

Abschlussbericht

Eignung paläogener Tone und Tonsteine im Rahmen des Standortauswahlverfahrens zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

Az. 31-2021 Oktober 2021 – März 2022

14.03.2022

Runa Fälber, Dennis Hansmann, Mandy Narten, Christian Brandes, Martin Achmus und Jutta Winsemann

Institut für Geologie, Leibniz Universität Hannover, Callinstr. 30, 30167 Hannover Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9a, 30167 Hannover

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz Archivstraße 2 30169 Hannover



Inhaltsverzeichnis

InhaltsverzeichnisI
AbkürzungsverzeichnisIV
AbbildungsverzeichnisVI
TabellenverzeichnisVIII
ZusammenfassungX
1. Einleitung1
1.1 Veranlassung
1.2 Gegenstand und Zielsetzung2
2. Datengrundlage und Methodik3
3. Bewertungskriterien und Ergebnisse früherer Studien4
3.1 Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl gemäß StandAG4
3.2 Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen durch die BGR (2007)5
3.3 Ausweisung von Teilgebieten im Tertiären Tonstein nach StandAG durch die BGE (2020)6
4. Geologie des Untersuchungsgebietes9
4.1 Die geologische Entwicklung Norddeutschlands9
4.2 Sekundäre Randsenken entlang von Salzstrukturen11
4.3 Tektonische Verwerfungssysteme und seismische Aktivität12
4.4 Interaktion von Salzstrukturen und glazialen Prozessen14
4.5 Tiefe glaziale Erosionsstrukturen16
5. Geowissenschaftliche Charakterisierung der in Niedersachsen vorhandenen paläogenen Ablagerungen hinsichtlich der geologisch-sedimentologischen Eigenschaften
5.1 Paläogeographische Entwicklung des südlichen zentraleuropäischen Beckensystems im Paläogen und Neogen
5.1.1 Übergeordnete Diskordanzen 20
5.1.2 Paläozän bis frühes Untereozän 20
5.1.3 Unter- bis Obereozän 22
5.1.4 Oligozän
5.1.5 Miozän – Pliozän 24
5.2. Lithologie, Verbreitung und Mächtigkeit der paläogenen Ablagerungen in Niedersachsen und angrenzenden Gebieten
5.2.1 Paläozän
5.2.2 Eozän



5.2.3 Oligozän
5.3 Laterale und vertikale Fazieswechsel im Norddeutschen Becken
6. Geowissenschaftliche Charakterisierung der in Niedersachsen vorhandenen paläogenen Ablagerungen hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung und daraus ableitbarer Gesteinseigenschaften
6.1Kenntnisstand in Bezug auf den Tonmineral- und Karbonatgehalt der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens40
6.1.1 Welche Rückschlüsse auf die Gesteinseigenschaften (Quellfähigkeit, Rückhaltevermögen) lassen sich aus der Tonmineral-Vergesellschaftung ziehen?
6.1.2 Mobilisierung von Radionukliden im Zusammenhang mit Karbonaten 45
6.2 Kenntnisstand in Bezug auf den Schwermineralgehalt46
6.2.1 Primäre Schwerminerale
6.2.2 Sekundäre Schwerminerale Pyrit und Markasit 46
6.3 Wie unterscheidet sich der Tongehalt/Mineralgehalt in den paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens von anderen Tonen/Tonsteinen, die für die Endlagerung in Betracht gezogen werden?
7. Versenkungsgeschichte und Diagenese50
7.1 Versenkungsgeschichte
7.2 Verfestigungsgrade und Diagenese paläogener Ablagerungen im Norddeutschen Becken 53
7.3 Methoden der Paläomaximal-Temperatur-Bestimmung von sedimentären Ablagerungen54
7.3.1 Vitrinitreflexion
7.3.2 Illit als Paläo-Thermometer 56
7.4 Kenntnisstand in Bezug auf die Maximaltemperaturbelastung der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens
7.5 Kenntnisstand in Bezug auf die Art, Menge und Reife organischer Substanzen
7.5.1 Mögliche Alteration/Freisetzung organischer Substanzen durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle
7.6 Hydrogeologische Eigenschaften der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens und in-situ Ermittlung der effektiven Gebirgsdurchlässigkeiten und Gebirgsporositäten
7.6.1 Hydrogeologische Eigenschaften
7.6.2 In-situ Ermittlung der effektiven Gebirgsdurchlässigkeiten und Gebirgsporositäten
8. Geomechanisch/geotechnische Charakterisierung der paläogenen Tone/Tonsteine im Norddeutschen Becken
8.1 Allgemeiner Kenntnisstand der geomechanischen und geotechnischer Eigenschaften von Tonen und Tonsteine und Übertragbarkeit geotechnischer Kennwerte



8.2 Geotechnische Kennwerte und deren Bandbreite71
8.2.1 Laborversuche
8.2.2 Geotechnische Parameter
8.3 Beurteilung der Primärspannungszustände
8.4 Temperaturvulnerabilität und Rissschließung bei Tonen/Tonsteinen
8.4.1 Rissbildung und -schließung im Bereich unterirdischer Hohlräume in Tonstein
8.4.2 Einflüsse auf das Verhalten von Tonen/Tonsteinen unter Temperatureinwirkungen 82
8.5 Stoffgesetze zur Modellierung von Tonen/Tonsteinen
8.5.1 Prozesse und Kopplungen bei unterirdischen Bauwerken zur Endlagerung radioaktiver Stoffe
8.5.2 Modellierungsbestrebungen in der Endlagerforschung
8.6 Standsicherheit und Teufen unterirdischer Bauwerke in Tonstein
8.6.1 Langfristige Offenhaltung, maximale Teufe und mögliche Rückholbarkeit von und aus unterirdischen Deponiebauwerken in Tonen/Tonsteinen
8.6.2 Geotechnische Erfahrungen mit unterirdischen Bauwerken und Auffahrungen in Tonen/Tonsteinen
9. Wissenslücken in Bezug auf die Eignung paläogener Tone und Tonsteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und Fazit
Literaturverzeichnis
Appendix

Abkürzungsverzeichnis

AGT	Anhydrit-Gips-Transformation
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagersuche
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
AS	Aller Störung
BASTION	Einfluss geologischer Prozesse auf die Barriereeigenschaften von Tongesteinsformationen
BBM	Barcelona Basic Model
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMWi	Bundesminesterium für Wirtschaft und Technologie
BT-Drs	Bundestagsdrucksache
C	Chemisch
CERBERUS	Control Experiment with Radiation of the BElgian Repository for Underground Storage
Corg	Organischer Kohlenstoff
CT DEM	Callov-Oxfordium Tonstein Computertomographie Distinct-Element-Methode
dT/dz	Temperaturänderung mit Tiefe
EA	Elementary areas
EBS	Engineered Barrier System
EDF	Électricité de France SA
EISRR	Equivalent initial stress release rate
ESTI	Environmental System Research Institute
EU	Europäische Union
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FB	Forschungsbohrung
FDEM	Hybride Finite-Discrete Element Simulation
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
G	Gasförmig
geovvk	Geowissenschaftliche Abwagungskriterien
Gew%	Gewichts-Prozent
GOK	Geländeoberkante
H	Hydraulisch
HADES	High-Activity Disposal Experimental Site
HI W	High-Level Waste
HNS HTPF	Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures
k.A.	Keine Angabe(n)
kro	Oberkreide
LBEG	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie
LD	lateraler Dekompressionstest
LRSD	Liberated residual stress dilation
M	Mechanisch
Ma	Millionen Jahre
MIS	Marine Isotopen Stadien
mk mya NAGRA	Million years ago Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NDB	Norddeutsches Becken
NODB	Nordostdeutsches Becken
NP	Paläogene Nannoplankton-Zone(n)
NRW	Nordrhein-Westfalen
NWDB	Nordwestdeutsches Becken
OE	"Obereozän" (nach Staesche & Hiltermann, 1940)
OPA	Opalinustonstein
OS	Osning Störung
PDGL	Partielle Differentialgleichung(en)



q	Quartär (ungegliedert)
RD	Referenzdatensatz
REM	Methode der Randelemente
RMOS	Rheeder Moor Oythe Störung
SGD	Staatliche Geologische Dienste
StandAG	Standortauswahlgesetz
Т	Thermisch
t	Tertiär (ungegliedert)
teo	Eozän (ungegliedert)
teom	Mitteleozän
teoo	Obereozän
teou	Untereozän
tmi	Miozän (ungegliedert)
tmim	Mittelmiozän
tmio	Obermiozän
tmiu	Untermiozän
tng	Neogen (ungegliedert)
TNO	The Netherlands Organisation of applied scientific research
tol	Oligozän (ungegliedert)
tolm	Mitteloligozän (veraltet)
tolmr	Rupelium
tolo	Oberoligozän
toloc	Chattium
tolu	Unteroligozän
tpa	Paläozän (ungegliedert)
tpad	Danium
tpao	Oberpaläozän
tpau	Unterpaläozän
tpg	Paläogen (ungegliedert)
tpl	Pliozän (ungegliedert)
tplo	Oberpliozän
tplu	Unterpliozän
TPHM	Two-parts Hooke's model
(ü.) N.N.	(Über) Normal-Null
URL	Underground Research Laboratory
ZEBS	Zentraleuropäisches Beckensystem
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional



Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1 Das zentraleuropäische Beckensystem mit Darstellung ausgewählter Teilbecken (verändert nach Scheck et al., 2002; Scheck-Wenderoth & Lamarche, 2005 und Brandes et al., 2013). Der nordwestliche Teil des Norddeutschen Beckens wird auch in der Literatur als Nordwestdeutsches Becken (NWDB) und der nordöstliche Teil als Nordostdeutsches Becken (NODB) bezeichnet (Gast et al., 1998). AS = Aller Störung, HNS = Harznordrand Störung, OS = Osning Störung, RMOS = Reeder Moor Oythe Störung. . 11

Abb. 4.4 Schematisches Modell der Interaktion von Salzstrukturen und glazialen Prozessen (verändert nach Liszkowski, 1993; Sirocko et al., 2008 und Lang et al., 2014). A) Während des Vorrückens des Eisschildes steigt der Salzdiapir auf, da die Salzursprungsschicht durch den Eisschild belastet wird. B) Während der vollständigen Eisbedeckung wird der Salzdiapir durch die Last nach unten gedrückt. C) Nach Abschmelzen des Eisschildes kann der Salzdiapir durch die Druckentlastung wieder aufsteigen.

Abb. 5.8 Profilschnitt B-B' verläuft von der Nordseeküste bis ins südöstliche Niedersachsen. Der Schnitt zeigt die Mächtigkeiten und Lithologie der paläogenen und neogenen Ablagerungen im nordöstlichen Niedersachsen (verändert nach Best et al., 1989). Die Lage des Profilschnittes ist in Abb. 5.6 abgebildet.



Abb. 7.3 Rezenter Wärmestrom im südlichen Permbecken (verändert nach Guterch et al., 2010). 57

Abb. 7.6 Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit (anhand des Durchlässigkeits-beiwertes k_f, hier nur mit k bezeichnet) bei 5 m Mächtigkeit der Schicht, typische Versuchsdauer (DGGT, 2011)... 64



Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1Ausschlusskriterien gemäß § 22StandAG und Mindestanforderungen gemäß § 23StandAG zurSuche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (nach BT-Drs. 18/11398,2017 und BGBI, 2020). ewG: einschlusswirksamer Gebirgsbereich, GOK: Geländeoberkante, Ma: MillionenJahre.

Tab. 3.2GeowissenschaftlicheAbwägungskriteriennach§ 24StandAG(BGBI, 2020).ewG:einschlusswirksamerGebirgsbereich.7

Tab. 3.3 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg (verändert nach BGE, 2020; BGE, 2020ag und BGE, 2020k). Die Spalte RD (Referenzdatensatz) gibt an, für welche Abwägungskriterien Referenzdatensätze für Tone oder Tonsteine vorhanden sind und genutzt wurden.

Tab. 5.1Stratigraphische Tabelle des Paläogens und Neogens von Nordwest- und Nordostdeutschland(verändert nach Janssen et al., 2018).Dunkelblau steht für pelagische, küstenferne Ablagerungen.Hellblausteht für flachmarine, neritische Ablagerungen.Gelb-Blaugestreift steht für paralische Ablagerungen.Gelbsteht für terrestrische Ablagerungen.SchwarzePunkte innerhalb der Formationen zeigen das Auftretenvon Braunkohle an.19

Tab. 6.2 Durchschnittliche Mineralvergesellschaftung von Tonen und Tonsteinen, die für den Bau eines Endlagers für hochradioaktive Stoffe in Betracht gezogen werden. Dargestellt sind die durchschnittlichen Mineralanteile im Sediment/Gestein in Gewichts-Prozent [Gew.-%] des Opalinuston (OPA) der Schweiz für die FB Benken und das Felslabor Mont Terri (exklusive sandig-kalkiger Fazies) (NAGRA, 2002), des Boom Clay (BC) Belgiens (Frederickx et al., 2021) und des jurassischen (Callovium-Oxfordium) Tonsteins (COx-Tonstein) in Frankreich (ANDRA, 1999; Mengel et al., 2012). x = nicht nachweisbar (d.h. < 1 Gew.-%). k.A. = keine Angaben.

Tab. 8.3 Thermische Parameter für unterkretazische Gesteine (Hedbergellenmergel, Mittleres Aptium) imModellgebiet östlich von Hannover (Jobmann et al., 2007) und als Berechnungsparameter (DBE, 1998).76



Tab. A.1 Inventarisierungstabelle der Erläuterungen der Geologischen Karte 1:25.000 von Niedersachsen.Inventarisiert wurden die Kartenblätter, die sich mit dem Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg und der
Landesfläche von Niedersachsen, Bremen und Hamburg überschneiden.132



Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Literaturrecherche in Hinblick auf die geologischen und geotechnischen Eigenschaften der paläogenen Tone und Tonsteine des Norddeutschen Beckens durchgeführt. Der Fokus der Studie liegt auf der Dokumentation der paläogenen Ablagerungen Niedersachsens, die im von der BGE ausgewiesenen Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg liegen. Konkrete Endlagerstandorte werden nicht ausgewiesen.

Insbesondere wurden folgende Aspekte behandelt:

1) Die paläogeographische Entwicklung des Norddeutschen Beckens im Paläogen; 2) die Lithologie, Verbreitung und Mächtigkeit der paläogenen Ablagerungen im Norddeutschen Becken; 3) die mineralogische Zusammensetzung der paläogenen Ablagerungen; 4) die Versenkungsgeschichte und Diagenese der paläogenen Ablagerungen und 5) die geomechanisch/geotechnische Charakterisierung der paläogenen Tone und Tonsteine.

Die paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens sind sehr heterogen und können in ihrer faziellen Ausbildung stark variieren. Aufgrund differentieller Subsidenz und der Bildung sekundärer Salz-Randsenken gibt es regional große Unterschiede in der Mächtigkeit.

Als potenzielle Endlagerwirtsgesteine wurden von der BGE Tone und Tonsteine des Thanetiums (Oberpaläozän) und des Ypresiums (Untereozän) ausgewiesen. Unsere Literaturrecherche zeigt, dass die oberpaläozänen Ablagerungen meist weniger als 100m mächtig sind. Lokal können die Mächtigkeiten (z.B. in sekundären Salz-Randsenken) jedoch auch höher sein. Dagegen sind die untereozänen Ablagerungen weit verbreitet und die durchschnittlichen Mächtigkeiten betragen 100m bis 500 m. In sekundären Salz-Randsenken, besonders im nördlichen Niedersachsen und Schleswig-Holstein, können noch deutlich höhere Mächtigkeiten auftreten.

Alle paläogenen Tone und Tonsteine haben wechselnde Schluff- und Sand-Gehalte. Teilweise treten Einschaltungen von Sand, Sandstein oder Mergel auf. Im Bereich des Beckenzentrums sind die Ablagerungen feinkörniger, der Tonanteil nimmt zu und der gröberklastische Eintrag ab. Die Tonmineralfraktion setzt sich hauptsächlich aus Smektit, Illit, Glaukonit, Chlorit und Kaolinit zusammen. Smektit ist in allen paläogenen Ablagerungen das dominierende Tonmineral, Illit ist das zweithäufigste Tonmineral, gefolgt von Kaolinit. Chlorit ist dagegen selten. Im Allgemeinen nimmt der Smektit-Gehalt nach oben hin ab, während die Illit- und Kaolinit-Gehalte zunehmen. Pyrit bzw. Markasit kommen in vielen Ablagerungen vor und treten überwiegend als Kristalle, Konkretionen oder in Form von pyritisierten Fossilen auf.

In Abhängigkeit von der differentiellen Subsidenz betrug die Versenkung der paläogenen Sedimente wenige 100 m bis einige 1000 m. Die Temperaturen in 1000 m Tiefe liegen etwa zwischen 40 °C und 55 °C, in 2000 m Tiefe etwa zwischen 60 °C und 90 °C.

Die geomechanischen und -technischen Eigenschaften der paläogenen Tone und Tonsteine sind kaum bekannt. Ebenso wenig die effektiven Gebirgsdurchlässigkeiten und Gebirgsporositäten. Eine systematische Analyse der in-situ Eigenschaften mit begleitenden Modellierungen und Validierungen von Stoffgesetzen und Abhängigkeiten hat bisher nicht erkennbar stattgefunden. Generell bestehen auch erhebliche Wissenslücken hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung, der Diagenese, Absenkungsgeschichte und Verfestigung der paläogenen Tone und Tonsteine des Norddeutschen Beckens.



1. Einleitung

1.1 Veranlassung

Am 28. September 2020 hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) den ersten Zwischenbericht im Rahmen des Standortauswahlverfahrens, gemäß des im Mai 2017 in Kraft getretenen Standortauswahlgesetz (StandAG; BGBI, 2020), veröffentlicht. Das StandAG regelt das Standortauswahlverfahren und definiert einen gesetzlichen Rahmen für die Suche nach einem potenziellen Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle. Der Zwischenbericht "Teilgebiete" dient laut BGE u. a. als "Gegenstand für den Beginn der förmlichen Öffentlichkeitsbeteiligung zu einem so frühen Zeitpunkt, dass eine Einflussnahme auf die Arbeit und die Ergebnisse im Standortauswahlverfahren möglich ist" (BGE, 2020).



Abb. 1.1 Lage des von der BGE ausgewiesenen Teilgebietes 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg, das paläogene Tone und Tonsteine der Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt umfasst (verändert nach BGE, 2020; Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021).

In diesem Zwischenbericht wurden 90 Teilgebiete innerhalb Deutschlands ausgewiesen, welche günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen (nach § 13 StandAG). Das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg umfasst tertiäre (paläogene) Tone und Tonsteine der Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg,



Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt. Das für Niedersachsen ausgewiesene Teilgebiet entspricht zirka 60% der Landesfläche (Abb. 1.1).

Bezugnehmend auf den Zwischenbericht Teilgebiete der BGE wurde am 01. Februar 2021 ein gemeinsames fachliches Positionspapier von den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) von Berlin, Brandenburg, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zur Ausweisung des Teilgebietes "Tertiäres Tongestein" veröffentlicht. Nach Auffassung der staatlichen geologischen Dienste bestehen noch zahlreiche offene Fragen und Wissenslücken in Hinblick auf die geowissenschaftliche und geotechnische Charakterisierung des potenziellen Wirtsgesteins "Tertiäres Tongestein". Dies betrifft insbesondere die fazielle und diagenetische Entwicklung, die mineralogische Zusammensetzung, die Maximaltemperaturbelastung sowie die Standsicherheit der tertiären Tone/Tonsteine (SGD, 2021).

Die am 02. Februar 2021 veröffentlichte Stellungnahme des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) des Landes Niedersachsen kommt nach der Sichtung der im Zwischenbericht Teilgebiete dargestellten Ergebnisse bezüglich der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geologischen Abwägungskriterien (nach §§ 22 – 24 StandAG) daher zu dem Ergebnis, dass eine vertiefende, regionalgeologische Betrachtung der in Niedersachsen ausgewiesenen Teilgebiete notwendig ist.

Das Land Niedersachsen, vertreten durch das Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Umweltschutz, hat daraufhin eine Literaturstudie bezüglich der Eignung paläogener Tone und Tonsteine im Rahmen des Standortauswahlverfahrens zur Endlagerung radioaktiver Abfälle vergeben, in der geprüft werden soll, ob die in Niedersachsen lagernden paläogenen Tone und Tonsteine günstige geologische Gegebenheiten für die Einrichtung, den Betrieb und die Stilllegung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen vermuten lassen. Die Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, vertreten durch das Institut für Geologie und das Institut für Geotechnik, wurde mit dieser Literaturstudie beauftragt.

1.2 Gegenstand und Zielsetzung

Im Rahmen dieser Studie wird anhand von frei zugänglichen Literaturdaten eine geowissenschaftliche und geotechnische Charakterisierung der paläogenen Tone/Tonsteine Norddeutschlands vorgenommen und bewertet, ob diese günstige geologische Eigenschaften für die Einrichtung, den Betrieb und die Stilllegung eines Endlagers erwarten lassen. Konkrete Endlagerstandorte werden nicht ausgewiesen.

Der Fokus der Literaturrecherche liegt auf

- 1. der geowissenschaftlichen Charakterisierung der in Niedersachsen vorhandenen paläogenen Ablagerungen hinsichtlich der geologisch-sedimentologischen Eigenschaften;
- 2. der geowissenschaftlichen Charakterisierung der in Niedersachsen vorhandenen paläogenen Ablagerungen hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung und daraus ableitbarer Gesteinseigenschaften;



- 3. der geowissenschaftlichen Charakterisierung der in Niedersachsen vorhandenen paläogenen Ablagerungen hinsichtlich der Versenkungsgeschichte und Diagenese sowie
- 4. der geomechanisch/geotechnischen Charakterisierung der paläogenen Tone/Tonsteine im Norddeutschen Becken.

2. Datengrundlage und Methodik

Im Rahmen dieser Studie wurde eine Literaturrecherche zu den in Kapitel 1.2 genannten Aspekten und Fragestellungen durchgeführt. Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit von nur fünf Monaten liegt der Fokus der Studie auf der Dokumentation der paläogenen Ablagerungen Niedersachsens, die im von der BGE ausgewiesenen Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg liegen (Abb. 1.1). Eine ausführliche Betrachtung von und Abgrenzung zu Tonen/Tonsteinen benachbarter Bundesländer war in diesem Zeitraum nicht möglich. Hier wird ein grober Überblick über den Kenntnisstand gegeben, ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Der Inhalt und die Gliederung des Berichtes orientieren sich an der Leistungsbeschreibung der Vergabe (Az: 31-2021; Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz). Die Recherche erfolgte im Bereich der frei zugänglichen oder mittels vorhandener Lizenzen abrufbaren Literatur der Fachdatenbanken der Technischen Universitätsbibliothek (TIB), der institutseigenen Bibliotheken, der Bibliothek des Geozentrums Hannover sowie mit Hilfe verschiedener Suchmaschinen, diverser Datenbanken und wissenschaftlicher Publikationsplattformen (z. B. ASCE Library, Google Scholar, Google Suche, IEEE Xplore, ResearchGate, ScienceDirect, Science.gov, Scopus, Scopus, SpringerLink, Taylor & Francis Online, Web of Science, Wiley Online Library). Die über die genannten Fachdatenbanken verfügbare Literatur wurde gesichtet, bzgl. ihrer Relevanz priorisiert und anschließend hinsichtlich der Fragestellungen ausgewertet. Für Niedersachsen wurden darüber hinaus noch die Erläuterungen der geologischen Karten 1: 25.000 ausgewertet. Die Ergebnisse sind im Anhang zusammenfassend tabellarisch dargestellt. Detailinformationen aus den Bohrdatenbanken oder Berichtsarchiven des LBEG oder anderer geologischer Dienste konnten aus Zeitgründen jedoch nicht weiter berücksichtigt werden und sollten ggf. zu einem späteren Zeitpunkt in nachfolgenden Detail-Studien ausgewertet werden.

Nur wenig relevante Daten sind z. B. zur Diagenese, zu Paläomaximal-Temperaturen, Gebirgsdurchlässigkeiten, effektiven Gebirgsporositäten, zur Hydrogeologie und den geomechanisch/geotechnischen Eigenschaften der paläogenen Tone/Tonsteine in Norddeutschland publiziert. Hier können wir daher nur unter Heranziehung von sedimentologischen, geologischen und geotechnischen Standardwerken einen allgemeinen Überblick über den Kenntnisstand geben. Insbesondere die Adressierung der geotechnischen und geomechanischen Fragestellungen kann in Teilen nur durch Bezugnahme auf umfangreich untersuchte Standorte außerhalb Norddeutschlands erfolgen.



Zusätzlich haben wir noch die Ergebnisse früherer Studien (Hoth et al., 2007; BGE, 2020) zur Eignung von tertiären Tonen/Tonsteinen zusammengefasst (Kapitel 3) und ein Kapitel zur regionalen Geologie Norddeutschlands (Kapitel 4) erstellt. Aus unserer Sicht ist ein solches Kapitel für eine ganzheitliche Betrachtung der tertiären Tone/Tonsteine in Hinblick auf die spätere Nutzung des Untergrundes von großer Wichtigkeit.

3. Bewertungskriterien und Ergebnisse früherer Studien

3.1 Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl gemäß StandAG

Im Standortauswahlgesetz werden die gesetzlichen Vorgaben zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle festgehalten. Der zukünftige Endlagerstandort muss dabei genau definierte Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl erfüllen. Das StandAG basiert auf den Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), welche im Jahr 2002 veröffentlicht wurden. Die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen wurden in Anlehnung an den Bericht des AkEnd formuliert.

	Ausschlusskriterien	Mindestanforderungen				
1.	Großräumige Vertikalbewegungen	1.	Grenzwerte für die Gebirgsdurchlässigkeit für			
2.	Aktive Störungszonen		k _f < 10 ⁻¹⁰ m/s			
3.	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer	2.	Mindestmächtigkeit des ewG von 100 m			
	bergbaulicher Tätigkeit	3.	Mindestteufe des ewG von 300 m unterhalb			
4.	Seismische Aktivität		der GOK			
5.	Vulkanische Aktivität	4.	Der ewG muss über eine Ausdehnung in der			
6.	Junge Grundwasseralter		Fläche verfügen, die eine Realisierung des			
			Endlagers ermöglicht			
		5.	Erhalt der Barrierewirkung über einen Zeit-			
			raum von 1 Ma			

Tab. 3.1 Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG und Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (nach BT-Drs. 18/11398, 2017 und BGBI, 2020). ewG: einschlusswirksamer Gebirgsbereich, GOK: Geländeoberkante, Ma: Millionen Jahre.

Nach StandAG ist ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet, falls mindestens eines der sechs Ausschlusskriterien erfüllt ist (§ 22 StandAG, Tab. 3.1). Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle kommen die Wirtsgesteine "Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein" in Betracht. Gebiete, die keines der Ausschlusskriterien erfüllen, sind nur als Endlagerstandorte geeignet, falls sie sämtliche der fünf Mindestanforderungen erfüllen (§ 23 StandAG, Tab. 3.1). Erfüllt ein Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG, erfolgt die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK). Die im StandAG definierten geoWK basieren ebenfalls auf den "allgemeinen Anforderungen an Endlagerstandorte" und den entsprechenden Indikatoren des AkEnd (2002).



Gemäß § 13 StandAG wird anhand der elf geoWK bewertet, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt (§ 24 StandAG; Tab. 3.2).

3.2 Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen durch die BGR (2007)

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) erteilte der Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR) im Jahr 2003 den Auftrag zur Untersuchung von Tongesteinsformation im Hinblick auf die Endlagerung stark Wärme entwickelnder hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland. Das Ergebnis dieser Studie wurde im April 2007 im Abschlussbericht "Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen" veröffentlicht und sollte nach dem aktuellsten Kenntnisstand Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tonsteinen für die Endlagerung ausweisen.

Die BGR Studie basiert auf der Auswertung von verfügbaren geologischen und geophysikalischen Daten. Eigene, standortspezifische Untersuchungen wurden nicht durchgeführt. Als Grundlage für die Eingrenzung untersuchungswürdiger Teilgebiete wurden die vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagersuche (AkEnd) aufgestellten, wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Anforderungskriterien genutzt, die den aktuellen Kriterien gemäß StandAG zu Grunde liegen (AkEnd, 2002). Diese Kriterien wurden durch wirtsgesteinsabhängige Auswahlkriterien für Tonsteine auf Basis internationaler Arbeiten und regionalgeologischer Auswahlkriterien ergänzt (Hoth et al., 2007):

- Die Tiefe eines Endlagers in Tonsteinen/Tonen sollte 1000 m nicht überschreiten (vgl. BGR, 1977; EU, 1979; ANDRA, 2001; NAGRA, 2002).
- Die Maximaltemperaturen im Einlagerungsbereich sollten aufgrund der Wärmeleiteigenschaften von Tonstein 50°C nicht überschreiten.
- Bei der Langzeit-Sicherheitsbetrachtung spielen die rheologischen Materialeigenschaften von Tonsteinen eine wesentliche Rolle für die Beurteilung der mechanischen Stabilität. Insbesondere müssen zeitabhängige Deformationsprozesse in plastischen Tonen berücksichtig werden (c.f. NAGRA, 2002).
- Zudem müssen bei der Abschätzung der Endlager-relevanten Mächtigkeiten von Tonen/Tonsteinen Einschaltungen von Sand- und Silt(steinen) beachtet werden. Die einzelnen Ton(stein)horizonte der unterschiedlichen Formationen müssen daher getrennt voneinander betrachtet werden.

Basierend auf diesen Anforderungen wurden auf Grundlage verfügbarer geologischer und geophysikalischer Literatur- und Archivdaten Tertiäre Tone/Tonsteine in Norddeutschland, die die Grundanforderungen an Mächtigkeit und Tiefenlage erfüllen, als potenziell untersuchungswürdige Gebiete ausgewiesen (Hoth et al., 2007). Hohe Mächtigkeiten potenziell geeigneter oberpaläozäner bis mittelmiozäner Ablagerungen werden dabei insbesondere im nördlichen Niedersachsen und in Teilen von Schleswig-Holstein erwartet, die die Mindestanforderungen für die Endlagerung erfüllen könnten. Teilweise liegen die tertiären Ablagerungen in Schleswig-Holstein und im Raum Hamburg jedoch zu tief. Im Gegensatz dazu werden in den Randbereichen des Norddeutschen Beckens (Teile von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern) die Mindestmächtigkeit des ewG von 100 m nicht erreicht. Im südlichen Niedersachsen, sowie in großen Teilen von Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern, wird die erforderte Mindesttiefe von 300 m nicht erreicht (Hoth et al., 2007).

Neben den genannten Einschränkungen bezüglich der Erfüllung der Mindestanforderungen nach AkEnd ergeben sich für die paläogenen Tone/Tonsteine im Norddeutschen Becken weitere wirtsgesteinsspezifische Limitierungen. In der Studie von Hoth et al. (2007) wird auf den größtenteils geringen bis sehr geringen Verfestigungsgrad der tertiären Ablagerungen verwiesen. Dies betrifft insbesondere die oberen Bereiche (zwischen 300 bis 500 m). Daraus ergeben sich ungünstige mineralogische und geomechanische Eigenschaften, wie z. B. eine Empfindlichkeit gegenüber signifikanten Temperaturerhöhungen, die durch die Einlagerung hoch radioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle entstehen können. Die tertiären Tone/Tonsteine stellen zudem eine wichtige hydrogeologische Barriere innerhalb des Norddeutschen Beckens dar. Die unteroligozänen Tone des Rupeliums ("Rupel-Tone") trennen Salz- und Süßwasserstockwerke und haben somit eine besondere Bedeutung und Nähe zu Schutzgütern. Zusammenfassend kommen Hoth et al. (2007) in Ihrer Studie zu der Einschätzung, dass die Eignung der tertiären Tone/Tonsteine in Norddeutschland als Endlagerwirtsgestein als eingeschränkt zu betrachten ist. Die Ablagerungen des Oberpaläozäns und des Eozäns in Norddeutschland wurden daher, neben den tertiären Ablagedes Alpenvorlandbeckens, aufgrund der unzureichenden Erfüllung rungen der Mindestanforderungen, ungünstiger geomechanischer Eigenschaften und erhöhter Temperaturempfindlichkeit im weiteren Verlauf der Studie nicht als Wirtsgesteinsoption in Betracht gezogen.

3.3 Ausweisung von Teilgebieten im Tertiären Tonstein nach StandAG durch die BGE (2020)

Im Standortauswahlgesetz werden die gesetzlichen Vorgaben zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland festgehalten. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) wurde als Vorhabenträgerin für die Standortauswahl im Rahmen des StandAG eingesetzt. Am 29. September 2020 veröffentlichte die BGE den Zwischenbericht "Teilgebiete". In diesem Zwischenbericht werden "Gebiete in Deutschland, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in einem der drei Wirtsgesteine erwarten lassen" (BGE, 2020) als Teilgebiete ausgewiesen. Das Vorhaben der BGE wurde dabei unabhängig von vorherigen Studien zu potenziellen Endlagerstandorten durchgeführt.

Im ersten Arbeitsschritt "wurden Gebiete ausgeschlossen, die nach den gesetzlich festgelegten Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG nicht als Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle geeignet sind" (BGE, 2020). Diese Ausschlusskriterien sind in Tab. 3.1 dargestellt.

Im zweiten Arbeitsschritt "wurden in den verbleibenden Gebieten jene identifiziert, welche die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen" (BGE, 2020). Diese Mindestanforderungen sind in Tab. 3.1 dargestellt und wurden von der BGE auf Gebiete mit den drei endlagerrelevanten Gesteinsformationen Tongestein, Steinsalz und Kristallingestein angewandt (BGE, 2020).



Nr.	Abwägungskriterien	Nr.	Indikatoren			
Erreichbare Qualität und Robustheit des Einschlusses						
1	Kriterium zur Bewertung des	1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers			
	Transportes radioaktiver Stoffe	1.2	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit			
	durch Grundwasserbewegungen	1.3	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient			
	im ewG	1.4	Absolute Porosität			
		1.5	Verfestigungsgrad			
2	Kriterium zur Bewertung der Kon-	2.1	Barrieremächtigkeit			
	figuration des Gesteinskörpers	2.2	Grad der Umschließung			
		2.3	Teufe der oberen Begrenzung			
		2.4	Flächenhafte Ausdehnung			
		2.5	Hydraulische Eigenschaften			
3	Kriterium zur Bewertung der räum-	3.1	Variationsbreite der Gesteinseigenschaften			
	lichen Charakterisierbarkeit	3.2	Räumliche Verteilung			
		3.3	Tektonische Überprägung			
		3.4	Gesteinsausbildung			
4	Kriterium zur Bewertung der lang-	4.1	Langfristige Stabilität der Mächtigkeit			
	fristigen Stabilität der günstigen	4.2	Langfristige Stabilität der räumlichen Ausdehnung			
	Verhältnisse	4.3	Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit			
Abs	icherung des Isolationsvermögens					
5	Kriterium zur Bewertung der güns-	5.1	Tragfähigkeit des Gebirges bei der Beanspruchung			
	tigen gebirgsmechanischen		bei Auffahrung und Betrieb			
	Eigenschaften	5.2	Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität			
6	Kriterium zur Bewertung der Nei-	6.1	Repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit			
	gung zur Bildung von	6.2	Barrierewirksamkeit			
	Fluidwegsamkeiten	6.3	Duktilität des Gesteins			
		6.4	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-			
			schließung			
		6.5	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch			
			Rissverheilung			
		6.6	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten			
Sich	erheitsrelevante Eigenschaften					
7	Kriterium zur Bewertung der Gas-	7.1	Wasserangebot im Einlagerungsbereich			
	bildung					
8	Kriterium zur Bewertung der Tem-	8.1	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärper-			
	peraturverträglichkeit	~ ~	meabilitäten			
		8.2	Temperaturstabilitat hinsichtlich Mineralumwandlun-			
		~ 1	gen			
9	Kriterium zur Bewertung des	9.1	Mineralphasen mit großer reaktiver Oberflache			
	Rucknaitevermogens im ewg	9.2	Ionenstarke des Grundwassers im ewG			
		9.3	Ko-werte für langzeitrelevante Radionuklide			
40	Kritanium nun Dauratuma dan burd	9.4	Offnungsweiten der Gesteinsporen			
10	Kriterium zur Bewertung der nyd-	10.1				
	Tochemischen Verhältnisse	10.2	pn-weite des Tiefenwassers			
		10.3	Anoxisch-reduzierendes willed im Tierenwasser			
		10.4	Genait von Konolen und Komplexbildhem			
44	Kritorium zur Dowortung das	10.0 4 4 4	Raibulaikulizenitailuli III Heleliwassel			
	Sobutzon don owe durab don	11.1	Grunuwassemenninenue Gesteine			
	Schutzes des ewG durch das	11.2	ETUSIONSNEIMMENDE GESLEINE Strukturalla Komplikationan			
	Deckgebilge	11.3	Strukturelle Komplikationen			

Tab. 3.2 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien nach § 24 StandAG (BGBI, 2020). ewG: einschlusswirksamer Gebirgsbereich.

Im dritten Arbeitsschritt wurden diese "identifizierten Gebiete anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG hinsichtlich ihrer günstigen geologischen Gesamtsituation für die Eignung als Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle bewertet"



(BGE, 2020). Diese geoWK sind in Tab. 3.2 zusammengefasst. Für die infrage kommenden Tonsteine liegen zum jetzigen Zeitpunkt in den meisten Fällen keine standortspezifischen Datensätze vor (BGE, 2020). Als Datengrundlage für die Bewertung der geoWK diente deshalb der Referenzdatensatz Tongestein (BGE, 2020b), der unabhängig von den unterschiedlichen Charakteristika der verschiedenen Tone und Tonsteine in Deutschland anhand von Literaturdaten entwickelt wurde (vgl. BGE, 2020b) und "wissenschaftlich basierte Ergebnisse und/oder allgemein anerkannte Erfahrungen über das jeweils zu betrachtende Wirtsgestein" zusammenträgt (BGE, 2020).

Nr.	RD	Kriter	rium	Indikatoren						
1	Ja	Trans	port radioaktiver Stof	fe	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	
2	Nein	Konfi	guration der Gesteins	körper	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	
3	Nein	Räum	nliche Charakterisierb	arkeit	3.1	3.2	3.3	3.4		
4	Nein	Langf	ristige Stabilität	4.1	4.2	4.3				
5	Ja	Gebir	gsmechanische Eige	5.1	5.2					
6	Ja	Bildur	ng von Fluidwegsamk	eiten	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6
7	Ja	a Gasbildung								
8	Ja	Temp	peraturverträglichkeit		8.1	8.2				
9	Ja	Rückhaltevermögen			9.1	9.2	9.3	9.4		
10	Ja	Ja Hydrochemische Verhältnis		sse	10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	
11	Nein Schutz durch Deckgebirge		11.1	11.2	11.3					
günstig		J	bedingt günstig	weniger günstig	nicht günstig		nicht anwendbar			

Tab. 3.3 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg (verändert nach BGE, 2020; BGE, 2020ag und BGE, 2020k). Die Spalte RD (Referenzdatensatz) gibt an, für welche Abwägungskriterien Referenzdatensätze für Tone oder Tonsteine vorhanden sind und genutzt wurden.

Im Rahmen des Zwischenberichtes hat die BGE 90 Teilgebiete in Deutschland ausgewiesen. Neun dieser Teilgebiete wurden für das Wirtsgestein Tongestein ausgewiesen. Drei dieser Teilgebiete enthalten Tone und Tonsteine des Tertiärs und umfassen paläogene Ablagerungen des Norddeutschen Beckens sowie der jüngeren und älteren unteren Meeresmolasse in Bayern.

Das Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg umfasst Bereiche der Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt. Es deckt eine Fläche von 62.885 km² ab. Die paläogenen Tone und Tonsteine erreichen eine maximale Mächtigkeit von 1.055 m. Die Basisfläche befindet sich in einer Teufe von 400 m bis 1.500 m unter GOK (BGE, 2020). Im Rahmen der Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß StandAG hat die BGE dabei jedoch bestimmte Bereiche der paläogenen Tone und Tonsteine in Norddeutschland ausgeschlossen.

Dies sind Gebiete mit

 aktiven Störungszonen inklusive einer Pufferzone von 1000 m um die vermuteten Störungszonen (BGE, 2020h),

- Einflüssen aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit in Form von Bergwerken, Kavernen und Bohrungen inklusiver einer Pufferzone von 25 m um abgeteufte Bohrungen (BGE, 2020h),
- jungen Grundwasseraltern (BGE, 2020h).

Bei der Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für potenzielle Wirtsgesteine wird zwischen den Einstufungen "günstig", "bedingt günstig", "weniger günstig", "nicht günstig" und "nicht anwendbar" unterschieden (Tab. 3.3). Sieben Kriterien wurden dabei anhand des Referenzdatensatzes bewertet (BGE, 2020b) und vier der Kriterien wurden auf Grundlage standortspezifischer Daten bewertet (vgl. BGE, 2020ag; Tab. 3.3). Die standortspezifische Bewertung einiger Indikatoren erfolgte anhand von gebietsspezifischen Daten (Kriterien 2 und 11) und Fachliteratur (Kriterien 3 und 4). Die Kriterien 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 und 10 wurden als "günstig" eingestuft. Das Kriterium 11 wurde als "bedingt günstig" eingestuft und das Kriterium 5 wurde als "nicht anwendbar" eingestuft (vgl. BGE, 2020ag). Den auf standortspezifischen Daten bewerteten geoWK wird in der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens eine besondere Bedeutung zugewiesen (vgl. BGE, 2020ag). Nach Einschätzung der BGE lässt daher die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien insgesamt "eine günstige geologische Gesamtsituation für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten" (BGE, 2020).

