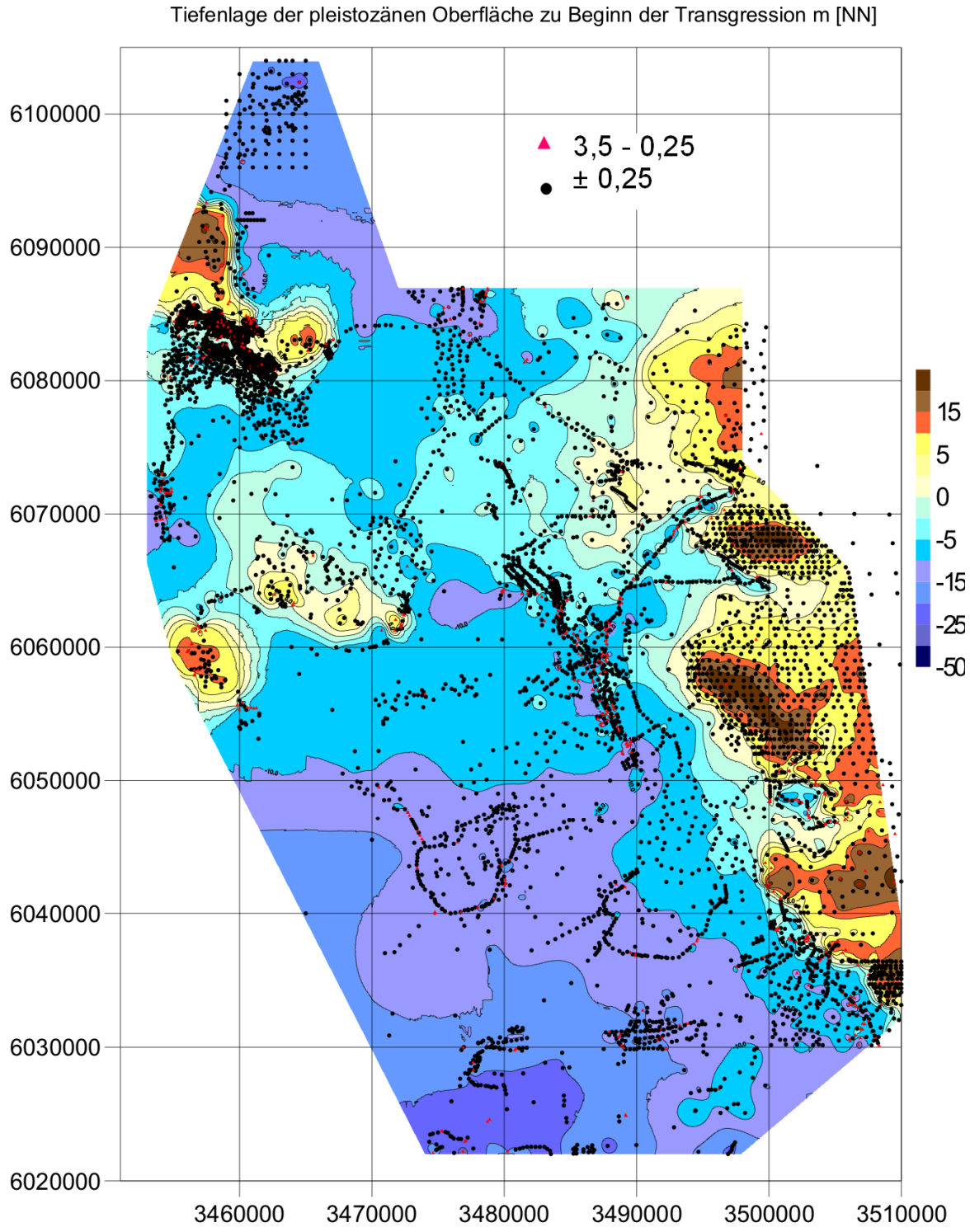


Abbildung 23: Residuals der holozänen Basis zu Beginn der Transgression.

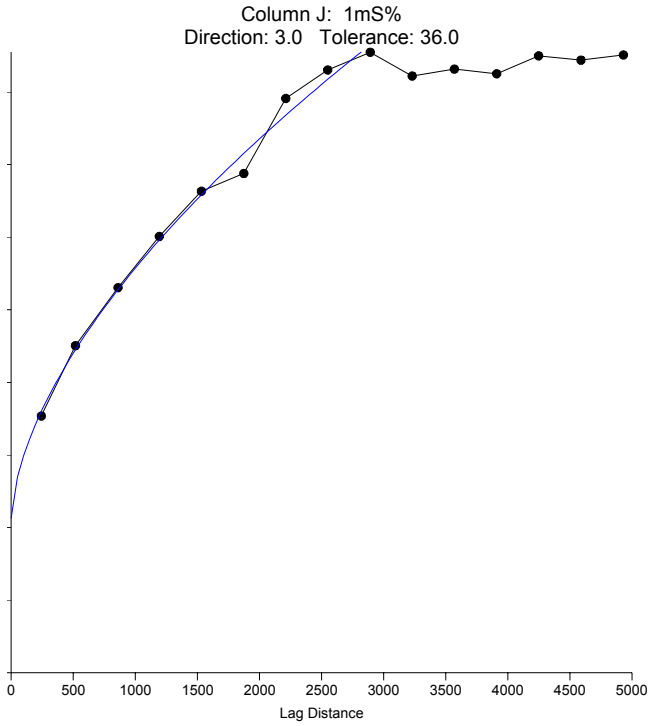


Abbildung 24: Variogramm des obersten Meters, Sandanteil.

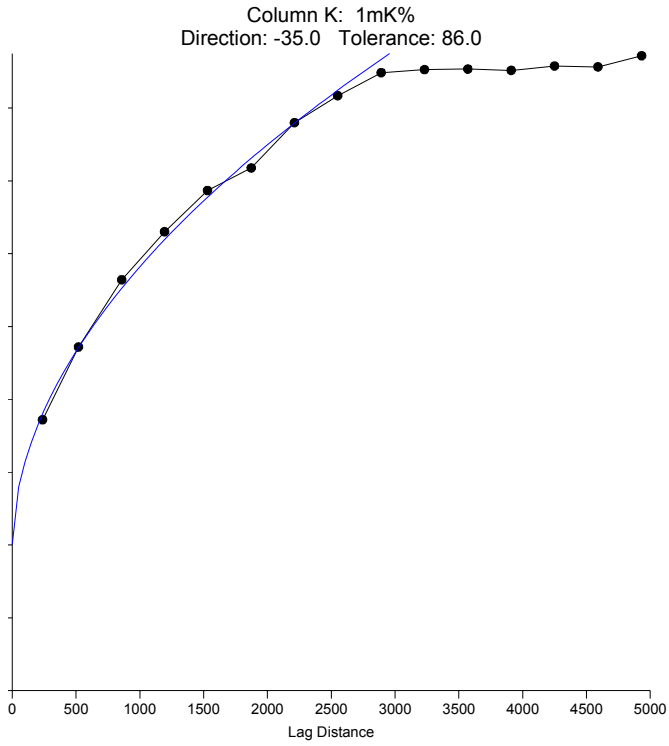


Abbildung 25: Variogramm des obersten Meters, Kleianteil.

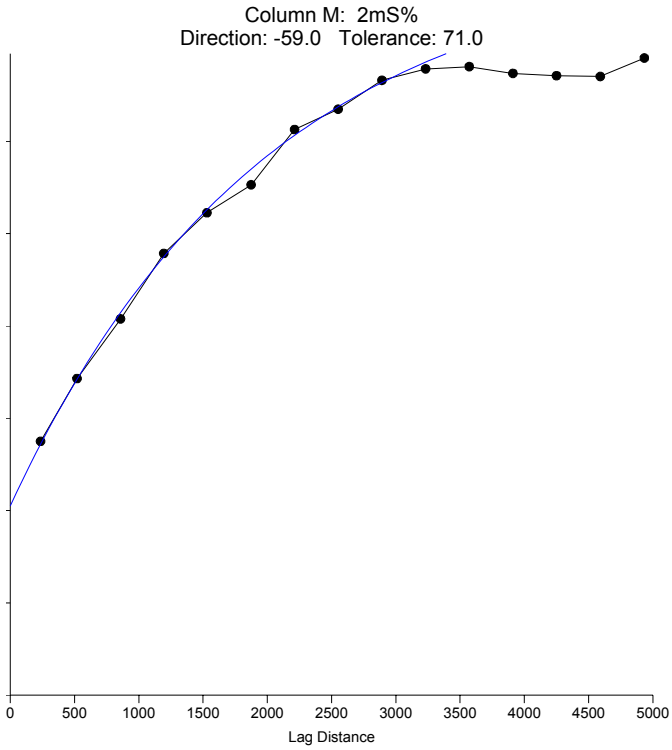


Abbildung 26: Variogramm der obersten zwei Meter, Sandanteil.

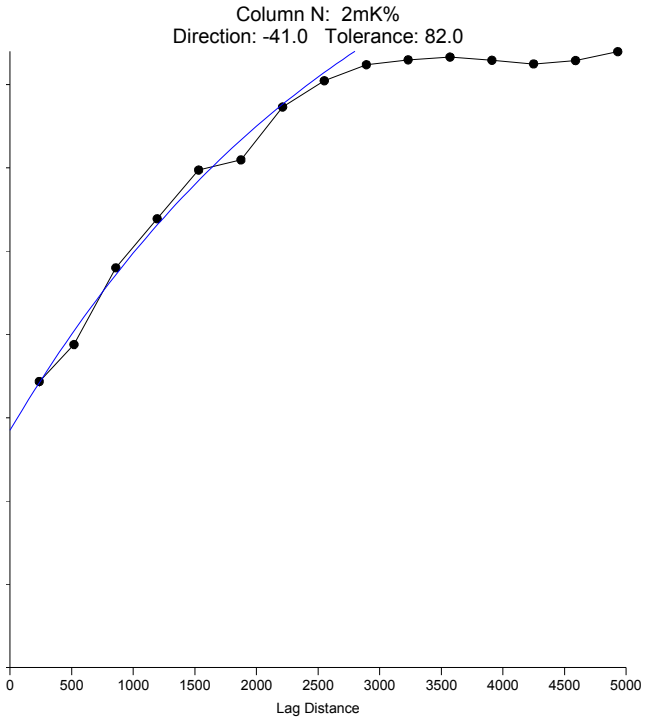


Abbildung 27: Variogramm der obersten zwei Meter, Kleianteil.

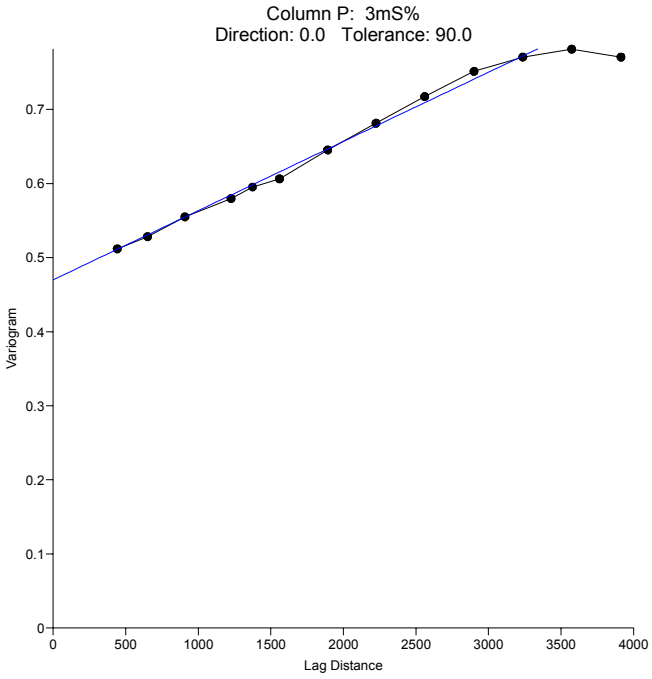


Abbildung 28: Variogramm der obersten drei Meter, Sandanteil.

