

Geopotenzial Deutsche Nordsee

Modul B

Dokumentation Nr. 9

Erstellung von Baugrundschnitten in der deutschen Nordsee

Bearbeitet von: Dr. Michael Naumann, Claudia Schnabel, Joachim Fritz, Dirk Djuren

Schnittzeichnungen vom 03.09.2012 bis 23.04.2013

Team Modul B:

BSH: Dr. Manfred Zeiler, Maria Lambers-Huesmann, Wolf-Udo Laurer

LBEG: Dr. Carsten Schwarz, Joachim Fritz, Dr. Stefan Viola, Dirk Djuren, Dr. Michael Naumann

BGR: Dr. Lutz Reinhardt, Dr. Annemiek Vink, Claudia Schnabel

BGR Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

LBEG Landesamt für
Bergbau, Energie
und Geologie



Inhalt

	ab Seite
1 Einleitung	3
2 Begriffe/Abkürzungen	3
3 Aufgabenstellung	3
4 Datengrundlage und Auswertung	4
4.1 Geophysikalische Daten	4
4.2 Bohrdaten	6
4.3 Drucksondierungen (CPT-Messungen)	8
4.4 Tiefenlage der Quartärbasis	10
4.5 Vorkommen subglazialer Rinnensysteme	11
5 Schnitterstellung	11
5.1 Lage	11
5.2 Erstellung	12
6 Baugrundsituation in der deutschen Nordsee	14
6.1 Allgemeiner geologischer Aufbau	14
6.2 Regionalgeologische Besonderheiten und geotechnische Eigenschaften	19
7 Literatur	21

1 Einleitung

Mit dieser Dokumentation werden Datengrundlagen sowie die Vorgehensweise zur Erstellung von Baugrundschnitten beschrieben. Daraus abgeleitete Erkenntnisse zum Aufbau des Sedimentpakets bis 50 m Teufe im Untergrund des deutschen Nordseesektors werden beschrieben.

2 Begriffe/Abkürzungen

AWI	Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung, Außenstelle Sylt
AWZ	ausschließliche Wirtschaftszone
BDN	Bohrdatenbank Niedersachsen des LBEG
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	British Geological Survey
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CPT	Cone Penetration Testing (Drucksondierung)
DIN	Deutsche Industrienorm
GPDN	Geopotenzial Deutsche Nordsee
GIS	Geografisches Informationssystem
HPA	Hamburg Port Authority
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Schleswig-Holstein
TWT	Two Way Traveltime
WTD 71/FWG	Wehrtechnische Dienststelle 71/Forschungsanstalt für Wasserschall und Geophysik der Bundeswehr

3 Aufgabenstellung

Die Errichtung von Windenergieanlagen als Offshore-Bauwerke gehört zu den Baumaßnahmen mit hohen geotechnischen Schwierigkeitsgraden, da in Seegebieten die Eigenschaften des Baugrundes nicht an das Bauwerk angepasst werden können. Neben den Aspekten der Konstruktionsweisen und den Lastfällen, die in den Meeresboden eingebracht werden, spielt die Kenntnis der Baugrundverhältnisse eine entscheidende Rolle. Der Meeresboden in der deutschen AWZ der Nordsee stellt keinen homogenen Sedimentkörper dar, sondern kann auf Grund seiner geologischen Entwicklung sowohl regional als auch lokal sehr heterogen aufgebaut sein.

Aus diesem Grund sind Kenntnisse der örtlichen geologischen Verhältnisse und geotechnischen Eigenschaften des Untergrunds zwingend erforderlich, um eine erfolgreiche Realisierung von Offshore-Bauwerken (u.a. Windparks) sicherzustellen. Diese lokalen Verhältnisse können nur durch entsprechende örtliche Untersuchungen ermittelt werden. Aus diesen Untersuchungen über den Aufbau des Meeresbodens bis in mehrere Zehnermeter Tiefe, die sich auf die Interpretation von Bohrungen, Drucksondierungen (CPT) und geophysikalischen Messungen (Reflexionsseismik) stützen, kann ein konsistentes Baugrundmodell für ein Untersuchungsgebiet entwickelt werden. Die Zusammenschau der

Erkundungsergebnisse aus mehreren Untersuchungsgebieten in verschiedenen Teilen der AWZ ermöglicht danach einen ersten Überblick über die regionalgeologischen Besonderheiten des Untergrundes, der Lagerungsdichte und petrographischen Zusammensetzung der Sedimente bis in eine Tiefe von etwa 50 m.

4 Datengrundlage und Auswertung

4.1 Geophysikalische Daten

Im marinen Bereich wird bevorzugt die hochfrequente zweidimensionale Reflexionsseismik zur flächenhaften Kartierung geologischer Strukturen bis einige Zehnermeter Tiefe unter dem Meeresboden eingesetzt. Das Verfahren ermöglicht die Unterscheidung unterschiedlicher Faziesseinheiten in den unkonsolidierten oberflächennahen Sedimenten. Auch eiszeitliche und nacheiszeitliche Rinnensysteme, organogene Lagen (Torf) und Steine (als Reflexionshyperbeln im Seismikprofil sichtbar) können mit Hilfe von hochfrequenten seismischen Messsystemen identifizieren werden.

Im Rahmen der Projektarbeiten wurden die in der BGR und dem BSH digital vorhandenen hochfrequenten seismischen Messdaten (bis max. 80 m Eindringung bzw. 100 ms TWT) prozessiert, harmonisiert und qualitätsgesichert. Zusätzlich wurden neue Daten durch projekteigene Schiffsexpeditionen akquiriert. Der gesamte Datensatz wurde in den jeweiligen Datenbank- / Interpretationssystemen beider Institutionen abgelegt. Er umfasst unterschiedliche reflexionsseismische Daten (Sedimentecholot, Chirp-Sonar, Boomer, MiniAirGun, Sparker), die sich im Frequenzspektrum signifikant unterscheiden.

Für die Erstellung von Baugrundschnitten sind insbesondere Boomer- und MiniAirGun-Systeme von Bedeutung, deren Signaleindringung in der Regel eine Betrachtung der Lagerungsverhältnisse bis in ca. 50 m Teufe zulässt. Sedimentecholot und Chirp-Sonar können, je nach Sedimenttyp, Informationen bis etwa 15 m unter Meeresboden liefern. In Tabelle 1 sind die Schiffsexpeditionen und die dabei durchgeführten Boomer- und MiniAirGun-Messungen aufgeführt und in Abbildung 1 kartographisch dargestellt (blaue Liniensignatur). Die rote Liniensignatur kennzeichnet Profile, die für die Erarbeitung der Baugrundschnitte interpretiert wurden.

Tabelle 1: Auflistung von hochfrequenten Seismikdaten (Boomer, MiniAirGun) die im Rahmen des GPDN-Projekts prozessiert und qualitätsgesichert wurden.

Expedition	Zeitraum	Profilanzahl	System	Datenhalter
Atair 142	2006	14	Boomer	BSH
Gauss 388a	2002	19	Boomer	BSH
Gauss 403	2003	18	Boomer	BSH
Gauss 420	2004	18	Boomer	BSH
Gauss 441	2005	2	Boomer	BSH
Aurelia 04	2004	17	MiniAirGun	BGR, Uni Bremen
Franklin 07	2007	53	MiniAirGun	BGR, Uni Bremen
Celtic Explorer 09	2009	21	Boomer	BGR
Celtic Explorer 11	2011	95	Boomer	BGR
Celtic Explorer 11	2011	73	MiniAirGun	BGR, Uni Bremen