4. Geologie des Untersuchungsgebietes

4.1 Die geologische Entwicklung Norddeutschlands

Die geologische Entwicklung Norddeutschlands ist maßgeblich durch geodynamische Prozesse des Paläozoikums geprägt. Subduktionsprozesse und Terrane-Akkretionierungen im Zeitraum Silur bis Unterkarbon, gefolgt von kontinentalen Kollisionsprozessen führten im Oberkarbon zur Formierung des Superkontinents Pangäa (Torsvik & Cocks, 2017) und zur Bildung des variszischen Gebirges im Bereich der Kollisionszone (Franke, 1989; Franke, 2000; Franke et al., 2017). Bei der Gebirgsbildung wurde die Lithosphäre in Mitteleuropa verdickt und stark aufgeheizt. Nordwestlich vor dem Gebirge im Bereich des heutigen Norddeutschlands und der südlichen Nordsee entstand durch die Flexur der Lithosphäre ein Vorlandbecken (Ziegler, 1990; McCann, 1999). Ein Zusammenspiel aus exogenen Prozessen (Erosion), endogenen Prozessen (Slab-detachment, Reorganisation des Spannungsfeldes von kompressiv auf dextral seitenverschiebend) und teilweise gravitativen Prozessen führte zur Einebnung des variszischen Gebirges (Henk, 1999; Ziegler et al., 2004). Entlang der Seitenverschiebungen, die sich als Folge von Relativbewegungen von Laurussia und Gondwana (Arthaud & Matte, 1977) bildeten, entstanden im Oberkarbon erste Sedimentbecken in Mitteleuropa (Ziegler, 1990). Ab dem Unterperm stellte sich ein extensionales Spannungsfeld ein und es kam zu großflächiger Beckenbildung, die in Zusammenhang mit dem beginnenden Zerfall des Superkontinents Pangäa stand (Littke et al., 2008b). Dabei entwickelte sich das zentraleuropäische Beckensystem (Abb. 4.1) im Bereich des ehemaligen variszischen Vorlandbeckens (Betz et al., 1987; Maystrenko et al., 2008).



Das zentraleuropäische Beckensystem umfasst große Teile Norddeutschlands und der südlichen Nordsee (Maystrenko et al., 2008; Littke et al., 2008b). Der südliche Teil des Beckens gliedert sich von West nach Ost in verschiedene Teilbecken wie das West-Niederländische Becken, das Niedersächsische Becken und das Subherzyn Becken. Nördlich dieser Teilbecken liegt das Norddeutsche Becken (Scheck et al., 2002; Scheck-Wenderoth & Lamarche, 2005; Maystrenko et al., 2008). Das Norddeutsche Becken wird durch die Altmarkschwelle und deren nördliche Verlängerung in das Nordwestdeutsche und das Nordostdeutsche Becken unterteilt (Gast et al., 1998). Am Südrand des zentraleuropäischen Beckensystems verläuft das Elbe Verwerfungssystem (Abb. 4.1) zu dem u. a. die Osning Störung, die Harznordrand Störung und die Aller Störung gehören (Scheck et al., 2002). Den Nordrand des Beckens bildet die Sorgenfrei-Tornquist Zone. Das Ringkøbing-Fünen Hoch teilt das zentraleuropäische Beckensystem in zwei große Bereiche, die auch als nördliches und südliches Perm Becken bezeichnet werden. Durch die Extension im späten Oberkarbon bis frühen Unterperm kam es zu einer Lithosphärendehnung und Ausdünnung, die von Subsidenz und weit verbreitetem Vulkanismus begleitet wurde (Littke et al., 2008b). Dies kann als mechanische Subsidenzphase des Riftbeckens gedeutet werden, bei der lokalisiert Akkommodationsraum entlang von Verwerfungen geschaffen wurde. Das permzeitliche Riftbecken ist durch zahlreiche parallel verlaufende Horste, Gräben und N-S streichende Verwerfungen gekennzeichnet (Gast & Gundlach, 2006). Die breite Rift Zone des zentraleuropäischen Beckensystems hatte geometrische und strukturelle Ahnlichkeiten mit der heutigen Basin-and-Range Provinz in den westlichen USA (Ménard & Molnar, 1988). In den Gräben des Riftbeckens wurden terrestrische Sedimente abgelagert. Danach folgte die thermische Subsidenzphase, angetrieben durch die Abkühlung und Dichtezunahme der gedehnten Lithosphäre, die durch ein laterales Ausweiten der Depozentren im Oberperm gekennzeichnet war und von einer marinen Ingression begleitet wurde. Ein arides Klima begünstigte eine ausgeprägte zyklische Evaporitbildung (Stollhofen et al., 2008). Die thermische Subsidenzphase dauerte bis in die mittlere Trias hinein an (Littke et al., 2008b). Von der Trias bis zur Kreide unterlag das zentraleuropäische Beckensystem dann fortlaufender Subsidenz (van Wees et al., 2000). Es wurden mehrere Kilometer mächtige, mehrheitlich marine aber auch teilweise terrestrische, Sedimente abgelagert.

Die spätmesozoische und känozoische Subsidenz im zentraleuropäischen Beckensystem stand in Verbindung mit der fortschreitenden Öffnung des Atlantiks (Littke et al., 2008b). In der Oberkreide kam es zur Inversion der Beckenfüllung. Grund dafür war, dass das extensionale Spannungsfeld von einem kompressiven Regime abgelöst wurde und zahlreiche Verwerfungen dabei reaktiviert und invertiert wurden (Kockel, 2003; Kley, 2013). Das Ergebnis sind eine Vielzahl von Inversionsstrukturen, die aufgrund ihrer Geometrie auch *"arrowhead"* oder *"harpoon"* Strukturen genannt werden. Diese tektonische Inversionsphase an der Wende Oberkreide/Paläogen führte u. a. zur Heraushebung des Harzes und zur Deformation des Südrands des zentraleuropäischen Beckensystems (z. B. dokumentiert in den Strukturelementen des niedersächsischen Beckens (Betz et al., 1987) und des Subherzyn Beckens (Brandes et al., 2013)). Die känozoische Sedimentation im zentraleuropäischen Beckensystem erfolgte nach der Beckeninversion. Ablagerungen des unteren und mittleren Paläozäns sind meist nur vereinzelt in tieferen sekundären Randsenken entlang von Salzstrukturen erhalten. In der Regel befindet sich eine Diskordanz an der Basis der oberpaläozänen marinen Ablagerungen (z. B. Gürs, 2005; Knox et al., 2010; Janssen et al., 2018). Insgesamt ist das känozoische Sedimentationsmuster stark von der



progressiven Heraushebung der variszischen Massive im Bereich der südlichen Beckenränder, der neogenen Heraushebung des Fennoskandischen Schildes sowie der Subsidenz im Bereich des Norddeutschen und des Nordsee Beckens geprägt (z. B. Knox et al., 2010; Arfai et al., 2014, 2018).



Abb. 4.1 Das zentraleuropäische Beckensystem mit Darstellung ausgewählter Teilbecken (verändert nach Scheck et al., 2002; Scheck-Wenderoth & Lamarche, 2005 und Brandes et al., 2013). Der nordwestliche Teil des Norddeutschen Beckens wird auch in der Literatur als Nordwestdeutsches Becken (NWDB) und der nordöstliche Teil als Nordostdeutsches Becken (NODB) bezeichnet (Gast et al., 1998). AS = Aller Störung, HNS = Harznordrand Störung, OS = Osning Störung, RMOS = Reeder Moor Oythe Störung.

4.2 Sekundäre Randsenken entlang von Salzstrukturen

Salzstrukturen sind im zentraleuropäischen Beckensystem (ZEBS) und damit auch im Untergrund Niedersachsens weit verbreitet (Abb. 4.2) und bestehen überwiegend aus Zechstein-Salz (untergeordnet spielen auch Rotliegend-Salze eine Rolle). Die Salzstrukturen umfassen Diapire, Salzmauern und Salzkissen (Maystrenko et al., 2005; Kukla et al., 2008; Scheck-Wenderoth et al., 2008). Erste Salzbewegungen begannen während der Trias und hängen vermutlich mit der regionalen, Ost-West gerichteten Extension zusammen. Diese regionale Extension führte zur Bildung Nordnordost-Südsüdwest und Nordwest-Südost streichender Störungen und Grabensysteme, an denen parallel Salzaufstieg stattfand (z. B. Mohr et al., 2005; Scheck-Wenderoth et al., 2008; Bandes et al., 2013; Warsitzka et al., 2019).

Die Beckendifferenzierung während des Jura und der Unterkreide mit der Ausbildung Nordwest-Südost -orientierter Strukturen führte zur Bildung einer zweiten Familie von Salzstrukturen, die Nordwest-Südost streicht (Scheck-Wenderoth et al., 2008; Brandes et al., 2013; Warsitzka et al., 2019). Verbunden mit der oberkretazischen Beckeninversion war eine Reaktivierung der Nordwest-Südost bis Nordnordwest-Südsüdost streichenden Salzstrukturen. Viele dieser Salzstrukturen erreichten zu diesem Zeitpunkt die Oberfläche (Scheck-Wenderoth et al., 2008; Warsitzka et al., 2019).

Lokale, bis zu 400 m mächtige paläogene Ablagerungen sind häufig mit den sekundären Randsenken entlang dieser Salzstrukturen assoziiert, die teilweise mächtige Braunkohleflöze enthalten (Brandes et al., 2012; Riegel al., 2012; Osman et al., 2013). Während der nachfolgenden, Ost-West gerichteten Extensionsphase im Neogen waren diese Salzstrukturen weitgehend inaktiv, da neogene Sedimente fehlen und die paläogenen Braunkohlen diskordant von quartären Ablagerungen überlagert werden. In diesem Zeitraum wurden Nord-Süd streichende Salzstrukturen erneut reaktiviert (Scheck-Wenderoth et al., 2008). Besonders gut sind generell die tertiären Ablagerungen im mitteldeutschen Raum untersucht, die in zahlreichen großen Tagebauen aufgeschlossen waren (z. B. Standke, 2008; Brandes et al., 2012; Riegel al., 2012; Osman et al., 2013; Methner et al., 2019; Lenz et al., 2021).



Abb. 4.2 Salzstrukturen im Untergrund von Norddeutschland (verändert nach Reinhold et al., 2008; Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021).

4.3 Tektonische Verwerfungssysteme und seismische Aktivität

Die komplexe geologische Geschichte von Norddeutschland mit den wechselnden tektonischen Spannungsfeldern führte zur Herausbildung verschiedener Verwerfungssysteme. Die Subduktion der Tornquist See und das Andocken des Avalonia Terranes an den Kontinent Baltica im Silur



(Torsvik & Rehnström, 2003; Smit et al., 2016) führte zur Ausbildung einer flach nach Süden einfallenden und Westnordwest-Ostsüdost streichenden Verwerfung, einer sogenannten "megathrust", die den tiefen Teil der Kruste von Norddeutschland charakterisiert. Ein weiteres bedeutendes Strukturelement ist das sogenannten Elbe-Lineament (Abb. 4.1), bei dem es sich möglicherweise um ein großes dextrales Seitenverschiebungssystem handelt (Tanner & Meissner, 1996). Während der spät-karbonzeitlichen bis früh-permzeitlichen Transtension waren Nordost-Südwest und Nordwest-Südost verlaufende Verwerfungen aktiv (Kley et al., 2008). Die anschließende Extensionsphase erzeugte die Nord-Süd verlaufenden Hauptverwerfungen des Riftsystems (Gast & Gundlach, 2006; Lohr et al., 2007). Diese Ost-West gerichtete Extension hielt auch in der Trias an (Kley et al., 2008). Im Jura und der frühen Kreide dominierte eine Nordost-Südwest Dehnung, die zur Aktivität von Westnordwest-Ostsüdost verlaufenden Verwerfungen führte. Im Zuge der Rotation der Iberischen Halbinsel erfolgte in der Oberkreide eine Umstellung und Re-orientierung des Spannungsfelds auf eine Nord-Süd bis Nordnordost-Südsüdwest gerichtete Kompression (Lohr et al., 2007; Kley et al., 2008) und einer daraus resultierenden Aktivität an Westnordwest-Ostsüdost verlaufenden Verwerfungen (Kockel, 2003; Kley, 2013). Das neogene Spannungsfeld war weniger einheitlich und zeigte regionale Unterschiede (Kley et al., 2008).

Die im Untergrund von Norddeutschland vorhandenen Verwerfungen (Abb. 4.3) sind die Quelle der prähistorischen, historischen und rezenten Seismizität (Brandes et al., 2015, 2019). Traditionell wird Norddeutschland als aseismisch bis seismisch wenig aktiv eingestuft (Leydecker & Kopera, 1999), aber neuere Arbeiten haben gezeigt, dass an einigen der Hauptverwerfungen eine signifikante Erdbebentätigkeit während der letzten 16.000 Jahre stattgefunden hat (Brandes et al., 2015, 2019; Müller et al., 2020). Geologische Indikatoren für eine prähistorische Seismizität vor ca. 16.000 und 12.000 Jahren gibt es von der Osning Störung (Brandes et al., 2012). Zusammen mit der historischen Erdebentätigkeit im Raum Bielefeld (Vogt & Grünthal, 1994; Leydecker, 2011) ergeben sich daraus Hinweise auf eine wiederholte Erdbebentätigkeit in der Region. Weitere Hinweise auf eine spätglaziale tektonische Aktivität stammen von der Harznordrand Störung (Müller et al., 2020). Eine Kombination von Epizentren der historischen Erdbeben aus Leydecker (2011) mit den aktuellen Verwerfungskarten aus Kley & Voigt (2008) und Kley (2013) zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen der in der Kreidezeit sehr aktiven Hauptverwerfungen in Norddeutschland und der Verteilung der historischen Seismizität (Brandes et al., 2015). Die zeitliche und räumliche Verteilung der seismischen Ereignisse zeigt das typische Muster von Intraplattenbeben, wie es auch in Nordamerika und Asien auftritt. Dabei sind die Erdbeben episodisch, gehäuft und migrierend (Stein, 2007). Die seismische Aktivität in Norddeutschland ist teilweise verknüpft mit der Massenverlagerung durch das Abschmelzen des weichselzeitlichen Eisschildes und den damit einhergehenden Veränderungen der lithosphärischen Spannungen (Brandes et al., 2015). Der dadurch kontrollierte Anstieg der Coulomb Spannung ist ein Schlüsselfaktor für die Auslösung von seismischen Ereignissen entlang von Hauptverwerfungen in Norddeutschland (Brandes et al., 2015). Dieses Modell konnte anhand von Beobachtungen an der Tornquist Zone in Dänemark bestätigt werden. Dort tritt eine vergleichbare Seismizität am Ende der Weichselvereisung auf (Brandes et al., 2018). Der zeitliche Zusammenhang zwischen dem Abschmelzen des weichselzeitlichen Eisschildes und dem Auftreten der seismischen Ereignisse erlaubt es, viele Verwerfungen in Nord- und Mitteldeutschland als sogenannte "post-glacial faults", "glacially



triggered faults" oder "*glacially induced faults*" zu klassifizieren (Müller et al., 2022). Dabei bedeuten alle diese drei Begriffe das Gleiche und beschreiben Verwerfungen, die durch Änderungen der lithospärischen Spannung infolge des Abschmelzens des letzten Eisschildes reaktiviert wurden. Da Verwerfungen in Intraplattengebieten typischerweise langandauernde Nachbebensequenzen haben, wäre es daher möglich, dass Teile der historischen und rezenten Seismizität, Nachbeben der spätglazialen Ereignisse sind (Brandes et al., 2015).



Abb. 4.3 Tektonische Verwerfungssysteme im Untergrund von Norddeutschland (verändert nach Schulz et al., 2013; Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021).

4.4 Interaktion von Salzstrukturen und glazialen Prozessen

Numerische Modellierungen (z. B. Lang et al., 2014) zeigen, dass Salzstrukturen auf Eisauflast reagieren und bestätigen damit existierende geländebasierte konzeptionelle Modelle (z. B. Liszkowski, 1993; Sirocko et al., 2008; Hardt et al., 2021). Die Art der Reaktion hängt vermutlich hauptsächlich von der Position des Eisrandes relativ zur Salzstruktur ab. Wenn bei einem Eisvorstoß die Salzursprungsschicht (*source layer*) einer Salzstruktur belastet wird, löst dies ein





Abb. 4.4 Schematisches Modell der Interaktion von Salzstrukturen und glazialen Prozessen (verändert nach Liszkowski, 1993; Sirocko et al., 2008 und Lang et al., 2014). A) Während des Vorrückens des Eisschildes steigt der Salzdiapir auf, da die Salzursprungsschicht durch den Eisschild belastet wird. B) Während der vollständigen Eisbedeckung wird der Salzdiapir durch die Last nach unten gedrückt. C) Nach Abschmelzen des Eisschildes kann der Salzdiapir durch die Druckentlastung wieder aufsteigen. viskoses Fließen von Salz aus der Ursprungsschicht in die Salzstruktur aus, was wiederum zum Aufstieg von Salz und damit Hebung der Salzstruktur führt (Abb. 4.4). Dieser Prozess läuft so lange ab, wie die Salzursprungsschicht, aber nicht die Salzstruktur durch das Eis belastet wird. Die maximale beobachtete Hebung im numerischen Modell von Lang et al. (2014) vor dem Eisschild betrug 3,8 m. Sobald die Salzstruktur vom Eis überfahren wird, wird sie nach unten gedrückt, was zu einer deutlichen Absenkung der Oberfläche über der Salzstruktur und einer geringen Verbreiterung der Salzstruktur führt. Die maximale beobachtete Absenkung der Salzstruktur unter dem Eisschild betrug im Modell 36 m. Während des Abschmelzens des Eischildes wird ein Teil des Versatzes wieder ausgeglichen, da wieder ein Salzfluss aus der Ursprungsschicht in die Salzstruktur erfolgt. Nach dem vollständigen Abschmelzen des Eisschildes hält diese Ausgleichsbewedie Elastizität auna durch der modellierten Schichten an. Plastische Deformation der Deckschichten ist in allen Simulationen auf den Bereich unmittelbar oberhalb der Salzstruktur beschränkt. Die maximale beobachtete verbleibende Hebung im Modell betrug 2,7 m und die maximale Absenkung 3,1 m. In den sekundären Randsenken wurde nur geringe Deformation beobachtet, die unmittelbar durch die Eisauflast an der Oberfläche und nicht

durch Salzfluss im Untergrund verursacht wird. Die systematische Variation der Eingabeparameter gewährt Einblick in die Bedeutung der verschiedenen Kontrollfaktoren. Die größeren Versätze treten in Modellen mit größeren Salzstrukturen, mächtigeren Salzursprungschichten, mächtigeren Eisschilden, längeren Belastungsphasen und geringerer Salzviskosität auf. In allen Simulationen ist die Salzflussrate zu Beginn der Belastungs- und Entlastungsphasen hoch und nimmt deutlich ab, wenn der Versatz sich seinem Maximum nähert. Die Deformation innerhalb der Salzstruktur ist in den Simulationen mit kompletter Eisbedeckung im oberen Bereich am höchsten. In den Simulationen mit teilweiser Eisbedeckung tritt die stärkste Deformation an der Basis auf, wo das Salz aus der Ursprungsschicht in die Salzstruktur fließt (Lang et al., 2014).

4.5 Tiefe glaziale Erosionsstrukturen

Während des Mittel- und Oberpleistozäns wurde Norddeutschland mehrfach vom Fennoskandischen Inlandeis überfahren (z. B. Caspers et al., 1995; Knoth, 1995; Lippstreu, 1995; Rühberg et al., 1995; Stephan, 1995; Eissmann, 2002; Litt et al., 2007; Ehlers et al., 2011; Böse et al., 2012; Lang et al., 2018; Winsemann et al., 2020). Die mittelpleistozänen elster- und saalezeitlichen Eisvorstöße hatten die größten Ausdehnungen und reichten im Süden bis zum Bergland. Die elsterzeitlichen Eisvorstöße lassen sich vermutlich mit den Marinen Isotopenstadien MIS 12 und MIS 10 korrelieren, während die saalezeitlichen Eisvorstöße (Drenthe- und Warthe-Vorstöße) mit dem Marinen Isotopenstadium MIS 6 korreliert werden (Eissmann, 2002; Litt et al., 2007; Busschers et al., 2008; Toucanne et al., 2009; Ehlers et al., 2011; Roskosch et al., 2015; Lang et al., 2018; Lauer & Weiss, 2018; Winsemann et al., 2020). Unter dem Eis wurden in Norddeutschland tiefe subglaziale Rinnen und Täler (tunnel valleys, *buried valleys*) durch Schmelzwassererosion eingeschnitten (z. B. Kuster & Meyer, 1979; Ehlers & Linke, 1989; Piotrowski, 1994; Eissmann, 2002; Lutz et al., 2009; Stackebrandt, 2009; Hepp et al., 2012; Kehew et al., 2012; Janszen et al., 2013; Steinmetz et al., 2015; Coughlan et al., 2018; Lohrberg et al., 2020; Winsemann et al., 2020). Diese Rinnen können mehrere Kilometer breit (meist 3-5 km) und mehrere 10er Kilometer (max. 150 km) lang sein und wurden während der verschiedenen Eisvorstöße teilweise immer wieder reaktiviert (z. B. Jørgensen & Sandersen, 2006; Lutz et al., 2009; Steinmetz et al., 2015). Sie verlaufen in der Regel parallel zur Eisfließrichtung und senkrecht zum hydraulischen Gradienten und scheinen sich bevorzugt in Sedimente mit geringer Permeabilität (z. B. tonige Sedimente) einzuschneiden (z. B. Kehew et al., 2012) bzw. in Bereichen mit Störungen, z. B. über Salzstrukturen (Wenau & Alves, 2020).

Die größten Tiefen erreichen diese Rinnen in der sogenannten mitteleuropäischen Subsidenzzone (Abb. 4.5), die sich von der Nordsee über Hamburg, Berlin nach Breslau (Wroclaw) erstreckt (Stackebrandt, 2009). In der südlichen Nordsee liegen die gemessenen Tiefen meist zwischen 120-300 m, erreichen lokal aber auch bis zu 400 m (Lutz et al., 2009; Lohrberg et al., 2020; Winsemann et al., 2020). Im Bereich der norddeutschen Tiefebene sind die mittelpleistozänen subglazialen Rinnen durchschnittlich zwischen 200-300 m tief (z. B. Kuster & Meyer, 1979; Piotrowski, 1994). Die bisher größten ermittelten Tiefen von ca. 500 m (Reeßelner Rinne; Kuster & Meyer 1979) und ca. 580 m (Hagenower Rinne; Schulz, 2002; Müller & Obst, 2008) sind aus dem nordöstlichen Niedersachsen bzw. Mecklenburg-Vorpommern bekannt. Im nordwestlichen Teil Niedersachsens sind große und tiefe subglaziale Rinnen weniger verbreitet, in den angrenzenden nördlichen Niederlanden kommen Sie aber wieder in dichteren Abständen vor (Bosch et al., 2009; Kehew et al., 2012; Wenau & Alves, 2020). Neueste Untersuchungen des TNO (Geologischer Dienst der Niederlande) zeigen, dass diese subglazialen Rinnen Tiefen von bis zu 600 m erreichen (Ten Veen & Bakker, 2021).

Nach Süden nimmt die Größe der subglazialen Rinnen deutlich ab (Kuster & Meyer, 1979; Stackebrandt, 2009). Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass subglaziale Rinnen auch noch

deutlich weiter südlich vorkommen als auf Abb. 4.5 dargestellt. Aus dem Leinetal und der sekundären Randsenke von Schöningen sind zwei solcher Rinnen in hochauflösenden seismischen Profilen dokumentiert, die jeweils Tiefen von ca. 30-40 m erreichen (Roskosch et al., 2015; Lang et al., 2012, 2015).



Abb. 4.5 Verbreitung von tiefen subglazialen Rinnen in Norddeutschland (verändert nach Stackebrandt, 2009).

Im Bereich der früheren Eisränder stellen glazitektonische Komplexe und glaziale Zungenbecken die tiefsten glazialen Erosionsstrukturen in Norddeutschland da. Diese Erosions- und Deformationstrukturen sind durch glaziale Ausschürfung bzw. Abscherung und Zusammenschub von Sedimenten entstanden. Vor Helgoland werden dabei Erosionstiefen von bis zu 250 m erreicht (z. B. Winsemann et al., 2020; Lohrberg et al., 2022). Im Bereich der sogenannten Rehburger Linie im südlichen Niedersachsen erreichen die Zungenbecken Tiefen von bis zu 120 m (z. B. das Quakenbrücker Becken; Hahne et al., 1994; Klimke et al., 2013).

Vor den mittelpleistozänen Gletschern bildeten sich in den aufgestauten Flusstälern große Eisstauseen (Eissmann, 2002; Meinsen et al., 2011; Lang et al., 2018, 2019; Panin et al., 2020), deren katastrophales Auslaufen zur Bildung von großen Tälern und Rinnen führte, die jedoch in der Regel nur einige 10er Meter tief sind (z. B. Meinsen et al., 2011; Winsemann et al., 2016; Lang et al., 2019; Winsemann & Lang, 2020).

Die oberpleistozänen weichselzeitlichen Eisschilde (MIS 2) haben die Elbe nicht überquert und das Gebiet Niedersachsens nicht mehr erreicht (Ehlers et al., 2011; Böse et al., 2012; Hughes et al., 2016). Im Gegensatz zu den mittelpleistozänen subglazialen Rinnen sind weichselzeitliche



Rinnen in der Regel deutlich flacher (30-80 m) (Jørgensen & Sandersen, 2009; Kehew et al., 2012).

5. Geowissenschaftliche Charakterisierung der in Niedersachsen vorhandenen paläogenen Ablagerungen hinsichtlich der geologisch-sedimentologischen Eigenschaften

Übersichtsbeschreibungen zur Stratigraphie und Paläogeographie der paläogenen und neogenen Schichtfolge des zentraleuropäischen Beckens liegen z. B. von Vinken (1988), Ziegler (1990), Huuse & Clausen (2001), Gürs et al. (2008a, 2008b), Gürs (2005), Standke et al. (2005), Knox (2010), Osman et al. (2013), Thöle et al. (2014), King et al. (2016) und Janssen et al. (2018) vor. Detaillierte stratigraphische, fazielle und mineralogische Analysen der paläogenen Ablagerungen beruhen im Wesentlichen auf der Auswertung von Bohrungen (z. B. Bühmann, 1986; Fay, 1986;

Morton et al., 1988; Nielsen, 1988; Bühmann, 1989; Kuster, 2005; Vis et al., 2016) und der Bearbeitung von Ablagerungen aus den südöstlichen Beckenrand-Bereichen, die in den großen Braunkohle-Tagebauen Nord- und Mitteldeutschlands aufgeschlossen waren/sind (z. B. Standke, 2008; Krutzsch, 2011; Brandes et al., 2012; Riegel et al., 2012; Osman et al., 2013; Methner et al., 2019; Lenz et al., 2021). Die Ablagerungen des Niederrheingebietes wurden u. a. von Hiss et al. (2005) bearbeitet. Eine Übersicht der stratigraphischen Gliederung des Paläogens und des Neogens (früher zusammenfassend als Tertiär bezeichnet) in Norddeutschland ist in Tab. 5.1 dargestellt.

5.1 Paläogeographische Entwicklung des südlichen zentraleuropäischen Beckensystems im Paläogen und Neogen

Die paläogene paläogeographische Entwicklung des südlichen zentraleuropäischen Beckensystems ist in acht Übersichtskarten dargestellt (Abb. 5.1, 5.2), die auf den Arbeiten von Kockel (1988b), Vinken (1988), Ziegler (1990) und Knox et al. (2010) beruhen. Nach der tektonischen Inversion in der Oberkreide und im Unterpaläozän unterlag das südliche zentraleuropäische Beckensystem weitgehend kontinuierlicher Subsidenz mit der Akkumulation von mehr als 3000 m Sediment im Bereich der zentralen Nordsee. Im Bereich von sekundären Salz-Randsenken sind Mächtigkeiten von bis zu 3500 m dokumentiert. Insgesamt ist das känozoische Sedimentationsmuster stark von der progressiven Heraushebung der variszischen Massive aus paläozoischen Gesteinen im Bereich der südlichen Beckenränder, der neogenen Heraushebung des Fennoskandischen Schildes sowie der Subsidenz im Norddeutschen Beckens geprägt (z. B. Gürs et al., 2008a, b; Knox et al., 2010; Arfai et al., 2014, 2018). Diese tektonischen Ereignisse (events) wurden von eustatischen Meeresspiegelschwankungen (Abb. 5.3) und halokinetischen Bewegungen überlagert (z. B. Huuse & Clausen, 2001; Knox et al., 2010; Brandes et al., 2012, 2013; Osman et al., 2013; Warsitzka et al., 2019). Darüber hinaus wurde die Sedimentation noch maßgeblich von der sukzessiven Abkühlung des Klimas beeinflusst (z. B. Huuse & Clausen, 2001; Gürs, 2005; Knox et al., 2010; Thöle et al., 2014).





Tab. 5.1 Stratigraphische Tabelle des Paläogens und Neogens von Nordwest- und Nordostdeutschland (verändert nach Janssen et al., 2018). Dunkelblau steht für pelagische, küstenferne Ablagerungen. Hellblau steht für flachmarine, neritische Ablagerungen. Gelb-Blau gestreift steht für paralische Ablagerungen. Gelb steht für terrestrische Ablagerungen. Schwarze Punkte innerhalb der Formationen zeigen das Auftreten von Braunkohle an.

5.1.1 Übergeordnete Diskordanzen



Tab. 5.2PaläogeneundneogeneAblage-rungssequenzen3.OrdnungimNorddeutschenBecken (Gramann & Kockel,1988).DieübergeordnetenDiskordanzenkennzeichnenHebungsphasen (s. Abb. 5.3).

Innerhalb der paläogenen und neogenen Schichtfolge des zentraleuropäischen Beckensystems sind vier übergeordnete Diskordanzen ausgebildet. die aus dem Zusammenspiel von tektonischen, eustatischen und klimatischen Prozessen resultierten (Tab. 5.2; Abb. 5.3). Diese bedeutenden Diskordanzen finden sich am Top des Unterpaläozäns, am Top des Obereozäns, nahe des Tops des Oligozäns und im Mittelmiozän (z. B. Gramann & Kockel, 1988; Huuse & Clausen, 2001; Gürs, 2005; Knox et al., 2010; Arfai et al., 2014; Thöle et al., 2014).

Phasen mit regionaler Hebung fanden 1) während des späten Unterpaläozäns, 2) im späten Obereozän und 3) während des späten Oberoligozäns/Mittelmiozäns statt. Diese regionalen Hebungen hängen vermutlich mit kompressiven tektonischen Phasen im Zuge der Kollision von Afrika mit Europa zusammen. In älterer Literatur werden diese Hebungsphasen auch

als 1) Laramische Phase, 2) Savische Phase und 3) Pyreenäische Phase bezeichnet (Abb. 5.3) (vgl. Ziegler et al., 1990; Knox et al., 2010). Diese tektonischen Hebungsphasen wurden von eustatischen Meeresspiegelschwankungen und halokinetischen Bewegungen überlagert, die zur Ausbildung weiterer regionaler (obereozäne und mittelmiozäne Diskordanz) und lokaler Diskordanzen/Erosionshorizonte (z. B. Oberpaläozän/Untereozän) führten (Gramann & Kockel, 1988; Huuse & Clausen, 2001; Gürs et al., 2008a, 2008b). Innerhalb des Norddeutschen Beckens wurden von Gramann & Kockel (1988) innerhalb der paläogenen und neogenen Schichtfolge insgesamt neun Ablagerungssequenzen korreliert, die jeweils bedeutende Transgressions-Regressionszyklen repräsentieren (Tab. 5.2, Abb. 5.3). Sie werden jeweils von Diskordanzen bzw. deren korrelativen Konkordanzen innerhalb der tieferen Beckenbereiche begrenzt. Die wichtigen regionalen Diskordanzen sind in den Tab. 5.1. und 5.2 dargestellt.

5.1.2 Paläozän bis frühes Untereozän

Wie bereits zuvor beschrieben, sind Ablagerungen des unteren Paläozäns meist nur vereinzelt in tieferen sekundären Randsenken entlang von Salzstrukturen erhalten. Diese randlich-marinen Ablagerungen waren/sind im Bereich des südöstlichen Beckenrandes in den großen Braunkohletagebauen Nord- und Mitteldeutschlands aufgeschlossen. Nach der Hebungsphase und dem relativen Meeresspiegelabfall lag die Küstenlinie im Nordwesten etwa auf der Höhe von Bremen.





Abb. 5.1 Paläogeographische Karten von Norddeutschland und angrenzender Gebiete (verändert nach Knox et al., 2010; Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021). A) Oberpaläozän (Thanetium), B) Untereozän (unteres Ypresium), C) Untereozän (mittleres Ypresium), D) Untereozän (oberes Ypresium).

Auf die unterpaläozäne Hebungsphase folgte eine Periode mir regionaler Subsidenz und mariner Transgression im frühen Thanetium (Abb. 5.1A). Im Zuge dieser Transgression wurden weite Gebiete Norddeutschlands überflutet (Gürs, 2005; Gürs et al., 2008 a; Knox et al., 2010; Grimm & Hottenrott, 2011). Die Transgressionsfläche ist durch ein Konglomerat mit glaukonitbeschlagenen Feuersteinen ("grüngerindete Feuersteine") gekennzeichnet (Hinsch, 1993; Gürs, 2005). Die darüber liegenden Ablagerungen sind überwiegend flachmarin. Tiefere hemipelagische Tone wurden weiter nördlich in den tiefsten Becken-Bereichen abgelagert (Knox et al., 2010). Die weitgehend feinkörnige marine Sedimentation während des Thanetiums endete mit einer erneuten



Hebungsphase im späten Paläozän. Die randlichen Beckenbereiche wurden herausgehoben und die paläozänen Sedimente erodiert. Im Bereich der zentralen Nordsee und Dänemarks wird diese Erosionsphase durch eine Änderung der Sedimentation markiert. Grün-graue Tone/Tonsteine mit reicher und diverser Mikrofauna werden von grauen Tonen/Tonsteinen mit verarmter Mikrofauna überlagert (Knox et al., 2010). Diese Hebungsphase hatte eine Isolation des Norddeutschen Beckens zur Folge. Damit verbunden war eine eingeschränkte Zirkulation mit der Bildung anoxischer Bodenwässer in den tieferen Beckenbereichen, wo die untereozänen Sedimente aus Organik-reichen Tone/Tonsteinen bestehen (Gürs, 2005). Relative Subsidenz im Bereich der südwestlichen Nordsee-Bucht führte zur Akkumulation von randlich-marinen Sedimenten, die teilweise Braunkohleflöze enthalten. Die frühe untereozäne Sedimentation endete mit einer neuen kurzen Hebungsphase, die zu einer weiträumigen Erosion im Bereich der südlichen Beckenränder und der Ausbildung einer Diskordanz führte (Knox et al., 2010).

5.1.3 Unter- bis Obereozän

Am Top der oberpaläozänen Ablagerungen am Übergang zum Eozän finden sich in vielen marinen Tonen/Tonsteinen Aschelagen (meist mit basaltischer Zusammensetzung). Diese Aschelagen sind gute Markerhorizonte in *sonic logs* und markieren das Ende des nordatlantischen subaerischen Vulkanismus. Sie bilden die Basis der unter- bis obereozänen Abfolge in den Beckenbereichen (s. Kapitel 6) während im Bereich der Beckenränder eine Diskordanz ausgebildet ist. Der Top der unter- bis obereozänen Abfolge wird durch eine weiträumige Diskordanz definiert, die im späten Eozän bis zum frühen Oligozän entstand (s. Kapitel 5.1.1).

Während des Unter- bis Obereozäns unterlag das Norddeutsche Becken erneut thermischer Subsidenz, die im Zusammenhang mit der Öffnung des Nord-Atlantiks steht. In diesem Zeitraum wurden sehr mächtige feinkörnige Sedimente im Bereich der Nordsee und Norddeutschlands abgelagert (Abb. 5.1B-D, 5.2A, B). In den südlichen Beckenrandgebieten wurden Flachwassersande, paralische und terrestrische Sedimente abgelagert, die teilweise Braunkohleflöze enthalten (Gürs et al., 2008a; Standtke, 2008; Knox et al., 2010; Riegel et al., 2012; Osman et al. 2013).

Im späten Ypresium (Untereozän) kam es zu größeren Sandeinträgen entlang der südlichen Beckenränder. Dieser erhöhte klastische Eintrag dauerte bis zum späten Lutetium (Mitteleozän) an und hing vermutlich mit Hebung der westlichen und südlichen Hochgebiete zusammen (Abb. 5.1D, 5.2A). Nach dieser Hebungsphase setzte erneut Subsidenz im Bereich der südwestlichen und südlichen Hochgebiete ein, die mit einer fortschreitenden marinen Transgression und erneuter feinkörniger Sedimentation einherging. Eine signifikante Änderung der Paläogeographie des südlichen zentraleuropäischen Beckensystems fand während des späten Mitteleozäns als Folge der Hebung von Großbritannien und Frankreich statt. Diese Hebung wurde zusätzlich noch von einem eustatischen Meeresspiegelabfall überlagert. Im Bereich des westlichen Beckenrandes wurden in Folge Flachwassersedimente bis in das Gebiet der Niederlande hinein abgelagert. Das späte Eozän ist durch eine bedeutende regionale Hebungsphase gekennzeichnet. Diese Hebungsphase war mit einer starken Regression im Bereich der Beckenränder verbunden (Abb. 5.2 A, B). Im marinen Gebiet der Nordsee dauerte die Sedimentation an (Gürs et al., 2008a; Knox et al., 2010).





Abb. 5.2 Paläogeographische Karten von Norddeutschland und angrenzender Gebiete (verändert nach Knox et al., 2010; Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021). A) Mitteleozän (oberes Lutetium), B) Obereozän (mitteres Priabonium), C) Unteroligozän (Rupelium), D) Oberoligozän (mittleres Chattium).

5.1.4 Oligozän

Der Übergang vom Eozän zum Oligozän war mit einer Änderung der Hebungs- und Subsidenz-Muster in Nordwest-Europa verbunden, die eine Änderung des lithosphärischen Spannungsfeldes anzeigen und zur Hebung der westlichen und nordöstlichen Beckenränder des zentraleuropäischen Beckensystems führte. Damit verbunden war die Ausbildung einer regionalen Diskordanz. Im Zuge des nachfolgenden eustatischen Meeresspiegelabfalls fand verstärkt Erosion und Abtragung entlang der Beckenränder statt und es kam zur Bildung einer markanten



Diskordanz in den südlichen Randbereichen des Norddeutschen Beckens. In der östlichen Nordsee progradierte das Eridanos-Delta bis auf den Dänischen Schelf als Folge der Hebung des südlichen Norwegens und Subsidenz im Bereich des Nordsee-Beckens (Overeem et al., 2001; Verweij et al., 2018). Die Klima-Erwärmung im Rupelium führte zu einer schnellen marinen Transgression, der Überflutung zuvor trocken gefallener Beckenbereiche (Knox et al., 2010; Vis et al., 2016) und der Ablagerungen weitverbreiteter feinkörniger mariner Sedimente (Abb. 5.2C). Tektonische Aktivität während des Übergangs vom Rupelium zum Chattium, die mit einem eustatischen Meeresspiegelabfall einherging, leiteten eine erneute Regression ein. Nachfolgend kam es immer wieder zu Transgressionen und Regressionen mit der Änderung von sandig-dominierter Fazies zu tonig-dominierter Fazies und umgekehrt (Gürs, 2005; Knox et al., 2010).

5.1.5 Miozän – Pliozän

Die Basis des Miozäns wird entlang der südlichen Beckenränder durch eine Diskordanz charakterisiert, die aus einer Kombination von tektonischer Hebung (vgl. Kapitel 5.1.1, Abb. 5.3) und einem klimabedingten, eustatischen Meeresspiegelabfall resultierte. In den tieferen Beckenbereichen scheint die Sedimentation weitgehend kontinuierlich gewesen zu sein. Die Hebung war u. a. mit der Inversion des Sole Pit Beckens (Niederlande), des Ringkøbing-Fünen Hochs und der



Abb. 5.3 Globale Meeresspiegelkurve und wichtige tektonische Hebungsphasen während des Paläogens und Neogens (verändert nach Knox et al., 2010).