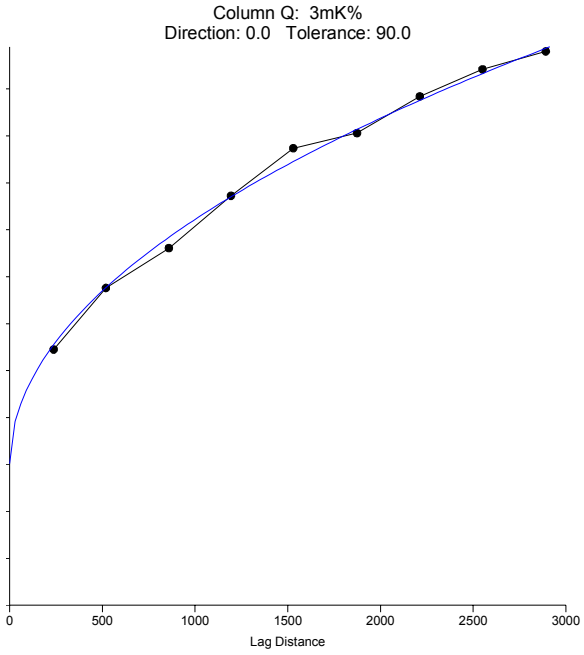


Abbildung 29: Variogramm der obersten drei Meter, Kleianteil.

5 ERGEBNISSE

Die Höhenlage der pleistozänen Oberfläche zu Beginn der Transgression ist in Abbildung 33, die heutige in Abbildung 36 dargestellt. Der erste Kontakt des steigenden Meeresspiegel (Abbildung 45) mit der Region erfolgte über das Lister Tief vor mehr als 8000 Jahren. Die Entwässerung des Hinterlandes nördlich einer Grenze Amrum-Föhr-Festland erfolgte über Das Lister Tief in nord-westlich Richtung. Südlich dieses Bereiches erfolgte die Transgression ca. 500 Jahre später. Die Entwässerung des Hinterlandes erfolgte mehr oder minder direkt Richtung Westen. Ein Kontakt beider Wasserkörper, der Lecker- und Soholmer Au und der Wiedau war nicht vorhanden.

Deutlich sind die Unterschiede zwischen dem nördlichen und dem zentralen bzw. südlichen Bereich von Nordfriesland zu erkennen. Herrschen im Norden noch die heute noch vorhandenen Geschiebemergelkomplexe von Sylt-Amrum-Föhr vor, so fehlen im südlich anschließenden Bereich die der heutigen Küste vorgelagerten pleistozänen Hochlagen. Erst vor ca. 6800 Jahren entsehen die Vorraussetzungen für das heutige Wattenmeer mit der Überflutung der Föhrer Schulter. Eine westlich 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 des Geschwindigkeit des Meeresspiegelanstieges um ca. 6500 v. h. konnte es anschließend zur Verlandung des Bereiches kommen. Dieser Verlandungsprozess und die durch den nachchristlichen Meeresspiegelanstieg wieder einsetzende Erosion kann mit den hier angewandten Methoden nicht rekonstruiert werden.

Das Fassungsvolumen des betrachteten Bereiches (Abbildung 32) zeigt einen nahezu ausgeglichenen logarithmischen Verlauf mit Ausnahme des Bereiches zwischen -9 und -8 m. Hier scheint es eine Art „Gleichgewichtsbedienung“ zu geben. Die nicht kontinuierliche Zunahme des Fassungsvolumens 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 Fassungsvolumen der ursprünglichen Form wieder an.

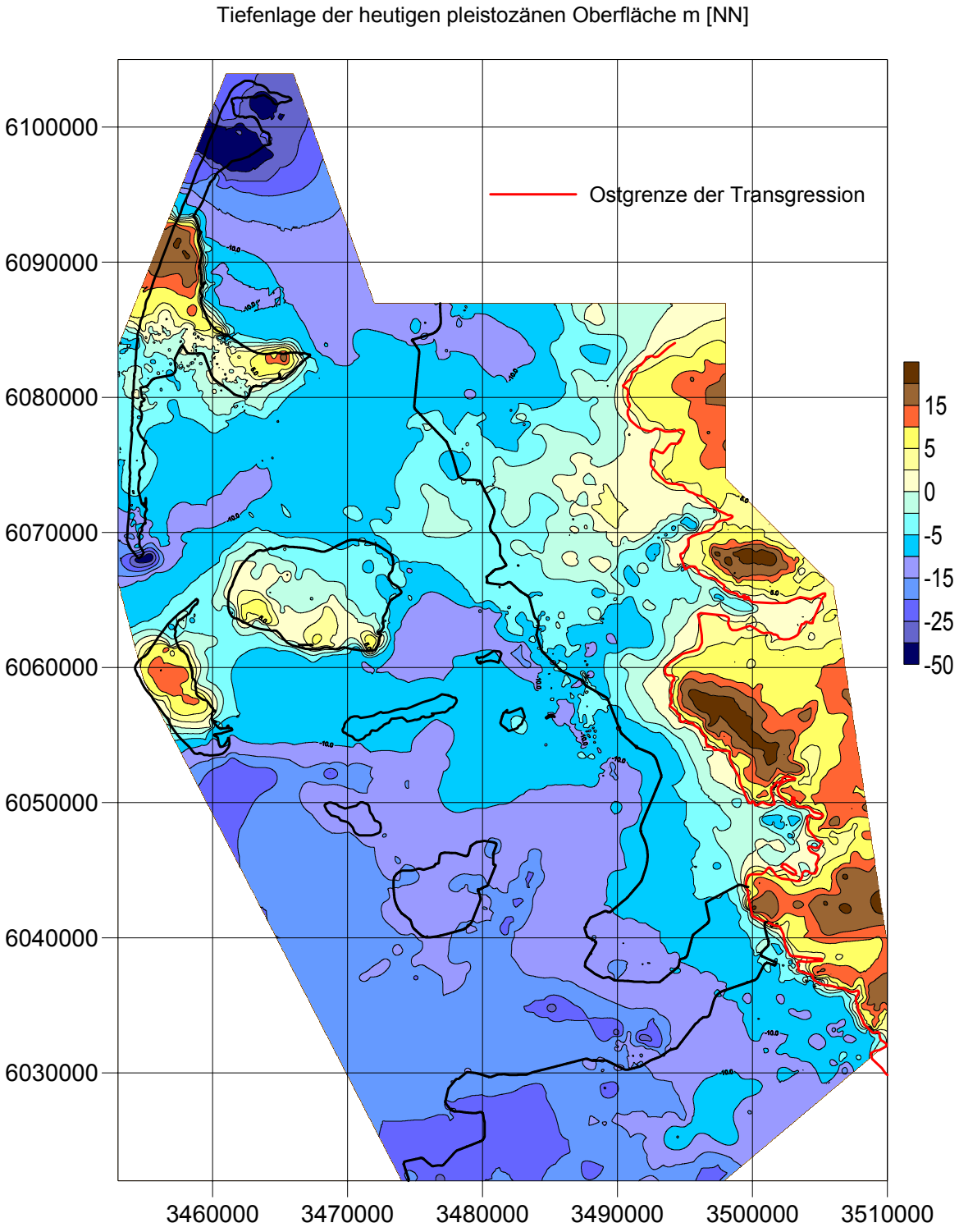


Abbildung 30: Tiefenlage der heutigen Holozänbasis.

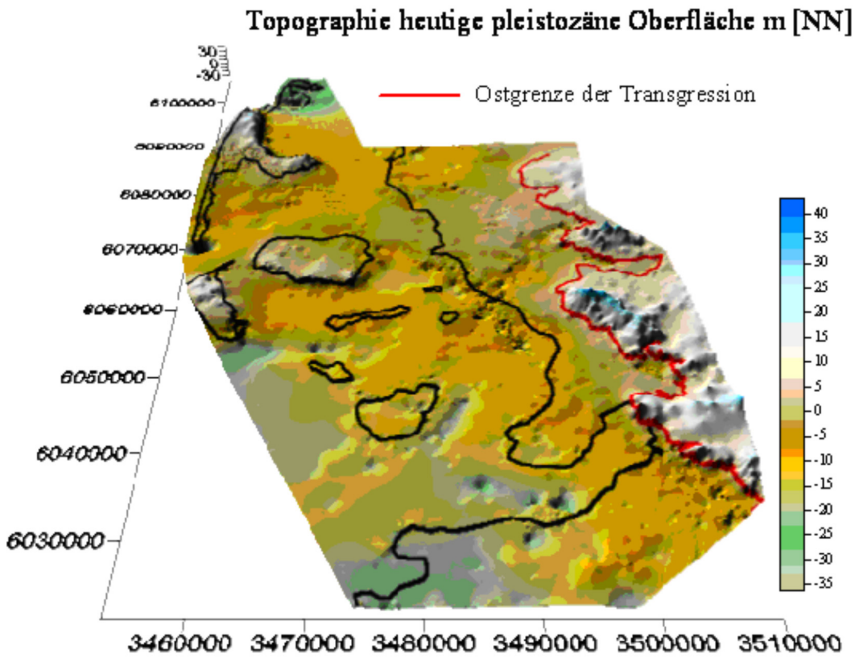


Abbildung 31: 3D-Darstellung der heutigen Holozänbasis.

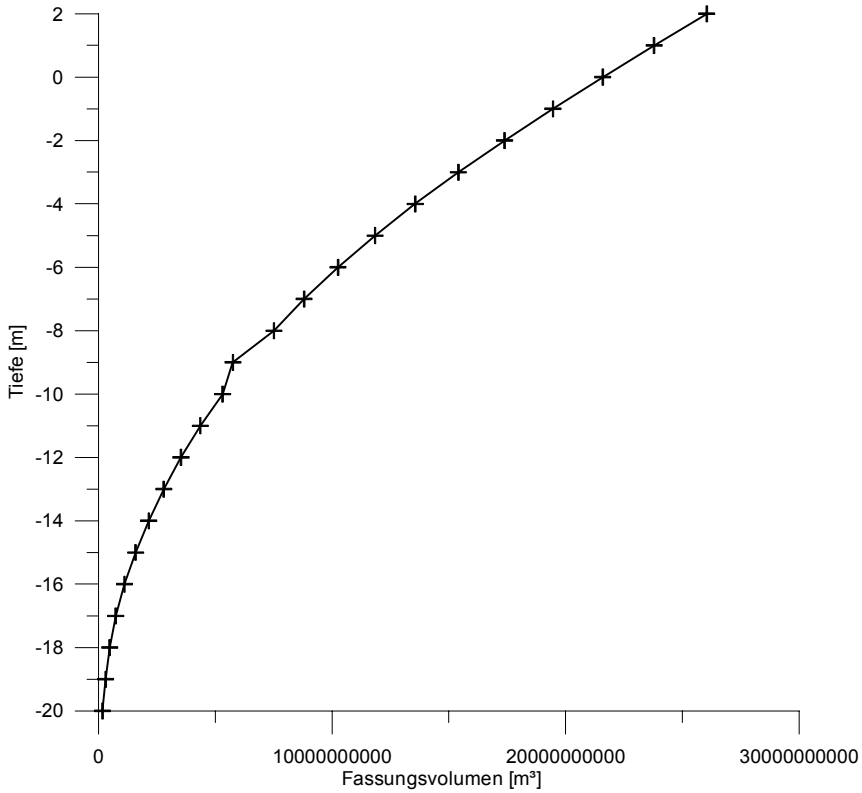


Abbildung 32: Fassungsvolumen des Untersuchungsraumes.