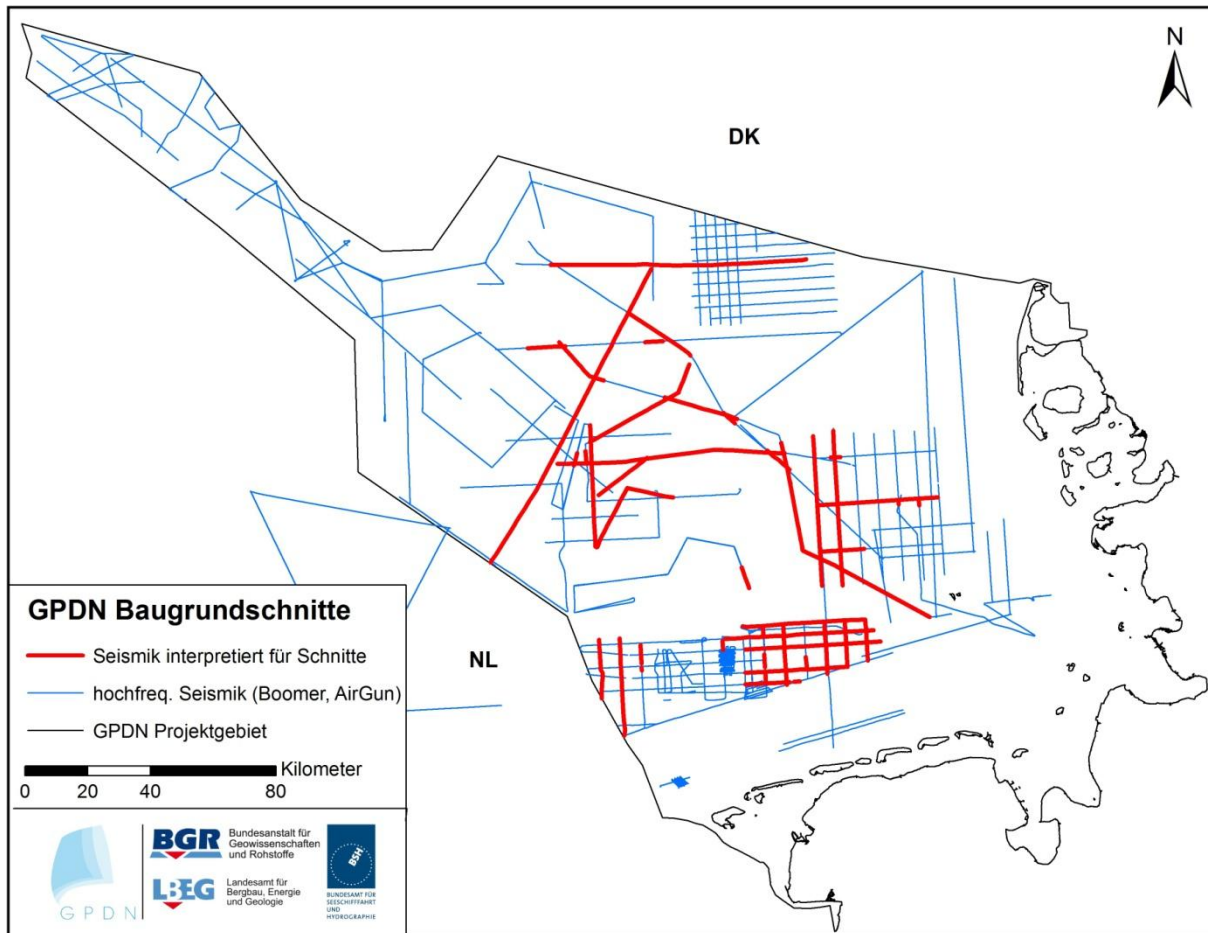


Abbildung 1: Lage von hochfrequenten Seismikdaten (Boomer, MiniAirGun / Frequenzbereich 300 – 3000 Hz) die im Rahmen des GPDN-Projekts prozessiert und qualitätsgesichert wurden. In roter Liniensignatur markierte Profile wurden für die Erstellung von Baugrundschnitten ausgewertet.

Die in den seismischen Profilen abgebildeten Reflektoren werden durch Impedanzkontraste hervorgerufen. Die Impedanz ist das Produkt aus Dichte und seismischer Geschwindigkeit des umgebenen Materials. Ändert sich demzufolge mindestens einer der beiden Faktoren, z.B. durch Lithologiewechsel, Änderung der Porenfüllung, entsteht ein Impedanzwechsel, der sich als Reflektor in den Messdaten abbildet.

Während der Interpretation konnten sechs unterschiedliche Reflektoren (seismische Horizonte) ausgewiesen werden, die sich an unterschiedlichen Positionen im deutschen Nordseesektor mit Bohrdaten und CPT-Messungen punktuell korrelieren ließen. Abbildung 2 zeigt die in den Baugrundschnitten vergebenen Liniensignaturen mit zugeordneter Bedeutung. Eine detaillierte Beschreibung zur Qualitätssicherung, zur Prozessierung und Interpretation der geophysikalischen Messungen ist als Dokumentation Nr. 8 „Bearbeitung und Interpretation hochauflösender Reflexionsseismik“ (SCHNABEL et al. 2013) erfolgt.

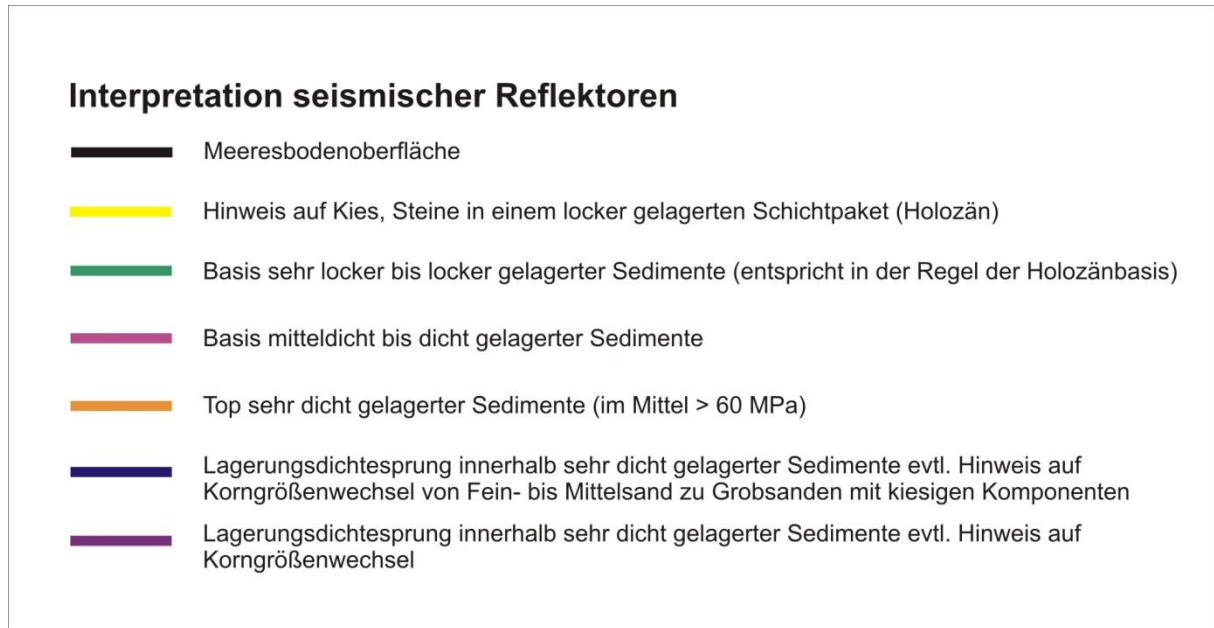


Abbildung 2: Farbcodierung der seismischen Reflektoren mit zugeordneter Bedeutung.

4.2 Bohrdaten

Im Rahmen der Projektarbeiten wurden insgesamt 11.260 Bohrungen aus den Datenbeständen von Behörden, Forschungseinrichtungen und der Industrie zusammengetragen und in die Bohrdatenbank Niedersachsen (BDN) des LBEG integriert (Stand: November 2012). Die Schichtbeschreibungen wurden einheitlich in den Symbolschlüssel Geologie (PREUSS et al. 1991) überführt und im SEP3-Format in der o.g. Datenbank abgelegt. Zur Interpretation geophysikalischer Daten konnten 2.266 Bohrungen genutzt werden, deren Lage sich jenseits der Inseln im Seegebiet der Nordsee befindet. Die übrigen Bohrungen befinden sich im Bereich des küstennahen Wattenmeeres und auf den Barriere-Inseln. Ein Großteil dieser 2.266 Bohrungen wurde mit Vibrationskernbohrgeräten abgeteuft, deren Eindringtiefe systembedingt maximal 6 m beträgt. Nur ein Bruchteil der Bohrungen erreichte Endteufen von mehr als 6 m. Abbildung 3 zeigt die Verteilung von Bohrungen im Nordseeraum, die hinsichtlich ihrer Endteufen in 6 farbigen Kreissignaturen klassifiziert sind. In Tabelle 2 sind die Datenhalter und die von ihnen bereitgestellte Anzahl an Bohrungen dargestellt. Tabelle 3 listet die Anzahl von Bohrungen, klassifiziert nach Endteufen, auf. Anhand der Karte (Abb. 3) und Tabelle 3 wird deutlich, dass nur eine geringe Anzahl an Bohrungen verwertbare Informationen über den geologischen Aufbau bis in 50 m Tiefe liefert, die dann zur Interpretation von Reflexionsmustern genutzt werden konnten.

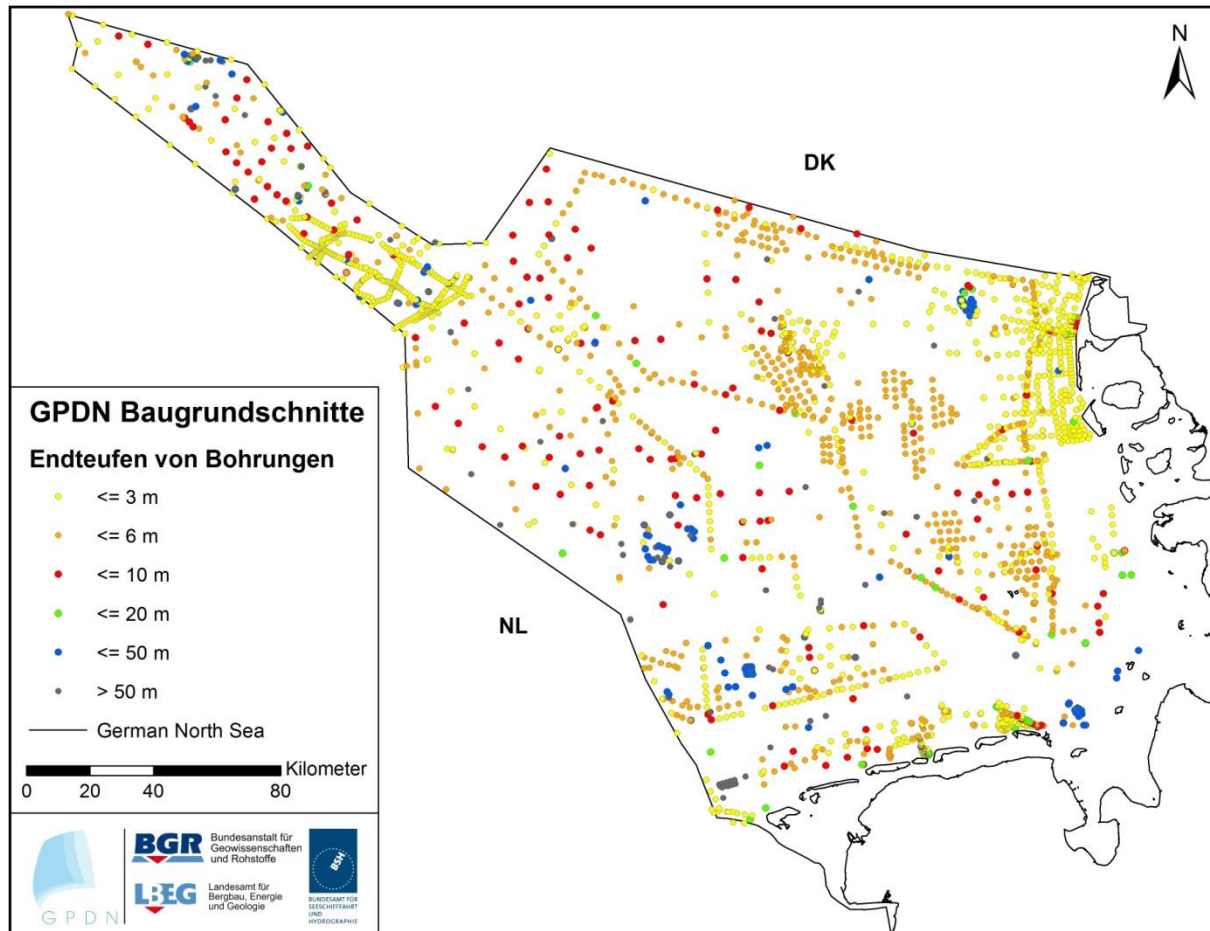


Abbildung 3: Lage von Bohrungen seewärts der vorgelagerten Inseln (Barriere-Inseln), die im Rahmen des GPDN-Projekts zur Verfügung standen. Die Endteufen der Bohrungen sind in 6 Klassen und entsprechend farbigen Punktsignaturen dargestellt. Die Klassen ≤ 10 m bis ≤ 50 m sind durch größere Punktdurchmesser hervorgehoben, da sie die wesentliche Datenbasis für die Erstellung von Baugrundschnitten darstellen.