Sorgenfrei-Tornquist Zone verbunden (vgl. Abb. 4.1). Erhöhte Sedimentzufuhr in den östlichen Beckenbereichen führte zur Bildung eines großen Fluss-Systems, das als baltisches Fluss-System bezeichnet wird. Dieses Fluss-System entwässerte große Teile Fennoskandiens, mündete in die Nordsee und schüttete das große Eridanos-Delta weiter auf (Overeem et al., 2001; Knox et al., 2010; Thöle et al., 2014; Winsemann et al., 2020).

Während des Mittelmiozäns kam es zu einer erneuten marinen Transgression und der Ablagerung von marinen und randlich-marinen Sedimenten im Norddeutschen Becken. Die Hebung von Großbritannien und Fennoskandien führte zu einer Erhöhung des klastischen Eintrages. Im Bereich der südöstlichen Nordsee wurde das Sediment im We-

sentlichen über das baltische Fluss-System eingetragen. Durch die verstärkte Subsidenz in der zentralen Nordsee wurden seit dem Mittelmiozän mehr 1500 m mächtigen Sedimente abgelagert (Knox et al., 2010; Arfai et al., 2014, 2018).



5.2. Lithologie, Verbreitung und Mächtigkeit der paläogenen Ablagerungen in Niedersachsen und angrenzenden Gebieten

Die Verbreitung, Lithologie und Mächtigkeit der paläogenen Ablagerungen sind in Abb. 5.1-5.9 dargestellt. Im nördlichen Niedersachsen basieren die Informationen zur Lithologie auf der Auswertung von Bohrungen (z. B. Bühmann, 1986; von Daniels & Gramann, 1988). In einigen Sandund Kiesgruben Niedersachsens sind oberflächennah paläogene Sedimente aufgeschlossen. Es handelt sich hierbei um Vorkommen in glazitektonischen Komplexen, die abgescherte paläogene Ablagerungen enthalten (Janssen et al., 2018). Am besten untersucht ist das Gebiet zwischen Weser, Aller und Elbe, basierend auf den Bohrungen Volkensen (TK 25 Elsdorf 2772) und der Forschungsbohrung Wursterheide (TK25 Nordholz 2217; Benda et al., 1988). Die paläogenen Ablagerungen westlich der Weser sind weniger gut untersucht (von Daniels & Gramann, 1988). Die neogenen Ablagerungen wurden im Rahmen von Grundwasser-Untersuchungen detaillierter untersucht (von Daniels & Gramann, 1988; Kuster, 2005). Für Nordostdeutschland liefert Standke et al. (2005) einen guten Überblick über die Zusammensetzung der paläogenen und neogenen Ablagerungen. Aus den südlichen Beckenrandbereichen gibt es zahlreiche Beschreibungen der eozänen bis oligozänen Flachwasser- und randlich-marinen Ablagerungen (z. B. Standtke, 2008; Knox et al., 2010; Krutzsch, 2011; Brandes et al., 2012; Riegel et al., 2012; Osman et al., 2013).

5.2.1 Paläozän

Unterpaläozän

Die Ablagerungen des Unterpaläozäns (Danium) sind im Norddeutschen Becken größtenteils erodiert (Sattler-Kosinowski & Streif, 1985; Baldschuhn, 1993, 1995; King et al., 2016) und liegen teilweise nur noch als Erosionsreste vor (Standke et al., 2005). In den meisten Fällen überlagern die Ablagerungen des Thanetium diskordant Kalksteine des Maastrichiums (Tab. 5.1; Hinsch, 1991, 1993). Die Ablagerungen des Daniums sind überwiegend karbonatisch ausgebildet und umfassen in Nordwestdeutschland die Dankalk-Formation. Im Bereich der Beckenränder kommen molluskenreiche Kalkarenite vor. Im Beckenzentrum sind bryozoenreiche Kalke in Schreibkreide-Fazies bzw. Tiefwasser-Riffkalke ausgebildet (Gürs, 2005; King et al., 2016). In Nordostdeutschland liegen Sedimente der marinen Wülpen-Formation transgressiv über präpaläogenen Ablagerungen. Sie bestehen aus überwiegend schluffigen, schwach glaukonithaltigen, kalkhaltigen Feinsanden, die nach oben hin gröber werden (Standke et al., 2005). Darüber folgen Ablagerungen der marinen Waßmannsdorf-Formation, die regional unterschiedliche Lithologien aufweisen. Im Raum Berlin werden sie überwiegend als eine Wechselfolge von schluffigen Kalkfeinsanden und lockeren Mergelsanden beschrieben. Nordöstlich von Magdeburg (Raum Wülpen) bestehen die Ablagerungen aus stark feinsandigen, kalkhaltigen Schluffen mit geringmächtigen Tonmergellagen (Standke et al., 2005).




Abb. 5.4 Verbreitungs- und Mächtigkeitskarten der paläogenen Ablagerungen im Norddeutschen Becken. A) Oberpaläozäne Ablagerungen, B) eozäne Ablagerungen (verändert nach Kockel, 1988b; Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021).

Oberpaläozän

Die Hebung am Ende des Unterpaläozäns verursachte eine starke Regression und Erosion der unterpaläozänen Ablagerungen. Östlich von Bremen (Söhlingen) sind paralische Schichten erbohrt. Aus dem Raum Hannover sind geflammte kontinentale Tone und Braunkohlen (Wehmingen) bekannt. Im Beckeninneren entstanden weite Denudationsflächen mit glaukonitbeschlagenen Feuersteinen ("grüngerindete Feuersteine"; Gürs, 2005; Kuster, 2005). In Nordostdeutschland tritt die marin-brackische **Nassenheide-Formation** auf. Diese besteht aus meist sandigen Ablagerungen, in denen einige geringmächtige Braunkohleflöze auftreten (Flözhorizont Viesen; Standke et al., 2005).

Zu Beginn des Thanetiums kam es zu einer Transgression und der Sedimentation feinklastischer Ablagerungen. Im Beckeninneren sind dies aschgraue bis dunkelgraue, z. T. plastische bis leicht "schieferige" Tone mit Ton(-mergel)steinlagen der Basbeck-Formation (Harbort et al., 1911; Lang, 1992; Gürs, 2005, Janssen, 2018). Teilweise enthalten die Tone meist feinkörnige, z. T. glaukonithaltige Sandsteinlagen (Lang, 1981; Jürgens, 1982b; Meyer, 1982; Baldschuhn, 1993). Im nördlichen Niedersachsen gehen die Tonsteine teilweise in Mergel- oder Schluffsteine über (Höfle, 1976; Röhling, 2004). Die Abfolgen enthalten im Norden Niedersachsens regelmäßige Einschaltungen grobkörniger Glaukonitlagen und sind ansonsten nahezu sandfrei. Gröberklastische Einschaltungen nehmen vom Raum Hamburg-Bremen Richtung Süden hin zu und bestehen aus Glaukonitsanden und Konglomeraten (Schad, 1947). Die Ablagerungen sind glaukonithaltig, z. T. glimmerhaltig, pyrithaltig und kalkhaltig (Streif, 1993; Barckhausen, 1995; Röhling, 2004). Im tieferen Teil kommen kalkschalige Foraminiferen vor, im höheren vornehmlich große Sandschaler. Eine für das Paläozän typische Foraminiferen-Art ist die Buliminia trigonalis (Staesche & Hiltermann, 1940; Gürs, 2005; Kuster, 2005). Die oberpaläozänen Ablagerungen enthalten im südlichen Teil des Beckens zudem teilweise Braunkohlestücke (Lang, 1983). Im Bereich der Beckenränder sind nur selten Ablagerungen vorhanden, wie z. B. die fluviatile Waseberg-Formation (Gürs, 2005, Janssen, 2018). In Nordostdeutschland treten die Ablagerungen der marinen Helle- und Mahlpfuhl-Formation auf. Diese bestehen aus Tonen, Tonsteinen, Schluffen und Sanden, sind kalkfrei bis kalkarm, teils glaukonithaltig, teils pyrithaltig (Blumenstengel, 1998; von Bülow & Müller, 2004; Standke et al., 2005). Die Ablagerungen der Linda-Formation werden als brackisch-ästuarin-terrestrisches Äquivalent zu den Helle- und Mahlpfuhl-Schichten interpretiert (Standke et al., 2005).

Verbreitung, Mächtigkeit, Tiefenlage

Die paläozänen Ablagerungen sind nicht vollständig erhalten (Gürs, 2005; Standke et al., 2005) und nur geringmächtig. Im Norddeutschen Becken betragen die Mächtigkeiten durchschnittlich weniger als 100 m (Abb. 5.4A; Kockel, 1988b; Knox et al., 2010). Im nördlichen Niedersachsen erreichen die Ablagerungen des Oberpaläozäns Mächtigkeiten zwischen 18 m und 87 m (Sattler-Kosinowski & Streif, 1985; Streif, 1993; Jürgens, 1982a, b; Höfle, 1976). Die Basis der oberpaläozänen Ablagerungen liegt in Tiefen von ca. 800 m bis 1800 m (Streif, 1993; Hinsch, 1993; Schmitz, 1985a). Im zentralen Bereich Niedersachsens erreichen die oberpaläozänen Ablagerungen Mächtigkeiten zwischen 15 m und 90 m (Lang, 1981, 1983; Baldschuhn, 1995; Blumenstengel, 1998; Meyer, 2009); die Basis liegt dort in Tiefen von 600 m bis 926 m (Meyer, 2009; Harbort et al., 1911). Im Nordostdeutschen Beckens können die paläozänen Sedimente

teilweise höhere Mächtigkeiten erreichen. Die Mächtigkeiten der Waßmanndorf-Formation liegt bei ca. 20 m bis >140 m, die der Nassenheide-Formation bei etwa 90 m bis 100 m und die Mächtigkeit der Helle- und Mahlpfuhl-Formation kann insgesamt bis zu 600 m betragen (Standke et al., 2005; Standke, 2015).

5.2.2 Eozän

Im Nordwestdeutsches Becken ist größtenteils die Schichtenfolge von Unter- bis Mitteleozän erbohrt (Tab. 5.1; Müller, 1986; Gramann, 1989; Gürs, 2005; Kuster, 2005; Janssen et al., 2018). Die Forschungsbohrung Gartow (TK25 Lenzen 2934) durchteuft eine für Nordwestdeutschland typische Abfolge des Unter- bis Mitteleozäns (Kuster, 2005). Stellenweise sind auch obereozäne Ablagerungen vorhanden. Im Nordostdeutsches Becken ist eine größtenteils vollständige Eozän-Abfolge erhalten (Tab. 5.1; Standke et al., 2005).

Untereozän

Untereozäne Ablagerungen (Ypresium) sind in ganz Norddeutschland verbreitet und treten flächenhaft auf (von Daniels & Gramann, 1988; Gürs, 2005; Standke et al., 2005). Die untereozänen Ablagerungen werden in Nordwestdeutschland traditionell in die Abschnitte Untereozän 1 (UE1) bis Untereozän 4 (UE4) untergliedert (Staesche & Hiltermann 1940; Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Darüber hinaus existiert eine Anzahl weiterer regionaler Formationen (Tab. 5.1).

Die Ablagerungen des **Untereozän 1** (UE1) bestehen aus dunkel- bis grünlichgrauen, marinen, teils schluffigen Tonen (von Daniels & Gramann, 1988; Lang, 1992; Baldschuhn, 1995). Sie enthalten Einschaltungen aus feinkörnigen Sandsteinen (Kockel, 1980; Lang, 1992; Baldschuhn, 1993, 1995). Diese treten im Osten (Wendland) und Südosten Niedersachsens vor allem an der Basis auf (von Daniels & Gramann, 1988). Es kommen zudem Einschaltungen von mehr als 70 Aschelagen vor (FB Wursterheide; Knox, 1989), die mit dem Vulkanismus in der Thule-Region (Nordatlantik) zusammenhängen (King et al., 2016). Die Ablagerungen sind glaukonithaltig, pyrithaltig und teilweise kalkhaltig (Kockel, 1980; von Daniels & Gramann, 1988; Lang, 1992; Baldschuhn, 1993, 1995). Diese Tuff und Tuffit führenden Tone enthalten darüber hinaus Phosphorite und Faserkalke (Gürs, 2005). Es sind keine kalkschaligen Mikrofossilien gefunden worden. Es werden jedoch lokal begrenzt pyritisierte Scheiben-Diatomeen, Schwammnadeln und Fischreste beschrieben (von Daniels & Gramann, 1988; Blumenstengel, 1998). Die Ablagerungen des Untereozän 2 (UE2) umfassen grau bis grau-grünliche, teils schwach feinsandige Tone und Tonsteine (Lang, 1981, 1992). Sie enthalten Einschaltungen mit feinkörnigen Sanden und teils verkieselten Sandsteinen im Osten und Südosten Niedersachsens (Lang, 1981, 1992; Gürs, 2005; Janssen et al., 2018) sowie Glaukonit und teilweise Pyrit (Lang, 1981, 1992). Im Bereich des südlichen Beckenrandes im Raum Helmstedt kommen randlich-marine Ablagerungen der Elz-Formation mit Kohleflözen vor (Gürs, 2005); Ablagerungen mit Braunkohlebruchstücken kommen im südlichen Niedersachsen vor (Lang, 1981). Im südöstlichen Niedersachsen treten die vorwiegend aus sandigen Schluffen und Sanden bestehenden, fossilarmen Ablagerungen der Zerben-Formation auf. Diese wurden zeitgleich mit den tonig-schluffigen Sedimenten der Marnitz-Formation abgelagert, die Foraminiferen, Radiolarien, Schwammnadeln und Reste von



Echiodermen, Fischen und Pflanzen enthalten. Beide Formationen werden dem UE2-4 zugeordnet (Blumenstengel, 1998; Blumenstengel & Krutzsch, 2008). Die in Nordwestdeutschland flächenhaft verbreiteten Ablagerungen der **Lamstedt-Formation** umfassen Sedimente des UE-1 und UE-2. Die tonigen Beckenablagerungen sind faziell relativ einheitlich, wurden in bathyalen Wassertiefen unter dysoxischen bis anoxischen Bedingungen abgelagert (Gürs, 2005; Gürs et al., 2008a; Janssen et al., 2018). Die marinen Ablagerungen der **Schlieven-Formation** bilden das nordostdeutsche Äquivalent zur Lamstedt-Formation. Diese Sedimente werden als kalkhaltige, schluffige Tone bis tonige Schluffe beschrieben und enthalten ebenfalls die für das Unter-Eozän charakteristischen phosphorithaltigen Asche- und Tuffitlagen (von Bülow & Müller, 2004; Standke et al., 2005).

Die Ablagerungen des Untereozän 3 (UE3) umfassen vorwiegend olivgrüne bis rostrote, sehr feinkörnige, teils feinsandige, mergelige Tone (von Daniels & Gramann, 1988; Lang, 1992; Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Vor allem im Süden und Südosten Niedersachsens kommen Einschaltungen von Sand und Sandsteinen vor. Die Sande und Sandsteine sind grau, feinkörnig, teilweise verkieselt, kalkfrei und enthalten teilweise Braunkohlebruchstücke und -flöze (Lang, 1981; Jürgens, 1982b; von Daniels & Gramann, 1988). Das Vorkommen einer kalkschaligen Foraminiferenfauna deutet auf eine bessere Durchlüftung der Sedimente hin. Diese Ablagerungen werden als plastisch und seifig beschrieben und gehören zur Fehmarn-Formation (von Daniels & Gramann, 1988; Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Im Süden Niedersachsens gehen die Tonsteine nach oben hin in (Ton-)Mergelsteine und Kalksteine über. Die Ablagerungen sind glaukonithaltig, teils glimmerhaltig, teils pyrithaltig und fossilführend (Lang, 1981, 1992; Baldschuhn, 1995). Die Ablagerungen des Untereozän 4 (UE4) bestehen im unteren Bereich aus grauen bis grün-grauen, teils feinsandigen Tonen und Ton- bis Tonmergelsteinen (Lang, 1981, 1992; Gürs, 2005). Die Ablagerungen sind überwiegend nicht bis teilweise schwach karbonatisch, teils glaukonithaltig und pyrithaltig. Sie führen eine Molluskenfauna in Pyriterhaltung mit planktonischen Schnecken (Hinsch, 1993; Gürs, 2005). Im Süden und Südosten Nordwestdeutschlands können Einschaltungen von glimmerhaltigen und glaukonithaltigen, sandigen Ablagerungen und Sandsteinen mit Braunkohleflözen beobachtet werden (Elz-Formation; v. Daniels & Gramann, 1988; Lang, 1992; Baldschuhn, 1993, 1995; Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Die marinen Ablagerungen der Marnitz-Formation bilden in Nordostdeutschland das Äquivalent zu den Ablagerungen des UE2-UE4. Anhand eines weitverbreiteten Sandhorizonts werden die ansonsten überwiegend tonigen bis schluffigen Marnitz-Schichten in die untere Marnitz-Folge (UE2-UE3) und obere Marnitz-Folge (UE4) untergliedert (von Bülow & Müller, 2004; Standke et al., 2005; Standke, 2015). Die im südöstlichen Randbereich des Nordostdeutschen Beckens vorkommenden Ablagerungen der Zerben-Formation sind sandig ausgebildet (Standke et al., 2005). Im Norden Schleswig-Holsteins treten Ablagerungen der Heiligenhafen-Formation auf, die als Wechsellagerungen aus tonigen Schluffen und Schluffsteinen beschrieben werden (Gürs, 2005). Im höheren UE4 wurden Radiolarien-reiche Sedimente abgelagert, die zur Bildung charakteristischer Kieselgesteine (Chert) und Kiesel-Konkretionen geführt haben. Diese Kieselgesteine werden in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern zur Heiligenhafen-Formation gezählt (Hinsch, 1988a; Gürs, 2005; Kuster, 2005). Nach Westen und Südwesten wird das Sediment toniger. Im Raum Hamburg kam es zur Ablagerung von grünlichen, plastischen Tonen der Lillebælt-Formation (Hinsch, 1995; Gürs, 2005). Im Süden bis Südosten des Nordwestdeutschen

Beckens werden die Sedimente zunehmend sandiger und glaukonithaltiger. Die Ablagerungen der Heiligenhafen-Formation sind hier durch die Ablagerungen der **Glinde-Formation** und der **Emmerstedt-Formation** ersetzt, welche zu der Gruppe der Grünsande gehören (Ritzkowski, 1990; Gürs, 2005).

Mitteleozän

Während des späten Ypresium und ältesten Lutetium kam es zu einer Regression und Sandeinträgen entlang der südlichen Beckenränder (Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Im Nordwesten Niedersachsens kommen feinkörnige, tonige Sandsteine der Grünsandgruppe vor, die zur **Glinde-Formation** und zur **Helmstedt-Formation** gehören. Die Ablagerungen sind glaukonithaltig und kalkhaltig (Streif, 1981; Jürgens, 1982b; Schmitz, 1985b; Sattler-Kosinowski & Streif, 1985). Die paralischen Ablagerungen der Helmstedt-Formation enthalten Braunkohle-Flöze (Gürs, 2005). Im Nordostdeutschen Becken kann der untere Abschnitt der **Dragun-Formation** mit den Ablagerungen der Grünsandgruppe korreliert werden (Lotsch, 1979, 1981; Standke et al., 2005). Im südlichen Randbereich kam es zeitgleich zur Ablagerung von geringmächtigen sandigen Tonen, Schluffen und Sanden, die glaukonithaltig, kalkhaltig und fossilführend (**Nedlitz-Formation;** Lotsch et al., 1969; Blumenstengel, 1998; Standke et al., 2005).

Auf die frühe mitteleozäne Regressionsphase folgte eine ausgedehnte Transgression im oberen Lutetium. Im Beckenzentrum lagerten sich pelagische Mergel ab, die zum Hangenden in teils sandige, glaukonithaltige, kalkige Tone bzw. Tonmergel übergehen (Streif, 1981; Sattler-Kosinowski & Streif, 1985; Hinsch 1988; Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Nachfolgend kam es zur Ablagerung von charakteristischen Kalksanden (Kalkarenit Formation, Glinde Formation), die auch als "Brüssel-Sand" bezeichnet werden (Abb. 5.7-5.9). Sie bilden einen wichtigen Leithorizont im gesamten Beckenbereich (Sattler-Kosinowski & Streif, 1985). Es handelt sich um graue und grünliche, teilweise auch hellgraue bis gelbliche, meist feinkörnige, mürbe Kalksandsteine. Die Ablagerungen sind fossilführend und enthalten u. a. Muschelbruchstücke, Seeigelstacheln, Fischreste und Nummuliten (Sattler-Kosinowski & Streif, 1985; Schmitz, 1985a; Baldschuhn, 1993, 1995; Röhling, 2004; Meyer, 2009). Sie werden als küstennahe, marine Schüttung interpretiert (Streif, 1998). Im Beckenzentrum kam es zur Ablagerung von pelagischen Mergeln der Søvind-Formation (Gürs, 2005). Die obere Dragun-Formation repräsentiert einen etwa zeitgleich gebildeten Abschnitt innerhalb des Nordostdeutschen Beckens und gehören zur Kalksandstein-Gruppe. Die Ablagerungen der Genthin-Formation bilden das küstennähere Äquivalent zu den oberen Dragun-Schichten. Es handelt sich um sandige, glaukonithaltige und kalkhaltige Ablagerungen (Blumenstengel, 1998; Standke et al., 2005). Im Süden des Nordwestdeutschen Beckens überlagern marine schluffig, feinsandige Ablagerungen der Annenberg-Formation und Grünsande der Gehlberg-Formation die Braunkohleführenden randlich-marinen Ablagerungen der Helmstedt-Formation (Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Teilweise kommen starke Anreicherungen von Glaukonit vor (Kuster, 2005). Im Nordostdeutschen Becken treten sandige, glaukonithaltige, sowie kalkfreie bis kalkhaltige Ablagerungen der Serno-Formation auf (Blumenstengel, 1998).



Obereozän

Obereozäne (Priabonium) Sedimente sind im Nordwestdeutschen Becken aufgrund der regionalen Hebungsphase nur sehr lückenhaft vorhanden (Gramann, 1989; Gürs, 2005; Janssen et al., 2018). Zudem ist die Abgrenzung obereozäner Ablagerungen von denen des unteren Oligozäns sehr schwer, da sie sich kaum in der Zusammensetzung unterscheiden und es keine eindeutigen biostratigraphischen Marker gibt (Gramann, 1989; Kuster, 2005).

Regional begrenzte, obereozäne Vorkommen sind vor allem im nördlichen Niedersachsen zu finden (Kuster, 2005). Es handelt sich um teils schluffige Tone und Tonmergel (Meyer, 1982; Baldschuhn, 1993, 1995; Kuster, 2005; Meyer, 2009). Richtung Süden kommen teilweise Einschaltungen von Sandsteinen vor (Meyer, 2009). Im Nordostdeutschen Becken treten flachmarine Ablagerungen der **Schönwalde-Formation** auf. Diese bestehen im unteren Bereich aus tonarmen, glaukonithaltigen Feinsanden ("untere Schönwalde-Folge") und im oberen Bereich aus tonreichen, kalkhaltigen Sanden ("obere Schönwalde-Folge"; Standke et al., 2005). Die Ablagerungen der unteren Schönwalde-Folge sind meist nur in tiefergelegen Senken erhalten und werden mit den Ablagerungen der niedersächsischen **Gehlberg-Formation** korreliert (Lotsch et al., 1969; Lotsch, 1981; Standke et al., 2005). Die Ablagerungen der oberen Schönwalde-Folge sind weiträumiger erhalten, liegen oft transgressiv auf älteren Abfolgen und werden zeitlich mit den Ablagerungen der niedersächsischen **Silberberg-Formation** korreliert (Lotsch, 1981; Standke et al., 2005). Die Ablagerungen der Borna-Formation bilden ein paralisches Äquivalent zu den Schönwalde-Schichten und sind teilweise kohleführend (Standke et al., 2005).

Verbreitung, Mächtigkeit, Tiefenlage

Die Gesamtmächtigkeit der eozänen Ablagerungen variiert im Norddeutschen Becken sehr stark aufgrund des Aufstiegs zahlreicher Salzstrukturen (Abb. 4.2, Abb. 5.4B, 5.7-5.9; s. Kapitel 4.2, Kapitel 5.4) und schwankt etwa zwischen 100 m und 1000 m (Frisch, 1984; Kockel, 1988a, b; Lang; 1992; Streif, 1993; Barckhausen, 1995; Blumenstengel, 1998; Meyer, 2009). Im nordöstlichen Teil des Norddeutschen Beckens erreichen die Ablagerungen des Eozäns durchschnittliche Mächtigkeiten von 100 m bis 350 m (Abb. 5.4B; Kockel, 1988b; Standke, 2015). Höhere Mächtigkeiten werden im Nordwestdeutschen Becken in den sekundären Randsenken entlang von Salzstrukturen erreicht. So beträgt beispielsweise die Mächtigkeit der eozänen Abfolgen in der Randsenke des Salzstocks Gorleben 430 m (Bohrung BV19/2933). Südöstlich des Salzstocks liegt die Mächtigkeit des Eozäns bei nur noch 240 m (FB Gartow; Kuster, 2005). In der Forschungsbohrung Wursterheide wurden etwa 373 m mächtige eozäne Sedimente erbohrt (Bühmann, 1989). Die höchsten Mächtigkeiten der gesamten Eozänabfolge liegen im nördlichen Niedersachsen, Hamburg und in Schleswig-Holstein im Bereich des Glückstadt Grabens, des Hamburger Lochs und der südöstlichen Nordsee. Hier erreichen die eozänen Sedimente Mächtigkeiten von bis zu 2000 m (Abb. 5.4B; 5.7-5.9; Gramann & Kockel, 1988; Kockel, 1988b). Im Bereich des Westholstein-Trogs können die eozänen Ablagerungen Mächtigkeiten von über 1000 m erreichen (Abb. 5.9; Hinsch, 1988b).



5.2.3 Oligozän

Im gesamten Norddeutschen Becken sind Ablagerungen des Unter- und Oberoligozän vorhanden, die in den Beckenrandgebieten diskordant auf den eozänen Ablagerungen liegen können (Gürs, 2005; Kuster, 2005; Standke et al., 2005; Janssen et al., 2018).



Abb. 5.5 Verbreitungs- und Mächtigkeitskarten der oligozänen Ablagerungen im Norddeutschen Becken (verändert nach Kockel, 1988b; Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021).

Unteroligozän

In den Beckenzentren wurden ab dem Unteroligozän wieder schluffige, teils tonige marine Sedimente der **Silberberg-Formation** abgelagert, die relativ weit verbreitet sind (Gürs, 2005; Kuster, 2005). Die tonreichen, kalkhaltigen Sande der oberen Schönwalde-Folgen bilden das nordostdeutsche Äquivalent zur Silberberg-Formation (Gürs, 2005; Standke et al., 2005). In Folge einer beckenweiten Regression kam es im Bereich der Beckenränder zur Ausbildung einer Diskordanz und der nachfolgenden Ablagerung von sandigen Sedimenten der **Neuengammesand-Formation** bzw. des **Rupelbasissands** (Gürs, 2005; Standke et al., 2005). Die für den Raum Hamburg charakteristischen Ablagerungen der **Neuengammesand-Formation** bestehen größtenteils aus glaukonithaltigen, größtenteils feinkörnigen Sanden oder Sandsteinen sowie Mergeln (Meyer, 1982; Sattler-Kosinowksi & Streif, 1985; Schmitz, 1985a, b, 1987; Baldschuhn, 1995; Röhling, 2004). Kuster (2005) beschreibt die Neuengammer Gassande überwiegend als grünlich graue Tone und Schluffe mit wechselnden Feinsandgehalten. Die Ablagerungen sind schwach kalkhaltig bis kalkfrei und haben einen nach oben hin abnehmenden Glaukonit-Gehalt. Typisch ist das Vorkommen von Quarzkörnern in der tonig/schluffigen Matrix sowie die Einschaltung von bis zu 2 m mächtigem Grobsand- bis Feinkies, der aus bis zu 90 % Quarzkörnern besteht (Kuster, 2005). Die marinen Rupelbasissande bilden das nordwestdeutsche Äquivalent zu den Neuengammer Gassanden (von Bülow & Müller, 2004; Standke et al., 2005). Sie bestehen aus stark glaukonithaltigen, tonigen Schluffen (Standke et al., 2005).

Auf die Regressionsphase folgte eine ausgedehnte Transgression, die sogenannte Rupel-Transgression (Gürs, 2005, Gürs et al., 2008a). Die überwiegend grünlichgrauen Tone der **Rupelton-Formation** sind im Beckenzentrum plastisch ausgebildet und werden zu den Beckenrändern hin zunehmend schluffiger und sandiger (Gürs, 2005; Standke et al., 2005). Sie kommen sowohl im Nordostdeutschen als auch im Nordwestdeutschen Becken vor (Gürs, 2005; Standke et al., 2005). Die Ablagerungen haben einen stark schwankenden Kalkgehalt, sind teils pyrithaltig, teils kalkhaltig und fossilführend. Charakteristisch für den Rupelton ist seine homogene lithologische Zusammensetzung. Komponenten mit einer Korngröße größer als Ton bzw. Schluff sind selten (Landgraf, 1972; Mattiat, 1979). Die Tone enthalten lagenweise Mergelsteine mit frühdiagenetischen Kalk-Konkretionen ("Septarien") und werden daher auch als "Septarienton" bezeichnet (Gürs, 2005; Kuster, 2005; Standke et al., 2005). Im Südosten des Nordostdeutschen Beckens gehen die Rupeltone in eine sandige Beckenrand-Fazies über (Standke et al., 2005).

Oberoligozän

Tektonische Aktivität während des Übergangs vom Rupelium zum Chattium (Oberoligozän) und ein eustatischer Meeresspiegelabfall leiteten eine erneute Regression ein. Der sogenannte Asterigerinen-Horizont markiert die Basis der Ablagerungen des Chattiums (de Man et al., 2004; Standke et al., 2005). Dieser ist durch das zahlreiche Auftreten der benthischen Foraminifere *Asterigerinoides gürichi gürichi* charakterisiert (Müller, 2000; Kuster, 2005; Standke et al., 2005). Im niedersächsischen Teil des Norddeutschen Beckens kennzeichnet der Grenzglaukonit-Horizont den Übergang vom Rupelium zu Chattium (Kuster, 2005). Diese Ablagerungen bestehen aus dunkel- bis hellgrünlich grauen, schluffigen Tonen. Sie sind vorwiegend kalkfrei und enthalten teilweise Siderit, Pyrit, Phosphorit und Apatit (Köwing, 1956; Valeton & Abdul-Razzak, 1974; van den Bosch et al., 1975; Bellmann, 1979; Zimmerle et al., 1990; Kuster, 2005).

Während der nachfolgenden Transgression wurden im Zentrum des Nordwestdeutschen Beckens weiterhin feinkörnige Sedimente abgelagert, die jedoch einen höheren klastischen Anteil aufweisen und durch einen hohen terrigenen Huminstoffeintrag geprägt sind (Gürs, 2005; Knox et al., 2010). Es handelt sich überwiegend um graue bis braune Kalkmergel mit wechselnden Schluff- und Feinsandgehalten. Die Ablagerungen sind glaukonithaltig, teilweise glimmerhaltig, teilweise humos bzw. bituminös (Lang, 1983; Sattler-Kosinowski & Streif, 1985; Streif, 1993; Blumenstengel, 1998; Gürs, 2005). Generell sind die Ablagerungen des Chattiums nur lückenhaft verbreitet. Im Bereich der Beckenränder wurden sandige, fossilreiche Sedimente der **Söllingen-Formationen** abgelagert. Die sandigen Ablagerungen der **Diekholzen-Formation** bilden ein regionales Vorkommen in einer Grabenstruktur (Ritzkowski, 1999; Gürs, 2005). Erst die offen marinen, feinsandigen Ablagerungen des höheren Chattiums sind wieder weiterverbreitet (**Ratzeburg-Formation**; Gürs, 2005). In Gebieten, in denen keine oberoligozänen Sedimente abgelagert wurden, bildet der Grenzglaukonit die markante Grenze zwischen oligozänen und miozänen Ablagerungen (Kuster, 2005). Im Nordostdeutschen Becken erfolgte eine Unterteilung



der Ablagerungen in landferne und landnähere Einheiten. Das Vorkommen von landferneren Ablagerungen ist auf das Gebiet von Mecklenburg-Altmark-Nordostbrandenburg begrenzt. Diese Ablagerungen werden in die **Plate-Formation**, die **Sülstorf-Formation** und die **Roghan-Formation** untergliedert (Tab. 5.1; Standke et al., 2005). Die Ablagerungen der **Plate-Formation** entsprechen faziell den Sedimenten der Rupelton-Formation, treten jedoch nur in Westmecklenburg auf. Die darüber liegenden Ablagerungen der **Sülstorf-Formation** werden als dunkle, tonige Schluffe beschrieben, die darüber folgenden Ablagerungen der **Roghan-Formation** haben einen höheren Sandanteil (Standke et al., 2005). Die landnäheren Äquivalente werden in der **Cottbus-Formation** zusammengefasst (Standke et al., 2005), die in die Glaukonitsand- und Glimmersand-Subformationen unterteilt werden. Die Glaukonitsande korrelieren mit den Ablagerungen der Sülstorf-Formation. Sie greifen teilweise erosiv auf Ablagerungen des Rupeliums über. Die Glimmersande korrelieren mit Ablagerungen der Roghan-Formation (Standke et al., 2005).

Verbreitung, Mächtigkeit, Tiefenlage

Die Mächtigkeiten der oligozänen Abfolgen liegen im Untersuchungsgebiet durchschnittlich bei unter 100 m (Abb. 5.5; 5.7-5.9; Kockel, 1988b). Lokal können die Mächtigkeiten entlang von Salzstrukturen im nördlichsten Niedersachsen und südlichen Schleswig-Holstein jedoch bis zu 500 m erreichen (Abb. 5.5, 5.8 und 5.9; Best et al., 1988; Kockel, 1988b; Kuster, 2005; Knox et al., 2010). Die als Neuengammer Gassand bezeichneten unteroligozänen Ablagerungen erreichen Mächtigkeiten von bis zu 35 m im niedersächsischen Teil des Ablagerungsgebietes (Hinsch, 1961, 1963; Kuster, 2005). Die Neuengamme-Formation tritt zudem nicht flächendeckend auf, sondern ist auf den östlichen Bereich Niedersachsens begrenzt. Die durchschnittlichen Mächtigkeiten betragen etwa 15 m (Jürgens, 1986; Baldschuhn, 1993, 1995; Röhling, 2004; Kuster, 2005; Meyer, 2009).

Der unteroligozäne marine Rupelton ist im Norddeutschen Becken flächenhaft verbreitet (z. B. Kuster, 2005; Janssen et al., 2018). Im Bereich der Nordsee erreichen die Rupeltone Mächtigkeiten von bis zu 187 m, die z. B. auf der Insel Neuwerk erbohrt wurden (Bohrung BV2/2016; Kuster, 2005). Zur Küste hin nimmt die Mächtigkeit der Rupeltone ab (Abb. 5.7-5.9). Im Raum Harburg sind die Rupeltone ca. 75 m mächtig (Behrmann, 1949), im Raum Cuxhaven nur noch 14 m (Wirtz, 1939; Schad, 1947; Bettenstedt, 1949; Gramann, 1989). Im nordöstlichen Niedersachsen erreichen die Rupeltone Mächtigkeiten von 80 m bis zu 180 m (Baldschuhn, 1993, 1995; Kuster, 2005). In der Randsenke des Salzstocks Gorleben wurde eine Mächtigkeit von 165 m nachgewiesen (Bohrung BV19/2933; Kuster, 2005). Im Bereich des Gifhorner Trogs weisen die oberoligozänen Ablagerungen (Neuengammer Sand und Rupelton) Mächtigkeiten von 125 m bis 175 m auf (Hinsch, 1961, 1963). Nordöstlich von Hannover (Sülze) erreichen sie sogar Mächtigkeiten von bis zu 328 m und treten ab einer Tiefe von 51 m unter GOK auf (Stoller, 1915a). Im Nordostdeutschen Becken erreichen die Rupeltone Mächtigkeiten von 20 m bis über 200 m (Standke et al., 2005; Standke, 2015).

Der Grenzglaukonit, der den Übergang vom Unter- zum Oberoligozän markiert, kann zwischen Weser, Aller und Elbe Mächtigkeiten von bis zu 10 m erreichen (Kuster, 2005). Die Ablagerungen des Chattiums erreichen im südöstlichen Niedersachsen Mächtigkeiten von 25 m und 75 m (Lang, 1992; Blumenstengel, 1998). In der Randsenke des Salzstocks von Gorleben beträgt die Mächtigkeit bis zu 120 m. Weiter östlich nimmt diese aber bereits wieder auf maximal 50 m ab

(Kuster, 2005). In Mecklenburg-Vorpommern sind die Ablagerungen des Chattiums 15 m bis 120 m mächtig (Standke et al., 2005), in Brandenburg etwa 150 m (Standke, 2015).



5.3 Laterale und vertikale Fazieswechsel im Norddeutschen Becken

Lage der Bohrungen

- Schnitt A-A' (Kockel, 1988a) Profillagen nach Kockel (1988b)
- Schnitt B-B' (Best et al., 1988) Buehmann (1986)
- Schnitt C-C' (Hinsch, 1988b)

Abb. 5.6 Lage der Profilschnitte A-A', B-B' und C-C'. Die zu Grunde liegenden Bohrungen sind farbig dargestellt (Geobasisdaten: Esri, 2020, 2021). Die Lage der Bohrungen wurde neu mit Koordinaten des NIBIS-Servers geplottet. Die Original-Darstellung der Bohrungen und Schnittlagen von Kockel (1988b) sind in grau. In schwarz sind Bohrungen dargestellt, aus denen Bühmann (1986) Proben für die Analyse der mineralogischen Zusammensetzung der paläogenen Sedimente untersucht hat. Die Lage dieser Bohrungen wurde ebenfalls neu mit Koordinaten des NIBIS-Servers geplottet. Laterale und vertikale Fazieswechsel ergeben sich aus den 9 dokumentierten marinen Regressiund Transgressionszyklen ons-(Tab. 5.2; Abb. 5.3; Gramann & Kockel, 1988; Gürs et al., 2008a, b; Knox et al., 2010), den tektonischen Hebungs- und Senkungsphasen sowie den klimatisch und tektonisch gesteuerten Änderungen des Sedimentangebots und des Sedimenteintrags (s. Kapitel 5.1 und 5.2). Es ist zu erwarten, dass diese Fazieswechsel besonders im Bereich der Beckenränder ausgeprägt sind, da sich dort die Regressionen und Transgressionen am stärksten auswirken. Anhand von drei exemplarischen Profilschnitten sind die lateralen und vertikalen Fazieswechsel dargestellt (Lage Abb. 5.6, Abb. 5.7 -5.9). Die Profilschnitte beruhen auf den Arbeiten von Best et al. (1988), Hinsch (1988b) und Kockel (1988a).

Der Profilschnitt A-A' (Abb. 5.7) zeigt die laterale und vertikale Entwicklung der paläogenen und neogenen Ablagerungen im westlichen Niedersachsen. Oberpaläozäne feinkörnige Ablagerungen sind nur relikthaft erhalten und überlagern in der Regel dis-

kordant oberkretazische Karbonate. Im nördlichen und zentralen Bereich des Schnittes fehlen die paläozänen Ablagerungen vollständig. Die untereozänen Sedimente überlagern die oberpaläozänen Sedimente größtenteils diskordant. Sie sind überwiegend tonig ausgebildet und enthalten an



der Basis die typischen Aschelagen. Nach Süden werden die untereozänen Ablagerungen sandiger. Die mitteleozänen Ablagerungen sind überwiegend sandig ("Brüssel-Sand"). Im Bereich der Salzstruktur J-18-1 treten synsedimentäre Mächtigkeitszunahmen auf. Über der Salzstruktur J-18-1 und nördlich von Helgoland sind sie dagegen vollständig erodiert. Die obereozänen Ablagerungen sind relativ geringmächtig und feinkörnig. Nur im Bereich der Salz-Randsenken sind höhere Mächtigkeiten vorhanden. Die Ablagerungen des untersten Oligozäns sind weitgehend abgetragen und nur in den Salz-Randsenken erhalten. In der Regel werden die obereozänen Ablagerungen von den unteroligozänen Ablagerungen des Rupeliums transgressiv überlagert. Diese sind an der Basis sandig ausgebildet (Neuengamme-Sande bzw. Rupelbasissande) und fehlen am Top der Salzstrukturen. Tonige oberoligozäne Ablagerungen sind meistens sehr geringmächtig und erreichen wiederum nur im Bereich von sekundären Randsenken höhere Mächtigkeiten. Darüber folgen relativ mächtige Ablagerungen des Neogens und des Quartärs.



Abb. 5.7 Profilschnitt A-A' verläuft vom südwestlichen Niedersachsen bis in die Nordsee. Der Profilschnitt zeigt die Mächtigkeiten und Lithologie der paläogenen und neogenen Ablagerungen zwischen Weser und Ems (verändert nach Kockel, 1988a). Die Lage des Profilschnittes ist in Abb. 5.6 abgebildet.