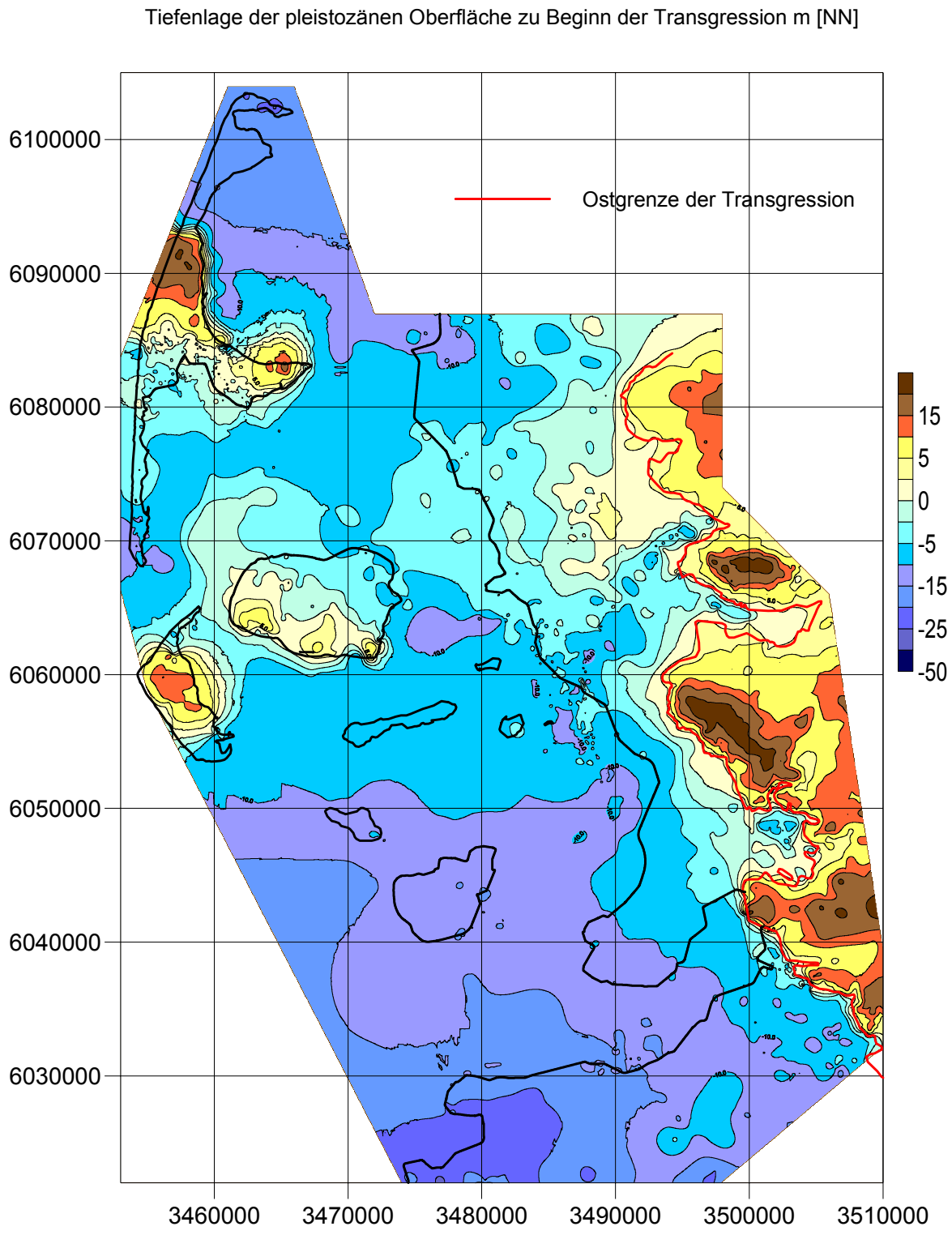


Abbildung 33: Vermutete Tiefenlage der Holozänbasis zu Beginn der Transgression.

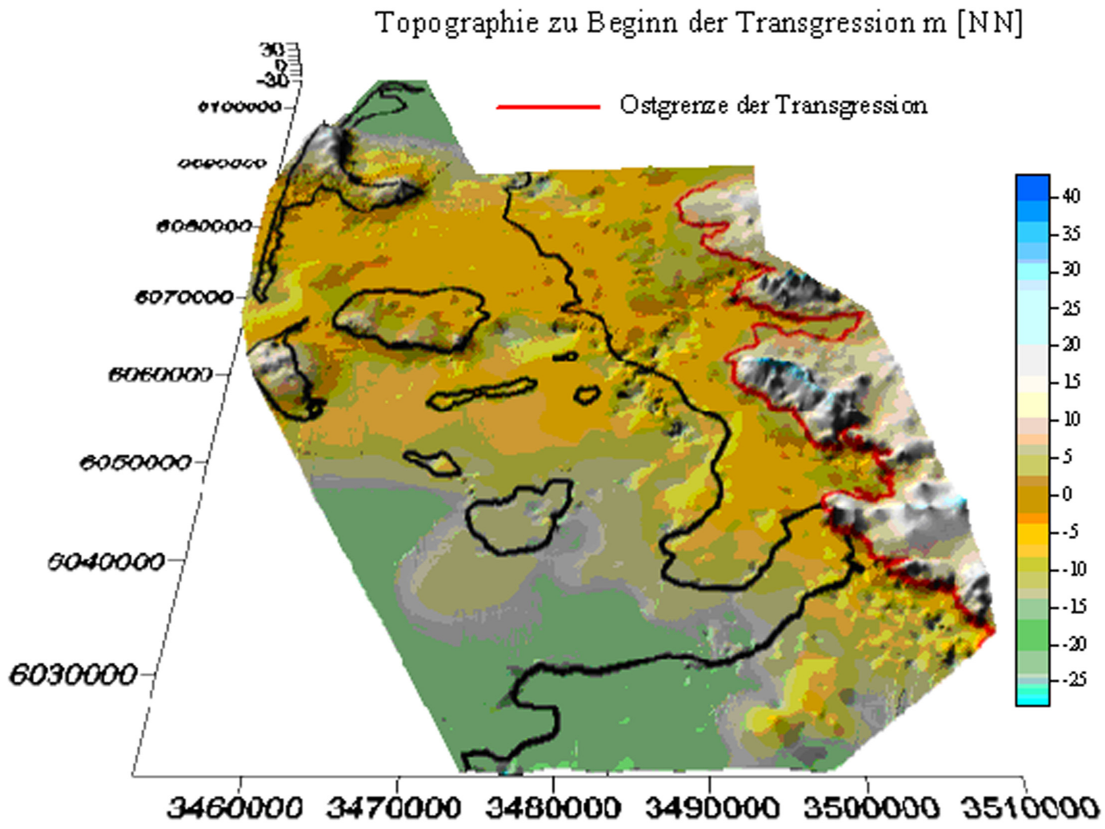


Abbildung 34: 3D-Darstellung der vermuteten Tiefenlage der Holozänbasis zu Beginn der Transgression.

Für die Beurteilung der Sedimentbilanz wurde der Bereich nördlich des Hindenburgdammes aus der Betrachtung ausgenommen, da hier die Daten am unsichersten sind. Der betrachtete Bereich ist in Abbildung 35 dargestellt.

Tabelle 1 gibt den Überblick über die vorhandenen Sedimentmengen wieder. Das heutige Volumen, also dies reale Sedimentmenge beträgt 19,867 x 10^9 m³. Dem stehen 1,828 x 10^9 m³ erodiertes Volumen, also die Differenz zwischen der Ausgangsbasis zu Beginn der Transgression und des heutigen Volumen. Dies entspricht nur 9,2 % des heutigen vorhandenen Volumens. Aus interner Umlagerung stammen somit maximal 9,2 %. Über 91,8 % 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. HOSELMNANN & 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 % entzogen. Hierbei handelt es sich ausschließlich um Sedimente hinter den Festlandsdeichen da davon ausgegangen wird, dass diese Bereiche auch mittelfristig dem direkten Meereseinfluss entzogen sein werden.

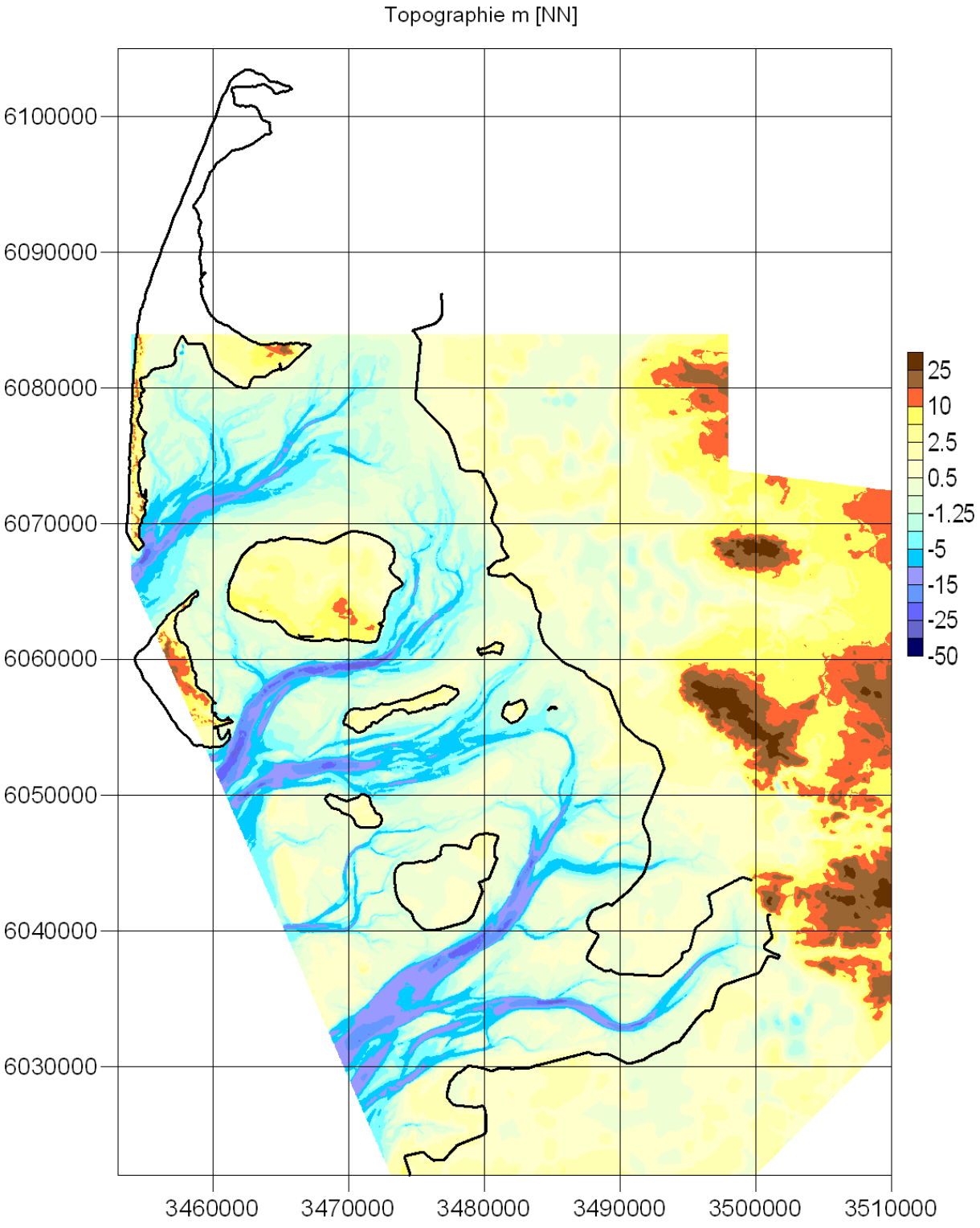


Abbildung 35: Übersichtskarte Volumengrenze.