Tabelle 2: Datenhalter und Anzahl der für das GPDN-Projekt bereitgestellten Bohrungen in der Nordsee

Datenhalter	Bohrungen
BSH	472
LBEG	1.183
BGS	1
WTD 71/FWG	10
BGR	380
BARD Engineering GmbH	1
LLUR	1
AWI	5
HPA	2
EnBW AG	28
WPD AG	26

EnergieKontor AG	12
GPDN (BGR, LBEG, BSH)	183

Tabelle 3: Klassifizierte Endteufen und entsprechende Anzahl der im GPDN-Projekt verfügbaren Bohrungen in der Nordsee.

Endteufe	Anzahl
< = 3 m	1.144
< = 6 m	708
< = 10 m	157
< = 20 m	47
< = 50 m	139
> 50 m	128

4.3 Drucksondierungen (CPT-Messungen)

Insgesamt standen 780 CPT-Messungen aus fünf Windparkprojekten im deutschen Nordseeraum aus dem Bau des Jade-Weser-Ports sowie aus Forschungsarbeiten im Jadebusen (Jadebusenprojekt 2009-2011) für Auswertungen zur Verfügung, um einen regionalen Überblick über Änderungen der Lagerungsdichte im Untergrund bis 50 m Teufe zu entwickeln. Zusätzlich wurden im Rahmen der projekteigenen Geländearbeiten an 113 Bohrungen in unterschiedlichen Schichtabfolgen 471 Handpenetrometer-Messungen durchgeführt. Diese Messungen erfolgten alle im Teufenbereich 0 – 6m und ergänzen die Datenlage in den oberflächennahen Schichten.

Die Drucksondierungen wurden mit den zugehörigen Aufschlussbohrungen korreliert und die Spitzendruckwiderstände in Anlehnung an Eurocode 7 (DIN EN 1997-2, 2010) klassifiziert. Dabei wurden die vier Lagerungsdichteklassen „sehr locker“ (0-2,5 MPa) und „locker“ (2,5-5 MPa) sowie „mitteldicht“ (5-10 MPa) und „dicht“ (10-20 MPa) zu zwei Klassen zusammengefasst (Abb. 4). Die fünfte und höchste Eurocode 7 – Klasse „sehr dicht“ (<20 MPa) wurde für die Bearbeitung des deutschen Nordsee-Sektors in zwei Klassen aufgeteilt, „sehr dicht“ (20-60 MPa) und „sehr dicht“ (im Mittel > 60-80 MPa).

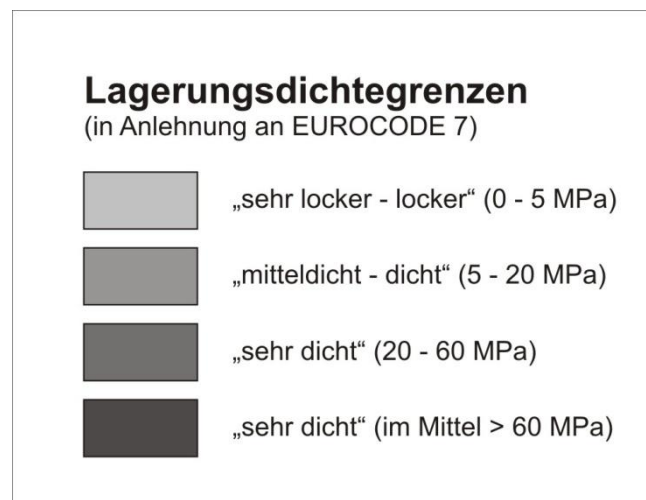


Abbildung 4: Klassifizierung der Lagerungsdichte für die Erstellung der Baugrundschnitte in Anlehnung an Eurocode 7 (DIN EN 1997-2, 2010).

Die Auswertung der verfügbaren CPT-Messungen ergab im Wesentlichen drei markante Bereiche von Messwerten im betrachteten Schichtbereich bis 50 m Teufe. Es zeichnet sich eine oberflächennahe Zone mit sehr lockerer bis lockerer Lagerung ab, die häufig nur geringe Mächtigkeiten aufweist und deshalb zusammengefasst wurde. Im Liegenden schließt sich ein wechselhafter Bereich von überwiegend mitteldichter und dichter Lagerung an. Der Übergang von lockeren zu deutlich höheren Lagerungsdichten vollzieht sich in der Regel innerhalb weniger Dezimeter bis Meter, so dass die Eurocode 7 – Klassen „mitteldicht“ und „dicht“ ebenfalls zugunsten der Übersichtlichkeit in den Baugrundschnitten zusammengefasst wurden. Sehr dichte Lagerung wurde häufig zwischen 10-15 m Teufe gemessen und ist als dritter markanter Bereich flächendeckend im geologischen Aufbau bis 50 m Teufe anzutreffen.

In einigen Regionen lässt sich zusätzlich jenseits 20 m Teufe im Untergrund ein sprunghafter Anstieg der Lagerungsdichte auf Werte von durchschnittlich über 60-80 MPa, mit einem Maximum von bis zu 130 MPa, feststellen. Dieser Befund führte zur weiteren Unterteilung der Eurocode 7-Klasse „sehr dicht“ (>20 MPa). Darüber hinaus sind auch aus weiteren Windparkprojekten, deren Daten im GPDN-Projekt nicht für eine Auswertung zur Verfügung standen, diese sehr hohen Lagerungsdichten bekannt (freundl. mündl. Mitteilung RIECKE et al. 2012). Abbildung 5 zeigt eine typische Drucksondierung aus dem nordwestlichen Teil des deutschen Nordseeraums, deren Spitzendruck diesen signifikanten Anstieg auf im Mittel über 60-80 MPa in Teufen größer als -35 m aufweist.

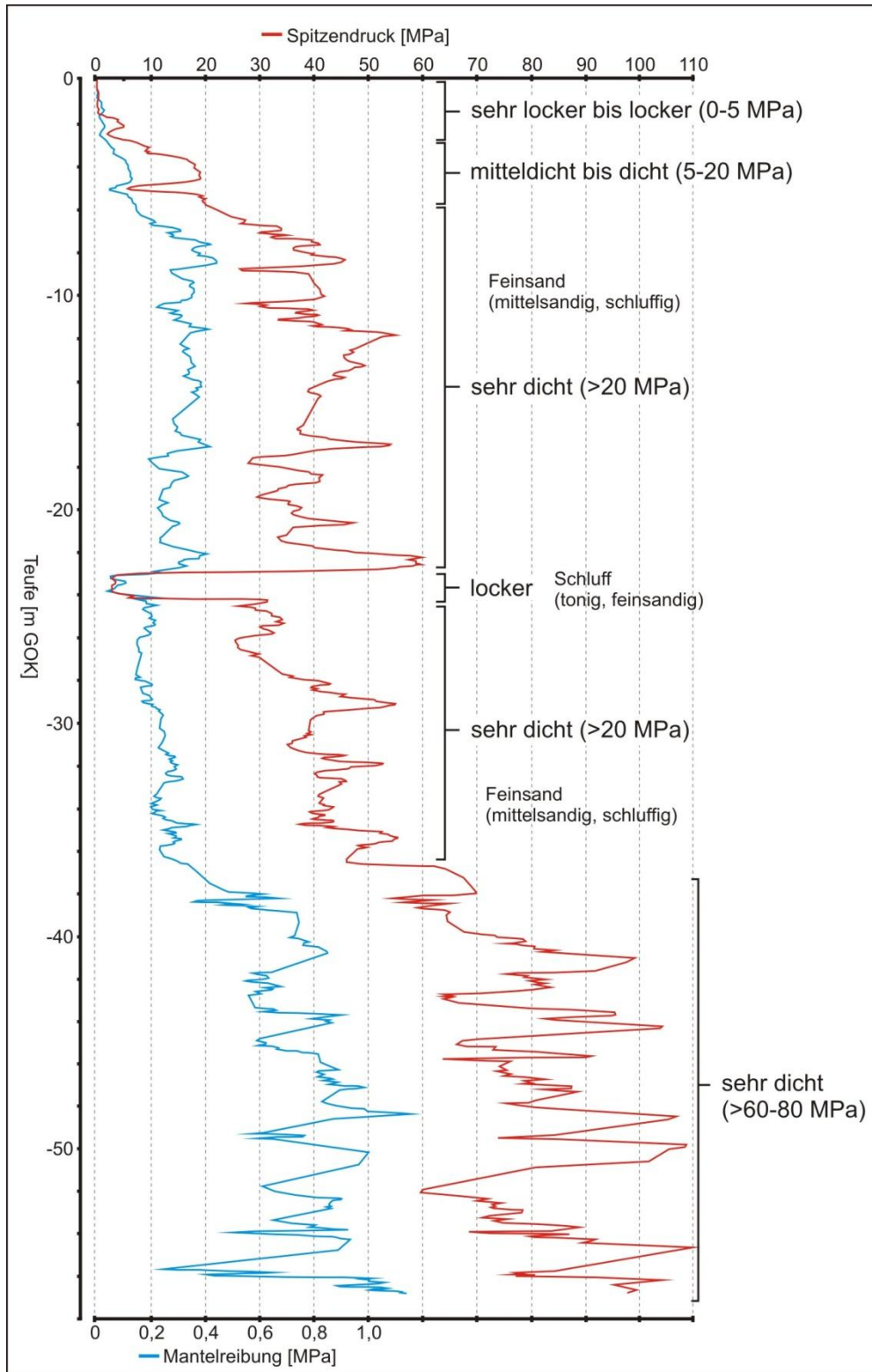


Abbildung 5: Beispiel einer typischen Drucksondierung (CPT) in der Nordsee mit klassifizierten Spitzendruckwiderständen in Anlehnung an Eurocode 7 (DIN EN 1997-2, 2010) sowie den ermittelten Korngrößen aus Proben der zugehörigen Aufschlussbohrung.