Der Profilschnitt B-B' (Abb. 5.8) zeigt die laterale und vertikale Entwicklung der paläogenen und neogenen Ablagerungen im östlichen Niedersachsen. Typisch sind geringmächtige Ablagerungen am Top von Salzstrukturen und hohe Mächtigkeiten in den assoziierten sekundären Randsenken (Best et al., 1988). Karbonatische Ablagerungen des Daniums sind nur im Nordwesten als Erosionsreste erhalten. Darüber liegen in der Regel diskordant transgressive Ablagerungen des Oberpaläozäns. Im Gebiet von Schneverdingen wurden paläozäne Wechsellagerungen von marinen Sanden und nicht marinen, kohleführenden Sedimente nachgewiesen, die vor der oberpaläozänen Transgression abgelagert wurden. Die nachfolgenden oberpaläozänen Ablagerungen sind meist geringmächtig und größtenteils in toniger Fazies ausgebildet. Nach Südosten nimmt der Sandgehalt zu (ab der Bohrung UNTL 5). Die Basis des Untereozäns (UE1) wird durch einen prägnanten Asche-Horizont markiert. Weiter im Südosten liegt dieser Asche-Horizont diskordant über kreidezeitlichen Gesteinen. Die untereozänen Ablagerungen bestehen aus Ton-Sand-Wechsellagerungen. Die mitteleozänen ("Brüssel")-Sande sind im gesamten Profilschnitt vorhanden, variieren aber stark in ihrer Mächtigkeit und erreichen in den sekundären Salz-Randsenken die höchsten Mächtigkeiten. Obereozäne Ablagerungen sind nur geringmächtig und meist tonig ausgebildet. Sie werden erosiv von den basalen Sanden des Rupeliums (Neuengamme-Sande) überlagert. Die obersten Ablagerungen des Obereozäns und Teile des Unteroligozäns fehlen. Die Neuengamme-Sande gehen im Raum Cuxhaven in eine schluffigtonige Fazies über. Oberoligozäne Ablagerungen sind nur im Südosten erhalten und im Nordwesten weitgehend erodiert. Neogene Ablagerungen sind im gesamten Profilschnitt vorhanden.

Der Profilschnitt C-C' (Abb. 5.9) zeigt die laterale und vertikale Entwicklung der paläogenen und neogenen Ablagerungen im nördlichen Teil des Norddeutschen Beckens. Der Schnitt liegt im südlichen Schleswig-Holstein und Hamburg und quert den Glückstadt Graben. Die Sedimentation wurde stark von der differentiellen Subsidenz entlang der Grabenstrukturen und Salzbewegungen kontrolliert. So können die paläogenen und neogenen Ablagerungen innerhalb der sekundären Salz-Randsenken sehr hohe Mächtigkeiten von mehreren tausend Metern erreichen während sie am Top der Salzstrukturen nur sehr geringmächtig sind (Hinsch, 1988b).

Die karbonatischen Ablagerungen des Danium sind nur noch relikthaft vorhanden und fehlen am Top der Salzstrukturen, sowie im Bereich des Westholstein-Blocks, dem Gardening Trog, der Wilster Synklinale und östlich des Schnelsener Salzkissens. Die darüber liegenden oberpaläozänen tonigen Ablagerungen sind in der Regel ebenfalls geringmächtig, fehlen im Bereich des Westholstein-Blocks und am Top der Salzstrukturen und erreichen in den stark abgesenkten Gebieten 50-150 m. Die Basis der eozänen Ablagerungen wird durch einen gut ausgeprägten Asche Horizont markiert. Die darüber liegenden untereozänen tonigen Sedimente enthalten keine sandigen Einschaltungen. Sie erreichen im Bereich des Hamburger Lochs und des Friedrichstadt Trogs sehr hohe Mächtigkeiten und sind auf den Hochgebieten geringmächtig. Die mitteleozänen Sedimente der Glinde-Formation (Äquivalent der Brüssel-Sande) wurden in allen von Subsidenz betroffenen Bereichen abgelagert. Die Ablagerungen des Unteroligozän konnten nur im Friedrichstadt Trog, Garding Trog und Horst Trog nachgewiesen werden und fehlen im restlichen Schnitt.







Abb. 5.8 Profilschnitt B-B' verläuft von der Nordseeküste bis ins südöstliche Niedersachsen. Der Schnitt zeigt die Mächtigkeiten und Lithologie der paläogenen und neogenen Ablagerungen im nordöstlichen Niedersachsen (verändert nach Best et al., 1989). Die Lage des Profilschnittes ist in Abb. 5.6 abgebildet.

Die transgressiven unteroligozänen Ablagerungen des Rupeliums liegen erosiv auf den ober- bis mitteleozänen Ablagerungen. Die basalen Ablagerungen der Neuengamme-Formation sind im Osten vorhanden, keilen aber in Richtung Nordwesten aus. Die Abfolgen des oberen Oligozäns bis zum Untermiozän sind größtenteils erhalten und fehlen nur am Top von Salzstrukturen. Im Bereich des zentralen Schleswig-Holstein Hochs und des Westholstein-Blocks liegen die Ablagerungen des Untermiozän diskordant über Ablagerungen des Rupelium und teilweise sogar des Mittel-Eozän.





Abb. 5.9 Profilschnitt C-C' verläuft von der Nordseeküste zur Ostseeküste und quert den Glückstadt Graben. Der Schnitt zeigt die Mächtigkeiten und Lithologie der paläogenen und neogenen Ablagerungen im südlichen Schleswig-Holstein und Hamburg (verändert nach Hinsch, 1988b). Die Lage des Profilschnittes ist in Abb. 5.6 abgebildet.

Zusammenfassung Kapitel 5

Im Gegensatz zu den überwiegend karbonatischen kretazischen Ablagerungen ist die paläogene und neogene Sedimentation des Norddeutschen Beckens klastisch dominiert. Diese Änderung der Sedimentation reflektiert die zunehmende Heraushebung der Beckenränder, die damit verbundene Größenzunahme der Landgebiete und die Abkühlung des Klimas, die zu einer Erhöhung des Sedimenteintrages führten. Ablagerungen des unteren Paläozäns sind meist nur vereinzelt in tieferen sekundären Randsenken entlang von Salzstrukturen erhalten. Die oberpaläozänen marinen Ablagerungen überlagern in der Regel diskordant kretazische und unterpaläozäne Karbonate oder ältere Gesteine. Im Paläozän und Eozän wurden in den nördlichen Beckenbereichen im Wesentlichen tief- bis flachmarine Sedimente abgelagert. Nach Süden und Südosten gehen die Sedimente in randlich-marine Ablagerungen über.

Die paläogenen Sedimente bestehen hauptsächlich aus Tonen bzw. Tonsteinen und Sanden bzw. Sandsteinen. Seltener kommen Kalkarenite und Mergel vor. Alle Ablagerungen haben wechselnde Kalkgehalte (von kalkfrei bis stark kalkhaltig).

Die Tone/Tonsteine haben wechselnde Schluff- und Sand-Gehalte. Teilweise enthalten sie Einschaltungen von Sand, Sandstein oder Mergel. Im Bereich des Beckenzentrums (nordöstliches Niedersachsen, Bremen, Hamburg und Schleswig-Holstein) sind die Ablagerungen feinkörniger und der Tonanteil nimmt nach Norden hin zu. Richtung Süden werden die Ablagerungen zunehmen grobkörniger und es treten vermehrt gröberklastische Einschaltungen auf. Die Sande/Sandsteine sind überwiegend feinsandig und haben wechselnde Ton- und Schluff-Gehalte. An der Basis der untereozänen Ablagerungen treten Asche-Lagen auf, die gute Markerhorizonte darstellen. Die mächtigsten Sande/Sandsteine kommen im Untereozän vor. Im Raum zwischen Helmstedt und Zwickau enthalten die paläogenen Ablagerungen zahlreiche Braunkohleflöze.

Die durchschnittlichen Mächtigkeiten der paläozänen Ablagerungen liegen unter 100 m. Die von der BGE als potentielle Endlagerwirtsgesteine ausgewiesenen Ablagerungen des Oberpaläozäns (Thanetium) haben meist Mächtigkeiten zwischen 10 m und 40 m, können jedoch lokal in sekundären Salz-Randsenken mehrere 100 m mächtig sein (z. B. Helle-Formation). Die durchschnittlichen Mächtigkeiten der untereozänen Ablagerungen (Ypresium) betragen 100 m bis 500 m. Die höchsten Mächtigkeiten erreichen sie im nördlichen Niedersachsen und Schleswig-Holstein (Glückstadt Graben). Die durchschnittlichen Mächtigkeiten der oligozänen Ablagerungen liegen unter 100 m. Die höchsten Mächtigkeiten sekundären Salz-Randsenken im nördlichen Niedersachsen, im Raum Hamburg und Bremen sowie in Schleswig-Holstein auf. Hier betragen die Sedimentmächtigkeiten mehrere 100 m bis mehrere 1000 m.

Im Norddeutschen Beckens können innerhalb der paläogenen Schichtfolge insgesamt 6 Ablagerungssequenzen korreliert werden, die bedeutende Transgressions-Regressionszyklen repräsentieren. Sie werden jeweils von Diskordanzen bzw. deren korrelativen Konkordanzen begrenzt. Die wichtigsten übergeordneten Diskordanzen befinden sich am Top des Unterpaläozäns, am Top des Obereozäns und nahe des Tops des Oberoligozäns.

6. Geowissenschaftliche Charakterisierung der in Niedersachsen vorhandenen paläogenen Ablagerungen hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung und daraus ableitbarer Gesteinseigenschaften

6.1 Kenntnisstand in Bezug auf den Tonmineral- und Karbonatgehalt der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens

Die mineralogische Zusammensetzung der paläogenen Sedimente im Norddeutschen Becken wurden von Bühmann (1986, 1989), Morton et al. (1988) und Nielsen (1988) beschrieben. Die



Studie von Bühmann (1986) kompiliert Daten aus 73 Bohrungen und 1000 Proben (Abb. 5.6), die einen sehr guten, repräsentativen Überblick über die mineralogische Zusammensetzung der paläogenen Sedimente Niedersachsens gibt (Tab. 6.1). Die mineralogische Zusammensetzung der paläogenen und neogenen Ablagerungen in der Forschungsbohrung FB Wursterheide wurde von ihm 1989 beschrieben (Bühmann, 1989). Beschreibungen der Tonmineralogie der paläogenen Ablagerungen in der Nordsee liegen von Nielsen (1988) und Nielsen et al. (2015) vor. Einen Überblick über Provenance und Verteilung der Schwerminerale in den Ablagerungen des Norddeutschen Beckens findet sich in Morton et al. (1988). In Hinblick auf die Eignung als potentielles Wirtsgestein für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (cf. Mengel et al., 2012) wird im Folgenden insbesondere auf den Tonmineral-, Karbonat- und Pyrit-Gehalt der paläogenen Sedimente Niedersachsens eingegangen.

Alter	Gesamtes Sediment/Gestein									Tonfraktion									
	Dolomit	Calcit	Siderit	Feldspat	Quarz	Kaolinit	Smektit	IIIit	Chlorit	Analcim	Klinoptiolith	Opal	Halit	Pyrit-Markasit	Jarosit	Kaolinit	Smektit	IIIit	Chlorit
Oligozän	1	16		3	64	6	4	6			х					23	55	21	1
Obereozän		1		12	72	4	3	4					4			14	68	17	1
Mitteleozän	х	15		5	63	х	2	1	x		1	1	1	1		2	82	16	x
Untereozän	1	2	1	5	76	2	3	4	1		2	1	1	x		3	83	13	1
Untereozäne Aschen				20	46		21	1	x	3	3		6			3	91	6	
Oberpaläozän		11	1	2	67	1	3	2	х		1	7	5	х	x	6	80	14	x

Tab. 6.1 Durchschnittliche Mineralzusammensetzung der paläogenen Sedimente in Niedersachsen, basierend auf etwa 1000 Proben aus 73 Bohrungen (Bühmann, 1986). Die Lage der Bohrungen ist in Abb. 5.6 dargestellt. Die Angaben zum gesamten Sediment/Gestein bzw. zur Tonfraktion (< 2 μ m) sind in Gew.-%. x = nicht nachgewiesen.

Bühmann (1986) unterteilte die paläogenen Ablagerungen in Abhängigkeit vom Silikat- und Karbonatgehalt in neun unterschiedliche "Silikat- und Karbonat-Einheiten". Allerdings werden in der Arbeit keine Angaben zur Lithologie gemacht. Die Alterseinstufung erfolgte in Anlehnung an die paläogene Nannoplankton-Zonierung (NP) von Martini (1971). Eine Darstellung der aktuellen Nannoplankton-Zonierung ist in Janssen et. (2018) publiziert.

Die Tonmineralfraktion innerhalb der paläogenen Ablagerungen Niedersachsens setzt sich hauptsächlich aus Smektit, Illit, Glaukonit, Chlorit und Kaolinit zusammen (Bühmann, 1986, 1989). Smektit ist das dominierende Tonmineral. Die Karbonat-Einheiten enthalten eine große Anzahl kalkiger Fossilien und können dementsprechend sehr gut mit Biozonen (z. B. Nannoplankton-Zonen NP) korreliert werden. Anhand der mineralogischen Zusammensetzung können drei signifikante Markerhorizonte definiert werden. 1) Der isochrone Albit-Beidellit-Horizont (Paläozän-Eozän Übergang); 2) der isochrone Glaukonit-Smektit-Horizont (Untereozän)



sowie 3) der diachrone Smektit-Kaolinit-Übergang (Oligozän-Miozän Übergang). Die ersten beiden Markerhorizonte kennzeichnen den Eintrag von vulkanischen Aschen in das Norddeutsche Becken. Der dritte, jüngste Markerhorizont zeigt eine Änderung des Hauptliefergebietes an (Bühmann, 1986) und hängt vermutlich mit der Hebung Skandinaviens zusammen (Abb. 5.3).

Einheit 1: Oberpaläozäne Silikat-Einheit

Die Einheit 1 umfasst oberpaläozäne Ablagerungen unterhalb der Zone NP8. Die Einheit konnte in Bohrungen im Raum Hamburg nachgewiesen werden. Es handelt sich um karbonatfreie Ablagerungen mit einem hohen Anteil an Smektit, einem niedrigeren Anteil von ca. 10% an Illit und einem Anteil von ca. 3 % an Kaolinit (Bühmann, 1986). Diese Einheit 1 wurde in der FB Wursterheide nicht erbohrt (Bühmann, 1989).

Einheit 2: Oberpaläozäne Karbonat-Einheit (NP8)

Die Einheit 2 umfasst Ablagerungen des Oberpaläozäns (Zone NP8). Die Einheit wurde im Raum Hamburg, im Raum Bremen und im Südwesten Niedersachsens nachgewiesen. Regional unterscheidet sich die Zusammensetzung geringfügig. Im Raum Hamburg und im Raum Bremen bestehen die Ablagerungen aus ca. 80% Smektit, 10% Illit, Kalzit und Spuren von Kaolinit. Im Raum Ehra-Lessien (südwestliches Niedersachsen) tritt im Bereich eines Basis-Dolomits unregelmäßig Chlorit und Smektit auf. Zudem ist in diesem Bereich eine geringere Menge an Kaolinit und Illit nachgewiesen worden. Nach oben hin nimmt der Gehalt an Dolomit ab, bis dieser völlig verschwindet. Gleichzeitig nehmen die Gehalte an Chlorit und Smektit ab und Kaolinit nimmt zu. Die Änderung der Silikatzusammensetzung von Chlorit-Smektit hin zu Kaolinit kennzeichnet vermutlich eine Zunahme der kontinentalen Verwitterung (Bühmann, 1986). Die Einheit 2 wurde in der FB Wursterheide nicht erbohrt (Bühmann, 1989).

Einheit 3: Oberpaläozäne bis untereozäne Silikat-Einheit (NP9 und NP10)

Die Einheit 3 umfasst Ablagerungen des Oberpaläozäns und des Untereozäns (Zonen NP9 und NP10). In der Untereinheit 1 treten Albit, Beidellit, geringe Mengen an Illit und stellenweise Kaolinit auf. Der Kaolinit-Gehalt nimmt von Nordwesten nach Südosten hin zu (Bühmann, 1986). Der Albit-Beidellit-Horizont (A+B Horizont) stellt die zweite Untereinheit dar und umfasst die Hauptaschelage des Paläozäns (Bühmann, 1979). Dieser Horizont ist ein charakteristischer Markerhorizont in Norddeutschen Becken I im Bereich des Paläozän-Eozän Übergangs (z. B. Gagel, 1907). In der Hauptaschelage treten vorwiegend Albit, Beidellit, sowie Klinoptilolithe (Gruppe der Zeolithe) und Analcim auf. In der Untereinheit 3 kommen erneut Albit, Beidellit, geringe Mengen an Illit und stellenweise Kaolinit vor (Bühmann, 1986, 1989).

Einheit 4: Untereozäne Karbonat-Einheit (NP11 und NP12)

Die Einheit 4 umfasst Ablagerungen des Untereozäns (Zonen NP11 und NP12). Es handelt sich um eine Abfolge aus karbonathaltigen und karbonatfreien Sedimenten. Die Tonfraktion setzt sich hauptsächlich aus Smektit zusammen, enthält aber auch geringe Anteile von Illit und Kaolinit oder Chlorit. Chlorit tritt dabei hauptsächlich im Nordwesten Niedersachsens auf (Bohrung Westorf 1), wo kein Kaolinit nachgewiesen werden konnte. Kaolinit kommt jedoch im Norden (Bohrung Hennstedt 1), Süden (Bohrungen Eitzendorf 1, 2, 6 und 8) und Südosten (Bohrungen Ehra 4 und 6)



vermehrt vor. Küstenferner, in den tieferen Bereichen des Beckens, beschränkt sich das Auftreten von Kaolinit auf einzelne Lagen. Beispielsweise tritt es in drei Lagen in der Bohrung Peckensen im Südosten von Niedersachsen und in einer Lage in den Bohrungen Witzhave (1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 15) östlich von Hamburg auf. In der Bohrung Moisburg 1 südwestlich von Hamburg, fehlt Kaolinit vollständig (Bühmann, 1986).

Einheit 5: Untereozäne Silikat-Einheit (NP13)

Die Einheit 5 umfasst Ablagerungen des Untereozän (Zone NP13). Die Tonfraktion setzt sich hauptsächlich aus Smektit und geringen Anteilen von Illit zusammen. Neben Smektit und Illit treten Klinoptilolithe (Gruppe der Zeolithe) auf (Bühmann, 1986). Das Fehlen von Kaolinit, der hohe Smektit-Gehalt und das Auftreten von Klinoptilolithen lässt auf vulkanische Aktivität und die Ablagerung vulkanischer Aschen im Bereich des oberen Untereozäns schließen (Bühmann, 1986, 1989).

Einheit 6: Mittel- bis obereozäne Karbonat-Einheit (NP14 bis NP16)

Die Einheit 6 umfasst Ablagerungen des Mitteleozäns und Obereozäns (Zone NP14 bis NP16). Die Einheit besteht u. a. aus einem kalkhaltigen Sandstein. Im Raum Hamburg wurden die höchsten Kalzit-Gehalte nachgewiesen. Der Kalzit-Gehalt nimmt Richtung Süden deutlich ab. Im Raum Bremen liegt er lediglich noch im einstelligen Prozentbereich. In der Tonfraktion dominiert Smektit. Anhand ihrer restlichen Zusammensetzung wurde die Einheit 6 in vier Untereinheiten unterteilt. Die älteste Untereinheit 1 ist durch eine dunkelgrüne, wenige Meter mächtige Glaukonit-Smektit-Ablagerung gekennzeichnet, die einen charakteristischen Markerhorizont innerhalb des Norddeutschen Beckens bildet (G-S-Horizont; Bühmann, 1981). Die Untereinheiten 1 und 4 sind sich in ihrer mineralogischen Zusammensetzung sehr ähnlich. Neben Smektit enthalten sie Illit und Glaukonit. Die Untereinheit 3 enthält neben Smektit auch Kaolinit. Der Kaolinit-Gehalt beträgt im Norden rund 10% (Bohrung Hennstedt 1) und nimmt Richtung Südosten zu. Im Raum Hamburg beträgt er 20% (Bohrungen Witzhave 1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 15) und erreicht im Südwesten bis zu 80 % (Bohrung Varel H1; Bühmann, 1986).

Einheit 7: Obereozäne bis unteroligozäne Silikat-Einheit (NP17 bis NP23)

Die Einheit 7 umfasst Ablagerungen des Obereozäns und des Unteroligozän (Zone NP17 bis NP23). Der Smektit-Gehalt liegt bei durchschnittlich 60% und damit etwa 20% niedriger als in den älteren paläogenen Ablagerungen. Der Kaolinit-Gehalt nimmt dagegen auf bis zu 20% zu. Der Kaolinit-Gehalt in den jüngeren Ablagerungen (NP21 und NP22) ist höher als in den älteren (NP18 bis NP20). Der Wechsel in der mineralogischen Zusammensetzung wird besonders in Bereichen deutlich, in denen die jüngeren, unteroligozänen Sedimente diskordant über denen des Eozäns liegen. Dieser Horizont ist ein charakteristischer, diachroner Marker im Norddeutschen Becken (Smektit-Kaolinit Übergang; Bühmann, 1986). Diese Änderung der Tonmineralogie wird von einem Wechsel in der Schwermineral-Zusammensetzung begleitet. Die älteren Ablagerungen Granat, Epidot und Hornblende enthalten (Fay, 1977).



Einheit 8: Unter- bis oberoligozäne Karbonat-Einheit (NP24)

Die Einheit 8 umfasst Ablagerungen des Unter- und Oberoligozäns (NP 24). Diese Einheit unterscheidet sich ausschließlich durch ihren Kalzit-Gehalt von den Einheiten 7 und 9. Der Smektit-Gehalt beträgt im Norden ca. 40% (Bohrungen Glinde1 und Westorf 1) und nimmt nach Süden auf bis zu 70% zu (Bohrungen Brokeloh 4 und Vorhop 3 und 6). Diese Zunahme des Smektitgehaltes geht mit einer Abnahme des Kaolinit-Gehalts einher (Bühmann, 1986).

Einheit 9: Oberoligozäne Silikat-Einheit (NP29)

Die Einheit 9 umfasst Ablagerungen des Oberoligozäns (NP 29). Diese Einheit hat im nördlichen bis westlichen Bereich Niedersachsen eine durchschnittliche Zusammensetzung von 28% Kaolinit, 22% Illit und 50% Smektit. Im südöstlichen Bereich weisen die Ablagerungen der Einheit 9 bis zu 45% Illit und Glaukonit auf, sowie einem merklichen Anteil von Aragonit. Der Smektit-Gehalt kann in jüngeren Ablagerungen auf bis zu 90% zunehmen. In diesen Ablagerungen kommen zudem Klinoptilolithe vor. Dies lässt darauf schließen, dass es vom Oligozän bis zum Miozän zu einem verstärkten klastischen Eintrag aus Norden sowie dem Eintrag vulkanischer Aschen in das Becken kam (Bühmann, 1986).

6.1.1 Welche Rückschlüsse auf die Gesteinseigenschaften (Quellfähigkeit, Rückhaltevermögen) lassen sich aus der Tonmineral-Vergesellschaftung ziehen?

Smektite und Illit-Smektit-Wechsellagerungsstrukturen bilden die reaktivsten Mineralkomponenten in Tonen und Tonsteinen (Mengel, 2006). Smektite besitzen ein vergleichsweise höheres Quellvermögen und ein höheres Sorptionsvermögen als Illit (Honty & De Craen, 2012; Bracke et al., 2019). Bei Temperaturen über 60°C und einem ausreichend großen Kaliumangebot beginnt die Umwandlung von Smektit zu Illit (Mengel, 2006; Thyberg & Jahren, 2011; Goulty et al., 2016). Mit zunehmenden Temperaturen schwindet der Anteil an Smektit im Ton/Tonstein. Ab Temperaturen von 100-120°C gehen die Smektit-haltigen Phasen verloren und der Anteil von Smektit in Smektit-Illit-Wechsellagerungsstrukturen geht auf 30-50% zurück (Šucha et al. 1993; Schegg & Leu 1996; Collo et al. 2011). Der Prozess dieser sogenannten Illitisierung hängt neben der Temperatur und dem Kaliumgehalt in der Lösung auch vom Faktor Zeit ab. Pytte & Reynolds (1989) zeigen, dass bei Temperaturen zwischen 75°C und 100°C die Illitisierung erst nach 10⁴ bis 10⁵ Jahren einsetzt. Laborversuche von Huang et al. (1993) bestätigen, dass bei einer Temperatur von 50° und einer deutlich erhöhten Kaliumverfügbarkeit (1000 ppm in der Porenlösung) ein Zeitraum von 1 Millionen Jahre nicht ausreicht, um den Prozess der Illitisierung nennenswert in Gang zu setzen.

Temperaturzunahmen sind sowohl durch eine Versenkung von Sedimenten im Rahmen der Beckenentwicklung, als auch durch die Einlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle zu erwarten. Der heutige thermische Gradient innerhalb des Norddeutschen Beckens liegt bei ungefähr 30,5°C/km (Clauer et al., 2012). Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kann mit einer Temperaturbelastung von bis zu 90°C auf das Umgebungsgestein gerechnet werden (Jobmann et al., 2007b; Conil et al., 2020). Eine Umwandlung von Smektit zu Illit kann negative Auswirkungen auf primäre und langfristige endlagerrelevante Eigenschaften von Tonen und Tonsteinen haben (Bracke et al., 2019). Der hohe Smektit-Gehalt innerhalb der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens (Tab. 6.1; Bühmann, 1989) lässt darauf schließen, dass die Mineralumwandlungen noch nicht oder nur in Teilen stattgefunden haben. Es kann daher vermutet werden, dass die paläogenen Tone und Tonsteine des Norddeutschen Beckens empfindlich auf Temperaturerhöhungen reagieren werden (vgl. Alfarra et al., 2020), was im Rahmen der Einlagerung hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle zu einer Veränderung der primären Gesteinseigenschaften (u. a. Quellfähigkeit, Rückhaltevermögen) führen kann. Fraglich ist jedoch, ob es in dem nach StandAG festgelegten Betrachtungszeitraum von 1 Millionen Jahren zu nennenswerten Änderungen der Gesteinseigenschaften durch Illitisierung kommen wird. Diese Fragestellung muss anhand standortspezifischer Kennwerte (u. a. mineralogische Zusammensetzung, Kalium-Verfügbarkeit) beurteilt werden.

6.1.2 Mobilisierung von Radionukliden im Zusammenhang mit Karbonaten

Bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle besteht die Möglichkeit der Mobilisierung von Radionukliden bei Kontakt des eingelagerten Materials mit Wasser (Geckeis et al., 2012). Die Mobilität der Radionuklide hängt von vielen Faktoren und Reaktionen ab (s. BGE, 2020b). Die Karbonat-Konzentration kann dabei die Mobilität von Radionukliden in wässriger Lösung maßgeblich beeinflussen. Tran et al. (2018) führten Experimente zur Sorption von Uran und Caesium an Bentonit-Kolloiden durch. Sie verwendeten dafür durchschnittlich zusammengesetztes Grundwasser (*artificial groundwater*) eines geklüfteten Karbonatgesteins und durchschnittlich zusammengesetztes Regenwasser (*artificial rain water*). Die Experimente zeigen, dass die Faktoren Kolloid-Konzentration, die Konzentration der Radionuklide, sowie die Konkurrenz zwischen Uran und Caesium das Ausmaß der Sorption steuern. Die Sorption von Uran und Caesium an Bentonit-Kolloiden ist im Grundwasser deutlich niedriger als im Regenwasser. Zudem wird Uran im Vergleich zu Caesium bei erhöhter Karbonat-Konzentration im Grundwasser in geringerem Ausmaß sorbiert. Tran et al. (2018) gehen davon aus, dass dies auf die Bildung von Uranyl-Karbonat wie CaUO₂(CO₃)₂²⁻_(aq) und Ca₂UO₂(CO₃)_{3(aq)} zurückzuführen ist, welche in Lösung nur sehr schlecht mit Kolloiden interagieren.

Joseph et al. (2013) untersuchten die Auswirkungen des pH-Werts auf die Sorption von U(VI) im Opalinuston (Proben aus Mont Terri). Sie stellten fest, dass durch Auswaschung des Opalinustons besonders die in Konkurrenz zum Uran stehenden Ionen Ca²⁺ und CO₃²⁻ (freigesetzt durch Lösung von Kalzit) Einfluss auf die Sorption von U(VI) nehmen. Bei pH-Werten zwischen 7,0 bis 8,2 ist der Uranyl-Komplex Ca₂UO₂(CO₃)_{3(aq)} die dominierende Spezies des in Lösung befindlichen Urans. Dieser Komplex wird schlecht sorbiert (Joseph et al., 2011) und dementsprechend nimmt die Uran-Sorption bei pH-Werten zwischen 7 und 8 im Opalinuston deutlich ab (Joseph et al., 2013). Die Bildung dieser Uran-Karbonat-Verbindungen ist dementsprechend maßgeblich an der Mobilität von Uran innerhalb der Porenwässer beteiligt (vgl. Joseph et al., 2013; Tran et al., 2018).

In tonigen Ablagerungen ist die Karbonat-Konzentration im Formationswasser ein standortspezifischer Parameter (BGE, 2020b). Variationen im Karbonat-Gehalt beeinflussen die Karbonat-Konzentration im Tiefenwasser. Lösungszutritte stark karbonathaltiger Wässer sind besonders in geklüftetem Tonsteinen möglich und können Einfluss auf das Potential einer Gesteinseinheit als Endlagerwirtsgestein nehmen (Alfarra et al., 2020; BGE, 2020b). Die paläogenen Ablagerungen Niedersachsens besitzen wechselnde Kalk-Gehalte (s. Kapitel 5.2, Kapitel 6.1). Eine standortspezifische Betrachtung der Verteilung der Karbonate innerhalb der paläogenen Ablagerungen und des Grundwasserchemismus ist aus diesem Grund unerlässlich. Eine allgemeine Bewertung des Karbonat-Gehalts der paläogenen Ablagerungen Niedersachsens in Bezug auf die potenzielle Mobilisierung von Radionukliden im Rahmen dieser Literaturstudie nicht möglich.

6.2 Kenntnisstand in Bezug auf den Schwermineralgehalt

6.2.1 Primäre Schwerminerale

Der Schwermineralbestand innerhalb der paläogenen und neogenen Ablagerungen des norddeutschen Beckens kann entsprechend der Liefergebiete (Provenance) in zwei Hauptgruppen unterteilt werden. Eine Gruppe, deren Liefergebiet im nördlichen Bereich des norddeutschen Beckens liegt (Fay, 1986; Morton et al., 1988). Diese Schwerminerale stammen von den schottischen Inseln, den nördlichen Orkney- und Shetland-Inseln sowie Bereichen des Fennoskandischen Schildes. Diese Schwermineral-Gruppe setzt sich hauptsächlich aus Epidot, Granat und Amphibol zusammen (Morton et al., 1988) und lässt sich in zwei Untergruppen unterteilen: eine Epidot-Granat-Vergesellschaftung und eine Hornblende-Vergesellschaftung (Fay, 1986).

Die zweite Schwermineral-Gruppe kennzeichnet Liefergebiete, die im Bereich des südlichen Beckenrandes liegen. Typisch für diese südlichen Liefergebiete ist das Fehlen von Epidot, Granat und Hornblende (Fay, 1986; Morton et al., 1988) sowie das Vorkommen von Zirkon und/oder Turmalin, mit wechselnden Gehalten von Kyanit, Staurolith und Andalusit (Morton et al., 1988). Die Ablagerungsbereiche der beiden Schwermineral-Gruppen werden durch eine Ost-West verlaufende Grenze voneinander getrennt. Die exakte Lage dieser Grenze variiert je nach betrachteter Zeitscheibe, befindet sich jedoch immer im südlichen Bereich des Norddeutschen Beckens (Morton et al., 1988).

6.2.2 Sekundäre Schwerminerale Pyrit und Markasit

Pyrit und Markasit gehören zu den sekundären Schwermineralen und bilden sich in einem sauerstoff-armen, nahezu anaeroben Milieu. Diese beiden Minerale haben die gleiche chemische Zusammensetzung (FeS₂) und unterscheiden sich aber in ihrer Kristallstruktur. Markasit bildet sich dabei bevorzugt in einem sauren Milieu (Okrusch & Matthes, 2014; Markl, 2015). Neben der Ausfällung von Pyrit und Markasit im Sediment, kann es bei der Fossildiagenese zur sogenannten Verkiesung von u. a. Schalen und Endoskeletten kommen. Dabei werden diese vollständig von Pyrit oder Markasit verdrängt, was zur teils sehr guten Erhaltung der Fossilien führt (Okrusch & Matthes, 2014; Mutterlose & Ziegler, 2018). Bei über 400°C geht Markasit in Pyrit über (Okrusch & Matthes, 2014).

Pyrit tritt in vielen paläogenen Ablagerungen Niedersachsens auf (z. B. Barckhausen & Streif, 1978; Lang, 1981, 1983, 1992; Bühmann, 1989; Streif, 1981, 1998; Voss, 1991; Hinsch, 1991, 1995; Barckhausen, 1995) und kommt sowohl in Form von Kristallen und Konkretionen (Streif,



1983; Lang, 1992), als auch in Form von pyritisierten Fossilien vor (Lang, 1983, 1992). Detailliere Angaben finden sich im Anhang.

Aus dem südlichen Niedersachsen wurde das Vorkommen von Markasit beschrieben (Stoller, 1915a; Harbort et al., 1916a). In den von Bühmann (1986) bearbeiteten Bohrungen (Abb. 5.6) tritt Pyrit bzw. Markasit nur vereinzelt auf und der Gesamtgehalt an Pyrit liegt in der Regel unter einem Gewichts-Prozent (Tab. 6.1). Bühmann (1986) nimmt an, dass der geringe nachweisbare Gehalt an Pyrit und Markasit auf die teilweise hohen Alter der Proben von mehreren 10er Jahren zurückzuführen ist. Sowohl Pyrit als auch Markasit zersetzen sich bei Kontakt mit Sauerstoff schnell zu Eisensulfat (Okrusch & Matthes, 2014; Markl, 2015). Diese Bohrproben eignen sich dementsprechend nur bedingt für die Abschätzung des Pyrit-Gehalts innerhalb der paläogenen Sedimente Niedersachsens.

Pyrit-Oxidation und Freisetzung von Schwefelsäure

Pyrit und Markasit oxidieren bei Kontakt mit Sauerstoff und O₂-haltigen Wässern, was zur Freisetzung von Schwefelsäure führen kann (F. 6.1 und F. 6.2; Jobmann et al., 2007b; Jahn & Sönnke, 2013).

$$2 FeS_2 + 2 H_2O + 7 O_2 \rightarrow 4 H^+ + 2 Fe^{2+} + 4 SO_4^{2-}$$
(F. 6.1)

$$4 FeS_2 + 14 H_2 O + 15 O_2 \rightarrow 2 (Fe_2 O_3 \cdot 3 H_2 O) + 16 H^+ + 8 SO_4^{2-}$$
(F. 6.2)

Schwefelsäure verursacht chemische Veränderungen im Umgebungsmaterial und kann z. B. zur Bildung saurer, korrosiver Grundwässer führen (NAGRA, 2002; Jobmann et al., 2007b). Dies kann Auswirkungen auf die Integrität der Umgebungsmaterialien (z. B. Ausdehnung in Folge von Gipskristallisation) und auch auf die Stabilität der für die Einlagerung verwendeten Behälter haben. Durch Schwefelsäure kommt es zur Lösung von Kalzit (F. 6.3), was wiederum zur Abmilderung der Folgen der Schwefelsäure-Freisetzung führen kann, dass es zur Ausfällung von Gips kommt (F. 6.4; Jahn & Sönnke, 2013).

$$CaCO_3 + 2H^+ \to CO_2 + H_2O + Ca^{2+}$$
 (F. 6.3)

$$Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$$
 (F. 6.4)

Ein hoher Gehalt an Sulfiden wie Pyrit und Markasit im Bereich der bergbaulichen Auflockerungszone kann daher durch Oxidationsprozesse zur Bildung und Freisetzung von Schwefelsäure führen. Daher besteht hier ein erhöhter Forschungsbedarf (Jobmann et al., 2007b; Jahn & Sönnke, 2013). Auf Grundlage der Nettoreaktionen kann eine Massenbilanz des chemischen Prozesses durchgeführt und so quantitativ abgeschätzt werden, mit welcher Menge an Schwefelsäure-Freisetzung, Gips- und Eisen-Hydroxid-Neubildung sowie Volumenzunahme durch Gipsbildung im Bereich der Auflockerungszone zu rechnen ist (vgl. NAGRA, 2002). Die NAGRA (2002) geht davon aus, dass im jurassischen Opalinuston (OPA) im Bereich der Auflockerungszone während der Bau- und Betriebsphase eines Endlagers mit einer minimalen Bildung von Gips und Eisen-Hydroxid in Folge der Pyrit-Oxidation zu rechnen ist. Eine Abschätzung, in welchem



Ausmaß bei der Errichtung eines Endlagerbergwerks in paläogenen Tonen bzw. Tonsteinen Niedersachsens mit der Freisetzung von Schwefelsäure zu rechnen ist, ist auf Grundlage der unzureichenden Datenlage nicht möglich. Zur Beantwortung der Frage sind weitere umfangreiche, standortspezifische Untersuchungen in Bezug auf die tatsächlichen Pyrit-Konzentrationen innerhalb der paläogenen Tone und Tonsteine nötig.

6.3 Wie unterscheidet sich der Tongehalt/Mineralgehalt in den paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens von anderen Tonen/Tonsteinen, die für die Endlagerung in Betracht gezogen werden?

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle werden auch in den Endlagerkonzepten anderer, benachbarter EU-Länder Tone/Tonsteine in Betracht gezogen. Eine generalisierte Zusammenstellung der mineralogischen Zusammensetzung dieser Tone und Tonsteine findet sich in Tab. 6.2. Eine Übersicht über die mineralogische Zusammensetzung und anderer relevanter Eigenschaften wichtiger Tone/Tonsteine, die in Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Stoffe untersucht wurden, bietet die Arbeit von Boisson (2005). Hier wird u. a. der Tonmineralgehalt von Tonen und Tonsteinen aus Deutschland, Belgien, Frankreich und der Schweiz dargestellt. Eine detaillierte Übersicht über die mineralogische Zusammensetzung des belgischen Boom Clay (BC, Rupelium) bieten u. a. die Arbeiten von Zeelmaekers et al. (2015) und Frederickx et al. (2021). Eine Übersicht über die Zusammensetzung und Eigenschaften des schweizerischen Opalinustons (OPA, untersucht im Untertagelabor Mont Terri) bietet die Arbeit von Thury (2002), sowie der NAGRA (2002). Eine Übersicht über die große Variabilität in der Zusammensetzung der jurassischen (Callovium-Oxfordium) Tonsteine ("COx-Tonsteine") Frankreichs geben Arbeiten der ANDRA (1999, 2005a) und u. a. die Arbeiten von Gaucher et al. (2004) und Pellenard & Deconick (2006).

	Calcit	Dolomit/Ankerit	Siderit	Albit	Quarz	Feldspat	Pyrit	∑ Tonminerale	Illit	Illit/Smektit	Chlorit	Kaolinit
Opalinuston Benken	16	1	4	1	20	2	1,1	54	18	14	5	17
Opalinuston Mont Terri	13	x	3	1	14	1	1,1	66	23	11	10	22
Boom Clay	0-6	< 1	0.2-4	k.A.	21-51	3-9	0.2-4	17-50	5-11	8-24	1-3	3-12
COx-Tonstein	20			25	2	1	40	23	15	1,5	0,5	

Tab. 6.2 Durchschnittliche Mineralvergesellschaftung von Tonen und Tonsteinen, die für den Bau eines Endlagers für hochradioaktive Stoffe in Betracht gezogen werden. Dargestellt sind die durchschnittlichen Mineralanteile im Sediment/Gestein in Gewichts-Prozent [Gew.-%] des Opalinuston (OPA) der Schweiz für die FB Benken und das Felslabor Mont Terri (exklusive sandig-kalkiger Fazies) (NAGRA, 2002), des Boom Clay (BC) Belgiens (Frederickx et al., 2021) und des jurassischen (Callovium-Oxfordium) Tonsteins (COx-Tonstein) in Frankreich (ANDRA, 1999; Mengel et al., 2012). x = nicht nachweisbar (d.h. < 1 Gew.-%). k.A. = keine Angaben.



Ein Vergleich der mineralogischen Zusammensetzung von Tonen und Tonsteinen unterschiedlicher Gebiete und unterschiedlichen Alters ist jedoch generell schwierig, da die Mineral-Vergesellschaftungen stark variieren können. Insbesondere der Vergleich der tonmineralogischen Zusammensetzung der paläogenen Ablagerungen Norddeutschlands mit denen für die Einlagerung hochradioaktiver Abfälle in Betracht gezogenen Tone und Tonsteine anderer Gebiete ist nur sehr eingeschränkt möglich. Die für Norddeutschland vorliegenden Daten (z. B. Bühmann, 1986, 1989) stammen aus der Beprobung stratigraphischer Horizonte mit unterschiedlichen Lithologien und nicht nur aus Tonen/Tonsteinen.