Tabelle 1: Volumenbilanzen [m³].

Heutiges holozänes Volumen	$19{,}867 \times 10^9$
Holozänes Fassungsvermögen auf 0m NN bezogen	$21{,}592 \times 10^9$
Holozänes Fassungsvermögen auf 1m NN bezogen	$23{,}792 \times 10^9$
Holozänes Fassungsvermögen auf 2m 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 den Abbildungen 36 bis 41 dargestellt. Im obersten Meter herrschen in Geestnähe sowie in Eiderstedt die kleiig-siltigen Sedimente vor. Westlich der ersten Deichlinie 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 in den zwei oberen Metern 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 Transgressionsgeschwindigkeit entsprechen, dass die oberen Sedimente aufgrund nachchristlicher Zunahme von Sturmflutereignissen entsprechend an Feinkorn verarmt sind.

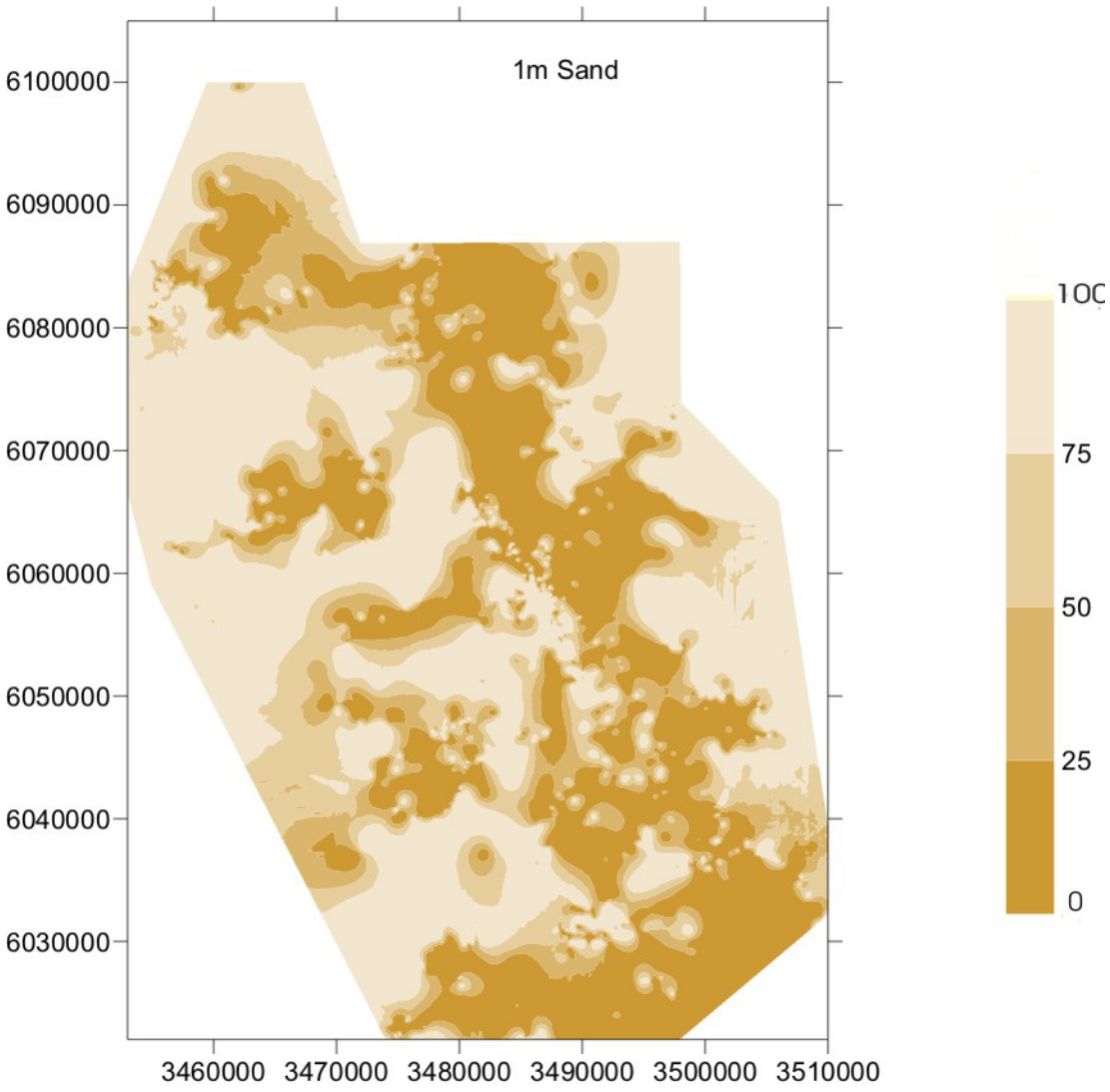


Abbildung 36: Prozentualer Sandanteil im obersten Meter.

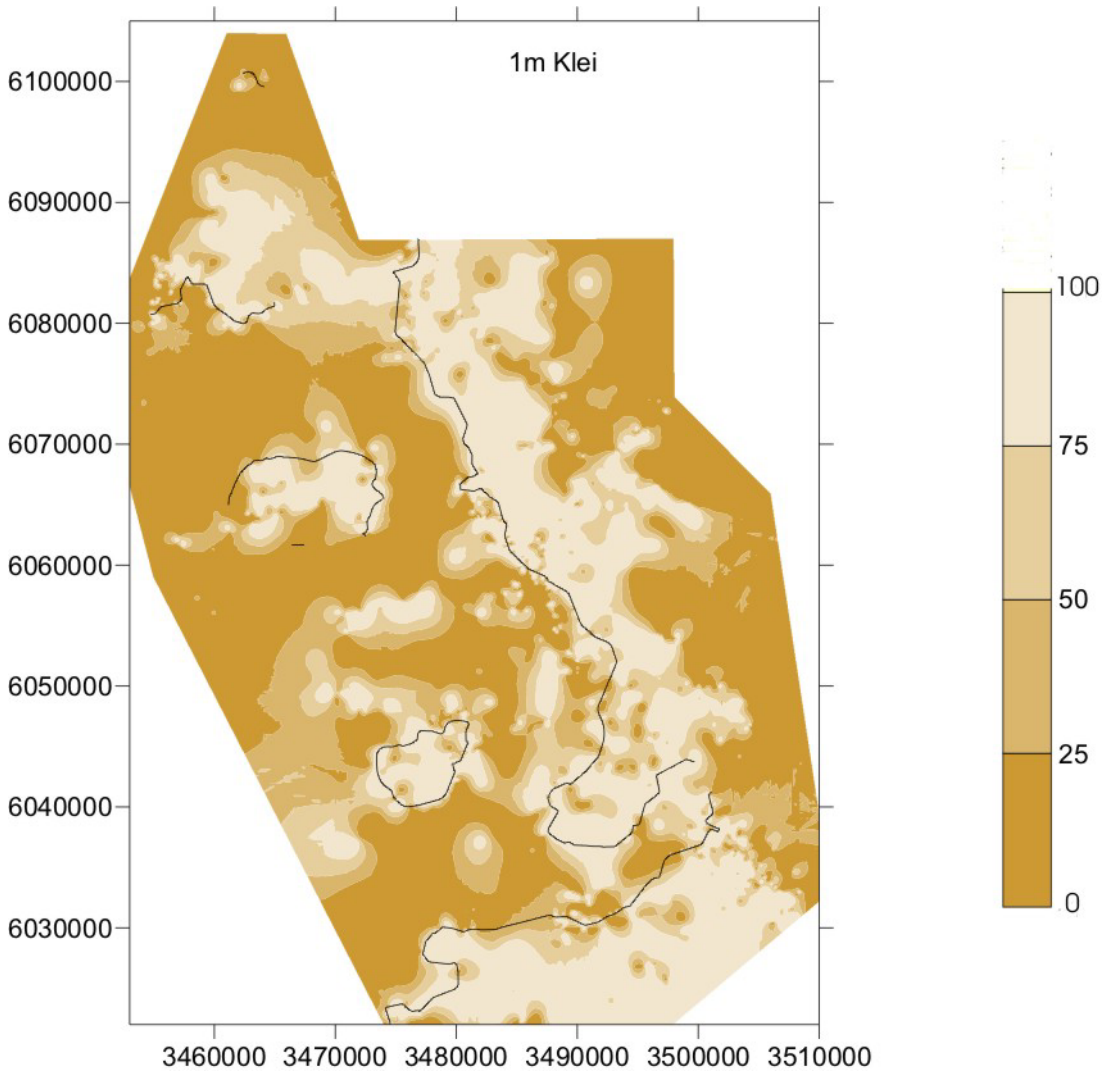


Abbildung 37: Prozentualer Kleianteil im obersten Meter.

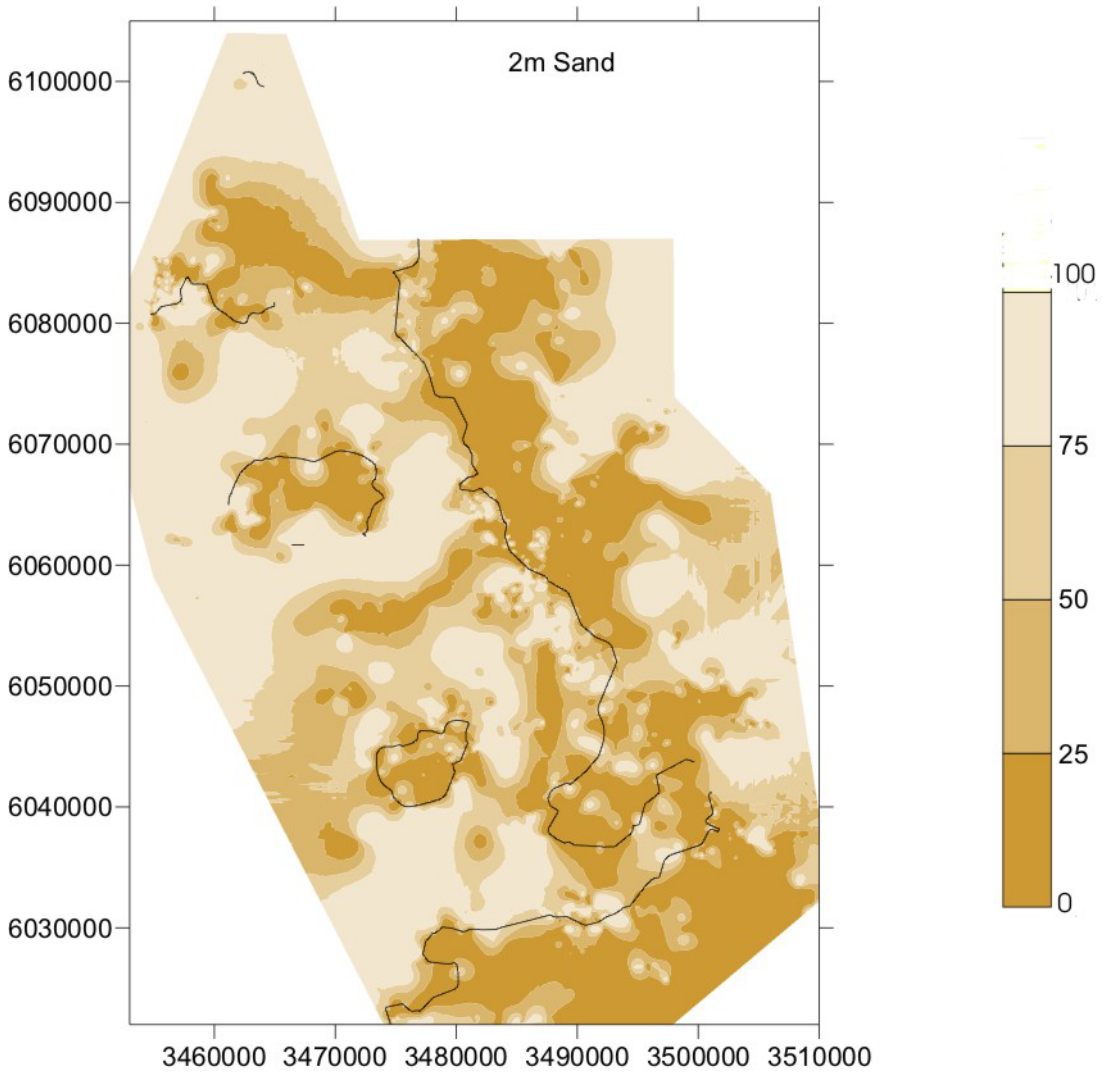


Abbildung 38: Prozentualer Sandanteil in den obersten zwei Metern.