4.4 Tiefenlage der Quartärbasis

Ergänzend zu den beschriebenen Datengrundlagen wurde zusätzlich die Tiefenlage der Quartärbasis in m NN und die Mächtigkeit der quartären Schichtenfolge in den

Baugrundschnitten angegeben. Datengrundlage hierfür ist die flächenhafte Modellierung, die ebenfalls im Rahmen des GPDN-Projektes erstellt wurde (ASPRION et al. 2013a). In der Regel befindet sich die Quartärbasis in Teufen größer als 50 m (individueller Textvermerk mit konkreten Teufen- bzw. Mächtigkeitsangaben in der Legende der Baugrundschnitte), kann aber lokal auch geringere Teufen als 30 m erreichen und wurde in diesen Fällen in den Baugrundschnitten dargestellt.

4.5 Vorkommen subglazialer Rinnensysteme

Auf der Grundlage der Kartierungen von SCHWARZ (1996b) und LUTZ et al. (2009) wurden die im tieferen Untergrund auftretenden subglazialen Rinnensysteme in den Baugrundschnitten mit ihrer Ausdehnung und Verlaufsrichtung durch eine Liniensignatur gekennzeichnet.

5 Schnitterstellung

5.1 Lage

Für die Erstellung von Baugrundschnitten bestehen hohe Anforderungen hinsichtlich der Datenqualität und der Datendichte. Aus den verfügbaren Bohrdaten, CPT-Messungen und den seismischen Messungen konnten insgesamt 18 Baugrundschnitte mit einer Gesamtlänge von etwa 625 km erstellt werden. In Abhängigkeit von Umfang und Qualität der jeweiligen Datengrundlagen sind diese 18 Baugrundschnitte hinsichtlich ihres detaillierungsgrades unterschiedlich. In Tabelle 4 sind die jeweils integrierten Datengrundlagen und Profillängen aufgelistet sowie in Abbildung 6 die Lage der Baugrundschnitte kartographisch dargestellt.

Tabelle 4: Metadaten von veröffentlichten Baugrundschnitten.

Name	Geophysikalische Methode	Bohrungen [Anzahl]	CPT [Anzahl]	Profillänge [km]
Baugrundschnitt_1_N-S	Boomer mit Einkanalstreamer	13	nein	49,8
Baugrundschnitt_2_W-O	Boomer mit Einkanalstreamer	11	nein	42
Baugrundschnitt_3_W-O	Boomer mit Einkanalstreamer	9	nein	38,5
Baugrundschnitt_4_NW-SO	Mini AirGun mit Mehrkanalstreamer	20	nein	45,5
Baugrundschnitt_5_S-N	Mini AirGun mit Mehrkanalstreamer und Boomer mit Einkanalstreamer	15	nein	34,5
Baugrundschnitt_6_W-O	Boomer mit Einkanalstreamer und Mehrkanalstreamer	14	nein	74
Baugrundschnitt_7_N-S	Boomer mit Mehrkanalstreamer	5	10	39,5
Baugrundschnitt_8_SW-NO	Boomer mit Mehrkanalstreamer	3	10	21,5
Baugrundschnitt_10_W-O	keine Geophysikmessung	2	12	10,25
Baugrundschnitt_13_SO-NW	keine Geophysikmessung	4	17	10,5
Baugrundschnitt_15_SW-NO	Boomer mit Mehrkanalstreamer	17	nein	106,5
Baugrundschnitt_16_W-O	Boomer mit Mehrkanalstreamer	10	nein	81
Baugrundschnitt_17_S-N	Boomer mit Einkanalstreamer	2	nein	14,5
Baugrundschnitt_18_S-N	Boomer mit Einkanalstreamer	11	nein	31,25
Baugrundschnitt_19_NW-SO	keine Geophysikmessung	2	7	2,65
Baugrundschnitt_21_N-S	keine Geophysikmessung	6	16	11
Baugrundschnitt_24_W-O	keine Geophysikmessung	3	6	4,44
Baugrundschnitt_26_NW-SO	keine Geophysikmessung	5	21	7,8

Die farbigen Liniensignaturen und Strichstärken in Abbildung 6 stellen die verwendeten Datengrundlagen dar. Die Farbgebung kennzeichnet unterschiedliche geophysikalische Methoden, deren Informationsgehalt von rot über grün bis blau anwächst. MiniAirGun-Systeme kombiniert mit Multichannel-Boomerdaten (blaue und grüne Farbsignatur) stellen dabei die besten seismischen Methoden dar, die Untergrundverhältnisse zu differenzieren. Das AirGun System dringt tiefer in das Sediment ein, der Boomer liefert aufgrund des höheren Frequenzspektrums eine deutlich höhere Auflösung.

Eine dünne Strichstärke kennzeichnet Schnitte auf Basis von Geophysik und Bohrungen, für die mit dicker Linienstärke dargestellten Bereiche liegen zusätzlich Drucksondierungen vor. Teilweise lagen auch nur Bohrungen und Drucksondierungen vor (magentafarbige mitteldicke Signatur); letztere liefern für Baugrundfragestellungen in der deutschen Nordsee die detailliertesten bodenmechanischen Informationen.

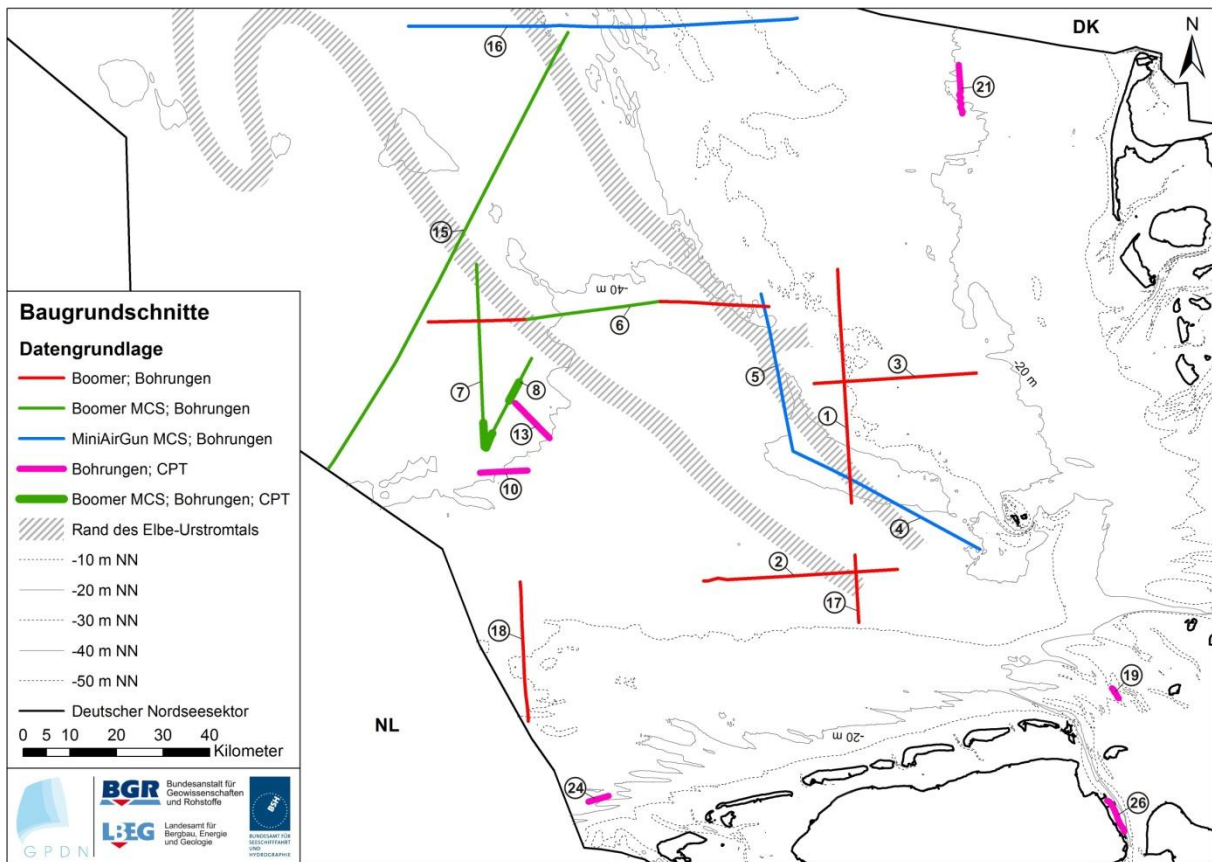


Abbildung 6: Lage der Baugrundschnitte, Kennzeichnung der verfügbaren Datengrundlagen durch farbige Liniensignaturen und unterschiedliche Strichstärken.