Zusammenfassung Kapitel 6

Die paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens sind in ihrer mineralogischen Zusammensetzung sehr heterogen aufgebaut und die Zusammensetzung kann je nach Gebiet stark variieren. In Niedersachsen können auf der Basis des Silikat- und Karbonatgehalts neun unterschiedliche Einheiten unterschieden werden.

Die Karbonat-Einheiten (NP8-NP29) enthalten eine große Anzahl kalkiger Fossilien und können dementsprechend sehr gut mit Biozonen korreliert werden. Der Karbonatgehalt der paläogenen Ablagerungen schwankt stark. Kalzit ist das dominierende Karbonatmineral mit 1 - 16 Gew.-%. Dolomit und Siderit liegen jeweils nur in Mengen von maximal 1 Gew.-% vor und sind nicht in allen paläogenen Sedimenten nachgewiesen.

Die Tonmineralfraktion der paläogenen Ablagerungen Niedersachsens setzt sich hauptsächlich aus Smektit, Illit, Glaukonit, Chlorit und Kaolinit zusammen. Smektit ist in allen paläogenen Ablagerungen das dominierende Tonmineral mit 55 - 91 Gew.-%. Illit ist das zweithäufigste Tonmineral mit 13 - 17 Gew.-% und stellt nur in den oligozänen Ablagerungen mit 21 Gew.-% das dritthäufigste Tonmineral, nach Kaolinit mit 23 Gew.-%, dar. In den oberpaläozänen bis obereozänen Sedimenten liegt der Kaolinit-Gehalt bei 2-14 Gew.-%. Chlorit kann lediglich in den untereozänen, obereozänen und oligozänen Sedimenten mit 1 Gew.-% nachgewiesen werden. Im Allgemeinen nimmt der Smektit-Gehalt nach oben hin ab, während der Illit-Gehalt zunimmt. Der nach oben hin zunehmende Kaolinit-Gehalt weist auf eine klimatisch bedingte Zunahme der kontinentalen Verwitterung hin.

Anhand der mineralogischen Zusammensetzung können drei signifikante Markerhorizonte definiert werden: 1) Der isochrone Albit-Beidellit-Horizont (Hauptaschelage des Paläozäns, Markerhorizont des Paläozän-Eozän Übergangs); 2) der isochrone Glaukonit-Smektit-Horizont (Mitteleozän) sowie 3) der diachrone Smektit-Kaolinit-Übergang (Eozän-Oligozän Übergang). Die Markerhorizonte 1 und 2 können mit dem Eintrag vulkanischer Aschen ins Norddeutsche Becken korreliert werden. Der dritte Markerhorizont zeigt die Änderung der Hauptliefergebiete an, die vermutlich mit der Hebung Skandinaviens zusammenhängt.

Die Schwermineral-Assoziationen können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden. Eine Gruppe ist durch Epidot, Granat und Amphibol charakterisiert und zeigt Liefergebiete nördlich des Norddeutschen Beckens an. Die andere Gruppe ist hauptsächlich durch Turmalin und/oder Zirkon charakterisiert und weist auf Liefergebiete südlich des Norddeutschen Beckens hin. Die Verteilung der Schwemineral-Vergesellschaftungen innerhalb der stratigraphischen Einheiten der paläogenen Ablagerung zeigt eine Veränderung des Hauptliefergebietes ab dem Oligozän an. Ab diesem Zeitpunkt stammt das meiste Material vom Fennoskandischen Schild. Lediglich Gebiete am Südrand des Beckens zeigen noch für südliche Liefergebiete typische Schwermineral-Assoziationen.

Pyrite bzw. Markasite kommen in vielen paläogenen Ablagerungen vor und treten überwiegend als Kristalle, Konkretionen oder in Form von pyritisierten Fossilen auf.



7. Versenkungsgeschichte und Diagenese

7.1 Versenkungsgeschichte

Die Absenkungsgeschichte der paläogenen und neogenen Sedimente in Norddeutschland wird durch die Subsidenz des zentraleuropäischen Beckensystems und seiner Teilbecken kontrolliert. Die Beckenentwicklung war ein komplexer Prozess, der über die letzten 300 Millionen Jahre abgelaufen ist. In den letzten 30 Jahren haben sich zahlreiche Forschungsprojekte mit der Entwicklung des zentraleuropäischen Beckensystems befasst. Viele dieser Arbeiten erfolgten im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der DFG (SPP1135 "Das zentraleuropäische Beckensystem unter wechselnden Spannungsfeldern"). Die wichtigsten Ergebnisse wurden in zwei Sonderbänden des International Journal of Earth Sciences (2005 und 2008) und einem Buch (Littke et al., 2008a) publiziert. Darüber hinaus haben sich verschiedene Arbeiten schon seit den späten 1990er Jahren mit der Beckenentwicklung und speziell der Absenkungsgeschichte in Norddeutschland befasst (Petmecky et al., 1999; Friberg et al., 2000). Die Beckenentwicklung war ein mehrphasiger Prozess. Aus dem kollisionsbedingten varizischen Vorlandbecken des Oberkarbons (Betz et al., 1987) entwickelten sich entlang dextraler Seitenverschiebungen verschiedene Sedimentbecken (Ziegler, 1990). Mit der Riftbildung im Unterperm entstanden in der initialen mechanischen Subsidenzphase, die für Norddeutschland charakteristischen Nord-Süd verlaufenden permischen Grabensysteme (Gast & Gundlach, 2006). Dies zeigt sich z. B. sehr deutlich in der Absenkungskurve für des Niedersächsischen Becken (Abb. 7.1A). Die anschließende thermische Subsidenzphase dauerte bis in die mittlere Trias hinein an (Littke et al., 2008b), deutlich nachvollziehbar anhand der Absenkungskurve im Bereich des Pompeckj Blocks (Abb. 7.1B). Bis zur Kreide unterlag das zentraleuropäische Beckensystem fortlaufender Subsidenz (van Wees et al., 2000). Die spätmesozoische und känozoische Subsidenz im zentraleuropäischen Beckensystem stand in Verbindung mit der fortschreitenden Öffnung des Atlantiks (Littke et al., 2008b). In der Oberkreide kam es zur Inversion der Beckenfüllung (Kockel, 2003; Kley, 2013). Die Inversion wirkte sich in Norddeutschland sehr unterschiedlich aus. Generell bedeutet eine Inversion eine Reaktivierung von Abschiebungen zu Aufschiebungen (Kockel, 2003), sowie die Fragmentierung eines Beckens in Sub-Becken und in Intra-Becken Hochgebiete (Voigt et al., 2008). So wurde der Südrand des zentraleuropäischen Beckensystems mit dem niedersächsischen Becken in der Oberkreide stark gehoben (Abb. 7.1A; Petmecky et al., 1999; Senglaub et al., 2006, Grassmann et al., 2006), wohin gegen in anderen Bereichen nördlich davon, wie z. B. im Gebiet des Pompecki Blocks weiterhin Subsidenz (Abb. 7.1B) und offenmarine Sedimentation vorherrschte (Voigt et al., 2008). Die kreidezeitliche Inversion spielt auch eine Rolle für die Beckendynamik im anschließenden Känozoikum, da nach der primären kompressiven Inversion in der Oberkreide eine relaxationsgesteuerte Inversion im mittleren Paläozän erfolgte (Nielsen et al., 2005; 2014). Ab dem Paläozän herrschte im Nordwestdeutschen Becken Dehnung, in deren Folge es zur Absenkung kam. Im Nordostdeutschen Beckens gab es hingegen keine Dehnung (Voigt et al., 2008). Dies bedingt eine heterogene Verteilung der Subsidenz in Norddeutschland. Ablagerungen des unteren Paläozäns sind daher meist nur vereinzelt in tieferen Randsenken entlang von Salzstrukturen erhalten.



Im Eozän gab es in im Raum Hamburg und im Bereich des Westschleswig-Jade-Grabens eine Absenkungsphase, die auch von Salzbewegungen beeinflusst wurde (Voigt et al., 2008). Am Ende des Eozäns kam es am Süd- und Nordrand des Norddeutschen Beckens zu Hebungen (Abb. 5.3; Voigt et al., 2008). Die Bereiche mit den höchsten Subsidenz-Raten im Oligozän entsprechen in Großteilen denen des Eozäns. Die unteroligozänen Ablagerungen des Rupeliums sind ein hervorragender Marker, der die heterogenen känozoischen Absenkungs- und Hebungsmuster anschaulich machen. So liegen diese Ablagerungen im Raum Hamburg heute in einer Tiefe von 1000 m, während gleichalte Sedimente im Harz auf einer Höhe von 512 m ü. N.N. zu finden sind (Voigt et al., 2008).



Abb. 7.1 1D Absenkungskurven des Niedersächsischen Beckens (A) und des Pompeckj Blocks (B). Die Absenkungskurven zeigen den gekoppelten Ablauf von Hebung und Erosion im Niedersächsischen Becken und die steigenden Sedimentationsraten und Sedimentmächtigkeiten im Bereich des Pompeckj Blocks. Zusätzlich sind gemessene (Punkte) und kalibirierte (Linie) Vitrinitreflexionswerte in %Ro, sowie berechnete und modellierte Paläomaximaltemperaturen in °C in Abhängigkeit zur Tiefe dargestellt. Verändert nach Bruns et al. (2016).

Seit dem Oberoligozän (post-Rupelium) bildet sich ein Nordwest-Südost orientiertes, von der südlichen Nordsee über Nord- und Mitteldeutschland bis nach Südost Polen verlaufendes



Subsidenzgebiet heraus, das als mitteleuropäische Senkungszone bezeichnet wird. Dieses Gebiet wird durch Nordnordost-Südsüdwest verlaufende Verwerfungen in eine Reihe von kleineren Depozentren untergliedert (Abb. 4.5; Abb. 5.7-5.9; Stackebrandt, 2004, 2005). Aus der heterogenen Subsidenzgeschichte ergibt sich eine heterogene Verbreitung und Maximalversenkung der paläogenen Sedimente. Im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens blieben die Regionen, in denen Subsidenz beobachtet werden konnte bestehen, zeigen jedoch deutlich geringere Sediment Mächtigkeiten als die Strukturen im Westen. Als neues Element etablierte sich die Nordwest-Südost streichende Niederrheinische Bucht, welche durch synsedimentäre Störungsaktivität geprägt ist (Gramann & Kockel, 1988).



Abb. 7.2 Übersicht über die unterschiedlichen Diagenese-Stadien, sowie die damit zusammenhängenden Bildungsbedingungen von Erdöl, Erdgas und Kohle (verändert nach Tissot & Welte, 1984; Wolf, 1988; Littke et al., 2008b; Bjørlykke, 2010; Bahlburg & Breitkreuz, 20017). Dargestellt sind die Temperaturfenster [°C], Tiefenfenster [km] und die entsprechende Verteilung der Vitrinitreflexions-Werte [Ro%]. Der gelb markierte Bereich zeigt die Verteilung der publizierten Vitrinitreflexions-Werte, die in paläogenen und neogenen Ablagerungen innerhalb des Norddeutschen Beckens gemessen wurden (s. Kapitel 7.3, Tab. 7.2).

Die Gebiete mit den höchsten Subsidenz-Raten im Oberoligozän bis Untermiozän sind die Niederrheinische Bucht, der Hamburger Trog und der Westschleswig-Jade Trog. Die höchste Subsidenz im Mittel- bis Obermiozän weist der Zentralgraben der Nordsee auf. Dort betrug die Subsidenz seit Beginn des Miozäns bis zu 1500 m. Dies entspricht in etwa der Hälfte der gesamten Absenkung im Paläogen und Neogen (cf. Arfai et al., 2014, 2018). Auch der Westschleswig-Jade Trog und der Hamburger Trog zeigen hohe Subsidenz-Raten seit Beginn des Mittelmiozän (Abb. 5.9). Die Absenkung im Bereich der Niederrheinischen Bucht und des Westschleswigs Trogs dauerten bis ins Pliozän an.



7.2 Verfestigungsgrade und Diagenese paläogener Ablagerungen im Norddeutschen Becken

Diagenetische Prozesse sorgen durch Kompaktion und Zementation für eine Zunahme der Verfestigung und die Lithifizierung von sedimentären Ablagerungen. Die Kompaktion beschreibt die Minimierung des Porenraums durch Austreibung leichtflüchtiger Bestandteile in Folge des Auflastdrucks (Hesse & Gaupp, 2021). Die Zementation beschreibt die, durch die versenkungsbedingte Druck- und Temperaturerhöhung ausgelöste, Lösung und/oder (Re-)Kristallisation von Mineralen. Es gibt unterschiedliche Arten von Zementtypen, die je nach mineralogischer Zusammensetzung des Gesteins variieren können. Zu den häufigsten Zementtypen zählen Karbonat- und Kieselsäurezemente (Hesse & Gaupp, 2021). Der Verlauf der Diagenese ist abhängig von den Druck- und Temperaturverhältnissen im Sedimentbecken, der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins und den chemischen Eigenschaften der im Sedimentbecken zirkulierenden Fluide. Diagenetische Prozesse laufen im Allgemeinen in offenen Systemen ab, da sie durch den Fluidstrom im Porenraum miteinander verbunden sind. Die Diagenese findet bei Drücken von unter 4 kbar (das entspricht ca. 12 km Versenkungstiefe) und Temperaturen unter 200 °C statt und wird entsprechend der von diesen Bedingungen abhängigen Veränderlichkeit organischer Substanzen in unterschiedliche Zonen unterteilt (Abb. 7.1; Hesse & Gaupp, 2021).

Junge Sedimente bestehen aus Komponenten (Minerale, organische Substanzen) mit sehr unterschiedlicher thermodynamischer Stabilität. Dementsprechend laufen die Veränderungen in unterschiedlichen Druck-Temperatur-Zeit-Fenstern ab. Das Auftreten bestimmter Minerale/Mine-

Tiefe	Mineral-Phase
0,2 – 1,0 km	Chabasit
	Natrolith
	Phillipsit
1,0 – 3,0 km	Klinoptilolith
	Mordenit
	Erionit
2,0 – 5,0 km	Analcim
	Heuland

Tab. 7.1 Tiefenzonierung des Auftretens von Zeolithen im Rahmen der Versenkungsdiagenese (Hesse & Gaupp, 2021). ralvariationen kann zur Abschätzung der bereits erreichten Tiefen, Temperaturen und Drücke genutzt werden. Die Bildung bestimmter Minerale/Mineralvariationen bzw. Zementparagenesen ist neben den Parametern wie Druck und Temperatur auch vom Chemismus der Porenwässer abhängig (z. B. Weaver, 1989; Hesse & Gaupp, 2021). Entsprechend ihres Verfestigungsgrades werden tonige Sedimente unterschiedlich klassifiziert. Ein Tonstein (*claystone, argillite*) ist ein Gestein, dessen Porosität auf 4 bis 5 % reduziert wurde.

Für die paläogenen Sedimente im Norddeutschen Becken liegen nur wenige Daten über die Verfestigungsgrade oder Diagenese-Stadien vor. Generell kann daher kein Bezug zum Alter, der Tiefe oder der mineralogisch-petrografischen Zusammensetzung hergestellt werden.

Bedingt durch die häufig fehlende Differenzierung zwischen Ton und Tonstein innerhalb der gesichteten Literatur ist es schwer, Aussagen über den Grad der Verfestigung oder mögliche diagenetische Überprägung der paläogenen Tone/Tonsteine in Niedersachsen zu treffen. Aus den Erläuterungen der geologischen Karten 1:25.000 sind vereinzelt Beschreibungen der Beschaffenheit der paläogenen Ablagerungen bekannt (s. Tabellen im Anhang). Für die paläozänen Ablagerungen liegen keine Beschreibungen vor. Die eozänen Ablagerungen werden als plastische Tone (Gagel & Schlunck, 1911; Harbort et al., 1911; Gagel & Schlunck, 1914), teils plastische, teils mürbe Tone und Tonsteine (Hinsch, 1991, 1993) und plastische Tonsteine (Hinsch, 1995) beschrieben; die oligozänen Ablagerungen als plastische Tone (Stoller, 1915a), plastische Tonmergel und Tonmergelsteine (Harbort et al., 1911; Streif, 1998) und stark plastische Mergel (Voss, 1991).

Das Auftreten bestimmter Zeolith-Minerale kann mit verschiedenen Versenkungstiefen assoziiert werden, da ihre Stabilitätsverhältnisse von bestimmten Druck- und Temperatur- (P-T) Bedingungen abhängig sind (Tab. 7.1; Utada, 1965; lijima & Utada, 1966). Das Auftreten nachweisbarer Mengen an Klinoptilolith (s. Kapitel 6, Tab. 6.1) innerhalb

der paläogenen Ablagerungen Niedersachsens spricht für eine geringe Versenkungstiefe und somit eine geringe diagenetische Überprägung der Sedimente. Klinoptilolith ist in Tiefenbereichen von 1 bis 3 km am stabilsten (Iijima & Utada, 1966; Hesse & Gaupp, 2021). Für die Gesamtzusammensetzung der paläogenen Ablagerungen werden nennenswerte Mengen mit 1 Gew.-% innerhalb der mitteleozänen und paläozänen, sowie mit 2 Gew.-% innerhalb der untereozänen Sedimente beschrieben (z. B. Bühmann, 1986). Hierbei handelt es sich jedoch um die durchschnittlichen Gehalte innerhalb des Nordwestdeutschen Beckens. Die Klinoptilolith-Gehalte spiegeln keineswegs die Versenkung des gesamten Gebietes wider, welche bereichsweise höher als 3 km war (s. Kapitel 5.4 und 7.1).

In den Kartenerläuterungen wird des Öfteren das Auftreten von Pyrit-/Schwefelkieskonkretionen (Schroeder et al., 1913; Stoller, 1915b; Lang, 1992), Toneisensteingeoden (Gagel & Schlunck, 1911; Streif, 1981) und Kalkkonkretionen (Schucht & Schroeder, 1906; Stoller, 1915a; Harbort et al., 1916a) beschrieben (s. Tabellen im Anhang). Konkretionen sind im Zuge der Diagenese neu gebildete lokale Mineralansammlungen. Art und Zusammensetzung können Rückschlüsse auf abgelaufene diagenetische Prozesse innerhalb des Sedimentbeckens ermöglichen. De Craen et al. (1999) untersuchten z. B. die frühdiagenetische, bakteriell gesteuerte Bildung von Karbonat-konkretionen innerhalb des unteroligozänen Boom Clay (BC, Belgien). Aufgrund der unzureichenden Beschreibungen der Art und Zusammensetzung der Konkretionen im Norddeutschen Becken können die diagenetischen Prozesse nicht näher eingeordnet werden

7.3 Methoden der Paläomaximal-Temperatur-Bestimmung von sedimentären Ablagerungen

Zur Bestimmung der Maximaltemperatur, die ein Sediment/Sedimentgestein im Verlauf der Zeit erfahren hat, gibt es unterschiedliche Methoden (Tab. 7.2). Die Untersuchung der Tonmineralkristallinität und der Vitrinitreflexion sind die gängigsten Methoden im Bereich der Sedimentologie, um die Paläomaximal-Temperatur abzuschätzen. Im Bereich des Norddeutschen Beckens liegen für die paläogenen und neogenen Sedimente lediglich Werte für die Vitrinitreflexion vor (s. Kapitel 7.3). Hohe Illit-Gehalte legen nahe, dass eine Nutzung des Illitkristallinitäts-Indexes für paläogene Ablagerungen Norddeutschlands ebenso geeignet ist. Beide Methoden werden im Folgenden kurz erläutert.



Paläothermometer	Anwendungsbereich	Spektrum der Reifegrade			
Vitrinit Reflexion	Devon und jünger	Unreif (0.2-0.5%),			
		Reif (0.5-1.3%),			
		Leicht überreif (1.3-2.0%)			
		Stark überreif (>2.0%)			
Illit-Kristllinität	Bevorzugt dioktaedrische Illite	Frühe bis späte Diagenese; Tem-			
		peraturfelder von der Mineralgröße			
		abhängig			
Maximal Vitrinit Reflexion	Devon und jünger	Semi-Anthrazit (2.2%)			
		Metamorphismus (>6%)			
Bitumen Reflexion	Alle sedimentären Gesteine	Reif bis stark überreif			
Fluoreszenzfarbe und -intensität	Alle sedimentären Gesteine	Unreif bis reif			
Sporenfarbe	Devon und jünger	Unreif bis reif			
Conodontenfarbe	Marine Ablagerungen	Unreif bis reif			
Kohlenstoff Index	Alle sedimentären Gesteine	Unreif bis reif			
	(unverwittertes Material nötig)				
Methylphenantren Index	Alle sedimentären Gesteine	Reif bis leicht überreif			
	(unverwittertes Material nötig)				
Biomarker	Alle sedimentären Gesteine	Unreif bis reif			
	(unverwittertes Material nötig)				
Rock-Eval T _{max}	Alle sedimentären Gesteine	Unreif bis leicht überreif			
Rock-Eval PI	Alle sedimentären Gesteine	Unreif bis leicht überreif			
	(unverwittertes Material nötig)				
Rock-Eval HI	Alle sedimentären Gesteine	Unreif bis leicht überreif, hängt vom			
		Potential zur Erdölbildung und			
		Reife ab			
Flüchtige Materie	Nur Kohle	Unreif bis überreif			
Wassergehalt/Feuchtigkeit	Nur Kohle	Unreif bis reif			
Kohlenstoffgehalt	Nur Kohle	Unreif bis überreif			

Tab. 7.2 Übersicht über gängige Paläo-Thermometer, ihren Anwendungsbereich und das Spektrum messbarer Reifegrade (Petschick, 2002; Littke et al., 2008b; Hesse & Gaupp, 2021).

7.3.1 Vitrinitreflexion

Vitrinite sind Bestandteile von Sedimenten/sedimentären Gesteinen, die sich bei der Zersetzung von Holz bilden. Es handelt sich um mikroskopisch kleine Fragmente von organischem, pflanzlichem Material (Mazerale). Im Verlauf der Diagenese nimmt der Inkohlungsgrad der Vitrinite irreversibel zu, was Einfluss auf ihr Reflexionsvermögen von Licht hat (Tissot & Welte 1984; Markl, 2015). Das Reflexionsvermögen (Ro in Prozent) gibt an, wie viel normales weißes Licht von einem Vitrinit im Verhältnis zu einem Material, welches 100 % des Lichtes reflektiert, reflektiert wird. Das Reflexionsvermögen ist abhängig vom Inkohlungsgrad des Vitrinits. Je höheren Temperaturen der Vitrinit ausgesetzt wurde, desto höher ist dessen Inkohlungsgrad und desto höher ist dessen Reflexionsvermögen. Vitrinit ist in vielen Sedimenten und sedimentären Gesteinen vorhanden und bietet daher eine gute und günstige Möglichkeit der Paläotemperatur-Bestimmung. Das Reflexionsvermögen des Vitrinits ist bei schichtungsparallelem Anschnitt am

höchsten, was zu gewissen Fehlern bei den Messwerten von Schräganschnitten führen kann. Zudem gibt die Vitrinitreflexion immer die maximale Temperatur an, der die Sedimente ausgesetzt waren. Sie ermöglicht keine Rekonstruktion des Temperaturverlaufs oder gar eine Datierung von Proben (Markl, 2015). Die Werte für die Vitrinitreflexion liegen zwischen 0,2 bis 0,5 % für unreife Substanzen, 0,5 bis 1,3% für reife Substanzen, 1,3 bis 2,0 % im Bildungsbereich nasser Gase und über 2,0% im Bildungsbereich trockener Gase (Abb. 7.2; Littke et al., 2008b).

7.3.2 Illit als Paläo-Thermometer

Die Kristallinität von Tonmineralen ändert sich mit zunehmender Diagenese. Die Änderung der Kristallinität ermöglicht die Einordnung in entsprechende diagenetische Zonen (Petschick, 2002; Markl, 2015). Die Zuweisung entsprechender Zonen ist jedoch nicht konkret möglich. Zwar spielt die Temperatur bei der Veränderung der Kristallinität die wichtigste Rolle, jedoch wird diese auch von der Fluidchemie, dem Druck, der tektonischen Spannung und Gesteinszusammensetzung beeinflusst (Markl, 2015). Bevorzugt werden für diese Methode Illite und Chlorite analysiert. Anhand des Rekristallisations-Grades der Tonminerale erfolgt eine Einschätzung, in welcher diagenetischen Zone sie sich gebildet haben. Dementsprechend erfolgt eine grobe Einschätzung der Paläomaximaltemperatur, die die Sedimente/Gesteine erfahren haben (Petschick, 2002; Markl, 2015). Aufgrund der fehlenden Standardisierung (unterschiedliche Messparameter, verschiedene Auswertungsmethoden, unterschiedliche Probenaufbereitung und zu große Abweichungen der Messdaten) ist es jedoch schwer, die Kristallinität einer genauen diagenetischen Zone und dementsprechend Temperatur zuzuordnen (Markl, 2015). Die Qualität der Daten hängt zudem stark von der Lithologie ab. Sandsteine zeigen in der Regel deutlich bessere Illitkristallinitäts-Werte als Tone/Tonsteine. Dies liegt an der höheren Permeabilität und Porosität von Sandsteinen, wodurch Kalium-haltige Porenwässer leichter ins Gestein gelangen (Hesse &Gaupp, 2021). Eine generelle Korrelation zwischen Illitkristallisations-Werten und z. B. Reflexionswerten organischer Substanzen ist nicht I möglich, sondern von standortspezifischen Faktoren abhängt (Hesse & Gaupp, 2021).

7.4 Kenntnisstand in Bezug auf die Maximaltemperaturbelastung der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens

Der Kenntnisstand in Bezug auf die Maximaltemperaturbelastung der paläogenen Tone und Tonsteine des Norddeutschen Beckens ist begrenzt. Zwar gibt es einige Untersuchungen zur Temperaturentwicklung innerhalb des Beckens t, diese behandeln jedoch in der Regel ältere Ablagerungen, die wirtschaftlich relevanter Kohlenwasserstoffe enthalten können (z. B. Grassmann et al., 2005, 2006; Bruns et al., 2016).

Die thermische Beanspruchung der paläogenen Tone und Tonsteine ist eine Funktion der maximalen Versenkungstiefe und des Wärmestroms, aus dem sich der geothermische Gradient ergibt. Grundsätzlich hängt der Wärmestrom von radioaktiven Zerfallsprozessen in der Lithosphäre ab und kann durch tektonische und magmatische Prozesse stark beeinflusst werden. So führen Dehnungsphasen in einem Sedimentbecken oft zu einer Erhöhung des Wärmestroms (z. B. Allen &



Allen, 2013). Der rezente Wärmestrom in Norddeutschland ist variabel. Guterch et al. (2010) zeigen, dass der höchste Wärmestrom von 80-85 mW/m² im westlichen Mecklenburg-Vorpommern auftritt. Niedrigere Wärmeströme von 50-55 mW/m² gibt es in einem Nord-Süd verlaufenden Gebiet das Teile Schleswig-Holsteins, Hamburg und Teile des nördlichen Niedersachsens umfasst. Im mittleren und südlichen Niedersachsen beträgt der Wärmestrom 60-65 mW/m², ganz im Westen an der Grenze zu den Niederlanden ist er etwas erhöht mit 70-75 mW/m² (Abb. 7.3).



Abb. 7.3 Rezenter Wärmestrom im südlichen Permbecken (verändert nach Guterch et al., 2010).

Im westlichen Mecklenburg-Vorpommern haben Gesteine in einer Tiefe von 1000 m eine Temperatur von 55-60°C, wohin gegen im Raum Hamburg in 1000 m Tiefe nur eine Temperatur von 35-40°C herrscht (Abb. 7.4 A; Guterch et al., 2010). In Niedersachsen herrschen in einer Tiefe von 2000 m Temperaturen zwischen 60-85°C. Im westlichen Mecklenburg-Vorpommern haben die Gesteine in 2000 m Temperaturen von bis zu 90°C (Abb. 7.2 B; Guterch et al., 2010).Der Wärmestrom kann in der unmittelbaren Nähe von Salzstrukturen vom generellen Trend abweichen und höher sein, da Salz eine bessere thermische Leitfähigkeit besitzt (z. B. Vizgirda et al., 1985; Jensen, 1990).

Da der Wärmestrom in einem betrachteten Gebiet in der Vergangenheit anders gewesen sein kann als heute (der heutige Wärmestrom kann z. B. durch Temperaturmessungen in Bohrlöchern bestimmt werden), braucht man für die Ableitung des Paläowärmestroms geologische Indikatoren. Dazu dienen meist Vitrinite, deren Reflexionsvermögen mit einer zunehmenden thermischen Beanspruchung (Inkohlung) steigt (s. Kapitel 7.3).





Abb. 7.4 Temperatur im südlichen Permbecken (verändert nach Guterch et al., 2010). A) 1000 m, Tiefe B) 2000 m Tiefe.

7.5 Kenntnisstand in Bezug auf die Art, Menge und Reife organischer Substanzen

Die känozoischen Ablagerungen Norddeutschlands enthalten teilweise zahlreiche Braunkohleflöze. Diese kommen in vielen stratigraphischen Horizonten vor (Tab. 5.1). Aufgrund ihres nur geringen Inkohlungsgrad haben Sie keine nennenswerten Mengen an Gas produziert. Ölvorkommen sind ebenfalls nicht aus den känozoischen Sedimenten bekannt (Knox et al., 2010). Kommerziell ausgebeutet werden im Wesentlichen die oberpaläozänen und untereozänen Ablagerungen Nord- und Mitteldeutschlands (z. B. Helmstedter Revier, Egeln), sowie die mittel- und obereozänen Vorkommen in Ostdeutschland und miozäne Vorkommen in der Niederrheinischen Bucht und Ostdeutschlands. Mit der Ausnahme der Niederrheinischen Bucht (tektonisches Grabensystem) reflektieren die unterschiedlichen stratigraphischen Kohlevorkommen die progressive ostwärtige Verlagerung der paralischen und terrestrischen Sedimentation während eines relativen Meeresspiegelanstiegs (Standtke, 2008; Knox et al., 2010; Krutzsch, 2011). Die Helmstedter und Egelner Vorkommen sind in sekundären Salz-Randsenken entstanden (z. B. Brandes et al., 2012; Riegel et al., 2012; Osman et al., 2013).

Hufnagel & Wehner (1989) untersuchten den Gehalt und Reifegrad der organischen Substanz der paläogenen und neogenen Ablagerungen der Forschungsbohrung (FB) Wursterheide (TK 25 Nordholz 2217). Diese erbohrten Sedimente den typischen Aufbau der paläogenen und neogenen Ablagerungen innerhalb des Norddeutschen Beckens (Benda, 1989). Der Gehalt an organischen Kohlenstoffen innerhalb der FB Wursterheide schwankt zwischen 0,19% und 10,70% Coro. Die höchsten Gehalte konnten in einer Tiefe von 288 m (Miozän) und die niedrigsten Gehalte in einer Tiefe zwischen 580 m und 701 m (Unter-Eozän) gemessen werden (Hufnagel & Wehner, 1989). Teilweise werden im Schichtenverzeichnis der FB Wursterheide makroskopisch erkennbare Kohlelagen beschrieben (Mengeling, 1989). Diese Beobachtung deckt sich mit Beschreibungen aus den Erläuterungen der geologischen Karten 1:25000 Niedersachsens (s. Anhang 1) in denen sowohl Kohlelagen (z. B. Streif, 1981; Barckhausen, 1995) als auch Braunkohlebruchstücke beschrieben werden (z. B. Lang, 1981; Frisch, 1984). Außerdem treten humose bis bituminöse Horizonte in den Bohrungen auf (z. B. Streif, 1984, 1993; Sattler-Kosinowksi & Streif, 1985; Barckhausen, 1995; Hinsch, 1995). In den erbohrten Sedimenten der FB Wursterheide besteht der organische Kohlenstoff hauptsächlich aus stark aufgearbeiteten Resten von Landpflanzen und einem geringen Anteil an Resten mariner Organismen. Lediglich in obermiozänen bis oligozänen Ablagerungen überwiegt der Anteil mariner Organismen in Relation zum terrestrischen organischen Material. Der Gehalt aromatischer (ungesättigter) Kohlenwasserstoffe überwiegt den der gesättigten Kohlenwasserstoffe. Die Pyrolyseversuche zeigen, dass es sich beim Kohlenstoff vorwiegend um unreifes, humoses organisches Material handelt. Diese Ergebnisse der Untersuchungen an Probenmaterial der FB Wursterheide lassen darauf schließen, dass es im Rahmen der Diagenese im nördlichen Niedersachsen noch zu keiner Neubildung von Kohlenwasserstoffen gekommen ist (Hufnagel & Wehner, 1989). Die Messung der Vitrinitreflexion innerhalb der Ablagerungen der FB Wursterheide ergab Werte von 0,34 Ro% (bei 280 m) zunehmend auf bis zu 0,49 Ro% (bei 760 m). Dies entspricht dem Entwicklungsstadium unreifer organischer Substanzen (Abb. 7.2; Littke et al., 2008b). Publizierte Werte aus industriellen Bohrungen in Norddeutschland zeigen ein ähnliches Spektrum für die Vitrinitreflexionswerte (Tab. 7.3). Der Inkohlungsgradient innerhalb der Sedimente der FB Wursterheide liegt bei 0.125 Ro%/1000 m. Dieser liegt im unteren Bereich des im niedersächsischen Känozoikum auftretenden Gradienten. Somit befinden sich die in der FB Wursterheide durchteuften paläogenen und neogenen Abfolgen in einem für die Erdölbildung unreifen Zustand (Hufnagel & Wehner, 1989). Faber (1989) untersuchte die Headspace-Gase eingedampfter Gesteinsproben aus der FB Wursterheide. Dabei wurden Anteil, Zusammensetzung und Isotopenverhältnisse der flüchtigen Kohlenwasserstoffe bestimmt. Die Gaszusammensetzung und die Isotopenverhältnisse von Methan stehen im direkten Verhältnis zu dessen Bildungsbedingungen (Whiticar et al., 1986; Whiticar, 1994, 1999). Methan mikrobiellen Ursprungs enthält im Vergleich zu Methan thermogenetischen Ursprungs eine geringere Menge des schwereren Kohlenstoffisotops ¹³C (Whiticar,



1994, 1999). Die Messung an Proben der FB Wursterheide ergaben einen Gesamt-Methangehalt von unter 1%. Faber (1989) geht davon aus, dass sich das Methan in situ durch bakterielle Umwandlungsprozesse gebildet hat und nicht durch thermische Inkohlungsprozesse entstanden ist. Mikrobielles Methan kann auf zwei Arten gebildet werden: 1) Primäre mikrobielle Bildung, bei der organische Masse bei der Methanogenese durch Mikroorganismen zersetzt wird; 2) Sekundäre mikrobielle Methan Bildung bei der Biodegradation von Öl und Gas (Larter et al., 2005). Vorkommen von (mikrobiellem) Gas in geringen Tiefen (*"shallow gas"*) sind aus der südlichen Nordsee bekannt (z. B. Müller et al., 2018; Verweij et al., 2018). Diese Vorkommen werden teilweise wirtschaftlich genutzt. Sie treten vor allem in neogenen Ablagerungen des Eridanos-Delta auf und liegen in einer Tiefe von bis zu 1000 m (Müller et al., 2018; Verweij et al., 2018). Auf Grundlage der chemischen Signatur handelt es sich dabei größtenteils um Gase aus der mikrobiellen Methanogenese. Es kann jedoch nicht endgültig bestimmt werden, ob es sich um in situ gebildete Gase durch die primäre Methanogenese handelt, oder durch sekundär gebildete Gase, die aus anderen oder tieferen Beckenbereichen migriert sind (Verweij et al., 2018).

Alter	Tiefe	Ro%	Lithologie	Bohrung	Quelle
Miozän	147 m	0,24 %	Schieferton		Muñoz et al. (2007)
	280 m	0,34 %		FB Wursterheide	Hufnagel & Wehner (1989)
	280 m	0,30 %		Mittelplatte 2b	Rodon & Littke (2005)
	350 m	0,37 %		Mittelplatte 2b	Rodon & Littke (2005)
Oligozän	175 m	0,35 %	Schieferton		Muñoz et al. (2007)
Eozän	210 m	0,31 %	Schieferton		Muñoz et al. (2007)
	246 m	0,45 %		Fehmarn Z1	Rodon & Littke (2005)
	250 m	0,50 %		Fehmarn Z1	Rodon & Littke (2005)
	295 m	0,33 %	Schieferton		Muñoz et al. (2007)
	760 m	0,49 %		FB Wursterheide	Hufnagel & Wehner (1989)
	1020 m	0,36 %		Mittelplatte 2b	Rodon & Littke (2005)
	1020 m	0,42 %		Mittelplatte 2b	Rodon & Littke (2005)
	1020 m	0,40 %		Mittelplatte 2b	Rodon & Littke (2005)
	1140 m	0,36 %		Mittelplatte 2b	Rodon & Littke (2005)

Tab. 7.3 Übersicht über publizierte Vitrinitreflexionswerte aus paläogenen und neogenen Ablagerungen Norddeutschlands. Dargestellt ist das Alter, die Tiefe der Probennahme, der Wert der Vitrinitreflexion in Ro in Prozent [%], die Lithologie (falls angegeben), der Name der Bohrung (falls angegeben), sowie die Quelle der Daten.

7.5.1 Mögliche Alteration/Freisetzung organischer Substanzen durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kann mit einer Temperaturbelastung von bis zu 90°C auf das Umgebungsgestein/Sediment gerechnet werden (Jobmann et al., 2007b; Conil et al., 2020). Diese hohen Temperaturen können bereits in einem Zeitraum von wenigen hundert Jahren erreicht werden, halten aber nach geologischen Maßstäben nicht sehr lange an. Die Temperaturen sinken nach etwa 1000 Jahre bereits wieder (NAGRA, 2002; Jobmann et al., 2015). In Kombination mit den natürlich vorherrschenden Temperaturen im Untergrund, kann die Temperaturentwicklung rein theoretisch für die thermogene Öl- oder Gasbildung durch die Zersetzung





Abb. 7.5 Rezenter Temperaturgradient im nordöstlichen Bereich des Niedersächsischen Beckens, ermittelt aus zwei Bohrungen (Thönse und Konrad) sowie der Temperaturentwicklung innerhalb des Schacht Konrad (verändert nach Jobmann et al., 2007). dT/dz = Temperaturänderung mit zunehmender Tiefe, mK/m = Millikelvin pro Meter.

organischer Substanzen ausreichen (Abb. 7.4; Jobmann et al., 2007b). Die Erhöhung des Reifestadiums der organischen Substanz kann die Freisetzung von Kohlenwasserstoffen und eine Änderung der Porenwasserchemie herbeiführen. Sie findet jedoch nur statt, falls die Gesamt-Temperatur im Einlagerungsbereich die Temperaturen überschreitet, die der Gesteinskörper/Sedimentkörper im Laufe der Diagenese bereits erfahren hat (vgl. NAGRA, 2002). Die Einwirkung des Temperaturimpulses, der von den wärmeentwickelnden, hochradioaktiven Abfällen ausgeht ist mit etwa 1000 Jahren aber deutlich kürzer als die Temperaturerhöhungen, die bei der Diagenese auf den Gesteinskörper/Sedimentkörper einwirken. Da der Prozess der Reifung von organischem Material eine Funktion von Temperatur und Zeit ist, kann davon ausgewerden. dass der gangen Temperaturimpuls eines Endlagers nicht ausreichend ist, um den Reifegrad organischer Substanzen zu erhöhen (NAGRA, 2002; Jobmann et al., 2015). Im Fall des

schweizer jurassischen Opalinustons (OPA) müsste die Temperatur im Einlagerungsbereich über einen deutlich größeren Zeitraum als 1000 Jahre (> 10.000 Jahre) erhöht sein, um eine nennenswerte Reifung des organischen Materials zu verursachen (NAGRA, 2002).

Indikatoren wie der Illit-Gehalt (s. Kapitel 6.1) und die Vitrinitreflexions-Werte (s. Kapitel 7.3) lassen darauf schließen, dass die paläogenen Ablagerungen Niedersachsens keine großen Temperaturerhöhungen erfahren haben. Die Reife der enthaltenen organischen Substanz kann nur anhand weniger Bohrdaten abgeschätzt werden, befindet sich aber, wie zuvor beschrieben, durchgehend im unreifen Stadium. Da die Zunahme der Inkohlung ein von Zeit und Temperatur abhängiger Prozess ist, wäre es möglich, eine Erhöhung des Reifegrades durch eine starke Temperaturerhöhung in einem kurzen Zeitraum zu erlangen (vgl. NAGRA, 2002). Da die Umgebungstemperatur und die Reife der vorhandenen organischen Substanzen standortspezifische Kennwerte sind, kann im Rahmen dieser Literaturstudie nicht abgeschätzt werden, inwiefern mit der Alteration bzw. Freisetzung organischer Substanzen innerhalb paläogener Ablagerungen Niedersachsens durch eine Temperaturerhöhung bei der Einlagerung wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfälle zu rechnen ist. Es kann lediglich festgestellt werden, dass eine Zunahme des Reifegrades unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist.