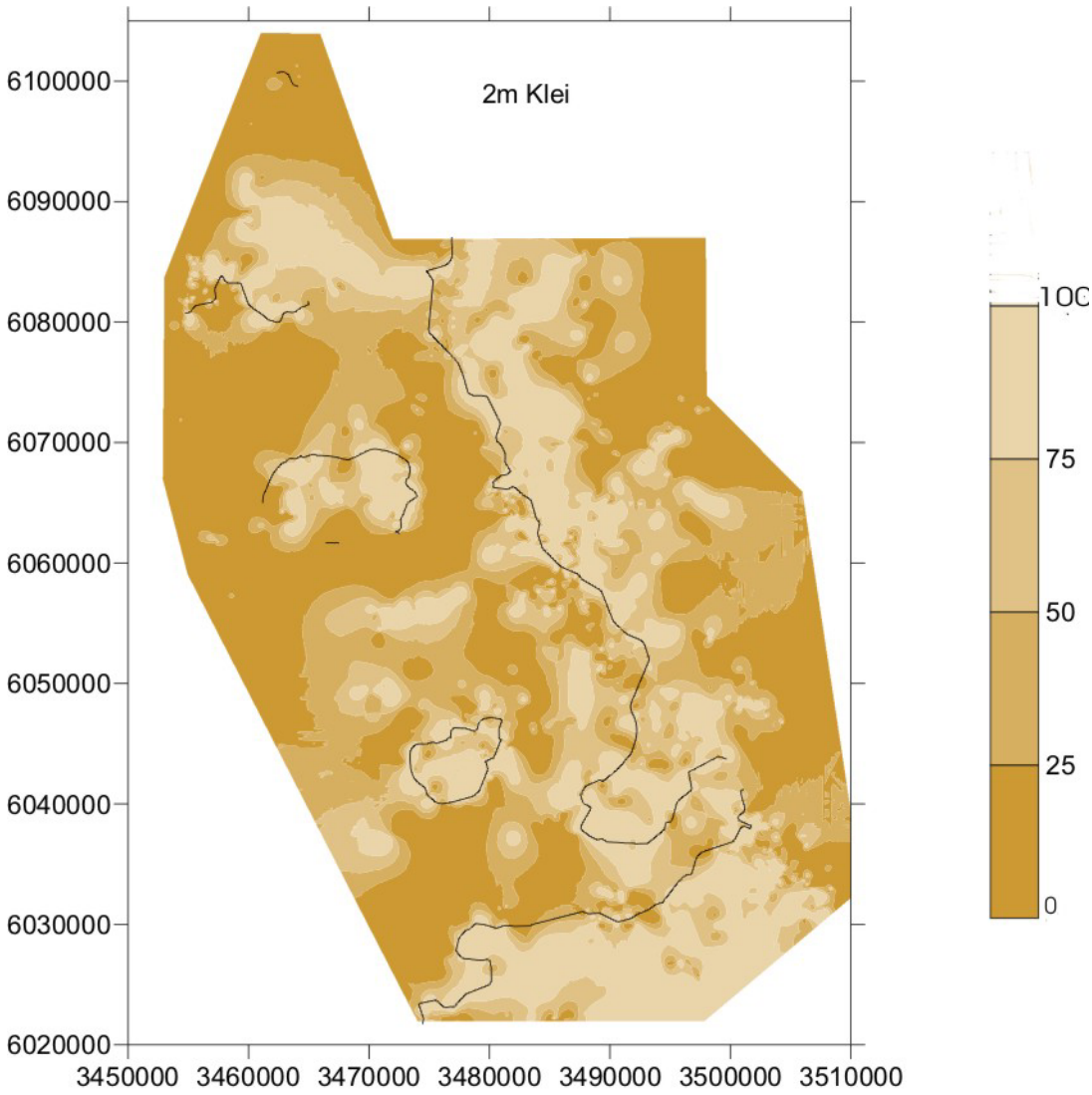


Abbildung 39: Prozentualer Kleianteil in den obersten zwei Metern.

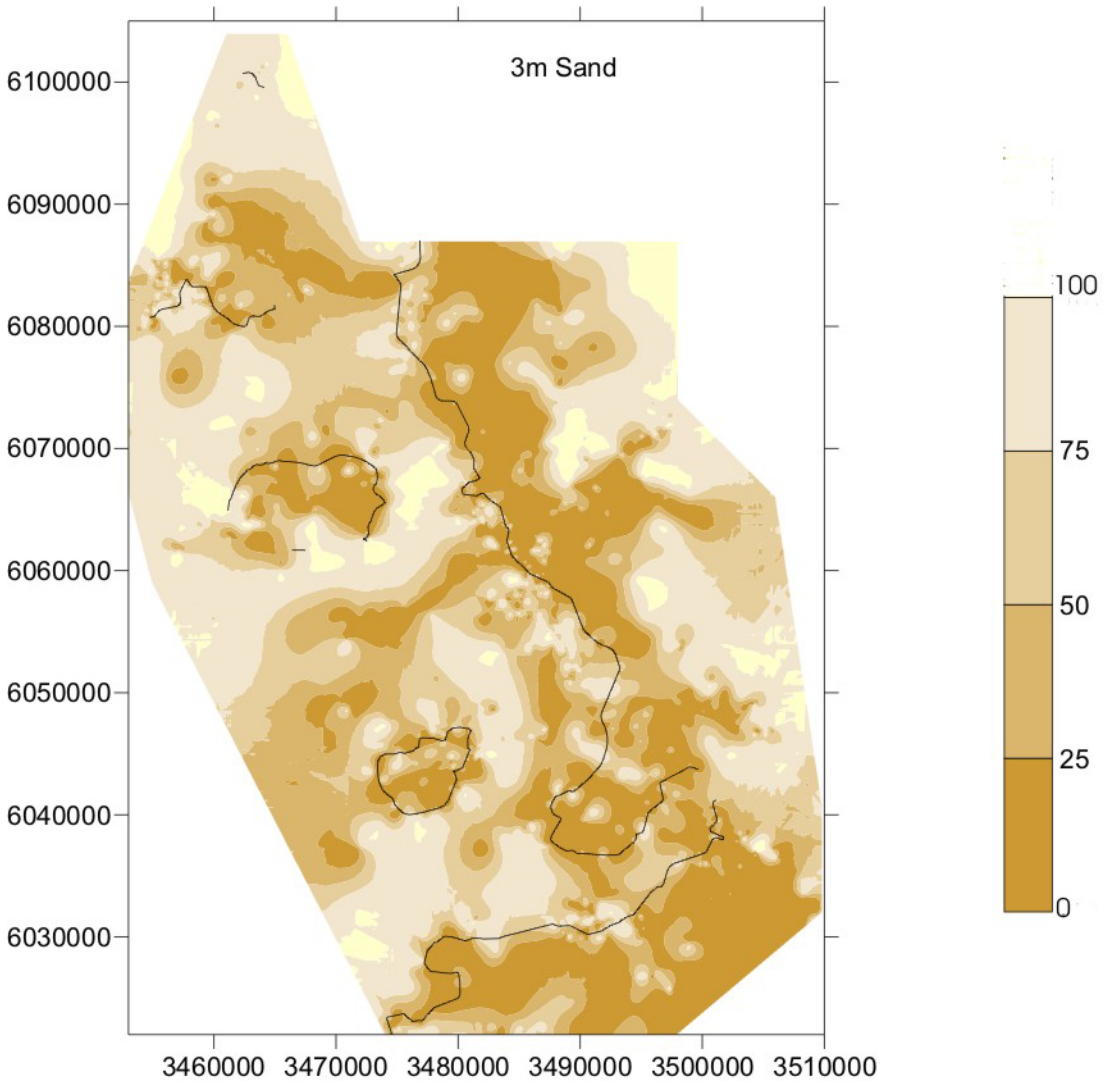


Abbildung 40: Prozentualer Sandanteil in den obersten drei Metern.

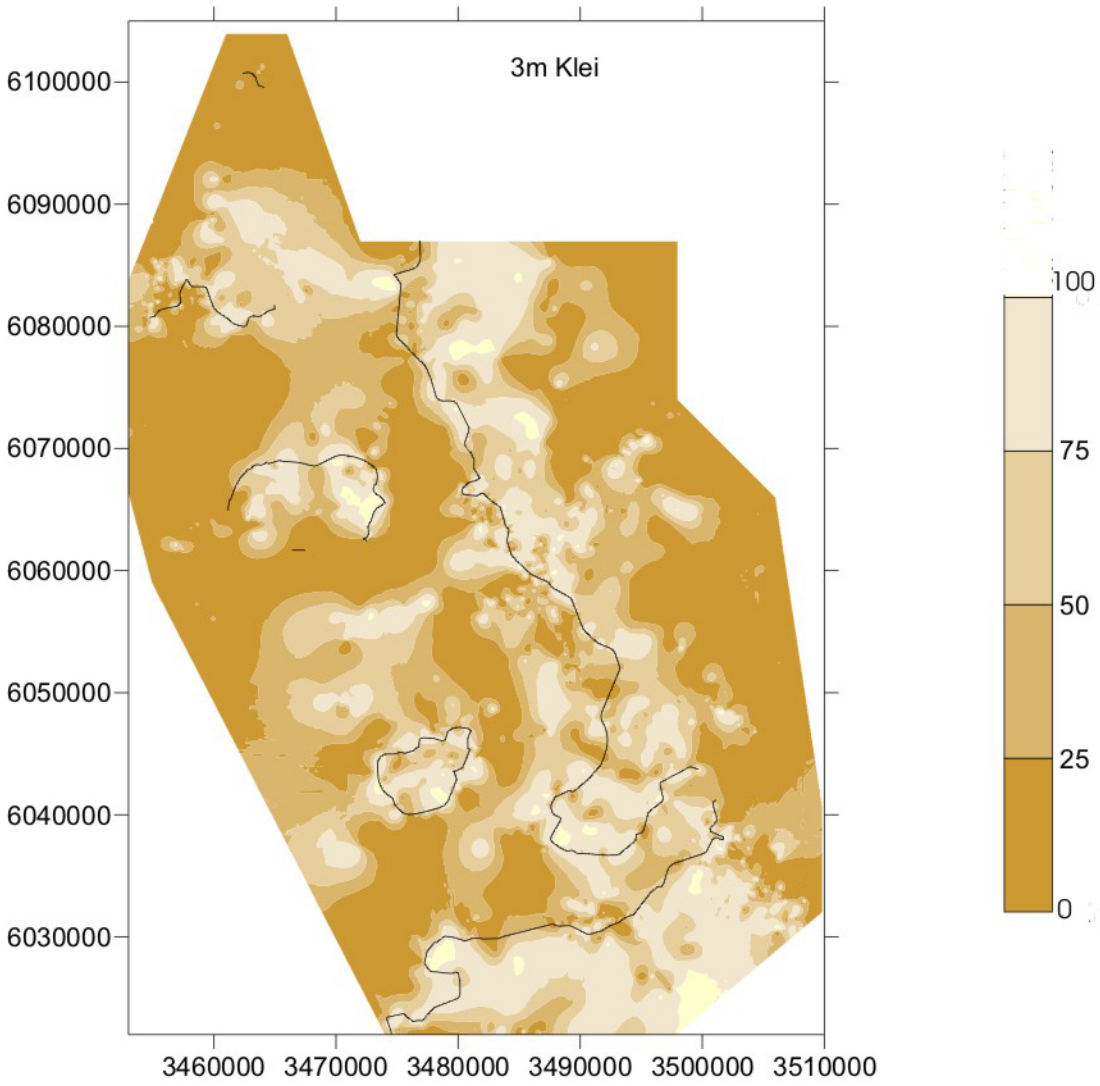


Abbildung 41: Prozentualer Kleianteil in den obersten drei Metern.