5.2 Erstellung

Die Schnitterstellung wurde mit dem Grafiksoftwarepaket *Corel Draw Version 14* der Firma COREL CORPORATION durchgeführt. Um einzelne Datengrundlagen graphisch exportieren zu können, wurde im Projektverlauf auch weitere Graphiksoftware genutzt.

Geophysikalische Daten aus BGR-Datenbanksystemen wurden mit dem Interpretationsystem *IESX-Geoframe* der Firma SCHLUMBERGER bearbeitet und als Bilddatei im jpg-Format jeweils als uninterpretiertes und als interpretiertes Profil exportiert. Bohrdaten und Drucksondierungen wurden aus der BDN als Microsoft Access-Datenbank exportiert und in das Bohrdatenverwaltungssystem *GeoDIN* der Firma FUGRO importiert. Aus diesem System wurden Darstellungen von Bohrsäulen, Schichtenverzeichnissen und Diagramme der Messwerte im dxf-Format (AutoCAD – Austauschformat) exportiert, um sie

als vektorisierte Grafiken in *Corel Draw* importieren zu können. Dieses erleichtert die weitere Bearbeitung in *Corel Draw* (Anpassungen von Größen, Farben, Schriftarten, etc.). So wurden zum Beispiel Schichtenverzeichnisse entsprechend der geotechnischen Fragestellung generalisiert (Schichten vergleichbarer Lithologie wurden zusammengefasst) und anschließend in den Schnitten dargestellt.

Die Schnittdarstellung erfolgte im einheitlichen Maßstab, um vergleichende Betrachtungen von Strukturen in den verschiedenen Schnitten zu ermöglichen. Aus der Vielzahl geophysikalischer Eingangsdaten, z.B. unterschiedliche Frequenzspektren, uneinheitliche Schusspunktstände, uneinheitliche Datenauflösung, ergab sich für die Illustration der Schnitte ein Längenmaßstab von 1:7.500 und ein Höhenmaßstab von 1:300. Als einheitliches Bezugsniveau wurde m NN gewählt und alle Daten wurden auf das im Projekt erstellte Bathymetriemodell (ASPRION et al. 2013b) bezogen.

Wie beispielhaft in Abbildung 7 als Ausschnitt aus einem Baugrundschnitt dargestellt, enthalten die Baugrundschnitte in der Regel drei Informationsebenen: 1.) Ergebnisse der geophysikalischen Messung, 2.) deren Interpretation sowie 3.) sedimentologische & ingenieurgeologische Daten.

Zunächst wird im oberen Teil die uninterpretierte geophysikalische Messung gezeigt, um einen Vergleich zwischen Rohdaten und Interpretation zu ermöglichen. Darunter folgt die interpretierte Seismik mit farbig eingezeichneten Reflektoren (seismische Horizonte), deren geologisch /geotechnische Deutung in der Legende erläutert wird (siehe Abb. 2). Im unteren Teil sind Bohrsäulen mit Schichtbeschreibungen dargestellt, die entsprechend der Fragestellung bzw. aus Darstellungsgründen teilweise vereinfacht werden mussten. In allen Fällen, in denen Drucksondierungen zur Verfügung standen, wurde auf Basis der klassifizierten Lagerungsdichteänderungen in Anlehnung an Eurocode 7 (DIN EN 1997-2, 2010) ein Baugrundschnitt erstellt. Zusätzlich sind in diesen Baugrundschnitten Informationen zur Tiefenlage der Basis von holozänen und pleistozänen Ablagerungen sowie deren Mächtigkeiten vermerkt. Die Ausrichtung tieferer, subglazialer Rinnensysteme sind mit einer Liniensignatur gekennzeichnet.

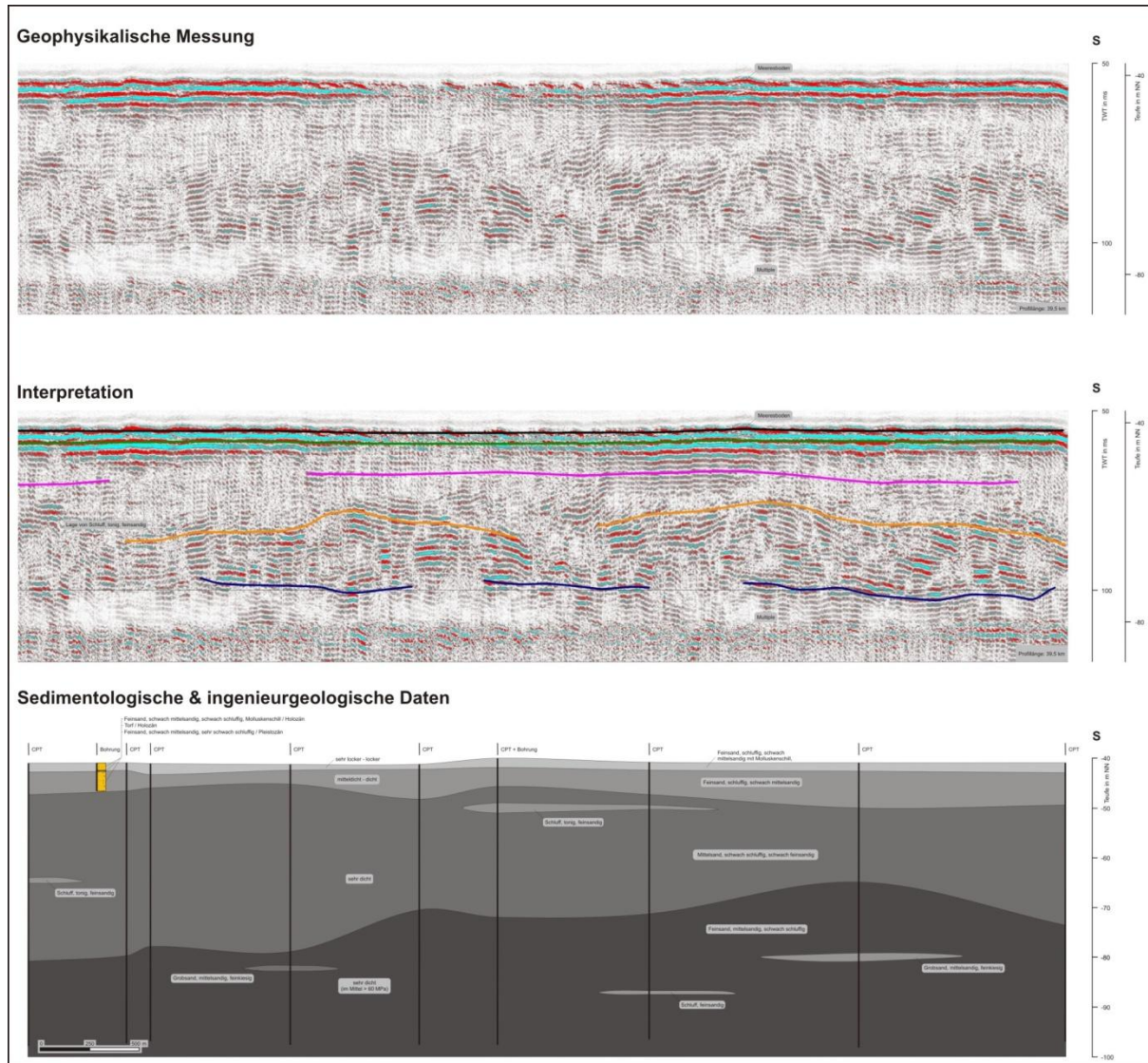


Abbildung 7: Ausschnitt aus einem Baugrundschnitt zur Verdeutlichung der verschiedenen Informationsebenen.

6 Baugrundsituation in der deutschen Nordsee

6.1 Allgemeiner geologischer Aufbau

Über einem Neogenen sehr feinkörnigen bis sandigen Deltakomplex, dessen Oberfläche von der Nordöstlichen deutschen Bucht in Richtung Südwesten abtaucht, finden sich quartäre marine, brackische, periglaziale, glazifluviatile, glazilimnische, subglaziale sowie holozäne Sedimente (SCHWARZ 1996a). Die Zusammensetzung und die Ablagerungsbedingungen der quartären und holozänen Sedimente sind maßgeblich für die Beschaffenheit des Baugrundes in der Nordsee. Grundsätzlich ähnelt der Aufbau des oberflächennahen Untergrundes bis etwa 50 m im südlichen Nordseebecken dem des angrenzenden Festlandbereiches. Unterschiede finden sich insbesondere in der Zusammensetzung und den Eigenschaften der holozänen Watt- und Brackwasserablagerungen am Meeresboden, die infolge der marinen Transgression abgelagert wurden und einen im Allgemeinen geringmächtigen Sedimentkörper mit sehr geringen Lagerungsdichten darstellen.

Festgestein tritt im deutschen Nordseeraum nur punktuell im Gebiet der Insel Helgoland zu Tage. Die Insel wurde durch salztektonische Prozesse im tieferen Untergrund gebildet,

indem Zechsteinsalze aus ursprünglichen Tiefen von circa 4000 m Tiefe bis etwa 700 m unter den Meeresboden aufgepresst wurden und auflagernde mesozoische Gesteine (Buntsandstein und Kreide) über den Meeresspiegel herausgehoben haben (SATTLER-KOSINOWSKI 1982). Alle anderen Bereiche der deutschen Nordsee sind von Lockersedimenten bedeckt.

Der überwiegende Flächenanteil der Nordsee ist mit quartären Ablagerungen bedeckt. Lediglich in Teilgebieten der Insel Sylt (Rotes Kliff) sowie in angrenzenden Seegebieten stehen miozäne Sande und pliozäne Kaolinsande an (EHLERS 2008). Die quartären Sedimente erreichen Mächtigkeiten bis über 1.000 m im nordwestlichsten Teil der AWZ (ASPRION et al. 2013a). Dazu gehören Ablagerungen des Pleistozäns, die durch wiederholtes Vordringen und Abschmelzen skandinavischer Inlandeismassen mit zwischengeschalteten marinen Transgressionen sedimentiert worden sind.