7.6 Hydrogeologische Eigenschaften der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens und in-situ Ermittlung der effektiven Gebirgsdurchlässigkeiten und Gebirgsporositäten

Tone und Tonsteine werden insbesondere wegen ihrer geringen Durchlässigkeit und ihres Radionuklid-Rückhaltevermögens als potenzielle Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Betracht gezogen (Parisio et al., 2018; Bossart, 2017). Für die Bewertung eines untertätigen Lagerstättenstandortes müssen Durchlässigkeit und Porosität für einen größeren Bereich (10 - 100 m) bewertet werden, der nicht nur von der lokalen Materialdurchlässigkeit und -porosität (Matrixeigenschaften) bestimmt wird. Während die Gesteinsporosität und -durchlässigkeit in Laborversuchen für einzelne Proben ermittelt werden können, sind bei der Gebirgsporosität und der -durchlässigkeit auch tektonische Trennflächen, wie z. B. Verwerfungen oder Klüfte oder Einschaltungen von gegebenenfalls erheblich permeableren gröberkörnigen Sedimenten (z. B. Sand) mitbestimmend. Bei sehr geringen Matrixdurchlässigkeiten (geotechnischer Bezeichnung der Durchlässigkeit des ungestörten Gesteins bzw. Probenkörpers) übt das Trennflächengefüge maßgeblichen Einfluss auf die Größe der Gesteinsdurchlässigkeit und -porosität aus (Genske, 2021).

7.6.1 Hydrogeologische Eigenschaften

Über die hydrogeologischen Eigenschaften der paläogenen Sedimente/Sedimentgesteine Norddeutschlands in nur wenig publiziert, da sie wasserwirtschaftlich keine Bedeutung haben. Nur in seltenen Fällen werden lokal Grundwasservorkommen in paläogenen Sedimenten genutzt (z. B. Teilraum 08302 Magdeburg-Glechtinger-Hochlage; Elbracht et al., 2016). Die flächenhaft verbreiten, tonigen Ablagerungen des Rupeliums (Unteroligozän) bilden einen wichtigen Grundwassergeringleiter (Aquitarde), der die für die Trinkwassergewinnung wichtigen neogenen und quartären Grundwasserleiter (Aquifere) nach unten hin abdichtet (Hebig et al., 2012). Allerdings kann diese Barrierefunktion durch die Erosion der tiefen pleistozänen subglazialen Rinnen teilweise gestört/ zerstört sein (vgl. Kapitel 4.5).

7.6.2 In-situ Ermittlung der effektiven Gebirgsdurchlässigkeiten und Gebirgsporositäten

Die Porosität, als Verhältnis aller Hohlräume zum Gesamtvolumen einer Probe (BGE, 2020b), entspricht dem in der deutschsprachigen Geotechnik verwendeten Porenanteil *n* (in Abgrenzung zur Porenziffer e, die sich auf das Feststoffvolumen bezieht) (Kempfert & Lüking, 2020). Per Definition ist hierbei die absolute Porosität gemeint, die von der effektiven Porosität abzugrenzen ist. Der für den hydraulischen Durchfluss nutzbare Porenraum definiert die effektive Porosität, wovon also sehr kleine, gut isolierte Porenräume ebenso ausgeschlossen sind, wie an der Gesteinsoberfläche adhäsiv gebundenes Haftwasser. Je kleiner die Korngrößen und desto größer die Kornoberflächen (wie dies insbesondere bei Tonen und Tongesteinen der Fall ist), desto geringer ist das effektive Porenvolumen (hydraulisch wirksam). Besonders wirksame Durchlässigkeiten im Bereich von Klüften oder größeren Verwerfungen im Gestein bilden die sekundäre Porosität (Bär, 2012).



Die Durchlässigkeit wird oft mithilfe des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f in m/s angegeben (Volumenstrom pro Fläche bei vorhandenem hydraulischem Gradienten), wodurch Dichte und Viskosität des durchströmenden Fluids berücksichtigt werden. Gebirgsporosität und Gebirgsdurchlässigkeit sind schwer zu bestimmten, da es sich um statistisch streuende Größen handelt. Im Deponiebau kam es daher in der Vergangenheit, auch bei Tonen/Tonsteinen die als geologische Barriere fungieren, zu Leckagen und Grundwasserkontaminationen (Genske, 2021). Infolge von Klüften und Verwerfungen sind Durchlässigkeiten für größere (Gebirgs-)Bereiche üblicherweise um mehrere Größenordnungen größer als die Matrixdurchlässigkeiten (Bär, 2012).

Zwischen Durchlässigkeit und Porosität gibt es keine allgemeine Umrechnungsfunktion, sondern höchstens gesteinsspezifische Näherungen. Dies ist dadurch bedingt, dass die Höhe der Durchlässigkeit von der geometrischen Ausbildung, das heißt Größe, Form und Interkonnektivität der Porenräume abhängt. Einen Überblick zu verschiedenen mathematischen Modellen hierzu liefern Pape et al. (1999) und Bär (2012).

Bereits die Bestimmung der Porosität bei Tonsteinen in Laborversuchen ist in erheblichem Maße von den Versuchsrandbedingungen beeinflusst und die geringe Porengröße, die Rissempfindlichkeit und die Interaktionen mit Wasser erschweren die Versuche. Generell ist die Struktur der Poren hinsichtlich ihrer Geometrie und Verbindungen nur teilweise verstanden. Auch die insgesamt heterogen verteilten Materialeigenschaften erhöhen die Ungenauigkeiten bei der Bestimmung. Hierbei ist das Quellverhalten in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung ein wichtiger Aspekt. Bei der Bestimmung der Porosität mit wassergesättigten Proben kann bei Vorhandensein von leicht oxidierbaren Pyriten eine Interaktion zwischen dem Wasser und der Bruchempfindlichkeit die Messung stören. Ein höherer Tonmineralgehalt hat eine größere spezifische Oberfläche zur Folge, weswegen beispielsweise die Gasdurchlässigkeit und der Tongehalt einen linearen Zusammenhang haben (Song et al., 2017). Um Einflüsse der Messrandbedingungen besser zu verstehen, haben Song et al. (2017) an Proben des jurassischen Opalinustons (OPA) unter hydrostatischem Druck (in Anlehnung an in-situ Bedingungen) die Porositätsbestimmung unter Zuhilfenahme verschiedener Gase (Argon und Helium) und Fluide (Wasser und Ethanol) untersucht. Sie stellten fest, dass keine Methode allein hinreichend zuverlässige Ergebnisse liefert. Es zeigte sich, dass eine gute Korrelation zwischen dem Tongehalt und der Porositätsbestimmung mit Wasser abgeleitet werden kann. Bei der Durchströmung mit Argon wurden infolge von Absorption höhere Porositäten ermittelt. Die Ergebnisse bei wassergesättigten Proben und der Durchströmung mit Argon zeigten sich über alle Messungen relativ stabil. Bei teilgesättigten Proben waren die Messungen mit Helium zuverlässiger (Song et al., 2017). Die labortechnische Bestimmung von Durchlässigkeitswerten kann bei gering durchlässigen Gesteinen erhebliche Messfehler aufweisen (Bär, 2012).

Zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit in situ wird die Transmissivität ermittelt und durch die Mächtigkeit des Gebirges geteilt, womit der Durchlässigkeitsbeiwert k_f bestimmt wird. Zur Auswahl eines geeigneten Messverfahrens muss die erwartete Größenordnung der Gebirgsdurchlässigkeit bekannt sein, da die Verfahren diesbezüglich Anwendungsgrenzen haben. Bei der Planung der Felduntersuchungen muss ferner eine ausreichende Anzahl Tests festgelegt werden, um etwaige Heterogenitäten hinreichend zu berücksichtigen. Zur Abschätzung der erwarteten Gebirgsdurchlässigkeit können orientierende Voruntersuchungen, wie beispielsweise geophysikalische Bohrlochmessungen, hilfreich sein. Grundsätzlich existieren unterschiedliche Verfahren für gesättigte und ungesättigte Bereiche. Eine Übersicht der Anwendungsgrenzen bei 5 m Schichtmächtigkeit für verschiedene Verfahren und Versuchsdauern zeigt Abb. 7.6 (DGGT, 2010).



Abb. 7.6 Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit (anhand des Durchlässigkeitsbeiwertes k_f , hier nur mit k bezeichnet) bei 5 m Mächtigkeit der Schicht, typische Versuchsdauer (DGGT, 2011).

Generell sind, sofern möglich, unverrohrte Erkundungsbohrungen zu empfehlen und Bohrlöcher müssen vor den eigentlichen Messungen gespült und gesäubert werden. Je geringer die Durchlässigkeit des untersuchten Bereiches ist, desto stärker können verschiedene Fehlereinflüsse die Ergebnisse verfälschen. Zu den möglichen Fehlerquellen zählen: Inhomogenitäten im Gebirge, hydraulische Kurzschlüsse in Gebirgsabschnitten, nichthydraulische Faktoren wie Temperatur und Viskosität, Veränderungen der Gebirgseigenschaften beispielsweise durch Quellen des Gesteins oder Zusetzen der Bohrlochwandungen,

Umläufigkeit bei Packern und Undichtigkeiten im Messsystem, ungenaue Messungen oder zu kurze Versuchsdauer sowie ungeeignete Auswertungsrandbedingungen. Beim Einsatz von Packern muss daher die korrekte Abdichtung durch begleitende Druckmessungen ober- und unterhalb der Packerabschnitte sichergestellt werden. Vorbereitung und Durchführung sind sorgfältig von fachkundiger Seite auszuführen und zu dokumentieren (DGGT, 2010). Da tektonisch gestörte Bereiche maßgeblich zur Gebirgsdurchlässigkeit beitragen, müssen Verlauf und Versatz von Klüften oder Verwerfungen im Untersuchungsgebiet möglichst genau erkundet werden. Anders als bei oberflächennahen Heterogenitäten/Diskontinuitäten, sind seismische Untersuchungen bei hohen Überdeckungen nicht mehr zielführend und die ortsspezifische Situation muss durch geeignete andere geophysikalische Verfahren untersucht werden (Bär, 2012).

Nach § 23 Abs. 4 (1) StandAG sind nur solche Wirtsgesteine für die Endlagersuche zu betrachten, deren charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit 10^{-10} m/s nicht überschreitet (BGE, 2020b). Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit entspricht dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f . Aufgrund dessen werden nachfolgend nur die Verfahren zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit genannt, welche für entsprechend geringe Durchlässigkeiten geeignet sind. Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass vorabgeschätzte k_f -Werte durchaus von den tatsächlichen Werten abweichen können, sodass gegebenenfalls ein Wechsel des angedachten Messverfahrens und wiederholende Untersuchungen notwendig werden können. Weitere, als die nachfolgend genannten Verfahren, sind in DGGT (2010) dargestellt.

Für orientierende Untersuchungen in tieferen Erkundungsbohrungen sind Squeeze-Testserien geeignet, bei denen ein Doppelpackerstrang (Packerabstand von 2–3 m) in einem Bohrloch sukzessive versetzt wird. Der aufgebaute Überdruck zwischen den Packern baut sich zeitabhängig

ab, woraus k_f -Werte korreliert werden können. Ferner werden die Messungen in den verschiedenen Teufenabschnitten miteinander verglichen (Hekel, 1994; DGGT, 2010).

Pulse-Tests eignen sich bis $k_f = 10^{-11}$ m/s, wobei eine Reihe von Randbedingungen zu beachten sind. Grundsätzlich wird bei einem Puls-Test eine Druckänderung in einem mit Packern gedichteten Bohrlochabschnitt impulsartig herbeigeführt. Aus der aufzuzeichnenden Druckänderung über die Zeit nach dem Impuls wird k_f ermittelt, wobei eine ausreichend lange Messdauer für verlässliche Ergebnisse unabdingbar ist. Der Untersuchungsradius um das Bohrloch beschränkt sich auf etwa 1 m. Die Auswertung erfolgt mit dem Typenkurvenverfahren, wobei Störungen durch Bohrlochwandeffekte (Skin-Effekte) und Brunnenspeicherung mittels Korrekturfaktoren zu berücksichtigen sind. Skin-Effekte dürfen keinesfalls vernachlässigt werden, da in Geringleitern andernfalls Ergebnisabweichungen von 1–2 Größenordnungen auftreten können. Bei der Messung ist ebenfalls die Gesamtkompressibilität zu ermitteln, welche für die Bestimmung eines Ersatzradius bei der Auswertung benötigt wird (Odenwald et al., 2009; DGGT, 2010).

Für ungesättigte Zonen sind Gasdrucktests bis $k_f = 10^{-12}$ m/s geeignet. Beim Test wird ein augenblicklich eingebrachter Gasdruck aufgebaut und dessen zeitabhängiger Abbau gemessen. Bei Tonsteinen hat dieses Verfahren den Vorteil, dass keine Quellprozesse durch Änderungen der Sättigung induziert werden. Unter Annahme einer radialsymmetrischen Druckausbreitung und instationärer Strömung wird die Gebirgsdurchlässigkeit mithilfe von Typenkurven ausgewertet. Dabei sind der Startdruck und die Änderung der Kompressibilität zu beachten und eine rechnergestützte Auswertung wird empfohlen. Die Durchlässigkeit für Wasser wird durch Umrechnung von Viskosität und Dichte zwischen verwendetem Gas und Wasser bestimmt (Wagner & Voigt, 1999; DGGT, 2010). Hierbei sei angemerkt, dass gegebenenfalls salzhaltiges Porenwasser vorliegt und generell auch die hydrochemische Zusammensetzung das Fließverhalten beeinflusst und daher nicht zu vernachlässigen ist (Stober & Bucher, 2012; Bär, 2012).

Für die in-situ Bestimmung der Gebirgsporosität in sehr schwach durchlässigen Gebirgsformationen scheint es keine etablierten Standardverfahren zu geben. Anders als bei Gesteinsproben lässt sich das betrachtete Gesamtvolumen im Gebirge nicht eindeutig räumlich abgrenzen. Im Kontext von unterirdischen Fluid- oder Gaslagerstätten (z. B. Aquifere, Erdöl, Gas oder CO₂ Verpressung) kann das Gesamtvolumen effektiver Porenräume von großem Interesse sein, da hiermit die Ergiebigkeit oder das Speichervolumen für Verpressungen abgeleitet werden können (Espinoza et al., 2011; Ashraf et al., 2018; Carrasquilla & Silva, 2019). Auch bei der Beurteilung geothermischer Potentiale ist die Gebirgsporosität von Interesse (Bär, 2012). Für die Endlagerung radioaktiver Feststoffe kann die Porosität beispielsweise im Zusammenhang mit mathematischen Näherungen für die Durchströmbarkeit eines Gesteins, mit Anteilen ungestörter Gesteinsmatrix und Klüftungen, von Interesse sein (Genske, 2021). Hierfür steht mit der hydraulischen Leitfähigkeit bereits ein aussagekräftiger Wert zur Verfügung (siehe obige Erläuterungen zum Zusammenhang zwischen Porosität und Durchlässigkeit). Während für leicht durchströmbare poröse Gebirge die näherungsweise Abschätzung der Porosität unter Einsatz verschiedener Techniken möglich ist, ergeben sich bei sehr schwach durchlässigen Gesteinen erschwerende Randbedingungen für eine in-situ Ermittlung von Porositäten. Ableitungen auf Basis eines induzierten Flüssigkeitsdruckgradienten sind infolge der geringen Fließgeschwindigkeiten nicht für größere räumliche Bereiche einsetzbar. Werden jedoch nur kleine Bereiche des Gebirges untersucht, so können stochastisch verteilte Störungen nicht ausreichend berücksichtigt werden. Es



ist nicht ausgeschlossen, dass sich, mittels anderer geologischer Erkundungstechniken (z. B. seismische Messungen, magnetische Messungen, Messungen elektrischer Widerstände, Tracer Verfahren mit Indikatorstoffen), bei guter Kenntnis der vorliegenden Gesteine/Ablagerungen und des Porenwasserchemismus, weitere Abhängigkeiten ableiten lassen, die auf vorhandene Hohlräume oder Heterogenitäten im Gefüge schließen lassen. Erläuterungen zu Verfahren der Porenklassifizierung mittels elektrischer Widerstandsmessungen in gesättigten porösen Medien sind in Sun et al. (2021) dargestellt. Ableitungen aus einzelnen Gesteinsproben decken, aufgrund der zu beurteilenden Gesamtgröße eines Endlagers, nur einen stark begrenzten Bereich im größeren Gebirgszusammenhang ab. Der Umfang solcher Stichproben im Verhältnis zur Grundgesamtheit des Gebirges ist so klein, dass der Standardfehler groß werden kann. Schon die Entnahme ungestörter Proben ist herausfordernd. Die Entnahme von Proben in zerklüfteten Bereichen ist hingegen nicht üblich, sodass deren markanter Anteil am Porenvolumen nicht anhand von Labortests quantifiziert werden kann. Andere, ergänzende Erkundungen, wie die Beurteilung von Klüften mittels optisch bildgebender Verfahren sind in gesättigten Tonsteinen schwierig, da das Gestein hierfür freiliegen muss und die Freilegung selbst Störungen des Gefüges zur Folge hat und damit Änderungen der ursprünglichen Eigenschaften die Folge sind (s. Kapitel 8.4 und 8.5). Verfahren zur Quantifizierung der Gebirgsporenräume mit ausreichender stochastischer Absicherung konnten im Rahmen dieser Literaturstudie somit nicht identifiziert werden. Damit bleibt die Gebirgsporosität bei den Tonen und Tonsteinen des Norddeutschen Beckens vorerst ein eher theoretischer Wert.

Aufgrund der erheblichen negativen Folgen, die mit möglichen hydraulischen Leckagen aus Endlagern für radioaktive Abfälle einhergehen, ist die Gebirgsdurchlässigkeit von fundamentaler Bedeutung für die Barrierewirkung eines tiefen geologischen Endlagers. Unentdeckte, lokale Heterogenitäten/Diskontinuitäten (z. B. sandige Einschaltungen, Klüfte, tektonische Verwerfungen) stellen hierbei eine nicht zu vernachlässigende Gefahr dar. Aufgrund der räumlich begrenzten Aussagekraft von Bestimmungsmethoden der Gebirgsdurchlässigkeit ist auch bei engmaschig durchgeführten geophysikalischen in situ Erkundungen nicht auszuschließen, dass die wirksame Gebirgsdurchlässigkeit höher ist als die durch lokale Aufschlüsse ermittelten Werte.

Zusammenfassung Kapitel 7

Zur Diagenese und den Paläomaximal-Temperaturen der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens sind nur wenige Daten publiziert. Der Wärmefluss im Norddeutschen Becken liegt zwischen 50 mW/m² und 95 mW/m² und kann aufgrund der erhöhten Wärmeleitfähigkeiten von Salz regional stark variieren. Die Temperaturen in 1000 m Tiefe liegen zwischen 40 °C und 55 °C, in 2000 m Tiefe zwischen 60 °C und 90 °C. In Abhängigkeit von der differentiellen Subsidenz betrug die Versenkung der paläogenen Sedimente wenige 100 m (z. B. Niedersächsisches Becken) bis einige 1000 m (z. B. Pompeckj Block). Auch im Bereich des Glückstadt Grabens kam es im Paläogen zu starker Absenkung in Kombination mit Salzbewegung.

Gemessene Vitrinitreflexionswerte liegen wischen 0,31 Ro% bis 0,50 Ro%. Dies spricht für einen unreifen Zustand des organischen Materials. Da der Inkohlungskrad der Vitrinite irreversibel ist, kann davon ausgegangen werden, dass Temperaturen innerhalb der paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens die Temperaturen des Diagenese-Fensters nicht



überschritten haben. Auch der hohe Gehalt an Smektit von 55 Gew.-% bis 91 Gew.-% stützt diese Annahme. Erst ab geologisch langfristig einwirkenden Temperaturen von über 60°C beginnt die Mineralumwandlung von Smektit zu Illit. Zusätzlich kann der Klinoptilolith-Gehalt als Indikator für die Versenkungstiefe herangezogen werden. Der Klinoptilolith-Gehalt der paläogenen Sedimente liegt bei 1 bis 3 Gew.-%. Klinoptilolith ist in Tiefen von zirka 1 bis 3 km stabil. Die paläogenen und neogenen Ablagerungen innerhalb der Forschungsbohrung Wursterheide enthalten zwischen 0,19% und 10,70% C_{org}. Die höchsten Gehalte wurden in miozänen und die niedrigsten Gehalte in untereozänen Sedimenten gemessen. Es handelt sich überwiegend um unreifes, humoses organisches Material, das im Verlauf der Diagenese keine Reifung erfahren hat.

All diese Daten sprechen dafür, dass die paläogenen Ablagerungen in der Regel nur geringen Paläomaximal-Temperaturen ausgesetzt waren und vergleichsweise geringe Versenkungstiefen erfahren haben, so dass ebenfalls nur geringe diagenetische Überprägungen zu erwarten sind. Aufgrund der großen regionalen Unterschiede in der Beckenentwicklung lassen sich aber keine allgemeinen Aussagen machen.

Über die hydrogeologischen Eigenschaften der paläogenen Sedimente/Sedimentgesteine Norddeutschlands in nur wenig publiziert, da sie wasserwirtschaftlich keine Bedeutung haben. Die flächenhaft verbreiten, tonigen Ablagerungen des Rupeliums (Unteroligozän) bilden einen wichtigen Grundwassergeringleiter (Aquitarde), der die für die Trinkwassergewinnung wichtigen neogenen und quartären Grundwasserleiter (Süßwasser-Aquifere) nach unten hin abdichtet. Allerdings kann diese Barrierefunktion durch die Erosion der tiefen pleistozänen subglazialen Rinnen teilweise zerstört sein.

Für die in-situ Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit gibt es unterschiedliche Verfahren. Zur Auswahl eines geeigneten Messverfahrens, muss zuvor die zu erwartende Größenordnung der Gebirgsdurchlässigkeit bekannt sein oder durch Voruntersuchungen näherungsweise bestimmt werden. Es gibt zudem unterschiedliche Messverfahren für gesättigte und ungesättigte Bereiche. Für die Umrechnung von der Gebirgsdurchlässigkeit in die Gebirgsporosität gibt es keine allgemeine Funktion, sondern nur gesteinsspezifische Näherungen. Für schwach durchlässige Gesteine gibt es zum jetzigen Zeitpunkt zudem keine etablierten Standardverfahren zur in-situ Bestimmung der Gebirgsporosität.

8. Geomechanisch/geotechnische Charakterisierung der paläogenen Tone/Tonsteine im Norddeutschen Becken

8.1 Allgemeiner Kenntnisstand der geomechanischen und geotechnischer Eigenschaften von Tonen und Tonsteine und Übertragbarkeit geotechnischer Kennwerte

Die geomechanischen und -technischen Eigenschaften paläogener Tone/Tonsteine des Norddeutschen Becken sind kaum bekannt (Jahn et al., 2016; Schuck & Kneuker, 2021). Eine systematische Beforschung der in situ Eigenschaften mit begleitender Modellierung und Validierung von Stoffgesetzen und Abhängigkeiten hat bisher nicht erkennbar stattgefunden, sodass für viele Gebiete in Deutschland nur oberflächennahe Erhebungen aus anderen Kontexten existieren. Auch in früheren Untersuchungen in Deutschland, die Tonsteine als mögliches Endlager



betrachteten, wurden Daten daher mitunter anhand der Ergebnisse aus anderen Ländern in Analogie abgeleitet (Jahn et al., 2016). Reinhold et al. (2013) haben darüber hinaus festgestellt, dass die im Rahmen des Referenzprofils NORD (nach Anforderungen des AkEnd aus der früheren Endlagersuche 2002) untersuchten tertiären Ablagerungen "häufig nur lückenhaft verbreitet" sind und regionale Unterschiede aufgrund der Versenkungsgeschichte Nordwestdeutschlands zu erwarten sind". Da in den paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens sowohl unverfestigte Tone als auch verfestigte Tonsteine vorkommen (s. Kapitel 5.2 und Kapitel 7.2), wurden wissenschaftliche Daten für Tonsteine und Tone zusammengetragen und in den nachfolgenden Abschnitten behandelt.

Die Adressierung der geotechnischen und geomechanischen Fragestellungen kann aufgrund der geringen Datenlage in Teilen nur durch Bezugnahme auf umfangreich untersuchte Standorte außerhalb Norddeutschlands erfolgen. Hierbei handelt es sich insbesondere um Tonsteine und Tone des Juras und des Unteroligozäns, die in Hinblick auf die Endlagersuche für radioaktiven Abfall untersucht wurden:

- Opalinuston (OPA) im *Mont Terri Project* Felslabor, Schweiz. Mitteljurassischer Tonstein (unteres Aalenium), 250–320 m Überdeckung (in der Vergangenheit auch mehr), steif, überkonsolidiert, stark geschichtet, mit unterschiedlichem Tonmineralgehalt (40–80 %) (Gens et al., 2007). Details zum mineralogischen Aufbau finden sich in Bossart et al. (2002) und Vergara Quezada (2019).
- Mittel- oberjurassische Tonsteine (Callovium-Oxfordium COx) im Untergrund Felslabor (Underground Research Laboratory URL) der französischen Atommüllbehörde Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) in Bure, Frankreich. 490 m Überdeckung, steif, geringe Porosität (Gens et al., 2007; Belmokhtar et al., 2017b).
- Boom Clay (BC) im Felslabor High-Activity Disposal Experimental Site (HADES) in Mol, Belgien. Unteroligozäne (Rupelium) Tone, 170–290 m Tiefe, plastisches Verhalten, überkonsolidiert, vergleichsweise hohe Porosität und geringere Festigkeiten als OPA und COx (Bernier et al., 1997; Gens et al., 2007; Cui et al., 2009).

Wesentliche Eigenschaften dieser jurassischen Tonsteine (OPA, Cox) und oligozänen (BC) Tone sind in Bock (2001) und Gens et al. (2007) zusammengefasst und werden in Kapitel 8.2 erneut aufgegriffen. Die Untersuchungen in der Schweiz dauern bereits 25 Jahre an, HADES wurde 1980 errichtet und in Frankreich wird seit 1974 geforscht, seit 1999 untertägig (Cui et al., 2009; Labalette et al., 2013; Bossart, 2017). Die Zeitspannen, in denen die oben genannten Tonsteine untersucht wurden, mit weiterhin anhaltenden offenen Fragen, deuten den Umfang der wissenschaftlichen Arbeit an, die zur Beantwortung von Fragen geotechnischer und geomechanischer Eigenschaften zur sicheren Langzeitlagerung von radioaktiven Abfällen notwendig sein können. Weitere Nationen (z. B. Südkorea, Finnland, Schweden, Spanien und Kanada) entwickeln und forschen ebenfalls an geologischen Endlagerkonzepten, allerdings nicht ausschließlich in Tonen/Tonsteinen, sodass dazu nur punktuelle Bezüge hergestellt werden können (Kim et al., 2011).

Die Bestimmung geomechanischer und -technischer Eigenschaften sowie die Beantwortung von Fragen der Standsicherheit bedürfen in der Regel dezidierte, standortspezifische Betrachtungen. Diese sind jedoch im Rahmen unserer Studie aufgrund des eingeschränkten Umfanges der vorhandenen wissenschaftlichen Informationen zu paläogenen Tonen/Tonsteinen in Norddeutschland nicht im erforderlichen Umfang abschließend durchführbar.

Auch lassen sich die Untersuchungsergebnisse anderer Standorte nicht ohne Weiteres auf Norddeutschland übertragen und der Grad der Vergleichbarkeit muss sorgfältig abgewogen werden. Hierbei ist ein hohes Maß an Systemverständnis mit Bezug auf die jeweiligen Untersuchungsstandorte und den Entwicklungsstand der dortigen Forschung notwendig (Mazurek et al., 2008). Bossart (2017) stellte mit Bezug auf die Ergebnisse von Mazurek et al. (2008) fest, dass eine Übertragbarkeit von Eigenschaften und Ergebnissen unterschiedlicher Standorte und Tonsteine/Tone immer unter Berücksichtigung diverser Faktoren erfolgen muss. Einige Eigenschaften lassen sich besser übertragen als andere, sodass im Folgenden ein Überblick zur Übertragbarkeit verschiedener Aspekte der geotechnischen und -mechanischen Charakterisierung vorgenommen wird.

Gemeinsamkeiten von Tonen/Tonsteinen leiten sich, neben vielen anderen Faktoren, aus ähnlichem mikrostrukturellem Aufbau ab, der maßgeblich vom Gehalt an Tonmineralien bestimmt wird (Mazurek et al., 2008). Für drei unterschiedliche lithostratigraphische COx Einheiten (URL in Frankreich), konnte gezeigt werden, dass das mechanische Verhalten im Wesentlichen vom Tonmineralgehalt abhängt (Conil et al., 2020). So sind einige Eigenschaften der jurassischen Tonsteine (OPA und Cox) ähnlich, u. a. der Verdichtungs- und (Über-) Konsolidierungsgrad, die mineralogische Zusammensetzung, der Porenwasserchemismus, das Porenwasserverhalten sowie die Porosität und hydraulische Leitfähigkeit.

Wenn all diese Parameter anderer Tonsteine vergleichbare Werte aufweisen (was in situ Untersuchungen voraussetzt), kann ebenfalls eine gewisse Übertragbarkeit gesteinsmechanischer Eigenschaften erwartet werden (Bossart. 2017). Die Tonminerale/Tonpartikel des jurassischen Tonsteins im französischen URL (COx) haben jedoch eine stärkere Orientierung als die des Opalinustons (OPA) im Schweizer URL. Durch die höhere Anisotropie zeigen die COx Tonsteine ein stark anisotropes Verformungsverhalten, bei dem lokale Dehnungsfelder durch die Last- und Schichtungsrichtungen beeinflusst sind (Conil et al., Hierbei zeigen Material-Inhomogenitäten einen stärkeren 2020). Einfluss als die Schichtorientierung der Tonminerale/Tonpartikel. In Konsequenz ist das Rissverhalten von Tonen/Tonsteinen ebenso anisotrop (Shi et al., 2021). Beim Vergleich von Tonen/Tonsteinen unterschiedlicher Standorte muss daher die Schichtorientierung der Tonminerale berücksichtigt werden. da die Wasserdurchlässigkeit, Temperaturleitfähigkeit und mechanischen Eigenschaftenen von Anisotropie-Effekten beeinflusst werden (Conil et al., 2020).

Die spezifische Wärmekapazität von Tonen/Tonsteinen lässt sich relativ genau bestimmen, da sie wesentlich von der Gesteinszusammensetzung abhängt (Conil et al., 2020). Wärmeleitfähigkeiten in situ und solche, welche in Laborversuchen ermittelt wurden, haben für die COx Tonsteine daher auch übereinstimmende Werte ergeben. Hierbei tritt kein Skalierungseffekt auf (Armand et al., 2017a). Diese Erkenntnis lässt darauf schließen, dass aus standortspezifischen Proben von paläogenen Tonen/Tonsteinen des Norddeutschen Beckens die Wärmeleitfähigkeit mittels Laborversuche in guter Näherung bestimmt werden kann. Eine Übertragbarkeit der Wärmeleitfähigkeit anderer Standorte ist bei gleichem Tonmineralgehalt, Porosität und Sättigungsgrad zu vermuten.

Handelt es sich eher um plastische Tone, ist die Vergleichbarkeit mit den stärker verfestigten jurassischen Tonsteinen (OPA und Cox) nur sehr eingeschränkt möglich und es sind für die plastischeren Tone des oligozänen Boom Clay (BC), die im Rahmen von HADES in Belgien untersucht werden, im Vergleich dazu wesentlich größere Abweichungen bei den ermittelbaren Parametern und Eigenschaften zu erwarten (Bossart, 2017). Aber auch die Untersuchungsergebnisse des Boom Clay lassen sich nicht ohne Weiteres auf die tiefer liegenden paläogenen Tone des Norddeutschen Beckens übertragen, die als Endlager in Frage kommen könnten, da der untersuchte Boom Clay in Belgien in einer geringen Tiefe von nur 170–290 m vorkommt. In Norddeutschland haben sich pleistozäne subglaziale Rinnen z. T. mehr als 500 m tief in den Untergrund eingeschnitten (vgl. Kapitel 4.5), so dass die Mindesttiefe eines Endlagers deutlich tiefer als 300 m liegen müsste (vgl. Bernier et al., 1997; Cui et al., 2009; BGBI, 2020).

Die im Rahmen von Projektphase I des BGR-Projektes BASTION (*Einfluss geologischer Prozesse auf die* Ba*rriereeigenschaften von* Tongesteinsformationen) zwischen 2013 und 2019 untersuchten Tonsteine in Norddeutschland stammen aus der Unterkreide. Diese weisen bereits im m-Bereich ausgeprägte Heterogenitäten auf, aus denen sich für die technischen Eigenschaften unter anderem unterschiedliche Brucheigenschaften ergeben können (Schuck & Kneuker, 2021). Auch Untersuchungen, welche im Rahmen der Auffahrung des Grubenbaus der Schachtanlage Konrad in Salzgitter durchgeführt wurden, können nur bedingt herangezogen werden. Die Untersuchungen wurden an mittel- und oberjurassischen (Dogger, Malm) Gesteinen durchgeführt und die Ergebnisse sind nur sehr eingeschränkt einsehbar (Czaikowski, 2011). Auch Veröffentlichungen zu oberflächennahen Bauwerken in Niedersachsen, wie z. B. über die Weserschleuse in Minden, die in unterkretazische Tonsteine (Hauterivium) gebaut wurde (Kauther et al., 2013), enthalten nur wenige für diese Literaturrecherche relevante Informationen.

Ob und inwieweit sich die in unserer Studie zusammengetragenen Eigenschaften auf paläogene Tone/Tonsteine in Norddeutschland übertragen lassen, ist letztlich von standortspezifischen Faktoren abhängig. Diese können, ohne eine engere örtliche Eingrenzung des Gebietes und zugehörige Untersuchungen der entsprechenden Ablagerungen in situ und in Laborversuchen, nicht ermittelt werden. Eine Übertragbarkeit von Ergebnissen kann, selbst bei gleichem Ton bzw. gleichem Tonstein, fraglich sein (Schuck & Kneuker, 2021). Auch Jahn et al. (2016) kommen zu dem Schluss, dass Werte anderer Standorte nicht allgemeingültig sind, da unterschiedliche Teufen, tektonische Beanspruchung oder Sedimentfazies abweichende Gesteinseigenschaften verursachen können. Hierbei wird auf die Schweizer Ergebnisse verwiesen, die für die dortigen Tonsteine (OPA) große Heterogenitäten nachgewiesen haben, welche nur durch standortspezifische Untersuchungen erfasst werden können (Jahn et al., 2016). Grundsätzlich können Sedimente/Sedimentgesteine Diskontinuitäten aufweisen, die sich auf endlagerrelevante Eigenschaften auswirken, wie z. B. die Spannungsverhältnisse in situ, die hydraulischen Eigenschaften oder die Rissbildung. Diese Heterogenitäten bzw. Diskontinuitäten können z. B. durch Sand- oder Karbonat-Einschaltungen sowie durch Brüche (Risse) und Klüfte in der Gesteinsmatrix entstehen (Minardi et al., 2016; Orellana et al., 2018a, b; Crisci et al., 2019; Kneuker & Furche, 2021). Daher ist eine genaue Kenntnis und Analyse der lithologischen Zusammensetzung, der sedimentären



Heterogenitäten und tektonischen Trennflächen erforderlich, um ein grundsätzliches Barrierekonzept für die Lagerung radioaktiver Stoffe zu entwickeln (Kneuker & Furche (2021).

Für alle nachfolgend behandelten geotechnischen und geomechanischen Eigenschaften steht daher eine Übertragbarkeit immer unter dem Vorbehalt einer notwendigen, umfangreichen Prüfung der jeweiligen spezifischen Eigenschaften des zu vergleichenden Tons/Tonsteins. Aus Bossart (2017) lassen sich hierfür einige der maßgeblichen Aspekte zur Beurteilung der Vergleichbarkeit ableiten: 1) Sedimentfazies und mineralogische Zusammensetzung, 2) diagenetische, metamorphe und tektonische Überprägung, 3) Konsolidierungsgrad, 4) Porosität, 5) Porenwasserchemismus und 6) gegenwärtige Spannungszustände.

8.2 Geotechnische Kennwerte und deren Bandbreite

Aufgrund ihrer Struktur weisen Tone/Tonsteine eine geringe Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten auf und haben ein hohes Rückhaltevermögen gegenüber Langzeit-sicherheitsrelevanten Radionukliden. Dies ist eine der wichtigen geotechnischen Eigenschaften zur Einstufung von Tonen/Tonsteinen als potenziell geeignetes Wirtsgestein zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, da die Möglichkeit besteht, sie als geologische Barriere zu nutzen (Mengel et al., 2012; BGE, 2020).

Neben der geringen Porosität weisen Tone/Tonsteine, durch die enthaltenen Minerale, eine gewisse Quellfähigkeit auf und sind vergleichsweise stark deformierbar, wodurch das Verhalten bei Belastung nicht mit einfachen mechanischen Ansätzen beschrieben werden kann, sondern gekoppelte Prozesse (s. Kapitel 8.5) betrachtet werden müssen (NAGRA, 2002; Jahn & Sönnke, 2013).

In Benken (Schweiz) wurden die Eigenschaften des dort vorhandenen Opalinustons (OPA) genauer beschrieben. Dabei wurde ein größtenteils anisotropes Verhalten festgestellt. Beispielsweise zeigt sich eine Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Tonmineral-Einregelung, welche das doppelte Maß der Leitfähigkeit parallel zur Tonmineral-Einregelung aufweist und zudem noch vom Wassergehalt und dem Quarzgehalt abhängig ist. Der Quarzgehalt scheint im Vergleich zum Wassergehalt eine noch größere Rolle zu spielen. Für das Quellverhalten konnte ebenfalls beobachtet werden, dass dieses senkrecht zur Tonmineral-Einregelung in höherem Maße auftritt (NAGRA, 2002). Auch Braun et al. (2021) konnten für verschiedene elastische Kennwerte, die an anderen jurassischen Tonstein-Proben (COx) gemessen wurden, deutliche Anisotropie-Einflüsse feststellen.

8.2.1 Laborversuche

Für die Bestimmung mechanischer Eigenschaften von Tonen/Tonsteinen kommt eine Fülle von verschiedenen Versuchsaufbauten in Frage. Liu et al. (2019) verweisen für die in Frankreich untersuchten jurassischen Tonsteine (Cox) beispielsweise auf:

Einaxiale Kompressionsversuche: Gasc-Barbier et al. (2004), Fabre & Pellet (2006), Yang et al. (2011, 2013) und Espitia & Cacicedo (2014).

- Triaxiale Kompressionsversuche: Gratier et al. (2004), Sarout et al. (2007), Sarout & Guéguen (2008), Zhang et al. (2014), Liu et al. (2015, 2017, 2018a, b) und Liu & Shao (2016).
- Mikro- oder Nano-Eindrückversuche: Zhang et al. (2012), Hu et al. (2014a) und Auvray et al. (2015).
- Weitere Tests mit teilweise spezifischen Aufbauten: Bemer et al. (2004), Montes et al. (2004), Mohajerani et al. (2011) und Huang et al. (2014).

Grundlegende geotechnische und physikalische Eigenschaften der jurassischen Tonsteine (COx, und OPA) und oligozänen Tone (BC) sind unter anderem erläutert in: Horseman et al. (1987), Baldi et al. (1991), Bernier et al. (1997), Harrington et al. (2001), Croisé et al. (2004), ANDRA (2005b), Coll (2005), Wileveau (2005), Bastiaens et al. (2006) und Gens et al., 2007).

8.2.2 Geotechnische Parameter

Bezugnehmend auf die Leistungsbeschreibung gehen wir im Rahmen dieser Literaturrecherche insbesondere auf die folgenden geotechnischen Eigenschaften ein:

1) Wassergehalt, 2) Viskosität, 3) Wärmeleitfähigkeit, 4) Festigkeiten, 5) Steifigkeiten, 6) thermischer Ausdehnungskoeffizient und 7) Kriechen

Eine Darstellung der geotechnischen Eigenschaften für paläogene Tone/Tonsteine des Norddeutschen Beckens ist jedoch nicht im erwünschten Maße möglich, da hierzu keine geeigneten wissenschaftlichen Publikationen gefunden wurden (vgl. Kapitel 8.1). Wir gehen hier daher schwerpunktmäßig auf die geotechnischen Eigenschaften, der im Rahmen der Endlagerforschung am besten untersuchten Tone/Tonsteine (BC, OPA, COx) im europäischen Raum, ein (vgl. Kapitel 8.1) und geben Hinweise zu weiteren Quellen.

Parameter der jurassischen und oligozänen Tonsteine und Tone der Schweiz, Frankreichs und Belgiens (OPA, COx und BC)

Um eine Übersicht der geotechnischen Parameter zu erhalten, wurden verschiedene Literaturquellen gesichtet und die Ergebnisse zusammengetragen. In Tab. 8.1 ist eine Zusammenstellung einiger relevanter Parameter der drei meistuntersuchten Tonsteine und Tone (OPA, COx und BC) Europas zu finden. Teilweise gibt es dabei für einen Parameter zwei Angaben, da eine Differenzierung der Wirkungsrichtung parallel oder senkrecht zur Tonmineral-Einregelung vorgenommen wurde.