Für die Ermittlung der Sedimente nach Qualität und Quantität wurde aufgrund des guten Datenbestandes das Einzugsgebiet der Norderaue (Abbildung 42) gewählt. Die Kornzusammensetzung der aktuellen Oberfläche wurde der geologischen Übersichtskarte CC1518 Flensburg bzw. der Bodenkarte CC1518 Flensburg entnommen. Beide Karten (Abbildung 43 und 44) wurden digital erfasst und georeferenziert. Anschließend wurden die Flächen der einzelnen Sediment- bzw. Bodentypen eraßt und in die Klassen Ton/Klei und Sand eingeteilt (s. Tabelle 3). Es ergibt sich eine Flächenübereinstimmung von 97 %. In der Geologischen Karte sind 71 % als Sand ausgewiesen wohingegen in der Bodenkarte 84 % Sand vorhanden sind. 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 Tabelle 2 sind die aus den vorhergehenden Analysen sich ergebenden Sand- und Tonanteilen in dem Gebiet nach den ersten drei Metern und in unterschiedlichen Höhenstufen zwischen –1 m und –5 m angegeben. Anhand von Stabilitätskriterien wird davon ausgegangen, dass in diesen Bereichen mittelfristig Erosion auftritt und in den Bereichen zwischen –1 m und 2 m NN es zu entsprechenden Sedimentationen kommen kann. In Tabelle 4 sind die unter Annahme von unterschiedlichen Anstiegsraten benötigten Sedimentmengen nach Qualität und Quantität angegeben. Ein Vergleich der Tabellen 2 und 4 zeigt deutlich, dass für interne Umlagerung genügend Sediment zur Verfügung gestellt werden könnte.

Wie aber aus den obigen Untersuchungen ersichtlich, 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 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 & BARTHOLOMÄ (2002) beschrieben. Der von STREIF (1990) beschriebene „Bulldozereffekt“, d.h., das Herantransportieren von Sedimenten aus der Nordsee Richtung Wattenmeer setzt voraus, das 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. Durch das heute vorhandene steilere Gefälle gegenüber dem postglazialem bzw. vorchristlichem (ca. 1700–1000 v. Chr.), hervorgerufen durch die künstliche Fixierung der Ostgrenze des Wattenmeeres, kann dieses 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, als die in den Bereichen des Wattenmeeres. Es wird erwartet, dass mittelfristig die eulitoralen Flächen abnehmen werden und sich die Sedimentzusammensetzung vergröbern wird. Dies hat entsprechende ökologische und küstenschutztechnische Auswirkungen.

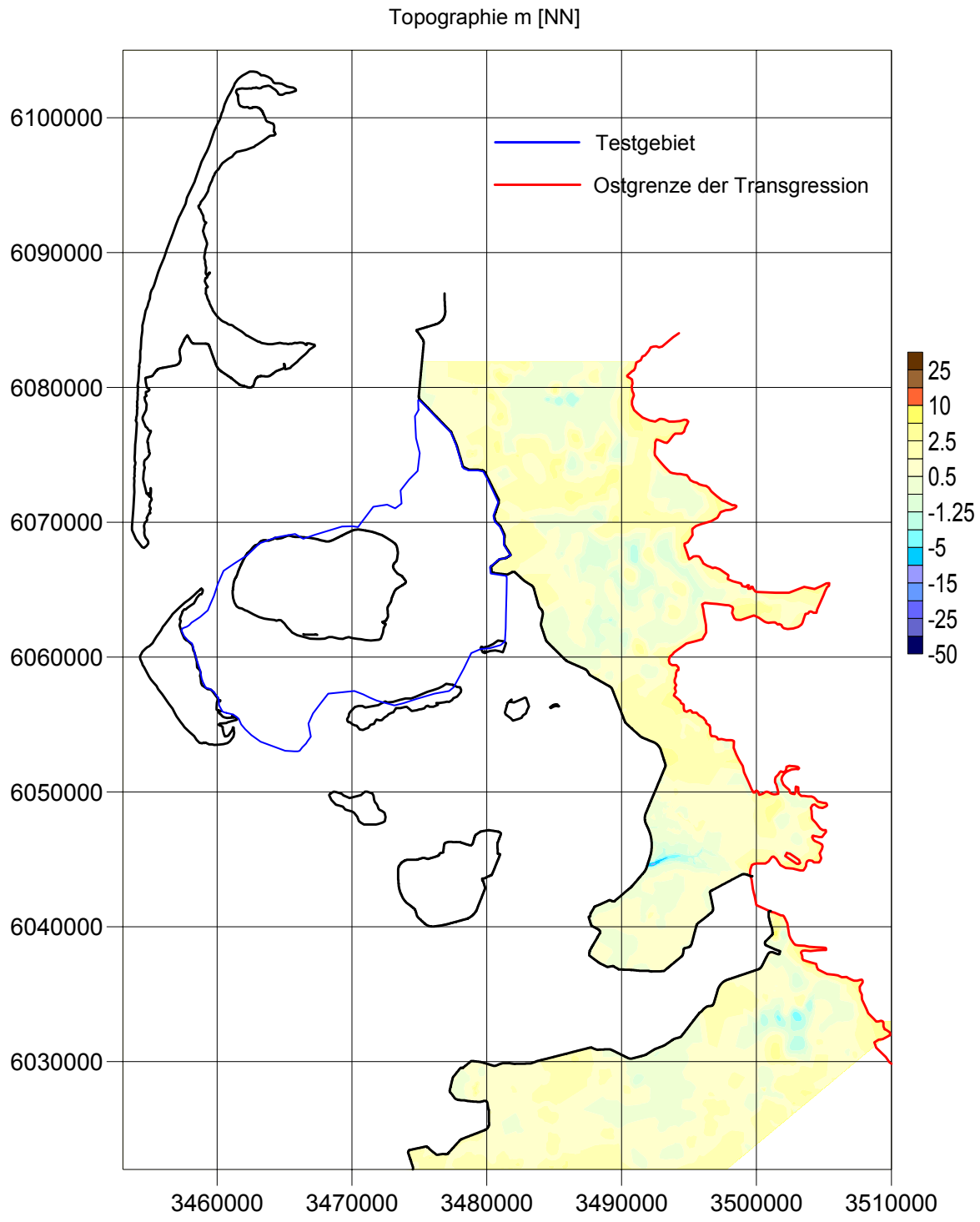


Abbildung 42: Übersicht über das Testgebiet.

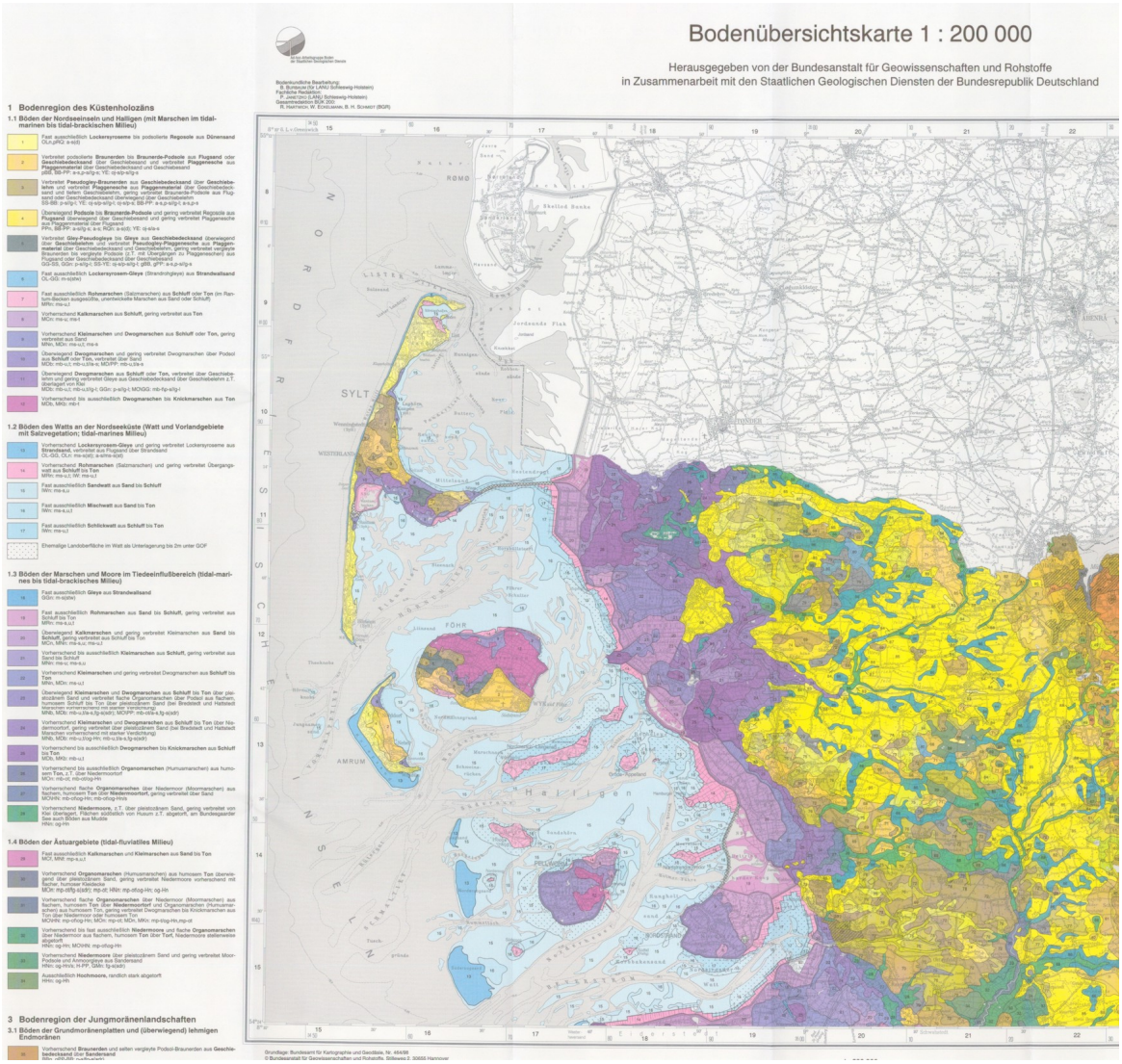


Abbildung 43: Ausschnitt aus der Bodenkarte CC1518 Flensburg.