Dabei handelt es sich vorwiegend um Schmelzwasser- und Flussablagerungen (Fein- bis Mittelsand, kiesiger Sand) sowie Moränenmaterial (Geschiebelehm, Geschiebemergel), das vom skandinavischen Eis hinterlassen wurde. Innerhalb der pleistozänen Sedimentabfolge wurden in den Warmzeiten organische Schluffe abgelagerte und Torfe gebildet.

Zusätzlich bedecken spätweichsel- bis holozänzeitliche marine Sedimente das Gebiet, die im Zuge des postglazialen Meeresspiegelanstiegs seit etwa 18.000 Jahren akkumulierten.

In diesem Zeitraum stieg der Nordseespiegel um ca. 130 m auf das heutige Niveau an (SHACKELTON 1987), begleitet von Erosion und Aufarbeitung der pleistozänen Ablagerungen und einer landwärts gerichteten Materialumlagerung.

In der Nordsee erreichte der postglaziale Meeresspiegelanstieg bereits vor ca. 6000 Jahren den Niedersächsischen Küstenraum in einem Niveau von ca. -6 m NN (BEHRE 2003; BUNGENSTOCK 2005). Beim weiteren Anstieg oszillierte die Küstenlinie in wiederholten landwärts bzw. seewärts gerichteten Schüben, bis sie ihre heutige Position erreichte.

Der steigende Meeresspiegel führte zunächst zur Vernässung und Versumpfung weiter Gebiete mit Torfbildungen (Basaltorfe). Danach gerieten diese Gebiete unter den Einfluss von Salzwasser und Tidebewegungen, dabei wurden Brackwasser- und Wattsedimente abgelagert. Häufig führten verstärkt einsetzende Tiedebewegungen, Seegang und Brandung dazu, dass die zuvor abgelagerten holozänen Sedimente, der Torf sowie Teile der darunter anstehenden pleistozänen Schichten erodiert wurden. Gerade im Küstenraum sind daher in kurzer räumlicher Distanz rasche Mächtigkeitsschwankungen der holozänen Ablagerungen zu erwarten.

Die Holozän-Mächtigkeit kann von wenigen Zentimetern im nordwestlichen Teil der AWZ bis hin zu mehreren Zehnermetern im Akkumulationskeil des Küstensaumes betragen.

Im Küstenraum steigt die Mächtigkeit der holozänen Deckschicht in der Regel von der -20 m NN Linie (Meeresboden) in Richtung der vorgelagerten Barriere-Inseln und dem Außenrand der Watten rasch an. Sie keilen gegen das pleistozäne Hinterland der Geest aus.

Beispielsweise beträgt die Schichtmächtigkeit im Untergrund der Insel Norderney 40 m, unter Borkum 34 m und unter Spiekeroog 22 m. In Erosionsräumen können die marinen Deckschichten auch gänzlich fehlen und es stehen pleistozäne Bildungen unmittelbar am Meeresboden an.

Basierend auf der quartären Entwicklung des Nordseeraums sind folgende Sedimenttypen zu erwarten. Eine Zusammenstellung von STREIF (2003) liefert wesentliche Grundlagen.

Charakterisierung der Sedimenttypen

1. Pleistozäne Lockergesteine

• eiszeitliche Schmelzwasser- und Flusssande (kiesiger Sand, Fein- bis Mittelsand):

Dieser Sedimenttyp ist im oberflächennahen Untergrund (bis 50 m Teufe) der Nordsee am weitesten verbreitet und erreicht relativ große Mächtigkeiten (mehrere Zehnermeter).

Hierbei dominieren gleichkörnige Fein- und Mittelsande, wobei partiell auch ungleichkörnige, zum Teil kiesige Sande anzutreffen sind. Dieses gröberen Sande wurden von Schmelzwasserströmen abgelagert, die am Rand des vorrückenden oder abschmelzenden Inlandeises austraten. Dabei gelangten auch Kiese und Steine zum Absatz, die im Gletschereis mitgeführt wurden.

Die Flusssande wurden ebenfalls in den Kaltzeiten abgelagert, als sich die Unterläufe von Ems, Weser, Elbe und Eider über die heutigen Festlandsgrenzen hinaus weit auf den Schelf erstreckten. Durch den längeren Transportweg und das geringe Gefälle der Flüsse wurde dabei nur relativ feinkörniges und gut sortiertes Material abgesetzt. Zusätzlich haben nach Deposition kleinräumige äolische Umlagerungen stattgefunden. Generell sind diese Sandablagerung als „gut tragfähig“ einzuschätzen.

Bodenklasse nach DIN 18311: NB 1, NB 2, NB 3
 Bodengruppe nach DIN 18196: SW, SE

• Geschiebelehm, -mergel (stark sandig-toniger Schluff mit Kies, Steinen und Blöcken):

Das Material besteht aus einer feinkörnigen Matrix aus Ton, Schluff und Sand mit in wechselnder Häufigkeit enthaltenen Kiesen, Steinen bis Blöcken, die mehrere Meter Durchmesser erreichen können. Die grobkörnigen Bestandteile werden auch mit dem Begriff Geschiebe zusammengefasst. Genetisch wird das Material als Geschiebelehm bzw. Geschiebemergel bezeichnet und Moränenablagerungen im Zuge der Vereisungen zugeordnet. Diese gemischtkörnigen Ablagerungen weisen eine steife bis feste Konsistenz auf.

Es wurde im Nordseegebiet während der Elster-Kaltzeit und dem Saale-Komplex mit dem nach Süden vordringenden Inlandeis über lange Transportwege aus Skandinavien und dem Baltikum herantransportiert und an der Sohle und Gletscherfront abgelagert bzw. vom abschmelzenden Eis hinterlassen. Die Weichsel-Kaltzeit als jüngste Vereisung hat dann den deutschen Nordseesektor nicht mehr erreicht. In der Nacheiszeit wurden im Rahmen des Meeresspiegelanstiegs und im Zuge der daraus resultierenden Transgression des Meeres die am Nordseeboden anstehenden Sedimente aufgearbeitet und teilweise erodiert. Feine Gemengeanteile wurden dabei abtransportiert, während Grobmaterialien in situ zurückblieben. Diese werden als Restsediment bezeichnet. Stellenweise entstanden dabei ausgedehnte Steinpflaster und Anhäufungen großer Gesteinsblöcke.

Derartige Beispiele sind vorrangig im nordöstlichen Teil der AWZ vor der Küste Schleswig-Holsteins anzutreffen. Weitere Gebiete sind der sogenannte *Steingrund* im Osten der Insel Helgoland und *Borkum Riffgrund* im Gebiet zur niederländischen AWZ-Grenze.

Insgesamt ist die Verbreitung von Geschiebelehm und -mergel im Nordseeraum eher gering und lückenhaft. Die Mächtigkeiten variieren stark und betragen i.d.R. weniger als 5 m.

Beim Bohren und Rammen von Pfählen ist in diesen Schichten mit größeren Steinen zu rechnen.

Bodenklasse nach DIN 18311: BOB 3, BOB 4, S
 Bodengruppe nach DIN 18196: SU, ST, UL, TL

• Lauenburger Fazies (toniger Schluff bis Ton):

Als „Lauenburger Fazies“ bezeichnet man einen Sedimenttyp aus feingeschichtetem Schluff und Ton in dunkelgraubrauner bis schwarzgrauer Färbung mit teilweise eingeschalteten mm-dicken Feinsandlagen. Die Ablagerungen weisen in der Regel mehr als 5 m Mächtigkeit auf, sind von steifer bis halbfester Konsistenz und kalkhaltig. Der obere Meter ist oft entkalkt. Dieser Sedimenttyp ist von Schmelzwasserflüssen als Suspensionsfracht (Gletschertrübe) antransportiert und im Stillwasserbereich ehemaliger Seebecken und Rinnen sedimentiert worden. Aufgrund dieser Ablagerungsbedingungen ist das Material scharf (steil einfallend) gegen benachbarte Schichten abgegrenzt.

Zudem kann das Material durch jüngere Eisstauchung während der Kaltzeiten des Saale-Komplexes aus seinem ursprünglichen Verband herausgelöst und in sandige Begleitschichten eingepresst worden sein. Beides führt zu kleinräumig wechselnden Boden- und Baugrundverhältnissen. Aufgrund der überwiegend feinkörnig-bindigen Komponenten ist Material der „*Lauenburger Fazies*“ relativ schwer zu erodieren. Es bildet im Bereich von Tiderinnen stellenweise isolierte Hochlagen, die einige Meter aus den umgebenden sandigen Schichten herausragen.

Solche Vorkommen sind aus dem Seegat der Accumer Ee zwischen den Inseln Baltrum und Langeoog sowie aus der Außenems bekannt.

Bodenklasse nach DIN 18311: BOB 3, BOB 4
 Bodengruppe nach DIN 18196: UL bis TA

2. Spätglaziale und holozäne Ablagerungen/Bildungen

• Moorbildungen, Ablagerungen von Binnenseen (Torfe, Mudden - organische Böden):

Torfe und Mudden kommen in fleckenhaften Verteilungsmustern als wenige Dezimeter dicke Schichten vor. Sie treten als so genannter Basaltorf (autochthon) bzw. als basale Mudden an der Grenzfläche zwischen pleistozänen Sedimenten im Liegenden und holozänen Meeres- bzw. Küstenablagerungen im Hangenden auf. Zusätzlich können Torfe auch als erodierte/umgelagerte Reste (allochthon) innerhalb der holozänen Sedimentabfolge auftreten. Diese organischen Bildungen waren im Zuge der holozänen Küstenentwicklung zeitweilig von einigen Metern mächtigen Flachwasser- /Strandsanden überdeckt, die anschließend größtenteils wieder abgetragen wurden. Aufgrund dieser temporären Überlagerung sind die Torfe und Mudden in der Regel entwässert und verfestigt. Ihre Tragfähigkeit ist sehr gering. Örtlich enthaltene Baumstämme (Driftholz und Baumstubben) können bei Erd-, Gründungs- und Bohrarbeiten Hindernisse darstellen.