Aus Untersuchungen von Braun et al. (2021) an 3 jurassischen COx-Bohrkernen wurden poroelastische Parameter gewonnen. Diese zeigten eine reversible Abnahme der Steifigkeit mit ebenfalls abnehmenden effektiven Spannungen. Für isotrope und deviatorische Tests wurde eine anisotrope Dehnungsantwort festgestellt. Der oligozäne Boom Clay (BC) ist dagegen ein Ton mit einem deutlich höheren Wassergehalt und einer erheblich größeren Porosität, welches zu einer deutlich kleineren Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zu den beiden jurassischen Tonsteinen (OPA, COx) führt.



	Name	Opalinuston (OPA)) COx	Boom Clay (BC)
	Lithologie	Tonstein	Tonstein	Ton
Parameter	Alter	Mitteljura	Mittel-/Oberjura	Oligozän
		(Aalenium) ((Callovium-Oxfordium)	(Rupelium)
	Ort	Mont-Terri	Bure	Burcht & Mol
		(Schweiz)	(Frankreich)	(Belgien)
	Teufe	250–280 m	420–550 m	170–290 m
Wassergehalt	w[%]	4,2-8 < 5,5-7,9		9,5-28
Rohdichte	ρ [kg/m³]	2.500 2.370-2.420		2.000
Verformungseigenschaften				
Steifigkeit	<i>E</i> [MPa]	4.000	400-5.600	200-400
Poissonzahl	v [-]	0,24-0,27 0,3		0,29
Festigkeitseigenschaften				
Druckfestigkeit (senkrecht)	σ [MPa]	4-17		
Druckfestigkeit (parallel)	σ [MPa]	10-28	20-30	2
Kohäsion	<i>c</i> [MPa]	5	4,5	0,8
Reibungswinkel	φ[°]	25 12		15,3
Thermische Eigenschaften				
Wärmeleitfähigkeit (senkrecht)	λ [W/(m*K)]	1,26-1,7		
Wärmeleitfähigkeit (parallel)	λ [W/(m*K)]	2,04-3,22		
Thermischer				
Ausdehnungskoeffizient	α [1/K]	0,2*10 ⁻⁶ bis 34,7*10	0 ⁻⁶ 0,43*10 ⁻⁴	
Weitere geotechnische Eigenschaften				
Porosität	Φ[%]	13,5-17,9	≤ 14	30-35
Durchlässigkeitsbeiwert	<i>k</i> f [m/s]	2*10 ⁻¹⁵ bis 1*10 ⁻¹²	5*10 ⁻¹⁴ bis 5*10 ⁻¹³	2,5*10 ⁻¹²

Tab. 8.1 Zusammenstellung der geotechnischen Parameter jurassischer Tonsteine und oligozäner Tone (OPA, Cox, BC). (Kompiliert aus Horseman et al., 1987; Baldi et al., 1991; Bernier et al., 1997; Delage et al., 2000; Gens, 2000; Bock, 2001; Harrington et al., 2001; NAGRA, 2002; Croisé et al., 2004; De Craen et al., 2004; ANDRA, 2005b; Coll, 2005; Wileveau, 2005; Bastiaens et al., 2006; Gens et al., 2007; Zhang et al., 2007; Bock, 2009; Mazurek et al., 2008; Bossart, 2008; Czaikowski, 2011; Blum, 2013; Mohajerani et al., 2014; Jahn et al., 2016; BGE, 2020b; Braun et al., 2021).

Wassergehalt und dessen Einfluss auf weitere Parameter

Nach NAGRA (2002) liegt eine Abhängigkeit der Festigkeit vom Wassergehalt der Tonsteine vor, welches der Vergleich verschiedener Tone bzw. Tonsteine zeigt (s. Abb. 8.1). Dies ist u. a. ebenfalls von Colback & Wiid (1965), Stagg & Zienkiewicz (1968), Mitchell (1992) und Pimentel (1996) beobachtet worden.

Dabei zeigen die Tone/Tonsteine bei hohem Wassergehalt (Sättigung) eher ein plastisches Deformationsverhalten, wohingegen ein geringer Wassergehalt (Teilsättigung) zu einer Verfestigung des Gefüges führt. Bei einer geringeren Sättigung der Tone/Tonsteine ist folglich mit einer Erhöhung der Festigkeit sowie der Steifigkeit zu rechnen (Czaikowski, 2011).





Abb. 8.1 Vergleich der einaxialen Druckfestigkeit verschiedener Tone/Tonsteine in Beziehung zum Wassergehalt (aus NAGRA, 2002).

Viskosität

Die Eigenschaft der Viskosität ist im Zusammenhang mit Tonsteinen nicht zu vernachlässigen. Räss et al. (2017) führten Kompressionsversuche am Opalinuston (OPA) durch, da das viskose Verhalten von Tonsteinen bisher bei hohen Wasserdrücken nur wenig untersucht worden ist. Entsprechende Modellierungen ergänzen seine Untersuchungen. Die Ergebnisse zeigen, dass dieses Verhalten nicht zu vernachlässigen ist, da die viskose Verdichtung einer gesättigten, porösen Bodenmatrix zu Instabilitäten führen kann. Auch Makhnenko et al. (2018) untersuchten in Kompressionsversuchen die Viskosität des Opalinuston (OPA). Sie zeigen, dass die Viskosität trotz Abnahme der effektiven Spannungen mit zunehmendem Porenwasserüberdruck abnimmt. Im Langzeitverhalten nähert sich der Flüssigkeitsdruck asymptotisch den kleinsten Hauptspannungen an. Grundsätzlich ist zeitabhängiges Verhalten von Gestein gekoppelt abhängig von: Hauptspannungen, deviatorischen Spannungen, Temperatur, Porenwasserüberdruck, Chemismus des Porenwassers und den Gesteinseigenschaften.

Wärmeleitfähigkeit

Für die Wärmeleitfähigkeit kann ein anisotropes Verhalten erwartet werden. Für jurassische Tonsteine (COx) haben sich parallel zur Mineralschichtung größere Wärmeleitfähigkeiten gezeigt als in senkrechter Richtung (Conil et al., 2020). Das Anisotropie-Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit bei COx beträgt etwa 1,5 (Armand et al., 2017a). Als Wärmetransportmechanismus in Tonstein ist, infolge der geringen Durchlässigkeit, nur Wärmeleitung von Bedeutung. Konvektion findet nicht statt (Gens et al., 2007; Armand et al., 2017a). Aufgrund der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit von Tonstein konnten Gens et al. (2007) für den Opalinuston (OPA) keine Kopplung zwischen hydraulischen und thermischen Phänomenen feststellen, ebenso wie eine Kopplung



zwischen mechanischem und thermischem Verhalten als vernachlässigbar bewertet wurde. Weitere Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von COx finden sich in Armand et al. (2017a, b). Einen Überblick über den Zusammenhang von thermischen Lasten und Konsolidierung liefern Delage et al. (2000). Für die Durchlässigkeit des schweizer Opalinustons konnte kein grundsätzlich anisotropes Verhalten nachgewiesen werden (Bock, 2001; Croisé et al., 2004; Coll, 2005; Gens, 2007).

Festigkeit

Nach Klinkenberg (2008) wurden im Rahmen des Mont-Terri-Projektes unterschiedliche mechanische Tests durchgeführt, deren Ergebnisse häufig nicht eindeutig zu interpretieren waren. Die Eigenschaften, welche das mechanische Verhalten von Tonsteinen beeinflussen, sind noch nicht einwandfrei geklärt, da Proben mit annähernd gleicher mineralogischer Zusammensetzung unterschiedliche Ergebnisse zeigen. Von Klinkenberg (2008) und Klinkenberg et al. (2009) wurde untersucht, ob der Karbonatgehalt einen Einfluss auf das Verhalten des Tonstein hat und dabei die mineralogische Zusammensetzung oder das Probengefüge eine Rolle spielen. Laut Klinkenberg (2008) zeigen Triaxialversuche für den Tonstein des COx (Naumann & Plischke, 2005) mit höherem Karbonatgehalt eine höhere Festigkeit sowie Steifigkeit, während Proben aus dem Oplinuston (OPA) mit steigendem Karbonatgehalt ein entgegengesetztes Verhalten zeigen (Klinkenberg et al., 2009). Vermutlich ist dieses unterschiedliche Verhalten auf das Mikrogefüge der Karbonate zurückzuführen. Bei gleichem Gesamt-Karbonatgehalt enthält der Opalinuston (OPA) mehr grobkörnige Schalenbruchstücke, während der Tonstein des COx eine homogenere Verteilung von feinkörnigem, überwiegend nicht-biogenem Karbonat besitzt (Klinkenberg 2008; Klinkenberg et al., 2009). Dies zeigt eine starke Abhängigkeit des mechanischen Verhaltens der Tonsteine von dessen Zusammensetzung und Gefüge und macht eine standortspezifische Untersuchung unabdingbar. Eine Übertragbarkeit der beiden untersuchten jurassischen Tonsteine (OPA, Cox) ist aufgrund der stark unterschiedlichen Verhaltensweisen bezüglich der Festigkeit somit nicht möglich.

Tonsteine in Norddeutschland

Geotechnische Parameter der paläogenen Tonsteine Norddeutschlands sind kaum bekannt. Tiefere Schachtbauten sind vor allem im Steinsalz aufgefahren worden. Auch gibt es nur wenige Daten aus oberflächigen Bauwerken, die in Tonsteinen errichtet wurden.

Bei der Auffahrung des Grubenbaus der Schachtanlage Konrad (Salzgitter) wurden mesozoische Gesteine durchteuft. Die Untersuchungsergebnisse für das Genehmigungsverfahren zur Ablagerung schwach und mittel radioaktiver Abfälle ohne Wärmeentwicklung für das Endlager Konrad wurden allerdings nur in einem begrenzten Rahmen veröffentlicht und sind daher nur sehr eingeschränkt einsehbar (Czaikowski, 2011). In Czaikowski (2011) sind für mittel- und unterjurassische Gesteine (Dogger und Malm) exemplarisch geotechnische Materialparameter nach DBE (1998) dargestellt. Ausdehnungskoeffizienten für unterkretazische Tonsteine aus den Untersuchungen am Schacht Konrad sind in Buntebarth (2005) publiziert. Die entsprechenden Parameter sind in Tab. 8.2 dargestellt.



	Lithologie	k.	Tonstein	
	Alter	Mitteljura	Oberjura	Unterkreide
Parameter		(Dogger)	(Malm)	(Hauterivium)
	Ort	Schacht Konrad 800 – 1000 m		Minden
	Teufe			oberflächennah
Wassergehalt	w [%]			6
Rohdichte	ρ [kg/m³]	2.400	2.400	2.500
Verformungseigenschaften				
Steifigkeit	<i>E</i> [MPa]	12.780	29.900	
Poissonzahl	v [-]	0,27	0,27	
Festigkeitseigenschaften				
Druckfestigkeit (senkrecht)	σ [MPa]			7,7
Druckfestigkeit (parallel)	σ [MPa]		35-42	9,2
Kohäsion	c [MPa]	10,8	8,3	
Reibungswinkel	φ[°]	27,1	48,4	
Weitere geotechnische Eigenschaften				(Pumpversuch)
Durchlässigkeitsbeiwert	<i>k</i> _f [m/s]			2*10 ⁻⁵

Tab. 8.2 Ausgewählte Parameter für jurassische Gesteine im Schacht Konrad (DBE, 1998; Czaikowski, 2011) und unterkretazische Tonsteine bei Minden (Kauther et al., 2013). k.A. = keine Angabe(n).

Die Parameter des sehr feinkörnigen, unterkretazischen Tonsteins (Hauterivium) bei Minden sind ebenfalls in Tab. 8.2 dargestellt. Diese wurden im Rahmen des Baus der neuen Weserschleuse ermittelt (Kauther et al., 2013).

Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Nach Buntebarth (2005) zeigen Tonsteine der Unterkreide (Bohrung Konrad 101) bezüglich des thermischen Ausdehnungskoeffizienten unterschiedliche Verhaltensweisen in Abhängigkeit von der Temperatur und des Wassergehaltes, sowie der mineralogischen Zusammensetzung. Proben mit ursprünglichem Wassergehalt (nicht vor der Beprobung getrocknet) zeigten durchgehend eine thermische Ausdehnung, während zuvor getrocknete Proben, welche senkrecht zur Schichtung orientiert sind, ein anderes Verhalten aufwiesen. Bis zu einer bestimmten Temperatur fand zuerst ein Schrumpfen statt, bevor die Dehnung ab ca. 300°C dann das Schrumpfen kompensierte und insgesamt wiederum eine Ausdehnung stattfand. Beispiele für thermische Berechnungsparameter finden sich in DBE (1998), Jobmann et al. (2007a) und Jahn & Sönnke (2013).

Parameter		Gemessene Werte Unterkreide (Mitteleres Aptium) Jobmann et al. (2007)	Berechnungsparameter DBE (1998)
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	[1/K]	2,8*10 ⁻⁵	1,3*10 ⁻⁵
Wärmeleitfähigkeit horizontal	λ _{//} [W/(mK)]	2,41	2
Wärmeleitfähigkeit vertikal	λ ₁ [W/(mK)]	1,65	2
Spezifische Wärmekapazität	<i>C</i> _v [J/(kgK)]	1.400	1.000

Tab. 8.3 Thermische Parameter für unterkretazische Gesteine (Hedbergellenmergel, Mittleres Aptium) im Modellgebiet östlich von Hannover (Jobmann et al., 2007) und als Berechnungsparameter (DBE, 1998).



Auch Delage et al. (2000) weisen für den oligozänen Boom Clay (BC) darauf hin, dass der Temperatureinfluss auf die Viskosität des Porenwassers entscheidend ist. Der Konsolidierungskoeffizient ändert sich für einen Temperaturanstieg nur geringfügig, da die Abnahme der Porosität durch die Zunahme der Durchlässigkeit mit höherer Temperatur kompensiert wird.

Kriechen

Bei Ton/Tonstein liegt generell ein viskoses (zeitabhängiges) Verformungsverhalten vor. Dies wurde, insbesondere in Zusammenhang mit hohen Porenwasserdrücken, bisher nur wenig untersucht. Durch die Bildung von Gasen (s. Kapitel 8.5) und resultierenden Drücken auf das Gestein können sogenannte *"porosity waves"* entstehen (stark durchlässige Kanäle im Zusammenspiel von Auftrieb und viskosem Widerstand des Gesteins; Connolly & Podladchikov, 2015; Yarushina et al., 2015; Räss et al., 2017). Das Kriechen von Tonsteinen kann unter ungünstigen Umständen zur Entstehung von vertikalen Kanälen mit erheblich erhöhter Durchlässigkeit und Porosität führen. Die viskosen Eigenschaften dürfen bei der Langzeitprognose tonreicher Gesteine daher nicht vernachlässigt werden (Räss et al., 2017).

8.3 Beurteilung der Primärspannungszustände

Nach NAGRA (2002) sind einerseits die geomechanischen und geotechnischen Eigenschaften des Gesteins für dessen Verhalten maßgeblich. Andererseits muss jedoch auch die Belastungssituation in situ betrachtet werden, welche durch entsprechende Auflast und Tektonik das Verhalten des (ungestörten, aber auch gestörten) Gesteins beeinflusst. Um die bautechnische Machbarkeit eines Projektes abschätzen zu können, werden Kenntnisse über das in-situ Spannungsfeld benötigt. Außerdem beeinflusst dieses Spannungsfeld auch das Langzeitverhalten eines potenziellen Standortes im Hinblick auf die selbstabdichtende Wirkung für die geplante Dauer der Lagerstätte. Das Spannungsfeld ist entscheidend für das Deformationsverhalten des Gebirges und die daraus möglicherweise resultierenden Bruchmechanismen.

Die Spannungen in situ können Lim (2013) zufolge nach ihren vier ursächlichen Faktoren unterschieden werden:

- Gravitation und resultierende Auflastspannungen
- tektonische Spannungen aus aktiven oder vorangegangenen Ereignissen
- remanente Spannungen, die nach dem Entfernen aufgebrachter Kräfte verbleiben
- Spannungen aus täglichen oder saisonalen Temperaturänderungen, Gezeiten oder der Corioliskraft.

Neben grundlegendem Wissen zu Spannungen, Spannungsrichtungen, Hauptspannungen und Spannungstensoren findet sich ein umfassender Überblick zu Spannungsmessungen in Gestein



aus Bohrungen bei Villaescusa et al. (2003). Die in-situ Spannungsmessung ist insbesondere aufgrund der Anisotropie von Tonsteinen schwierig (Lisjak et al., 2015). Im schweizerischen Opalinuston (OPA) im Mont Terri wurde eine Vielzahl von in-situ Spannungsmessungen durchgeführt. Als bevorzugte Methode hat sich hierfür "Undercoring" herausgestellt (im Vergleich mit Borehole Slotter und Hydraulic Fracturing). Details zu den in-situ Spannungsmessungen wurden von Wermeille & Bossart (1999), Martin & Lanyon (2003) und Gens et al., (2007) veröffentlicht. Die aktualisierten Empfehlungen zur Gebirgsspannungsbestimmung mit Überbohrverfahren werden von Heusermann & Kiehl (2021) sowie Kiehl & Heusermann (2021) vorgestellt. Diese eigenen sich auch bei anisotropem Gestein, wobei ergänzende Laboruntersuchungen (einaxiale Druckversuche an zylindrischen Proben) zur Bestimmung der benötigten Elastizitätskennwerte notwendig sind. Spannungsmessungen mit Hydraulic Fracturing und Überbohrungen stehen unter dem Vorbehalt, dass linear-elastisches Materialverhalten und homogene, kontinuierlich vorhandene Materialeigenschaften angenommen werden (Lim, 2013). Da sich Ton/Tonstein mit seinem schichtartigen Aufbau transversal isotrop verhält (Sonderform der Anisotropie), müssen insgesamt fünf Elastizitätskennwerte bekannt sein, um unter diesen Voraussetzungen Gebirgsspannungszustände über Rückrechnungen ermitteln zu können (Kiehl & Heusermann, 2021).

Ferner sind bei in-situ Spannungsmessungen drei Unsicherheitsfaktoren vorhanden: 1) Intrinsische Faktoren (z. B. abhängig von geologischen Strukturen), 2) messbezogene Unsicherheiten (z. B. Einflüsse aus den Instrumenten, Störungen durch Temperatur oder das Kriechen von Klebstoffen bei bestimmten Techniken) sowie 3) analysebezogene Einflüsse (z. B. aus vereinfachenden Annahmen für das Materialverhalten) (Lim, 2013). Messmethoden für Spannungsgrößen in Gesteinen sind generell sehr aufwändig, da oft nur punktuelle Messungen möglich sind. Konventionelle Methoden verwenden daher Flüssigkeitsinjektionen, durch die ein Aufbruch des Gesteins auf Zug, mit Rissbildung rechtwinklig zur kleinsten Hauptspannungsrichtung erzeugt wird. Die größte Hauptspannung ist dann mithilfe der Gesteinszugfestigkeit und dem Porenwasserdruck ermittelbar, wobei für die kleinste Hauptspannung ca. 5 % Ungenauigkeiten zu erwarten sind, für die größte Hauptspannung ca. 20 %. Mit Zusatzmessungen sind dann auch die Spannungsrichtungen näherungsweise ermittelbar. Diese Methoden sind aber nicht anwendbar bei präexistenten, schadhaften Bereichen. In solchen Fällen werden HTPF (Hydraulic Tests on Pre-existing Fractures) verwendet, bei denen ein abgeschlossener Bereich in der Bohrung erzeugt wird. Dort können dann Normalspannungen rechtwinklig zu bestehenden Rissen ermittelt werden. Aus der Kombination mit Bildgebungsverfahren kann durch mindestens 20 Einzelmessungen dabei auch ein 3D-Spannungsfeld ermittelt werden (unter der Annahme der gleichbleibenden Rissorientierung: Zugspannungen und Porenwasserdrücke müssen nicht bekannt sein). Als Methode zur Ermittlung von Spannungsrichtungen bietet sich die Analyse von Bohrlochausbrüchen an, die Höhe der Spannungen ist hierbei infolge der zeitabhängigen Erweiterung von Ausbrüchen aber nur ungenau bestimmbar (Lin et al., 2018).

Im Rahmen der Eignungsprüfung der Schachtanlage *Konrad* für die Endlagerung schwach- bis mittelradioaktiver Abfälle wurden geotechnische Messungen und Untersuchungen u. a. an jurassischen Gesteinen (Dogger und Malm) in einer Tiefbohrung (Bezeichnung *Konrad 101*) und während der Schachtauffahrung durchgeführt (Czaikowski, 2011). Die bestimmten Primärspannungszustände einer Teufe von 800 bis 1.000 m sind in Tab. 8.4 dargestellt.



	Name		Opalinuston (OPA)	Opalinuston (OPA)	COx
	Lithologie	k.A.	Tonstein	Tonstein	Tonstein
Parameter	Alter	Jura	Mitteljura	Mitteljura	Mittel-/Oberjura
	Ort	Schacht Kon-	Benken	Mont Terri	Bure
	On	rad	(Schweiz)	(Schweiz)	(Frankreich)
	Teufe	800 - 1000 m	650 m	265 m	460 m
Vertikalspannung aus Auflast	S _V [MPa]	21,0	15,5	6,5	12,0
Maximale Horizontalspannung	Sн [MPa]	17,6	19,7	4,2	12,0
Minimale Horizontalspannung	S _h [MPa]	12,0	14,6	0,6-4,0	12,0

Tab. 8.4 Primärspannungszustände für den Opalinuston (OPA), COx-Tonstein und mittel- und oberjurassische Gesteine des Schacht Konrad (aus Czaikowski, 2011; kompiliert aus DBE, 1998; ANDRA, 1999 und NAGRA, 2002).

Im Bericht der NAGRA (2002) werden Spannungsmessungen an Opalinuston (OPA) für den Standort Benken im Züricher Weinland in der Schweiz dargestellt und diskutiert. Dabei wurden aktive Messungen mit der Hydraulic-Fracturing Methode zur Bestimmung der Spannungsmagnitude der horizontalen Hauptspannungen durchgeführt. Passive Untersuchungen von induzierten Rissen während des Bohrvorgangs und an Bohrlochrandausbrüchen ergänzten diese. Die Ergebnisse zeigen verlässliche Daten für die Spannungsrichtung, jedoch nur eine grobe Richtung für die Spannungsmagnitude. Hydraulic Fracturing ist eine klassische Auswertemethode für Festgestein, daher wurde zusätzlich eine numerische Berechnung mit elasto-plastischem bzw. poroelastischem Ansatz zur Berücksichtigung des Porenwasserdrucks durchgeführt. Dabei ergab sich für die klassische Auswertung ein Spannungsverhältnis von $K_0 = S_H/S_V$ ca. 2, wohingegen sich mit numerischer Auswertung ein K₀-Wert von 1,5 einstellte. $K_0 = 2$ würde auf einen möglicherweise instabilen Zustand hinweisen, welcher bei dieser Bohrung nicht festgestellt wurde. Da außerdem das Spannungsfeld kompatibel mit der tektonischen Situation ist, wurde angenommen, dass der durch die numerische Berechnung korrigierte Wert die Gegebenheiten in situ besser widerspiegelt. Die maximale Hauptspannung ist die größte Normalspannung und entspricht im Bereich des Wirtsgesteins dem 1,3- bis 1,5-fachen der vertikalen Auflast. Die minimalen horizontalen und die vertikalen Spannungen hingegen sind in etwa gleich groß. Das vorherrschende kompressive Spannungsfeld ist gegenüber dem mitteleuropäischen Spannungsfeld leicht gedreht (s. NAGRA, 2001). Tab. 8.4 zeigt beispielhaft die Primärspannungszustände für den Opalinuston (OPA) am Standort Benken.

Für die für unserer Studie relevanten jurassischen Tonsteine OPA und COx wurden von Czaikowski (2011) Angaben zu Vertikal- und Horizontalspannungen aus Arbeiten der ANDRA (1999) und NAGRA (2002) kompiliert. Dabei wurden für den Opalinuston (OPA) in *Mont Terri* URL Primärspannungszustände in einer Teufe von 265 m und für COx in Bure in einer Teufe von 460 m dargestellt (siehe Tab. 8.4).

Nach NAGRA (2002) zeigt der Opalinuston (OPA) im Zürcher Weinland (Benken) eine deutlich höhere Festigkeit und Steifigkeit als der OPA im Mont Terri. Das Spannungsverhältnis der Vertikal- und der maximalen Hauptspannung liegen für diesen Tonstein bei $K_0 < 1$. Dies ist auf die unterschiedliche Überdeckung und die daraus resultierende deutlich unterschiedliche Vorbelastung und Konsolidierung des Gesteins zurückzuführen (Mont Terri: 265 m Teufe; Benken: 650 m Teufe). Die deutlichen Unterschiede bei Überlagerung und tektonischer Situation führen demzufolge zu einem unterschiedlichen Spannungsfeld sowie unterschiedlichen Porenwasserdrücken an beiden Standorte. Wird nun der Primärspannungszustand für den COx aus Tab. 8.4 betrachtet, so zeigt sich bei diesem Tonstein noch ein anderes Spannungsfeld. Das Spannungsverhältnis liegt mit Wert von $K_0 = 1$ zwischen den beiden Werten der zuvor beschriebenen Tonsteine. Werden nun noch einmal die Werte für den Schacht Konrad bezüglich des Spannungsverhältnisses betrachtet, so ergibt sich dort ein Wert von $K_0 < 1$.

Wie zuvor beschrieben, spielen bei der Betrachtung der gemessenen Primärspannungen, viele Faktoren eine Rolle. Daher muss mit Ungenauigkeiten bezüglich der Ergebnisse gerechnet werden. Auch zeigt der Vergleich verschiedener Tonsteine aus unterschiedlichen Tiefen, dass nicht nur die Teufe und die damit resultierende Auflastspannung maßgebend für die Spannungsverhältnisse im Gestein ist, sondern auch das rezente tektonische Spannungsfeld. Auch remanente Spannungen aus vorhergehenden Belastungen sowie beispielsweise temperaturbedingte Spannungen führen zu Veränderungen der Spannungen im Gestein in situ. Folglich ist eine Übertragung von Primärspannungen aus anderen Standorten mit ähnlichen Parametern (z. B. Lithologie und Teufe) nicht möglich und zur Einschätzung des Primärspannungszustands eines Standortes müssen somit direkte Untersuchungen vor Ort stattfinden.

8.4 Temperaturvulnerabilität und Rissschließung bei Tonen/Tonsteinen

Von exothermen hochradioaktiven Abfällen (*High-Level Waste* HLW) können bis zu 90°C Temperatur ausgehen, einhergehend mit einer Erwärmung des umgebenden Wirtsgesteins oder etwaiger Verfüll- und Ausbaumaterialien (Conil et al., 2020). Daher ist der Temperatureinfluss auf Tone/Tonsteine langjähriger Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Hierbei sind einerseits mögliche mineralogischen Veränderungen infolge höherer Temperaturen von Interesse (s. Kapitel 6) und andererseits die Änderung der mechanischen und hydrologischen Eigenschaften des Gesteins (Zhang, 2011). Grundlegende Ausführungen zum Temperatureinfluss auf Lockergesteine finden sich in Youssef (1961) und Habibagahi (1977).

Der Einfluss von Temperatur sollte im Kontext der in-situ Bedingungen und der diagenetischen Geschichte betrachtet werden. Unter anderem haben die vorherrschenden Spannungsverhältnisse, die hydraulischen und thermischen Leitfähigkeiten sowie die Paläo-Maximaltemperaturen und Versenkungstiefen (s. Kapitel 7) Einfluss auf das Verhalten von Tonen und Tonsteinen. Die Einflüsse sind teilweise gekoppelt und in ihren Abhängigkeiten nicht grundsätzlich voneinander zu trennen. Es gibt daher eine Vielzahl von Untersuchungen mit voneinander abweichenden Apparaturen und Versuchsbedingungen. Eine allgemeine Ableitung von Eigenschaften der Temperaturvulnerabilität ist, ohne Kontext der Versuchsbedingungen und untersuchten Fragestellungen, nicht möglich. Die nachfolgenden Ergebnisse fassen daher wesentliche Erkenntnisse für verschiedene Tone/Tonsteine und Untersuchungen zusammen.



8.4.1 Rissbildung und -schließung im Bereich unterirdischer Hohlräume in Tonstein

Der Verschluss von Brüchen/Rissen zeigt sich in der Regel an verminderten hydraulischen Durchlässigkeiten und geringen Porositäten. Rissschließung wird oft mit dem Begriff Heilung bezeichnet. Hierbei ist jedoch zwischen einem Verschluss im Sinne einer messbar reduzierten hydraulischen Leitfähigkeit und einer tatsächlichen Heilung im Sinne der dauerhaften Beseitigung mechanischer Schäden im Gefüge zu unterscheiden (Tsang & Bernier, 2005; Zhang, 2011; Chen et al., 2014). Die hydraulische Leitfähigkeit ist von besonderer Bedeutung für das Barrierekonzept, da mit steigender Leitfähigkeit, z. B. durch ausgeprägte Risse oder Klüfte, die Gefahr des hydraulischen Transports von Radionukliden steigt. Die hydraulische Leitfähigkeit ist vom Porenraum, der geometrischen Ausprägung von Gefügeschäden, sowie der Viskosität und Dichte des Porenwassers abhängig. Thermische Lasten können insbesondere Einfluss auf die Veränderungen der Dichte des Porenwassers und dessen Viskosität haben (Zhang, 2011).

Effekte der Rissbildung und -schließung und des Einflusses von erhöhten Temperaturen werden, insbesondere im Kontext des vom Aushub gestörten Bereiches eines Tunnel- bzw. unterirdisch baulich ausgebildeten Hohlraums, diskutiert (*Excavation Damaged Zone* EDZ). Im Nahbereich der EDZ können infolge des prägnanten Spannungsabfalls durch den Aushub vorhandene Überkonsolidierungen verloren gehen (Cui et al., 2000). Auch vorhandene Porenwasserüberdrücke gehen beim Aushub in Bereich der EDZ verloren (Bjerrum, 1967; Corkum, 2020). Mögliche Rissschließungen stehen somit nicht nur im Zusammenhang mit den Materialeigenschaften der betroffenen Sedimente/Gesteine, sondern es treten u. a. Interaktionen zwischen den in-situ Spannungszuständen, Spannungsänderungen durch den Aushub, den hydrogeologischen Verhältnissen, den Porositäten, dem Porenwasserchemismus und dem Konsolidierungsgrad auf (Cui et al., 2000; Bossart, 2017).

Das Rissverhalten im Bereich der EDZ ist ein zeitabhängiger Prozess. Hierbei ändern sich die hydromechanischen Eigenschaften und ungewöhnlich große Verformungen können im Umfeld eines Aushubes oder von Bohrlöchern auftreten und damit eine starke Rissbildung verursachen (Nawrocki et al. Kiehl & Heusermann (2021), 1998; Lionço & Assis, 2000; Corkum & Martin, 2007; Weng et al., 2008; Tsang et al., 2005; Li & Liu, 2015). Die EDZ Entwicklung ist abhängig vom Zusammenspiel aus der räumlichen Orientierung (Drift) des Bauwerks und der Orientierung von in-situ Spannungen (Armand et al., 2013, 2014, 2017a; Seyedi et al., 2017b; Djouadi et al., 2020). Nach einer Wiederverfüllung der EDZ tritt eine erneute Sättigung auf und über Zeiträume von mehreren Jahrzehnten sind Veränderungen der EDZ infolge von Wärme, Spannungsverhältnissen, Porenwasser und biologischen und chemischen Aktivitäten zu erwarten (Bernier et al., 2006; Bastiaens et al., 2007; Kim et al., 2011).

Sofern ausgehobene Tunnel oder Kavernen nach dem Deponieren von hochradioaktivem Abfall (HLW) wieder verfüllt werden, wie dies in den Konzepten zur HLW-Endlagerung einiger anderer europäischer Länder geplant ist, ergeben sich hieraus weitere Einflüsse auf die EDZ. So können zwischen Rückverfüllung und Gestein Druckspannungen entstehen, die eine Teilschließung etwaiger Störungen in der EDZ begünstigen können, sodass die hydraulische Durchlässigkeit sinkt (Zhang, 2011).



Vor dem Hintergrund der ausgeprägten Anisotropie von Tonen/Tonsteinen ist ferner die geometrische Ausbildung von Tunneln und Hohlräumen in Hinblick auf die Schichtung und die tektonischen Trennflächen zu beachten. Rissbildung und -schließung zeigten sich beim Opalinuston (OPA) in erheblichem Maße von der Schichtung sowie der Aushubrichtung abhängig (Lisjak et al., 2015). Schon die Messung der in-situ Spannungen kann aufgrund weiterer Einflüsse – Sättigung des Gesteins und Quellverhalten, nicht elastische Antwort des Tunnels auf Öffnungen bei Aushub oder Bohrungen – mit Schwierigkeiten behaftet sein (Martin & Lanyon, 2003; Lisjak et al., 2015). Detaillierte Arbeiten zur EDZ wurden z. B. von Martino & Martin (1996), Martino (2003), Tsang et al. (2005), Davies & Bernier (2005), Bernier et al. (2006), Bastiaens et al. (2007), Zhang (2011), Lee et al. (2013) und Li & Liu (2015) publiziert.

8.4.2 Einflüsse auf das Verhalten von Tonen/Tonsteinen unter Temperatureinwirkungen

Relevante Ergebnisse in Hinblick auf die Temperaturvulnerabilität von Tonen /Tonsteinen sind für verschiedene, gut untersuchte Tone/Tonsteine nachfolgend kompiliert. In den jurassischen Tonsteinen (COx, OPA) und oligozänen Tonen (BC) konnten wärmebedingte Volumenänderungen beobachtet werden, die den Porenwasserdruck erhöhen und generell das Spannungsniveau ändern. Dies wird durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Porenwasser und Gesteinsmatrix begünstigt, ebenso wie durch die geringe Leitfähigkeit des Sedimentes/Gesteins (Monfared et al., 2011, 2013; Mohajerani et al., 2012; Conil et al., 2020). Der zeitabhängige Abbau von thermisch induzierten Porenwasserüberdrücken wird von den hydraulischen und thermischen Leitfähigkeiten, sowie den Gradienten des Porenwasserdrucks und der Temperatur beeinflusst und ist daher sehr komplex (Delage et al., 2000). In-situ Untersuchungen zum thermomechanischen Verhalten von Tonsteinen wurden z. B. von Picard et al. (1994), Bernier & Neerdael (1996), De Bruyn & Serge (2002), De Bruyn & Labat (2002) und Wileveau & Rothfuchs (2007) durchgeführt. Der mögliche zusätzliche Einfluss radioaktiver Strahlung wurde im Projekt *Control Experiment with Radiation of the BElgian Repository for Underground Storage* (CERBE-RUS) untersucht (Gens et al., 2007).

Ein thermisch-bedingtes Volumenänderungsverhalten kann grundsätzlich auch für die paläogenen Tone/Tonsteine des Norddeutschen Beckens erwartet werden. Allerdings ist eine allgemeine Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen auf die paläogenen Tone/Tonsteine schwierig (s. Kapitel 8.1).

An den jurassischen Tonsteinen des COx wurden im Temperaturbereich zwischen 25°C und 80°C folgende Beobachtungen gemacht: Die Festigkeiten nehmen mit steigender Temperatur geringfügig ab, ebenso wie das Elastizitätsmodul. Etwas stärker ist die Abnahme der Festigkeit bei geringeren Randspannungen (Armand et al., 2017a). Bei lateralen Dekompressionstests (LD) mit konstanten Hauptspannungen konnte eine Reduktion der Scherfestigkeit mit steigender Temperatur (maximal 90°C) festgestellt werden, die durch einen natürlichen Logarithmus mathematisch und mit guter Näherung nachgebildet werden konnte. Eine kritische Temperatur, ab der beispielsweise das Elastizitätsmodul deutlich herabgesetzt ist, wird vermutet, konnte aber bisher nicht eindeutig nachgewiesen werden (Conil et al., 2020).

Zu Beginn der Wärmeeinleitung verhielten sich die jurassischen Tonsteine (COx) infolge der geringen hydromechanischen Durchlässigkeit wie undrainiert (Seyedi et al., 2017a; Conil et al., 2020). Eingeleitete Wärme im Temperaturbereich zwischen 22–90°C scheint dabei keine Schädigung des Probenmaterials zu verursachen, da bei diesen Temperaturen die Durchlässigkeit in situ unverändert blieben (Conil et al., 2020). Auch Garite et al. (2014) stellten fest, dass Veränderungen der thermischen Leitfähigkeit im zu erwartenden Temperaturbereich infolge des HLW vernachlässigt werden können.

Unter Temperaturlasten von 25–80°C konnten Menaceur et al. (2015) an den COx Proben einen geringen Einfluss der Temperatur auf die elastischen Eigenschaften nachweisen. Hierzu wurden Triaxialtests unter verschieden großen Spannungsniveaus durchgeführt, ebenso wie radiale Durchlässigkeitstests bei den oben genannten Temperaturen. Die Scherfestigkeit nahm mit steigender Temperatur ab und die intrinsische Durchlässigkeit war nur infolge der verringerten Viskosität des Wassers erhöht. Parallel zur Mineral-Einregelung bzw. Schichtung blieb die Durchlässigkeit etwa gleich. Die Ergebnisse zur Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur decken sich mit den Ergebnissen von Hu et al. (2014b), das Schwinden infolge der Temperatur war wie bei Mohajerani et al. (2014).

Menaceur et al. (2016a) untersuchten das THM-Verhalten abgescherter COx Proben in thermalen Triaxialtests, bei denen die Spannungsverhältnisse in situ nachgebildet wurden. Nach dem Aufbringen einer Scherlast mit konstanter effektiver Hauptspannung, entsprechend den beim Aushub erwarteten Verhältnissen, wurden die Proben entlastet und erwärmt. Die resultierenden Porenwasserdrücke reduzierten die effektiven Hauptspannungen und es formten sich Brüche, was auf thermisch induzierte Brüche hinweist. Die bei anschließenden Tests ermittelten erhöhten intrinsischen Durchlässigkeiten waren nach kurzer Zeit wieder auf den Ursprungswert zurückgescheinbar Selbstheilungseffekte gangen, da auftraten. Dennoch konnten mit Temperaturerhöhungen Schädigungen reaktiviert werden. Selbstheilungseffekte bei den untersuchten oligozänen Tonen (BC) sowie den jurassischen Tonsteinen (OPA, Cox) werden mit dem Vorhandensein von Smektit in Verbindung gebracht (Menaceur et al., 2016a).

Chen et al. (2014) haben den Temperatureinfluss auf oligozäne Tone (BC, Boom Clay) und den Opalinuston (OPA) hinsichtlich der Rissschließung untersucht. Der Verschluss von Rissen in Proben gleichbleibenden Volumens unter Temperaturlasten bis 80°C war bei den oligozänen Tonen (BC) schneller als beim Opalinuston (OPA). Der thermische Einfluss auf den Verschluss von Rissen war beim Opalinuston jedoch ausgeprägter als beim Boom Clay (BC). Ein Einfluss auf die Rissschließung durch Abkühlung nach der thermischen Last wurde nicht festgestellt. Bereits bei 40°C zeigte der jurassische Tonstein (OPA) eine starke Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit. Beim oligozänen Ton (BC) blieb die intrinsische Durchlässigkeit unter Temperaturlasten nahezu konstant, während die hydraulische Leitfähigkeit zunahm, beim Opalinuston (OPA) nahmen beide unter Temperaturlast zu (Chen et al., 2014). Mithilfe der intrinsischen Durchlässigkeit kann die Viskositätsänderung des Porenwassers mit der Temperatur einbezogen werden. Zhang (2011) ermittelten die intrinsische Durchlässigkeit beispielsweise mittels Gasdurchfluss-Tests. Bei den Untersuchungen von Chen et al. (2014) haben sich bestehende Risse im Ton (BC) nicht ausgeweitet, sodass sich keine Fließwege entwickeln konnten. Schäden im Gefüge scheinen durch thermische Lasten nur temporär verschlossen, nicht aber geheilt zu werden. So konnte eine Rückkehr von zuvor thermisch verschlossenen Rissen in Proben nach Rücknahme von thermischen Belastungen mittels Computertomographie (CT) beobachtet werden. Für den Boom Clay (BC) konnte kein Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Injektionslösungen festgestellt



werden. Beim Opalinuston (OPA) hingegen zeigte sich bei der Injektion von zwei Lösungen eine ausgeprägtere Rissschließung. Der Einfluss des Chemismus ist aber unklar, da auch die Größe der vorher eingebrachten Risse einen Einfluss auf die Verschlussgeschwindigkeit zu haben scheint. Insgesamt sollte das Rissschließungsvermögen im Zusammenhang mit dem konstanten Volumen in den zugrundeliegenden Tests gesehen werden. Beobachtete Leitfähigkeitszunahmen unter thermischen Lasten können ausschließlich auf die Reduktion der Viskosität des Wassers mit zunehmenden Temperaturen zurückgeführt werden. Anhand von CT-Aufnahmen konnte nach Durchlässigkeitstests keine Änderung des Mineralgefüges beobachtet werden (Chen et al., 2014).