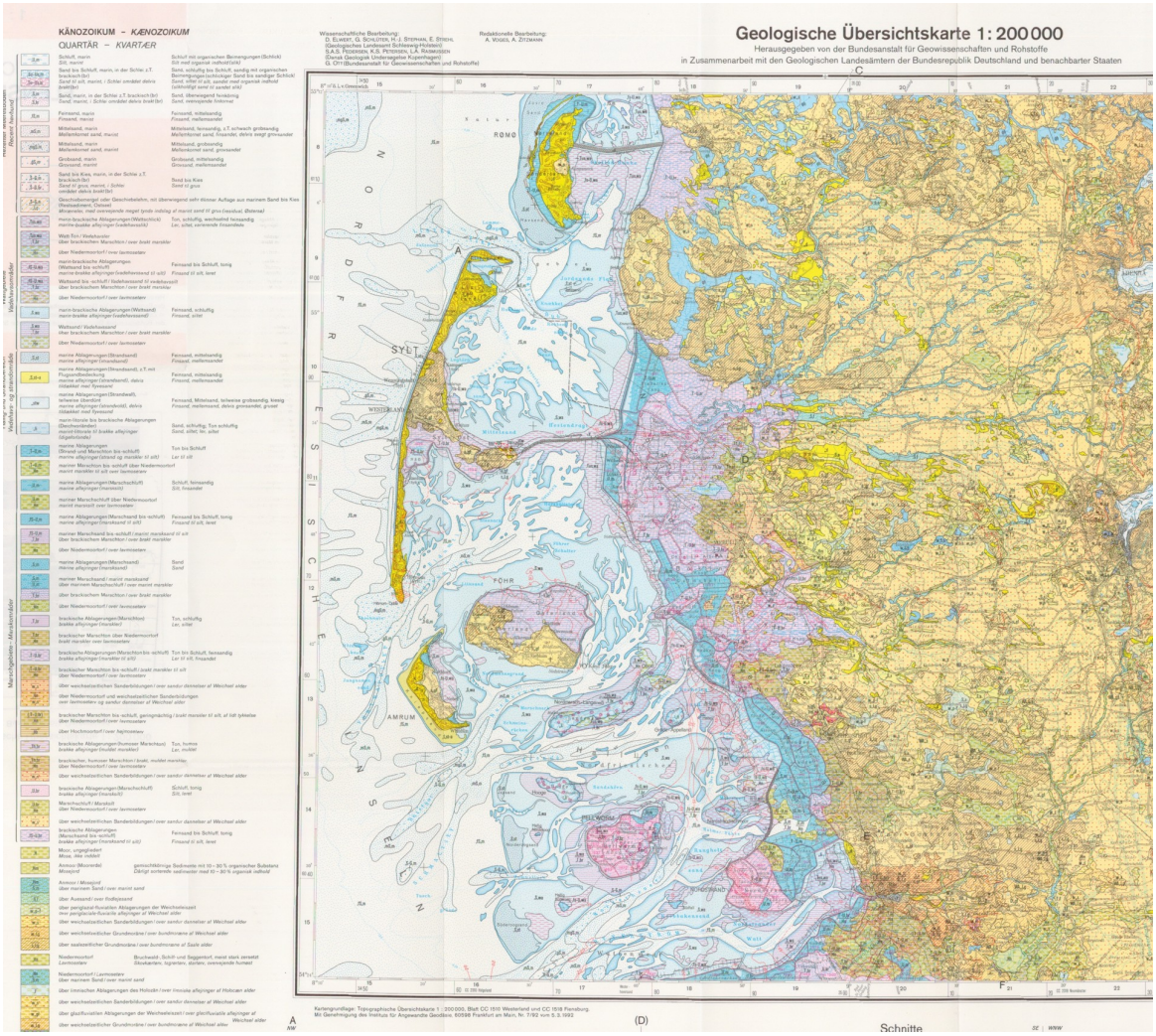


Abbildung 44: Ausschnitt aus der Geologischen Übersichtskarte 1518 Flensburg.

Tabelle 2: Korngrößenanteile der obersten drei Meter.

Sandanteil im oberster Meter	**m³**
Zwischen -4 und -5:	903102,31
Zwischen -3 und -4:	973663,90
Zwischen -3 und -2:	1771681,28
Zwischen -2 und -1:	4115260,47
Sandanteil in den obersten zwei Metern	**m³**
Zwischen -4 und -5:	1904198,4
Zwischen -3 und -4:	1934711,6
Zwischen -3 und -2:	3485584,0
Zwischen -2 und -1:	8700428,0
Sandanteil in den obersten drei Metern	**m³**
Zwischen -4 und -5:	2807210,4
Zwischen -3 und -4:	2845269,0
Zwischen -3 und -2:	5045182,26
Zwischen -2 und -1:	12556484,7
Anteil <0,63 mm im obersten Meter	**m³**
Zwischen -4 und -5:	83486,00
Zwischen -3 und -4:	157869,10
Zwischen -3 und -2:	311322,20
Zwischen -2 und -1:	688960,60
Anteil <0,36 mm in den obersten zwei Metern	**m³**
Zwischen -4 und -5:	206895,4
Zwischen -3 und -4:	341388,4
Zwischen -3 und -2:	663178,6
Zwischen -2 und -1:	146179,8
Anteil <0,63 mm in den obersten drei Metern	**m³**
Zwischen -4 und -5:	331401,0
Zwischen -3 und -4:	1509517,8
Zwischen -3 und -2:	676055,4
Zwischen -2 und -1:	2298100,5

Tabelle 3: Flächenanteil nach Sedimenttyp.

Fläche je Sedimenttyp zwischen -1m NN und 2m NN nach Geologischer Übersichtskarte CC1518 Flensburg 1 : 200.000	**m²**	**Flächen je Bodenart zwischen -1 m NN und 2 m NN nach Bodenübersichtskarte CC1518 Flensburg 1:200.000**	**m²**	**Fläche je Sedimenttyp zwischen -1m NN und 0m NN**	**Fläche je Sedimenttyp zwischen 0m NN und 1m NN**	**Fläche je Sedimenttyp zwischen 1m NN und 2m NN**
Tuswatbr_watt ton	**576810**	14 Rohmarschen-Salzmarschen	**1162190**	**55550**	**495370**	**25890**
Tuswa	**1406120**	15 ehemaliges Sandwatt	**1384150**	**714640**	**687970**	**3510**
Li_marin-littoral	**567170**	15 Sandwatt	**5084890**	**7620**	**288620**	**270930**
Swahn_wattsand_niedermoortorf	**840310**	16 ehemaliges Mischwatt	**943720**	**596320**	**234730**	**9260**
Swa-marine_brackische Ablagerung	**5340410**	16 Mischwatt	**889810**	**4854580**	**474780**	**11050**
Msm_mittelsand	**30**	17 ehemaliges Schlickwatt	**695660**	**0**	**10**	**20**
Fsuwa_wattsand	**680810**			**550160**	**128200**	**2450**
Fsm_feinsand	**302690**			**302440**	**130**	**110**
Fsfuhn_wattsand_niedermoor	**145400**			**86060**	**59060**	**280**
Ton/Klei	**2550100**	**Ton/Klei**	**1857850**	**777810**	**1471960**	**300330**
Sand	**7309620**	**Sand**	**8302570**	**6397180**	**896910**	**23710**
Summe	**10160420**	**Summe**	**9859220**			

Tabelle 4: Benötigte Sedimentmengen nach erwarteter Geländeerhöhung.

Erhöhung des Bodenniveaus um:	Ton zwischen -1m und +2m NN	Sand zwischen –1 und +2m NN	Ton zwischen –1m und 0m NN	Sand zwischen –1m und 0m NN	Ton zwischen 0m und 1m NN	Sand zwischen 0m und 1m NN	Ton zwischen 1m und 2m NN	Sand zwischen 1m und 2m 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

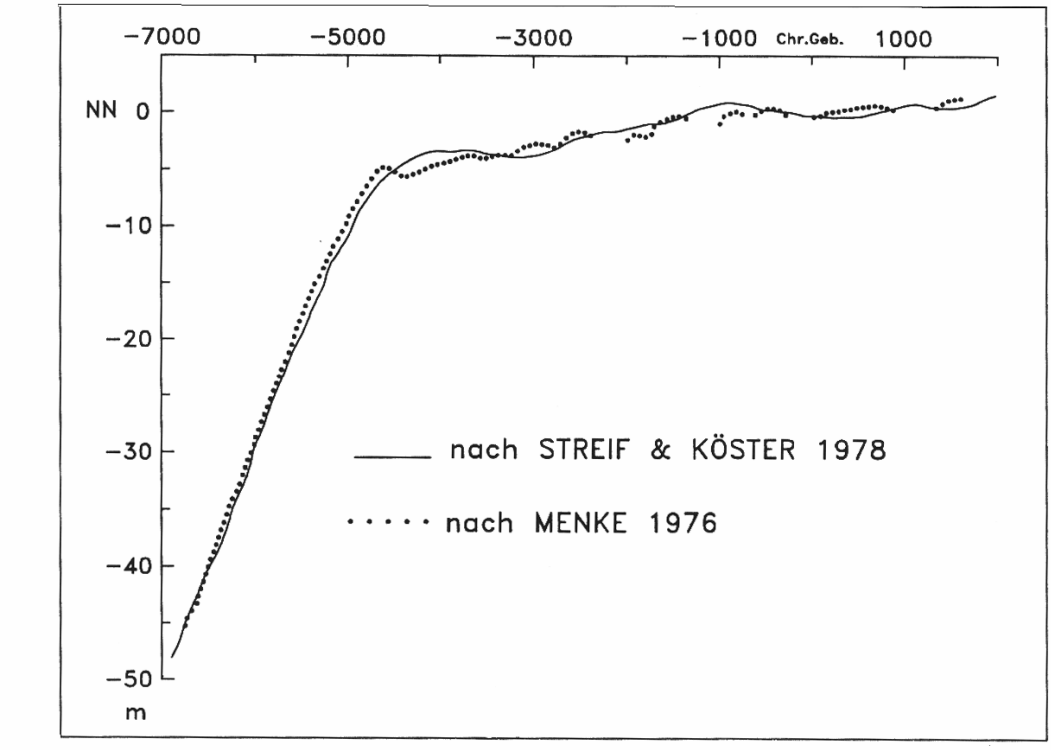


Abbildung 45: Meeresspiegelanstiegskurve nach STREIF & KÖSTER (1978) und MENKE (1976).

Anmerkung:

Die hier vorliegenden Daten ergeben eine hervorragende Basis für weitergehende Auswertungen. So wird z. B. das „Lithologische Ordnungsprinzip“ (BARCKHAUSEN, STREIF & PREUSS, 1977) zur Zeit im Büro für Umwelt und Küste für die geologischen Daten angewandt und an das nordfriesische System angepasst. Die Ergebnisse werden in entsprechenden geologischen Fachzeitschriften (Geologisches Jahrbuch, Meyniana) veröffentlicht werden.

LITERATUR

AHRENDT, K. (1989): Sedimentdynamik im gezeitenbeeinflussten Bereich der sandigen Brandungsküste Sylts (Deutsche Bucht). Ber. Rep. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, 28.

AHRENDT, K., (1992): Entwicklung und Sedimenthabitus des Hörnum- und Vortrapptiefs. Meyniana, 44: 53–65.

AHRENDT, K., (1994): Geologie und Küstenschutz am Beispiel Sylt/Deutsche Bucht. – Mit. Forsch. u. Techn. Zentr. Westküste, 4, 135 S., Büsum.

AHRENDT, K.& KÖSTER, R., (1986): Bericht über die geologischen Untersuchungen zur Versuchs-Sandvorspülung Hörnum/Sylt, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel, Kiel, (unveröf.).