Bodenklasse nach DIN 18311: BOB 1, BOB 2
 Bodengruppe nach DIN 18196: HN, HZ, F

• Klei (toniger Schluff mit Feinsandlagen bis schluffiger Ton):

Holozäne bindige Ablagerungen, ortsüblich als „Klei“ bezeichnet, sind durch eine stark variierende Kornzusammensetzung gekennzeichnet. Sie reicht vom schluffigen Ton bis zu feinsandigem, tonigem Schluff. Dieses Material kann zum Teil organische Beimengungen sowie dünne Sandlagen enthalten. Das Vorkommen dieses Sedimenttyps ist vorrangig an die Küstenzone und in besonderem Maße an rückseitige Standorte der Barriere-Inseln (Wattenmeer) gebunden. Die Ablagerung steht in engem räumlichem Bezug zu basalen Torf- und Muddeschichten. Die Mächtigkeiten schwanken von wenigen Dezimetern bis hin zu einigen Metern in den Marschen, also im landwärts angrenzenden Küstenraum.

Dieser Sedimenttyp kann unterschiedliche Konsistenzen aufweisen, die von breiig bis steif reichen. Ähnlich wie Torfbildungen können die Ablagerungen durch temporäre Überlagerung stark kompaktiert worden sein. Damit sind die bei der Entwässerung frischer Kleischichten üblicherweise zu erwartenden unregelmäßigen Setzungen in diesen Fällen bereits weitgehend abgeschlossen.

Bodenklasse nach DIN 18311: BOB 1, BOB 2
 Bodengruppe nach DIN 18196: UL, UM, TL, OU, OT

• Watt-, Rinnenablagerungen:

Die holozänen Watt- und Rinnenablagerungen bestehen aus mehr oder weniger schluffigem Fein- und Mittelsand, in dem dünne Kleischichten und –lagen enthalten sein können. Diese Sedimente sind als nichtbindige Ablagerungen einzustufen. Örtlich kann Driftholz auftreten. Die Wattsande sind in der Regel locker, örtlich auch sehr locker, die Rinnensande locker, z.T. mitteldicht gelagert. Diese Bodenarten sind gering bis mittel tragfähig. Aufgrund der enthaltenen Kleilagen ist bei Belastung dieser Böden durch Bauwerke mit unregelmäßigen Setzungen zu rechnen. Die örtlich enthaltenen Baumstämme (Driftholz) können bei Erd-, Gründungs- und Bohrarbeiten Hindernisse darstellen.

Bodenklasse nach DIN 18311: NB1, NB2
Bodengruppe nach DIN 18196: SU, SÜ*

• Strand-, Schelfsande und Rinnensand:

Holozäner Sand besteht aus Mittel- bis Grobsand mit kiesigen Beimengungen, örtlich sind einzelne Steine eingebettet. Die Sande sind überwiegend locker, z.T. mitteldicht gelagert. Diese Sedimente wurden in Tiederinnen unter dem Einfluss von Gezeitenströmungen bzw. im Vorstrandbereich der Inseln unter Einwirkungen von Seegang und Brandung abgelagert. Partiiell enthalten sie größere Mengenanteile von umgelagertem und resedimentiertem Pleistozänmaterial.

Bodenklasse nach DIN 18311: NB1, NB 3, NB 5
Bodengruppe nach DIN 18196: SW, GW, GE

Je nach Alter sind die Eigenschaften pleistozäner Schichten durch spätere Überdeckung verändert worden, was sich auf ihre Tragfähigkeit auswirkte. So wurden die Ablagerungen des Holstein-Interglazials beim späteren Überfahren durch das bis mehrere hundert Meter mächtige Inlandeis des Saale-Komplexes vorbelastet und konsolidiert. Ablagerungen des Eem-Interglazials wurden dagegen nur durch die Auflast des darüber liegenden Bodens vorbelastet und sind daher weniger stark konsolidiert.

Die lithostratigraphische Abgrenzung der pleistozänen gegen die holozänen Ablagerungen konnte in Bohrkernen auch mit Hilfe der Handpenetrometermessungen eindeutig identifiziert werden, da die pleistozänen Ablagerungen gegenüber den jungen marinen holozänen Sedimenten eine deutliche höhere Lagerungsdichte aufweisen. Insgesamt sind die holozänen Lockerablagerungen für das Abtragen von Lasten aus Bauwerksgründungen nur bedingt geeignet.

6.2 Regionalgeologische Besonderheiten und geotechnische Eigenschaften

Für die geotechnische Betrachtung des Untergrundes bis 50 m Tiefe im deutschen Nordseeraum deutet sich eine Unterteilung in drei Regionen an. Die Differenzierung beruht auf unterschiedlichen regionalgeologischen Ablagerungsbedingungen im jüngsten Pleistozän und Holozän.

Abbildung 8 zeigt den deutschen Nordseesektor mit den markierten Gebieten 1 - westliche Deutsche Bucht, 2 - Elbe-Urstromtal und 3 - dem östlichen Teil der deutschen Bucht, die im nachfolgenden Teil näher beschrieben werden.

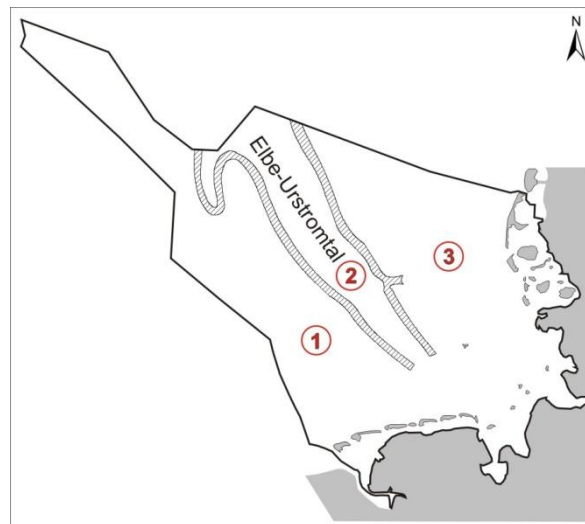


Abbildung 8: Gebiete ähnlicher geologischer Entwicklung seit dem jüngsten Pleistozän /Holozän (1 - westliche Deutsche Bucht, 2 - Elbe-Urstromtal, 3 - östliche Deutsche Bucht).

1 – westliche Deutsche Bucht

Dieses Teilgebiet ist relativ homogen aus Sandablagerungen aufgebaut, die im Wesentlichen glazi-fluviatil abgelagert und anschließend im Zuge der Transgression marin überprägt wurden. Grobklastische Ablagerungen treten nur im südwestlichen Teil, dem Borkum-Riffgrund auf. Diese wurden von LABAN (1995) als Restsedimente von Geschiebemergelablagerungen des Drenthe-Eisvorstoßes eingestuft. In der westlichen Deutschen Bucht sind bindige Ablagerungen eher selten und geringmächtig ausgeprägt.

Die holozäne Deckschicht weist Mächtigkeiten von wenigen Zentimetern bis etwa 3 Meter auf. Im Maximum werden Werte von bis zu 8 Meter erreicht, wobei diese Größen eher Ausnahmen bilden. Diese Sedimente wurden im Zuge des postglazialen Meeresspiegelanstiegs aufgearbeitet und abgelagert.

Seismische Profile zeigen in diesem Schichtpaket häufig Rinnenbildungen, die nur wenige Meter in liegende pleistozäne Ablagerungen einschneiden. Bohrkern zeigen eine hauptsächlich sandige Verfüllung an. Insgesamt ist die holozäne Sedimentation in der Regel locker bis sehr locker, selten mitteldicht gelagert.

In den interpretierten seismischen Profilen wird der grün markierte Reflektor (vgl. Abb. 2 und 7) als Basis der holozänen Sedimente interpretiert.

Pleistozäne Sedimente weisen eine deutlich höhere Lagerungsdichte auf. Die Basis der mitteldicht bis dichten Lagerung wird in Teufen zwischen 4-11 m unter der Meeresbodenoberfläche erreicht. Zum Liegenden hin steigt die Lagerungsdichte weiter an.

Ein besonderes Merkmal für dieses Gebiet ist der sprunghafte Anstieg der Lagerungsdichte auf Werte von über 60-80 MPa, mit Spitzenwerten von über 100 MPa. Dieser Wertebereich wird im südlichen und nördlichen Teil nachgewiesen (vgl. Baugrundschnitte Nr. 7, 8, 10, 13, 24).

Informationen aus umliegenden Windparkprojekten (z.B. RIECKE et al. 2012) lassen den Schluss zu, dass in der gesamten Region westlich des Elbe-Urstromtals diese Verhältnisse verbreitet sind. Diese hohe Lagerungsdichte von über 60-80 MPa wird in Teufen zwischen 22 m bis 60 m unter der Meeresbodenoberfläche erreicht kann aber auch an einigen Standorten gänzlich fehlen.

Sedimentologisch handelt es sich bei dem sehr dicht gelagertem Sedimentpaket (> 20 MPa) um Feinsand mit mittelsandigen, schluffigen, vereinzelt grobsandigen, kiesigen Nebengemengeanteilen. Aus den Aufschlußbohrungen ergibt sich, dass der sprunghafte Anstieg der Lagerungsdichte innerhalb dieses Paketes nicht an eine substanzielle lithologische Änderung geknüpft ist. Es fehlen hier lediglich die Nebengemengeanteile von Mittel- und Grobsand bzw. Kies.