AHRENDT, K. & PESCH, R. (2001): Das GIS als Methode für die Rekonstruktion geologischer Entwicklungen – Beispiel Sylt/Deutsche Bucht. – Meyniana, 53, 5–30.

AHRENDT, K. & TABAT, W., (1994) : Ein Vierteljahrhundert sedimentologische Forschung vor der Küste Sylts/Deutsche Bucht. Meyniana, 46: 11–36.

ARSENOGLOU, S., (1971): Sedimentologische Untersuchungen von Proben aus dem Seegebiet vor Sylt, südwestlich der Einfahrt zu dem Lister Tief. Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 54 S., (unveröf.).

AZHAR, A.-R., (1974): Sedimentologische Kartierung und Untersuchung in einem begrenzten Gebiet vor Amrum. Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 23 S., (unveröf.).

BANTELMANN, A., (1939): Das nordfriesische Wattenmeer, eine Kulturlandschaft der Vergangenheit. Westküste, 2(1).

BANTELMANN, A. & FISCHER, F., (1966): Die Landschaftsentwicklung an der schleswig-holsteinischen Westküste, dargestellt am Beispiel Nordfriesland – Eine Funktionschronik durch fünf Jahrtausende. Die Küste, 14(2): 1–99.

BARCKHAUSEN, H.; PREUSS, H. & STREIF, H., (1977): Ein lithologisches Ordnungsprinzip für das Küstenholozän und seine Darstellung in Form von Profiltypen. – Geolg. Jb., Reihe A, 44: 45–77.

BAYERL, K.-A., (1992): Zur jahreszeitlichen Variabilität der Oberflächensedimente im Sylter Watt nördlich des Hindenburgdammes. Mit. Forsch.- u. Techn. Zentr. Westküste, 135 S., 2, Büsum.

BERNER, H., (1981): Die Wattsedimente beiderseits der Norderhever. – Dipl. Arb. Geol. Inst. Univ. Kiel, 88 S. (unveröf.).

BERNER, H.; KAUFHOLD, H.; NOMMENSEN, B. & PRÖBER, C., (1986): Detaillierte Kartierung der Oberflächensedimente im mittleren und südlichen Nordfriesischen Wattenmeer. Meyniana, 38: 81–93.

BRESSAU, R. & SCHMIDT, R., (1979): Ergebnisse einer Auswertung von Bohrungen zur Frage der Sandbewegungen an der Westküste Schleswig-Holsteins. In: DFG-Forschungsbericht "Sandbewegung im Küstenraum", 64–80.

DIETZ, C. & HECK, H.-L., (1952): Geologische Karte von Deutschland 1:25000 Land Schleswig-Holstein: Erläuterungen zu den Blättern Sylt-Nord und Sylt-Süd. Landesanstalt für Angewandte Geologie, Kiel.

DITTMER, E., (1941a): Das nordfriesische Eem. Ein Beitrag zur Geschichte der junginterglazialen Nordsee. Kieler Meeresforschungen, 5(1): 169–199.

DITTMER, E., (1941b): Neue Ergebnisse zur Erforschung des nordfriesischen Eems. – Forschungen und Fortschritte, 17, (3): 25–27.

DITTMER, E., (1952): Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. Meyniana, 1: 138–168.

EHLERS, J., (1988): The Morphodynamics of the Wadden Sea. 379 S., Balkema Verlag.

EL-SAYED, M.-K., (1977): Tridimensional structure of bottom sediments off the island of Sylt, North Sea, F. R. Germany, with special reference to sedimentation and sand movement. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 184 S. (unveröf.).

ELROD, J.M., (1973): Sandtransport zwischen den Inseln Sylt und Amrum. Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, 64 S., (unveröf.).

ELWERT, D. & SCHNEIDER, W. M., (1979): Meeresspiegelschwankungen der Nordsee im Jungpleistozän und Holozän. – Abschlußbericht DFG-Forschungsvorhaben Sea-level Project, Gruppe Schleswig-Holstein.

FIGGE, K., (1998): Materialinventur an der deutschen Nordseeküste. – KFKI-Vorhaben FKZ 03 KIS 306, (unveröf.).

FERK, U., (1995): Folgen eines beschleunigten Meeresspiegelanstieges für die Wattgebiete

GRIPP, K. & BECKER, W., (1940): Untersuchungen über den Aufbau und die Entstehung der Insel Sylt – 2. Mittel-Sylt. Westküste, 2(H 2/3): 71–84.

GRIPP, K. & SIMON, G., (1940) : Untersuchungen über den Aufbau und die Entstehung der Insel Sylt – 1. Nord Sylt. Westküste, 2(H 2/3): 24–70.

HAYES, M.O., (1979): Barrier Island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMANN (Hrsg.): Barrier Islands.

HIGELKE, B., HOFFMANN, D. & MÜLLER-WILLE, M., 1982. Das Norderhever-Projekt – Beiträge zur Landschafts- und Siedlungsgeschichte der nordfriesischen Marschen und Watten. Offa, 39: 245–254.

HIGELKE, B., (1995): Abschlußbericht der Christian-Albrechts-Universität Kiel zur Ökosystemforschung Wattenmeer 1994/95 – "Sylter Wattenmeer Austauschprozesse" – Projekt B 4.2 a: "Sedimentbilanz der Wattflächen, Kartenauswertung und Luftbildanalyse", Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (Geographisches Institut), Kiel, (unveröf.).

HOFFMANN, D., (1988): Das Küstenholozän im Einzugsbereich der Norderhever, Nordfriesland. *In*: MÜLLER-WILLE, M., HIGELKE, B., HOFFMANN, D., MENKE, B., BRANDE, A., BOKELMANN, K., SAGGAU, H. E., & KÜHN, H. J., Das Norderhever-Projekt 1. Landschaftsentwicklung und Besiedlungsgeschichte im Einzugsgebiet der Norderhever. Offa-Bücher E, 66, 51–115.

HOFFMANN, D., (1974a): Aufbau und Alter der Marsch im Kern der Insel Sylt. Bericht der Römisch-Germanischen Kommission, 55(2): 378–385.

HOFFMANN, D., (1974b): Zum geologischen Aufbau der Hörnumer Halbinsel auf Sylt. Meyniana: 63–68.

HOSELMANN, C. & STREIF, H., (1997): Bilanzierung der holozänen Sedimentakkumulation im niedersächsischen Küstenraum. Z. dt. geol. Ges., 148 (3–4), 431–445.

HOSELMANN, C. & STREIF, H., (1998): 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.

KAUFHOLD, H., (1980): Geologisch-sedimentologische Kartierung der Watten und Seegaten im Bereich zwischen Hamburger Hallig und Nordstrandischmoor. Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel. (unveröf.).

KÖNIG, D., (1987): 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.

KÖSTER, R., (1974): Geologie des Seegrundes vor den Nordfriesischen Inseln Sylt und Amrum. Meyniana, 24: 27–41.

KÖSTER, R., (1980): Geologisches Gutachten zu den geplanten Küstenschutzmaßnahmen im südlichen nordfriesischen Wattenmeer – Kurzfassung. In: MELF (Editor), Schriftenreihe der Landesregierung Schleswig-Holstein – Gutachten zur geplanten Vordeichung der Nordstrander Bucht, 89–131.

KÖSTER, R.; AUSTEN, G.; AUSTEN, I.; BAYERL, K.-A.& RICKLEFS, K., (1995): Sylter Wattenmeer Austauschprozesse – Teilprojekt: Sedimentation, Erosion und Biodeposition, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel – Forschungs- und Technologiezentrum Westküste in Büsum, Kiel, (unveröf.).

LÜNEBURG, H., (1969): Sedimenthabitus und Sedimentdynamik in den Pieprinnen vor Büsum und im Hörnum Tief vor Sylt (Deutsche Bucht). Veröff. Inst. Meeresfor. Bremerhaven, 11(2): 137–164.

NOMMENSEN, B., (1982): Die Sedimente des südlichen nordfriesischen Wattenmeeres (Deutsche Bucht): Ergebnisse geologisch-Sedimentologischer Untersuchungen an pleistozänen und holozänen Sedimenten und an Schwebstoffen der Gezeitenströme. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, (unveröf.).

OSTENDORFF, E., (1943): Die Grund- und Bodenverhältnisse der Watten zwischen Sylt und Eiderstedt. Westküste, Kriegsheft: 1-6.

PESCH, R., (2000): Rekonstruktion der geologischen Entwicklung der Insel Sylt im Holozän mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems. Dipl.-Arb. Univ. Kiel, 90 S. (unveröf.).

PRANGE, W., (1967): Geologie des Holozäns in den Marschen des nordfriesischen Festlands. Meyniana, 17.

PREUSS, H.; VINKEN, R. & VOSS, H.-H., (1991): Symbolschlüssel Geologie. 328 S.

RENGER, E., (1979): Zweidimensionale Stabilitätsanalyse von Tidebecken und Watteinzugsgebieten größerer Ausdehnung. Die Küste, 34, 226–239.

SIMON, W., (1941): Der voralluviale Untergrund des nordfriesischen Wattenmeeres. Kieler Meeresforschungen, 5(H1).

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., (1998): Die geologische Küstenkarte von Niedersachsen 1:25.000 – eine neue Planungsgrundlage für die Küstenregion. Z. f. angew. Geol., 44 (H4).

STREIF, H., (1990): Das Ostfriesische Küstengebiet – Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. Samml. Geol. Führer, 57.

STREIF, H. & KÖSTER, R., (1978): Zur Geologie der deutschen Nordseeküste. – Die Küste, 32: 30–50.

TEMMLER, H., (1995): Neue Ergebnisse zum Aufbau des Eem-Interglazials in Nordfriesland. Meyniana, 47: 83–100.

TIETZE, G., (1983): Die deutsche Nordseeküste von der Eiszeit bis zur Gegenwart. Geowissenschaften in unserer Zeit, 1(5): 164–167.

TIETZE, G., (1984): Das Jungpleistozän und marine Holozän nach seismischen Messungen nordwestlich Eiderstedts/Schleswig-Holstein. N. Jb. Geol. Paläont. Abh, 169(1): 102–125.

WITEZ, P.; BOCK, S. & HOFSTEDE, J., (1998): Modelluntersuchungen zur morphologischen Stabilität des Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeressspiegelanstieg. BMBF Forschungsvorhaben MTK 0569 (unveröf.).

ANHANG

Residuals DGM Nordfriesland

Number of values:	1959916
Minimum:	-4.129
Maximum:	7.122
Mean:	-2.24823E-005
Standard error:	7.19550E-005
Standard deviation:	0.100

Residuals heutige Holozänbasis

Number of values	7720
Minimum	-3.237
Maximum	2.902
Mean	-0.0008
Standard error	0.002
Standard deviation	0.215

Residuals Holozänbasis zu Beginn der Transgression

Number of values:	6764
Minimum:	-3.237
Maximum:	2.906
Mean:	-0.0004
Standard error:	0.003
Standard deviation	0.206

Residuals des obersten Meters Sand

Number of values:	3496
Minimum	-31.0
Maximum	25.2
Mean	-0.00098
Standard deviation	3.451

Residuals des obersten Meters Klei

Number of values	3550
Minimum	-25.2
Maximum	27.32
Mean	-0.007
Standard deviation	3.546

Residuals der obersten zwei Meter Sand

Number of values	3411
Minimum	-34.66
Maximum	94.32
Mean	0.029
Standard deviation	3.56

Residuals der obersten zwei Meter Klei

Number of values	3411
Minimum	-89.4
Maximum	27.12
Mean	-0.07
Standard deviation	3.8587

Residuals der obersten drei Meter Sand

Number of values	3220
Minimum	-22.511
Maximum	82.111
Mean	0.0364
Standard deviation	3.229