Nach den im GPDN-Projekt verfügbaren Erkenntnissen werden diese hohen Werte von über 60-80 MPa dagegen nicht in den östlichen und südöstlichen Teilgebieten der Nordsee im Untergrund bis 50 m erreicht (vgl. Baugrundschnitte Nr. 19, 21, 26).

Ein genereller Überblick über den westlichen Teil des Deutschen Nordseesektors kann in den Baugrundschnitten Nr. 2, 6, 7, 8, 10, 13, 15, 17, 18, 24 gewonnen werden.

2 – Elbe-Urstromtal (Zentralteil)

Das Elbe-Urstromtal stellt eine große weichselzeitliche Rinnenstruktur dar. Es diente als Vorfluter von Elbe und Weser. Zusätzlich entwässerten Schmelzwasserrinnen von Schleswig-Holstein in dieses Flusssystem. Es erstreckt sich südsüdost-nordnordwest gerichtet mit einer Breite von etwa 30-40 km im Zentrum der Deutschen Bucht und wurde von FIGGE (1980) mit Hilfe von Sedimentecholotaufnahmen auskartiert. Die südliche und westliche Anbindung in Richtung Festland lässt sich nach FIGGE (1980), vermutlich aufgrund der Materialaufarbeitung im Zuge der nachfolgenden Transgression, nicht weiter verfolgen. Mit Blick auf die Bathymetrie (siehe ASPRION et al. 2013b) wird die Struktur im Osten von Auftragungen begrenzt, die von PRATJE (1951) sowie OELE & SCHÜTTENHELM (1979) saalezeitlichen Moränenzügen zugeordnet werden, während sich nach Westen eine relativ strukturlose Ebene anschließt.

Die Rinnenstruktur ist im Zentrum bis etwa 15 m in das Liegende eingeschnitten und feinklastisch bis sandig verfüllt. Im Liegenden werden pleistozäne Sandabfolgen mit höherer Lagerungsdichte vermutet, wie sie auch in den benachbarten Teilgebieten auftreten. CPT-Daten aus diesem Gebiet standen im GPDN-Projekt nicht für Auswertungszwecke zur Verfügung.

Repräsentative Baugrundschnitte für dieses Gebiet sind Nr. 6,15,16.

3 – östliche Deutsche Bucht

Im Vergleich zum Gebiet westlich des Elbe-Urstromtals ist das Seegebiet vor der Schleswig-Holsteinischen Küste deutlich heterogener aufgebaut. Dieses lässt schon ein Blick auf die Kartenwerke zur Sedimentverteilung am Meeresboden vermuten, in denen grobklastische Materialien nordöstlich der Insel Helgoland (Steingrund), an der dänischen Grenze und entlang der Ostflanke des Elbe-Urstromtals kartiert sind und auf ehemalige Eisrandlagen hindeuten. Wie bereits beschrieben, sind diese Ablagerungen nach PRATJE (1951) sowie OELE & SCHÜTTENHELM (1979) saalezeitlichen Ursprungs.

Während der Interpretation seismischer Messungen fielen in diesem Gebiet unterhalb des Meeresbodens häufig kleinräumige starke Reflektoren und Diffraktionshyperbeln auf, die auf Grobklastika hindeuten.

Pleistozäne und frühholozäne Rinnenbildungen sind in der Regel zwischen 10-15 m, seltener bis 40 m eingeschnitten und stellen ehemalige größere Entwässerungsrinnen dar (vgl. z.B. Baugrundschnitte Nr. 1, 3, 4). Als Füllung dieser Rinnen dominiert nach unseren Auswertungen in der Regel Feinsand mit schluffig, schwach kiesigem Nebengemenge.

Zusätzlich treten in diesem Gebiet häufiger bindige Lagen (Schluff und Ton) von bis zu 5 m Mächtigkeit und mehreren hundert Metern horizontaler Ausdehnung auf (vgl. z.B. Baugrundschnitt Nr. 21). Diese glazilimnischen Ablagerungen weisen eine weiche bis steife Konsistenz auf.

Aufgrund des heterogeneren geologischen Aufbaus variieren die Lagerungsdichteverhältnisse in diesem Gebiet deutlich stärker als in der westlichen Deutschen Bucht.

Die Basis der locker gelagerten Ablagerungen schwankt zwischen 0,5 m und etwa 22 m unter der Meeresbodenoberfläche. Ähnlich verhält sich die Basis der dicht gelagerten Sedimente, die zwischen 2-23 m GOK schwankt und im Mittel zwischen 6-15 m mächtig ist. Extreme Lagerungsdichten von über 80 MPa konnten in den im GPDN-Projekt zur Verfügung stehenden Datensätzen nicht beobachtet werden.

In den Baugrundschnitten Nr. 1, 3, 4, 5, 6, 16, 21 sind die charakteristischen Baugrundverhältnisse in diesem Gebiet dargestellt.

7 Literatur

- ASPRION, U.; GRIFFEL, G.; ELBRACHT, J. (2013a): Die neue Quartärbasis im deutschen Nordseesektor und im Küstenbereich der deutschen Nordsee. – Produktdokumentation des GPDN Projektes, LBEG, Hannover, 10 S.
- ASPRION, U.; SBRESNY, J. GRIFFEL, G.; ELBRACHT, J. (2013b): Die Bathymetrie der deutschen Nordsee – Erstellung der projektweiten Bezugsfläche. – Produktdokumentation des GPDN Projektes, LBEG, Hannover, 9 S.
- BEHRE, K.E. (2003): Eine neue Meeresspiegelkurve für die südliche Nordsee. Transgressionen und Regressionen in den letzten 10.000 Jahren. - Probleme der Küstenforschung im südlichen Nordseegebiet, 28, 9-63.
- BUNGENSTOCK, F. (2005): Der holozane Meeresspiegelanstieg südlich der ostfriesischen Insel Langeoog, südliche Nordsee - hochfrequente Meeresspiegelbewegungen während der letzten 6000 Jahre. – Dissertation, Universität Bonn, 122 S.
- DIN EN 1997-2 (2010): Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrundes; Deutsche Fassung EN 1997:2007 + AC:2010, 198 S.
- DIN 18311 (2010): VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) – Nassbaggerarbeiten. – DIN Deutsches Institut für Normierung e.V. [Hrsg.]: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 15 S.
- DIN 18196 (2011): Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. – DIN Deutsches Institut für Normierung e.V. [Hrsg.]: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 6 S.
- SCHNABEL, C.; REINHARDT, L.; LAURER, U.; ZEILER, M. (2013): Bearbeitung und Interpretation hochauflösender Reflexionsseismik. - Geopotenzial Deutsche Nordsee, Modul B - Dokumentation Nr. 8, LBEG – BSH – BGR, Hannover/Hamburg, 16 S.
- EHLERS, J. (2008): Die Nordsee – Vom Wattenmeer zum Nordatlantik. – Primus Verlag, 176 S.
- FIGGE, K. (1980): Das Elbe-Urstromtal im Bereich der Deutschen Bucht (Nordsee). – Eiszeitalter und Gegenwart 30, S.203-211.

- LABAN, C. (1995): The Pleistocene glaciations in the Dutch sector of the North Sea: A synthesis of sedimentary and seismic data. – Dissertation, University of Amsterdam, 194 S.
- LUTZ, R.; KALKA, S.; GAEDICKE, C.; REINHARDT, L.; WINSEMANN, J. (2009): Pleistocene tunnel valleys in the German North Sea – spatial distribution and morphology. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 160(3): S. 225-235.
- OELE, E; SCHÜTTENHELM, R.T.E. (1979): Development of the North Sea after Saalian glaciation. – in: OELE, E; SCHÜTTENHELM, R.T.E., WIGGERS, A.J. (Hrsg): The Quaternary History of the North Sea. Acta Universitatis Upsaliensis, Symposium Universitatis Upsaliensis Annum Quingentesimum Celebrantis, vol. 2. University of Uppsala, Uppsala, pp. 191–215.
- PRATJE, O. (1951): Die Fortsetzung der Endmoränen am Boden der Nordsee. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft Band, 103, 75 – 77.
- PREUSS, H., VINKEN, R., VOSS, H.-H. (1991): Symbolschlüssel Geologie - Symbole für die Dokumentation und automatische Datenverarbeitung geologischer Feld- und Aufschlußdaten. – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg], Hannover, 328 S.
- RIECKE, R.; MEYERHOFF, F.; GALAL, G. (2012): Offshore Großrohrstammpfähle – praktische Nachweisführung der Pfahltragfähigkeit im Baufeld BARD Offshore 1. – Abstractband, Hans Lorenz Symposium 2012, Berlin.
- SATTLER-KOSINOWSKI, S. (1982): Geotektonischer Atlas Blatt Langen (C2314) 1:100 000. – Bericht Archiv BGR 93 539, Hannover, 28 S.
- SCHWARZ, C. (1996a): Die Bohrungen 89/3, 89/4 und 89/9 auf dem deutschen Nordseeschelf – Sedimentologische und Magnetostratigraphische Befunde sowie Lithostratigraphische Konnektierung. – in: Streif, H. [Hrsg.]: Deutsche Beiträge zur Quartärforschung in der südlichen Nordsee - Geologisches Jahrbuch 146: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 33-137.
- SCHWARZ, C. (1996b): Neue Befunde zur Verbreitung und Dimension pleistozäner Rinnensysteme auf dem deutschen Nordseeschelf. – in: Streif, H. [Hrsg.]: Deutsche Beiträge zur Quartärforschung in der südlichen Nordsee - Geologisches Jahrbuch 146: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 233-244.
- SHACKELTON, N.J. (1987): Oxygen isotopes, ice volume and sea level. – Quaternary Science Reviews 6, S. 183-190.
- STREIF, H. (2003): Raumordnung in der niedersächsischen Küstenregion – Geologische Stellungnahme zur Beschaffenheit des Untergrundes für die Planung von Windenergiestandorten im Offshore-Bereich. – unveröff. Archivbericht Nr. 0131430, NLFb, Hannover, 9 S.