Das Verhalten des Boom Clay (BC) unter thermischer Last hat gezeigt, dass der Konsolidierungsgrad einen entscheidenden Einfluss auf mögliche plastische Volumenänderungen hat. So können normalkonsolidierte Tone/Tonsteine, unabhängig von den aufgebrachten mechanischen Lasten, eine thermisch induzierte Überkonsolidierung infolge des Porenwasserüberdrucks erfahren (Cui et al., 2000). Stark überkonsolidierte Tone/Tonsteine erfahren unter thermischer Last anfangs eine – reversible – Volumenzunahme (Delage et al., 2000, Cui et al., 2000). Die beschriebenen irreversiblen Volumenabnahmen in Abhängigkeit vom Überkonsolidierungsgrad (*overconsolidation ratio* OCR) wurden auch von Campanella & Mitchell (1968), Paaswell (1967), Demars & Charles (1982) und Delage et al. (2000) beobachtet.

Gleichwohl die elastischen Eigenschaften von Lockergesteinen mit steigenden thermischen Lasten abnehmen, unterliegen die elastische und plastische Komprimierbarkeit von Ton/Tonstein kaum thermisch induzierten Veränderungen (Tidfors & Sällfors, 1989; Eriksson, 1989; Boudali et al., 1994; Delage et al., 2000).

Infolge in situ aufgebrachter thermischer Lasten auf den Opaliuston (OPA) konnte die stärkste Kopplung zwischen mechanischem, hydraulischem und thermischem Verhalten beobachtet werden. Der Hauptanteil an auftretenden Verformungen wurde dabei auf thermisch bedingte Ausdehnungen zurückgeführt. Auch der Abbau von Porenwasserüberdruck infolge thermischer Lasten verursacht zusätzliche Dehnungen und Verschiebungen. Es konnte keine merkliche Vergrößerung der hydraulischen Leitfähigkeit durch mechanische Gefügeschäden infolge der thermischen Lasten, assoziierten Dehnungen oder Verschiebungen festgestellt werden (Gens et al., 2007).

Bei den jurassischen Tonsteinen des COx traten unter drainierten, isotropen Spannungsverhältnissen, sowohl für Umgebungstemperaturen als auch bei 80°C, anisotrope Kriechspannungen auf. Sowohl für den Opalinuston (OPA), als auch für den COx konnte ein thermisches Erhärtungsphänomen beobachtet werden. Das bedeutet, dass thermoelastische Ausdehnungen unter drainierten Bedingungen nur bis zu etwa der Temperatur auftraten, die als Paläo-Maximaltemperatur angenommen werden kann (z. B. ca. 50°C für jurassische Tonsteine des Pariser Beckens; Blaise et al., 2014). Bei höheren Temperaturen traten Fließen und thermoplastisches Schwinden auf, sodass bis zur maximalen Versenkungstemperatur die Annahme thermoporoelastischen Verhaltens gültig zu sein scheint (Monfared et al., 2011; Belmokhtar et al., 2017a). Frühe Beobachtungen zum thermischen Erhärtungsphänomen wurden von Towhata et al. (1993) beschrieben. Untersuchungen zum thermischen Verhalten des Boom Clay (BC) sind u. a. von Baldi et al. (1988), Hueckel & Baldi (1990), Neerdael et al. (1992), De Bruyn & Thimus (1995), Belanteur et al. (1997) und Monfared et al. (2012) durchgeführt worden. Das thermische Erhärtungsphänomen des Boom Clay (BC) wurde von Sultan et al. (2002) beschrieben.

Der Einfluss extrem hoher Temperaturen von bis zu 1000°C wurde von Tian et al. (2014) an luftgetrockneten, zylindrischen Tonsteinproben aus Nordrhein-Westfalen aus Tiefen von rund 1200 m untersucht. Die Porosität nimmt demnach bei über 200°C stark zu, bis 200°C hingegen kam es durch die thermische Ausdehnung zum Verschluss von Mikrorissen und dadurch zur Zunahme der Festigkeit. Die Druckfestigkeit nimmt bis zur Einwirkung von 800°C zu, ab 1000°C ist eine Abnahme zu beobachten, da sich neue Risse ausbilden (Tian et al., 2014).

Die größten Einflüsse auf mögliche Selbstheilungseffekte im Bereich der EDZ konnten im Opalinuston (OPA) und im Boom Clay (BC) maßgeblich auf Quellen, Konsolidierung und Kriechen zurückgeführt werden (Bastiaens et al., 2007). Für die jurassischen Tonsteine (Cox, OPA) hat Zhang (2011) die Selbstheilung von Rissen im Hinblick auf die Durchströmung von Wasser und Gas unter triaxialen Spannungszuständen und Temperatureinfluss untersucht. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass die Rissschließung ein zeitabhängiger Prozess ist, der in sehr kurzen Zeiträumen (Monate bis Jahre) stattfindet. Dabei wird ein vollständiger Verschluss bei einer intrinsischen Durchlässigkeit von 10⁻¹⁹ m² bis 10⁻²⁰ m² erreicht, was den Werten eines intakten Tonsteins entspricht. Zu beobachten war eine exponentielle Abnahme der Rissöffnung mit Zunahme der aufgebrachten Spannungen. Die Rissschließung hatte eine kubische Abnahme der Gasdurchlässigkeit zur Folge. Bei der hydraulischen Durchströmung mit Wasser war die Verschlussgeschwindigkeit 3- bis 7-fach höher als bei reinem Gasdurchfluss. Ein nennenswerter Einfluss der aufgebrachten Temperaturen von 20°C bis 90°C auf den Rissverschluss wurde nicht festgestellt. Auch der Einfluss von Randspannungen war nicht besonders ausgeprägt (Zhang, 2011). Die Ausgangsrisse der zugrunde liegenden Untersuchungen waren jedoch nicht einheitlich, sodass mögliche Abhängigkeiten hiervon nicht ausgeschlossen werden können.

Für den Opalinuston (OPA) konnte gezeigt werden, dass Diffusion der vorherrschende Transportmechanismus ist und sich keine ausgeprägten Fließwege aus vorhandenen Heterogenitäten oder kleineren Rissen entwickeln. Dieses Verhalten wird auf die Selbstheilungseffekte, das heißt die Rissschließung, zurückgeführt. Bei den untersuchten Tonsteinen zeigte sich ein grundsätzlich sehr geringes Durchlassvermögen, da mechanische Rissschließungseffekte infolge der mächtigen Überdeckung auftreten. Ein zunehmender Tonmineralgehalt geht dabei mit der Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit einher. Andererseits können stark komprimierte Tone/Tonsteine mit geringer Porosität eine Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeit aufweisen. Hier wird vermutet, dass die geringe Plastizität von stark überkonsolidierten Tonsteinen die Selbstheilungseffekte negativ beeinflusst (Gautschi, 2017).

Kneuker et al. (2020) untersuchten unterkretazische Tonsteine im Niedersächsischen Becken und stellten fest, dass die Barrierewirkung durch tektonisch gestörte Bereiche negativ beeinflusst werden kann. So können Flüssigkeiten auch durch Tonsteine mit grundsätzlich geringer hydraulischer Leitfähigkeit fließen, falls Verwerfungen oder Klüfte vorhanden sind. Die Ausbildung von Klüften kann zudem durch erhöhte Porenwasserdrücke gefördert werden.

Je nach räumlicher Anordnung der HLW-Lagerstätten ergeben sich zusätzliche Randbedingungen für die zu erwartenden Spannungsfeldänderungen und Wärmeeinflüsse. Für eine größere Anzahl flach längs nebeneinander gelagerter HLW-Behälter wird angenommen, dass im Wirtsgestein eine vertikale thermische Volumenzunahme erfolgt. Dabei dürften vertikale Druckspannungen eingeleitet werden (Conil et al., 2020). Der Einflussradius mit merklichem Temperaturanstieg im Umfeld thermisch belasteter Bohrlöcher im Opalinuston (OPA) beschränkt sich auf etwa 5 m. Bei den zugrunde liegenden Untersuchungen wurden thermische Lasten bis knapp über 100°C in zwei Stufen über insgesamt 338 Tage aufgebracht (Gens et al., 2007).

8.5 Stoffgesetze zur Modellierung von Tonen/Tonsteinen

Für komplexe Bauwerke sind numerische Berechnungsverfahren von großer Bedeutung. In der Geotechnik wird insbesondere die Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet, darüber hinaus kommen die Finite-Differenzen-Methode (FDM), Methode der Randelemente (REM) und die Distinct-Element-Methode (DEM) zur Anwendung (Kempfert & Lüking, 2020).

Von maßgeblicher Bedeutung für die numerische Lösung geotechnischer Probleme ist die Auswahl geeigneter Stoffgesetze zur Erfassung physikalischer Nichtlinearitäten. Neben linear- und nichtlinear-elastischen Stoffgesetzen werden elasto-plastische, elasto-visko-plastische und hypoplastische Ansätze häufig für die Beschreibung von Locker- und Festgesteinen verwendet. Die Stoffgesetze unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer Fließfunktionen, also der Grenzfläche, welche die Bruchbedingung des Sedimentes/Gesteins abhängig von den Spannungen definiert. Bei einigen Gesetzen ist die Fließfläche zusätzlich durch eine zweite Fließfläche, eine sogenannte Kappe, in Richtung hoher Spannungen verschlossen (z. B. *CamClay*-Modell). Einige Versagensmodelle finden sich z. B. bei Chen & McCarron (1986) oder Chen & Mizuno (1990). Gängige Stoffgesetze sind in Kempfert & Gebrelassie (2006) und Kempfert & Lüking (2020) publiziert.

Da Stoffgesetze von Lockergesteinen für gewöhnlich nichtlinear sind, werden Lösungsverfahren benötigt, welche die infolgedessen inkrementell formulierten Gleichgewichtsbedingungen bewältigen können. Näheres hierzu findet sich in Zienkiewicz (1977) und Kempfert & Lüking (2020). Ebenfalls zu beachten sind mögliche Diskontinuitätsprobleme (z. B. bei sich öffnenden Kontaktflächen in Tonen/Tonsteinen), für deren Lösung Kempfert & Lüking (2020) Kontaktelemente wie die von Katona (1983) oder Desai et al. (1984) als mögliche Herangehensweise aufführen. Bei gekoppelten Prozessen werden die unbekannten Zustandsgrößen durch partielle Differentialgleichungen (PDGL) ausgedrückt und abhängige Größen werden mit den konstitutiven Gleichungen oder Gleichgewichtsbedingungen gelöst (Kim et al, 2011).

8.5.1 Prozesse und Kopplungen bei unterirdischen Bauwerken zur Endlagerung radioaktiver Stoffe

Numerische geotechnische Modellierungen von Tonen/Tonsteinen im Kontext der HWL-Abfalldeponierung stellen besonders komplexe Anforderungen. Hierbei müssen thermische (T), hydraulische (H), mechanische (M) sowie gegebenenfalls chemische (C) Prozesse und der Transport von Gasen (G) berücksichtigt werden und der Grad ihrer Kopplung ist sorgfältig zu evaluieren (Kohlmeier, 2006; Kim et al., 2011).

Auch zusätzliche Einflüsse aus radioaktiver Strahlung auf die Prozesse sind denkbar. THMCG Modellierungen gesättigter oder teilgesättigter poröser Medien sind außerordentlich komplex. Daher gibt es weder für die hier adressierten paläogenen Tone/Tonsteine des Norddeutschen



Beckens noch für die gut untersuchten jurassischen Tonsteine (COx, OPA) oder den oligozänen Boom Clay (BC) allgemeingültige Ansätze unter korrekter Berücksichtigung aller physikalischen Vorgänge. Für diverse Phänomene, Fragestellungen und Forschungsvorhaben sind auf diesem Grund begleitende Modellierungen durchgeführt und mit Labor- oder in situ Versuchen abgeglichen worden. Obschon es Abhängigkeiten zwischen den auftretenden Prozessen gibt, weisen Kim et al. (2011) darauf hin, dass eine vollumfassende, simultane Simulation aller Aspekte nicht zwingend nötig ist, sondern vielmehr verschiedene Analysen sinnvoll miteinander verknüpft werden können, sofern die Mechanismen gut verstanden werden. Neben den grundlegenden Formulierungen der mathematischen Beziehungen ist die Validierung von Systemparametern für die jeweils vorliegenden geotechnischen Bedingungen ein wichtiger Faktor für zutreffende Berechnungen (Kim et al., 2011). Unabhängig davon, ob Zustandsgleichungen empirisch (anhand von Versuchsergebnissen) oder theoretisch (beispielsweise auf Basis physikalischer Gesetze) hergeleitet werden, bestimmen die dabei getroffenen vereinfachenden Annahmen und Randbedingungen die Gültigkeitsgrenzen der Zustandsgleichungen (Pimentel, 1996). Da im Rahmen dieser Studie keine entsprechenden Untersuchungen an und in paläogenen Tonen/Tonsteinen Norddeutschlands gefunden werden konnten, können lediglich Annahmen getroffen werden, welche Stoffgesetze oder Modellierungsmethoden für diese Ablagerungen geeignet sein könnten (zur Übertragbarkeit von Eigenschaften s. Kapitel 8.1).

Chemische Prozesse und Gastransport im Bereich von HLW-Endlagern

Das Schutzkonzept zur geotechnischen Endlagerung von HLW-Abfällen sieht in der Regel ein natürliches Barrieresystem (z. B. Gesteine mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit) sowie ein künstliches Barrieresystem (Engineered Barrier System EBS) vor, z. B. Behältnisse und Verfüllmaterial. Infolge von anaerober Korrosion, mikrobiologischer Zersetzung von Metallen des EBS, der chemischen Umwandlung von Betonbestandteilen oder Wasserradiolyse infolge ionisierender Strahlung können Gase wie Wasserstoff (H₂), Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Methan (CH₄) entstehen (Kim et al., 2011; Shaw, 2015). Wenn sich hierbei Druck aufbaut, können Teile der EBS ebenso wie das Wirtsgestein beschädigt und durchdrungen werden, sodass mögliche Transportwege (Mikro- bis Makrorisse) entstehen oder erweitert werden, welche negative Implikationen für die Barrierewirkung des Gesamtsystems zur Folge haben (NAGRA, 2008; Kim et al., 2011; Harrington et al., 2012; Fall et al., 2012, 2014). Insofern ist die Langzeitbetrachtung der Gasentstehung auf Basis chemischer Prozesse und die Gasmigration im HLW-Endlagerkonzept sinnvoll. Ein weiterer chemischer Aspekt sind Zement-Ton-Interaktionen in den Kontaktzonen zwischen dem Ausbau unterirdischer Hohlräume unter Einsatz von Beton und dem Wirtsgestein. Aus dem Beton können hochalkalische Stoffe entweichen, sodass in der Kontaktzone zum umgebenden Ton/Tonstein ein chemischer Gradient entsteht und mineralogische Umwandlungen möglich sind. Diese könnten die Langzeit-Barrierewirkung beinträchtigen, weswegen gekoppelte geochemische Transportberechnungen notwendig sind (Gaucher & Blanc, 2006; Vinsot et al., 2008; Gaucher et al., 2009; Savage et al., 2010; Gaboreau et al., 2012; Marty et al., 2014). Details zu entsprechenden Langzeitmodellierungen der chemischen Prozesse in jurassischen Tonsteinen (Cox) sind bei Marty et al. (2014) zu finden.

Die wesentlichen Prozesse und ihre Interaktionen in porösen Medien sind in Abb. 8.2 schematisch dargestellt: Infolge von Wärmeeinflüssen verändern sich Fluiddichten und Viskositäten, in



den festen Stoffanteilen entstehen thermische Dehnungen. Die Porosität der Feststoffe beeinflusst sowohl die thermische als auch die hydraulische Leitfähigkeit. Gase und Flüssigkeiten beeinflussen wiederum die thermische Leitfähigkeit und stehen in Spannungsinteraktion mit den Feststoffen. Für den Wärmetransport mittels Konduktion, in Abhängigkeit von den Temperaturgradienten, findet das *Fourier*-Gesetz Anwendung. Die Flüssigkeitsbewegung, abhängig von den Druckgradienten, kann mit der *Darcy*-Gleichung beschrieben werden. In Abb. 9.2 B wird die Beziehung zu chemischen Prozessen verdeutlicht. Hier sind die Reaktionskinetik und das chemische Gleichgewicht wichtig (Kim et al., 2011).



Abb. 8.2 Kopplung und Interaktion von THMGC Prozessen. A) Wesentliche Interaktionen zwischen Prozessen in porösen Medien, B) Ergänzung der THM Beziehungen um chemische Prozesse (nach Kim et al., 2011). T = Thermisch, H = Hydraulisch, M = Mechanisch, C = Chemisch, G = Gas.

8.5.2 Modellierungsbestrebungen in der Endlagerforschung

Aufgrund der Schwierigkeit einer umfassenden Modellierung aller genannten Prozesse wird vielfach nur eine THM-Modellierung (thermisch, hydraulisch, mechanisch) vorgenommen. Kim et al. (2011) verweisen hierzu auf Auswertungen von Olivella et al. (1994, 1996), Gawin et al. (1995), Thomas & He (1995), Collin et al. (2002) und Rutqvist et al. (2005). Arbeiten, die chemische Prozesse mit reaktiven Transportgleichungen miteinbeziehen, wurden von Guimarães et al. (1999, 2007) und Thomas et al. (2001) publiziert. Einfachere chemische Betrachtungen mittels Transportmechanismen finden sich bei Thomas & Cleall (1998). Zur Beschreibung ungesättigter, poröser Medien unter nicht-isothermen Bedingungen wurde beispielsweise das elasto-plastische *Barcelona Basic* Model (BBM) entwickelt. Dieses Modell wurde durch verschiedene Autoren auch für das Ausdehnen von Sedimenten/Gesteinen und Einflüsse aus osmotischer Saugwirkung sowie Kationenaustausch erweitert (Alonso et al., 1990; Gens & Alonso, 1992; Sánches et al., 2005, 2008, Guimarães et al., 2009; Kim et al., 2011).

Frühe Entwicklungen zur Beschreibung vom Quellverhalten und resultierenden Änderungen festigkeitsmechanischer Eigenschafen von Tonsteinen sind bei Pimentel (1996) vergleichend dargestellt. Ein erstes Stoffgesetz mit orthotroper Anisotropie für das Quellverhalten diagenetisch verfestigter Tonsteine hat Fröhlich (1986) formuliert, wodurch beispielsweise Sohlhebungen in Tunnelbauwerken durch Quellen mit guter Übereinstimmung numerisch nachgerechnet werden



konnten. Das Vorhandensein quellfähiger Mineralanteile im Gestein sowie insbesondere besonders stark schwellfähiger Anhydrit, kann erhebliche negative Auswirkungen auf unterirdische Bauwerke haben Die Begriffe Quellen und Schwellen werden in der Literatur teilweise synonym verwendet. Quellen meint hier die Volumenzunahme infolge osmotischer Flüssigkeitsaufnahme und Schwellen die Volumenzunahme infolge der chemischen Anhydrit-Gips-Transformation (AGT; cf. Pimentel, 1996). Es können sich beispielsweise die Scherfestigkeitsparameter bei Wasseraufnahme verändern oder ein Quelldruck aufbauen. Die Beschreibung von Fröhlich (1986) zielt dabei nur auf die korrekte Darstellung des Endzustandes ab, nicht auf dessen zeitliche Entwicklung. Die zugrundeliegenden Quelldruckversuche wurden u. a. an Tonsteinen des Keupers und des mittleren Bundsandsteins durchgeführt (Pimentel, 1996). Zur Beschreibung des osmotischen Quellens diagenetisch verfestigter Tonsteine (bei Quell-Orthotropie unter Beachtung des räumlichen Spannungszustandes) hat Pimentel (1996) eine Zustandsgleichung entwickelt. Ebenso wurde in dieser Arbeit eine Zustandsgleichung zur qualitativen Beschreibung der Materialentfestigung und Herabsetzung der Materialsteifigkeit für Tonsteine entwickelt. Der dafür untersuchte jurassische Tonstein (unteres Aalenium) stammte aus der schwäbischen Alb. Grundlegende Untersuchungen zum Schwellverhalten infolge von AGT wurden von Wanninger(-Huber) (2020) durchgeführt und die Ergebnisse wurden mit mathematisch chemo-mechanischen Modellen beschrieben.

Ein grundlegender Überblick über den poroelastischen Ansatz nach Biot (1941) unter Berücksichtigung von Erweiterungen für anisotropes Verhalten, wurde von Cheng (1997) ausgearbeitet. Die notwendigen konstitutiven Gleichungen, mikromechanischen Konstanten und Koeffizienten sind dort detailliert dargestellt. Der poroelastische Ansatz wird in der internationalen Forschung zu Tonen/Tonsteinen wiederkehrend verwendet, auch wenn beispielsweise Braun et al. (2021) keine zufriedenstellende Übertragung des Ansatzes mit isotroper Spannungsabhängigkeit auf Ergebnisse aus Triaxialversuchen gelungen ist. Für eine überschlägige Verwendung des Ansatzes können zurückgerechnete Parameter (z. B. der Biot- oder der Skempton-Koeffizien; Porenwasserdruck-Koeffizient) nach Braun et al. (2021) oder Belmokhtar (2017b) verwendet werden. Diese wurden für verschiedene Spannungsniveaus an COx Proben ermittelt. Eine Implementierung von Viskositätseigenschaften in die konstitutiven Beziehungen haben Makhnenko & Podladchikov (2018) für OPA in Anlehnung an Biot (1941) vorgenommen. Für zutreffende hydromechanische und thermo-mechanische Modellierungen von Tonen/Tonsteinen im Bereich der EDZ ist eine gute Kenntnis der poromechanischen Eigenschaften unabdingbar (Gens et al., 2007; Garitte et al., 2017; Guayacán-Carrillo et al., 2017; Braun et al., 2021). Gegenwärtig ist es nicht möglich, die theoretisch fundierten Ansätze wie den poroelastischen Ansatz nach Biot (1941) oder den poroplastischen Ansatz nach Rice (1975) so zu erweitern, dass alle in situ beobachtbaren Effekte hinreichend erfasst werden. Beispielsweise können die Öffnungsweiten von Rissen, die Verteilung von Rissen oder das Verhalten von bestimmten triaxialen Spannungszuständen nicht richtig modelliert werden (Corkum, 2020). Zur Simulation von zeitabhängigem, poroviskoelastischen Prozessen haben Räss et al. (2017) konstitutive Beziehungen aufbauend auf Biot (1941) ergänzt. Die benötigten Materialparameter wurden aus Laboruntersuchungen von Opalinuston (OPA) gewonnen.

Ein kontinuumsmechanisches Modell zur Dimensionierung von Tunnelausbauten in quellfähigem Gestein hat Anagnostou (1992) entwickelt. Hierbei wird das Quellen als gekoppelter Spannungs-

Sickerströmungs-Prozess beschrieben und die Stoffgesetze enthalten Beschreibungen der Porenwasserspannung und des Wassergehaltes (neben den mathematischen Beschreibungen für Spannungen und Verzerrungen). Der Quellprozess wird dabei in seinem zeitlichen Ablauf erfasst, das Materialverhalten ist elastoplastisch ausgeführt.

Für kohäsive Sedimente/Gesteine unter monotonen oder zyklischen Lastbedingungen hat Tafili (2020) ein Modell von Fuentes et al. (2007) erweitert (*visko-ISA*-Modell für Ton), sowie ein eigenes entwickelt, das anisotropem Materialverhalten Rechenschaft trägt und Viskositätseinflüsse einbezieht. Besonders ist, dass ein zustandsabhängiges Dilatanzverhalten unter Berücksichtigung von Dichte (Pyknotropie), Spannungsabhängigkeit (Barotropie) und Lasthistorie (Historiotropie) formuliert wurde. Das neu vorgeschlagene Modell arbeitet mit einer rotierenden, historiotropen Fließfläche und ist dadurch in der Lage, das anisotrope Verhalten und die Herabsetzung des Schubmoduls zu erfassen (Tafili, 2020).

Ein sehr umfassendes Modell (3D, anisotrope Plastizität, hydromechanisch, konstitutives Schädigungsmodell) haben Parisio et al. (2018) vorgestellt. Dabei waren sie in der Lage, die am Testtunnel im Opalinuston (OPA) beobachteten Effekte wie die Ausweitung der EDZ größtenteils gut nachzubilden. Hierbei wurde ein Gradient zweiter Ordnung für das Dilatanzverhalten eingeführt, um ein netzabhängiges Verhalten zu unterbinden. Die Autoren nehmen an, dass das angewendete Modell auch für andere anisotrope, quasi-spröde Geomaterialien mit geringer Durchlässigkeit geeignet ist (Parisio et al., 2018). Corkum (2020) weist jedoch darauf hin, dass die Änderung der Porenwasserdrücke bei Parisio et al. (2018) nur unzureichend erfasst wurde. Für die Modellierung dieses Effektes (des beim Aushub rapide abfallenden Porenwasserüberdruckes bei undrainierter Volumenänderung - auch *liberated residual stress dilation* (LRSD) genannt) hat Corkum (2020) einen semi-empirischen Ansatz abgeleitet. Dieser basiert auf der Freisetzung von Eigenspannungen infolge von Mikrorissbildung beziehungsweise nichtlinearer Rissschließung, in Abhängigkeit vom gegenwärtigen Spannungsniveau. Der Ansatz wurde in einem FDM-Kontinuumsansatz, im Code *FLAC3D* implementiert. Die Ergebnisse wurden mit Piezometermessungen des tunnelnahen Labors im Opalinuston (OPA) abgeglichen (Corkum, 2020).

Eine Möglichkeit der voll gekoppelten, dreidimensionalen (3D) HM-Modellierung der dilatanzkontrollierten Gasmigration bei anfänglich gesättigtem anisotropem Tongestein beschreiben Yang et al. (2020). Die Validierung erfolgte in drei Versuchen an jurassischen Tonsteinen (COx). Das verwendete Modell beinhaltet zwei Rissmodelle mit nichtlinearem mechanischem Materialverhalten und kubischer Durchlässigkeitsbeschreibung. Die Gleichungen zum Massen- und Energieerhalt sowie Momentengleichgewicht werden im Artikel dargestellt. Wesentliche beobachtete Einflüsse der dilatanzabhängigen Gasmigration wie radiale Verformungen, Gasdurchbrüche und mechanische Dehnungen konnten ohne größere Abweichungen mit dem Modell erfasst werden, wohingegen Schwierigkeiten bei der korrekten Wiedergabe der dynamischen Änderung der Migrationspfade im Gestein bestehen bleiben. Es sei darauf hingewiesen, dass neben dem dilatanzabhängigen Gasdurchfluss drei weitere Gasmigrationsmechanismen für Tone/Tonsteine bekannt sind, deren Modellierung ebenfalls betrachtet werden sollte. Details zum gegenwärtigen Entwicklungstand der Gasmigrations-Modellierung und der vorherrschenden Prozesse können Yang et al. (2020) entnommen werden. Ferner ist zu beachten, dass vereinfachende zweidimensionale (2D), achsensymmetrische Modelle nicht geeignet sind, um größere Rissöffnungen oder die anisotropen Radialverformungen korrekt abzubilden (Yang et al., 2020).

Djouadi et al. (2020) haben die Einführung zweier Ansätze zur strukturellen Anisotropie in ein bestehendes konstitutives Gesetz (*Drucker-Prager* Modell) überprüft und anhand einer vereinfachten Modellierung eines Untergrundbauwerkes im Bereich der EDZ angewendet. Für die Modellierung des jurassischen COx Tonsteins zeigte der *Fabric-Tensor* Ansatz die besseren Ergebnisse im Vergleich zum *Weakness-Plane* Ansatz. Die Implementierung erfolgte im Kontext des *LKR*-Modells, einem isotropen elastoviskoplastischen konstitutiven Modell, durch ein Team der teilstaatlichen *Électricité de France SA* (EDF). Das Modell ist Teil einer open source FE-Software (Djouadi et al., 2020).

Für Modellierungen des THM-Verhaltens ist die starke Kopplung der mechanischen und hydraulischen Prozesse von Bedeutung (Conil et al., 2020). Bei Rückrechnungen zur Ermittlung von THM-Parametern unter Verwendung des elastoplastischen *Mohr-Coulomb* Ansatzes* konnte beispielsweise die Änderung des Porenwasserdruckes nur qualitativ nachgebildet werden (*unter Berücksichtigung des Scher- und Zugversagens mit Abschwächung bei Erreichen der ursprünglichen Festigkeitswerte, elastische Anisotropie, exponentielle Beziehung zwischen intrinsischer Durchlässigkeit und Spannungszustand). Weitere Modellierungen mit poroelastischem Ansatz konnten die wesentlichen Beobachtungen eines thermischen in-situ Lastversuches in guter Näherung abbilden. Hierbei wurde, trotz des Temperaturbereiches von 22–90°C, mit konstanten thermischen und hydromechanischen Eigenschaften gerechnet; lediglich die Ausdehnung des Porenwassers und dessen Viskositätsänderung mit der Temperatur wurden beachtet (Conil et al., 2020). Verschiedene Ansätze zur thermomechanischen Modellierung beim oligozänen Boom Clay (BC) sind u. a. in Hueckel et al. (1990), Hueckel & Borsetto (1990), Baldi et al. (1991), Cui et al. (2000) und Sultan et al. (2002) zu finden.

Belmokhtar et al. (2017a) führen an, dass einige Autoren für die Modellierung zeitabhängigen Verhaltens viskoplastische konstitutive Gleichungen verwenden, z. B. Shao et al. (2003, 2006), Liu et al. (2015) oder Pardoen & Collin (2016). Eine einfachere Modellierung der volumetrischen Kriechdehnungen bei 25°C und 80°C wurde von Belmokhtar et al. (2017a) mithilfe des viskoelastischen rheologischen *Kelvin-Voigt* Modells durchgeführt. Der Fokus lag auf der unmittelbaren thermischen Antwort des modellierten jurassischen Cox Tonsteins. Die Kriechdehnungen wurden mit dem Ansatz sehr gut getroffen, allerdings ist das Modell auch nicht in der Lage, Volumenzunahmen oder -abnahmen während der Erwärmung zu berechnen.

Wie bereits in Kapitel 8.4 diskutiert, ist das Rissverhalten in der EDZ zeitabhängig, gekoppelt und außerordentlich komplex. Es kommt zu Interaktionen zwischen dem Gestein, möglichen Füllmaterialien und exothermer Wärme, mit Einflüssen auf Festigkeiten, Spannungen, Kriechverhalten, chemische Reaktionen und biologische Aktivität. Nach anfänglicher Entsättigung des ausgehobenen Bereiches durch die Belüftung erfolgt bei Verfüllungen später eine zeitabhängige Rücksättigung. Infolge von Kriechverformungen oder Quelldruck werden Risse möglicherweise begrenzt oder ihre Größe wird verringert. Es findet jedoch, anders als in unverfestigtem Ton, keine vollständige Rissheilung statt und damit auch keine Wiederherstellung der Ursprungsfestigkeiten (Lisjak et al., 2016).



Die Modellierung der Rissbildung im Bereich der EDZ kann auf verschiedene Weisen geschehen. Viele Simulationen zu Schädigungen in der EDZ wurden mit Kontinuumsansätzen (z. B. Lanvon et al., 2009; Levasseur et al., 2010; Xu et al., 2013; Le & Nguyen, 2015) oder Diskontinuumsansätzen (z. B. Marschall et al., 2008) durchgeführt. Einen weiteren Überblick zur EDZ Modellierung geben Lisjak et al. (2015, 2016). Grundsätzlich gibt es bei Gesteinen drei wesentliche Rissmechanismen zu beachten: Makroscherrisse in Umgebungen mit hohen Spannungen, Abplatzungen im Bereich geringer Spannungen und Öffnungen bei Zugspannungen (Pardoen et al., 2015). Bei in situ Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass Scherzonen entstehen, bevor sich Risse in der EDZ ausbilden. Die Modellierung solcher Scherzonen mit FEM ist jedoch abhängig vom gewählten Netz (mesh), sodass Pardoen et al. (2015) unter Einsatz eines Lokalen-Zweiten-Gradienten Modells die Lokalisierung der Scherzonen untersucht haben. Dabei wurde das Kontinuum um Mikrostrukturauswirkungen erweitert, die Modellierung für ungesättigte Bedingungen eingeführt und mithilfe des Biot-Koeffizienten Kompressibilität für die festen Bestandteile ermöglicht. Damit wurde überprüft, ob ein 2D isotropes Modell die Dehnungslokalisation in Scherbändern prognostizieren kann. Die auftretenden Rissmuster in der EDZ untersuchter Teststollen waren fischgrät-/pfeilförmig ausgebildet (sowohl in COx, als auch in BT). Die Charakterisierung dieser Rissbildung und die Modellierung von Auswirkungen wird von den Autoren jedoch weiterhin als schwierig bewertet. Die Simulationen der horizontalen Konvergenzen waren im vorliegenden Fall nicht zufriedenstellend, da die anisotropen Eigenschaften des Tonsteins scheinbar nicht ausreichend berücksichtigt worden sind (Pardoen et al., 2015). Die Autoren schlagen daher vor, dass ein Ansatz für die hydromechanische Kopplung entwickelt werden sollte, beispielsweise mit dem Fabric-Tensor Konzept (Tensoren zweiter Stufe zur Beschreibung der räumlichen Verteilung von Festigkeitsparametern). Darüber hinaus wird für die HM-Kopplung ein Konzept zur Berücksichtigung von inhomogenen Durchlässigkeitseigenschaften vorgezeichnet, das mit einer Durchlässigkeitsmodifikation in Abhängigkeit von mechanischen Eigenschaften vorgenommen werden könnte (Pardoen et al., 2015).

Pardoen et al. (2019) haben für die EDZ Modellierung in Tonsteinen (Cox) einerseits einen Ansatz auf Makroebene gewählt. Die Rissbildung der EDZ wurde dort mit Dehnungslokalisation in Scherbändern in einem FEM Ansatz modelliert. Das verwendete gekoppelte *Lokale-Zweiter-Gradient*-Modell beinhaltet eine Regulierungsmethode. Der Ansatz wurde für ungesättigtes Gestein mit Anisotropie und Kompressibilität der Feststoffe erweitert. Andererseits wurde auf der Multi-Skalen-Ebene eine doppelte FEM Methode (FEMxFEM) gewählt. Auf Mikro-Skala-Ebene wurden hierfür elementary areas (EA) eingesetzt. Die Antwort der EA bilden dabei die konstitutiven Gesetze für die Makroskala. Mit den EA werden elastisch verformbare Festkörper durch kohäsive, schädigbare Kontaktzonen verbunden (das Schädigungsgesetz beschreibt die Kohäsionskräfte). Die Kontaktflächen formen ein durchströmbares Netz mit veränderbaren Öffnungsweiten, wodurch eine hydraulische Permeabilität simuliert wird. Auf der Makroskala wurde ein poro-mechanisches Kontinuum mit gekoppeltem hydro-mechanischem Verhalten verwendet (Pardoen et al., 2019).

Zur expliziten Berücksichtigung der Rissbildung und -vergrößerung haben Lisjak et al. (2016) 2D hybride Finite-Discrete Element Simulationen (FDEM) durchgeführt und mit Ergebnissen eines OPA-Teststollens im Maßstab 1:3 abgeglichen. Es zeigte sich ein erheblicher Einfluss der Materialanisotropie auf die Rissbildung. Nicht beachtet wurden schichtungsparallele tektonische

Trennflächen, poroelastische Auswirkungen und zeitabhängige hydromechanische Effekte wie Kriechen, Quellen oder Selbstheilung. Die Notwendigkeit weiterer Forschung unter Beachtung der genannten zusätzlichen Randbedingungen wird betont (Lisjak et al., 2016). Auch besteht weiterer Forschungsbedarf zu Stoffgesetzen bei Tonsteinen, insbesondere im Hinblick auf anisotrope Eigenschaften, die mit Beobachtungen in situ abgeglichen werden sollten. (Djouadi et al., 2020).

Vergara Quezada (2018) hat das Quellverhalten unter anderem von Tonstein-Proben (OPA) untersucht und begleitend numerisch modelliert. Hierbei wurde deutlich, dass weitere Untersuchungen zu Einflüssen aus zyklischen Feuchtigkeitsänderungen auf das Quellverhalten und die gekoppelten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen erforderlich sind. Darüber hinaus wurden auch Wissenslücken zum Einfluss des Schwellverhaltens im Zuge der Anhydrid-Gips-Umwandlung aufgezeigt.

Da linear-elastische oder elasto-plastische Methoden aufgrund der nichtlinearen Verformungen in Tonsteinen unzuverlässige Ergebnisse liefern, haben Li & Liu (2015) einen Versuch der EDZ Modellierung mit zweiteiligem *Hooke'schem* Modell (*two-parts Hooke's* model, TPHM) vorgestellt. Die Modellierung wurde dazu im Code *FLAC3D* implementiert. Für einen Teil des Porenraums wurden große Verformungen möglich gemacht, indem hierfür das *Natural-Strain-Based Hooke'sche* Gesetz verwendet wurde. Der restliche Porenraum wurde mit dem *Engineering-Strain-Based Hooke'schen* Gesetz simuliert. Hierbei zeigte sich eine gute Übereinstimmung mit dem *"ED-B"* Testtunnel des schweizer URL im Mont-Terri hinsichtlich der Verschiebungen und der Größe der geschädigten Zonen. Grundsätzlich gehen die Autoren davon aus, dass die zeitlich verteilten Rissprozesse (Anbahnung, Ausbreitung und Rissschließung) alle vom Modell erfasst und unter Berücksichtigung der vorherrschenden physikalischen Prozesse berechnet werden können. Allerdings sind TPHM-Simulationen gegenüber den konstitutiven Beziehungen des Modells empfindlich. Im vorliegenden Fall schienen im Labor ermittelte mechanische Eigenschaften als Grundlage für die Verformungssimulation geeignet (Li & Liu, 2015).

Die numerische Modellierung der Rissausbreitung um die EDZ ist gerade auch für die Bereiche von Bedeutung, in denen in situ Beobachtungen bisher nicht durchgeführt werden können (z. B. in tieferen Bereichen der EDZ; Li & Liu, 2015).

Die Simulation der Entlastung von Gesteinen bei remanenten Spannungen ist sehr herausfordernd. Tao et al. (2012) haben hierzu eine sequenzielle Modellierung mit impliziten und expliziten Schritten in einem FEM-Programm (LS_DYNA) vorgenommen. Der implizite Schritt beinhaltet die Initialisierung der statischen Ausgangsspannungen, der explizite Schritt die dynamische Berechnung. Anders als die sonst häufig notwendige manuelle Bearbeitung in zwei Programmen, sogenanntes "incorporate coupling", wurde dadurch der Bearbeitungsaufwand erheblich verringert. Zur quantitativen Beschreibung des Entlastungsvorgangs wurde eine äquivalente-Ausgangsspannungs-Freisetzungsrate (*equivalent initial stress release rate* EISRR) eingeführt. Grundsätzlich blieben aber große Unsicherheiten bei der Simulation bestehen, da der Entlastungsvorgang ein schwer kontrollierbarer Prozess ist (Tao et al., 2012).

Corkum (2006) hat für den Opalinuston (OPA) zwei phänomenologisch basierte konstitutive Beziehungen für das nichtlineare elastische Verhalten sowie ein vereinfachtes Modell für den Porenwasserüberdruck in Tonstein bei der Erstellung von Tunnelbauwerken entwickelt. Die Ergebnisse wurden im Code *FLAC3D* implementiert. Das Porenwasserdruckmodell basiert hierbei auf einer Feldmessung sowie der Extrapolation von Laboruntersuchungen zum Spannungs-Dehnungsverhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse noch besser quantifiziert werden müssen, insbesondere zum Aufbrechen des Gefüges und dem damit verbundenen Freiwerden von latenter Dehnungsenergie. Gerade Dilatationseffekte werden von den Modellen ignoriert (Corkum, 2006).

Yong et al. (2017) betonen bezüglich ihrer Simulationen der EDZ im Opalinuston (OPA), dass die Suche nach geeigneten konstitutiven Gleichungen ein andauernder Prozess ist und Simulationsergebnisse häufig nur qualitativ zutreffend sind. Weitere Untersuchungen und Ansätze zur Modellierung und zu Stoffgesetzen für Tonsteine liegen von Pouya (2015); Pouya & Yazdi (2015), Cheng et al. (2020), Cheng et al. (2021), Niu et al. (2021) und Nitsch et al. (2021) vor.

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen ein breites Bild von möglichen Modellierungsansätzen und zugrundeliegenden Stoffgesetzen für verschiedene Prozesse und Phänomene in Tonstein. Bis heute haben sich dabei keine Standardverfahren etablieren können.

8.6 Standsicherheit und Teufen unterirdischer Bauwerke in Tonstein

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind in Norddeutschland keine Bau- oder Forschungsprojekte in paläogenen Tonen oder Tonsteinen bekannt. In Belgien wurden dagegen die oligozänen Tone des Boom Clay (BC) umfangreich untersucht. Eine direkte Übertragung dieser Ergebnisse auf paläogene Tone des Norddeutschen Beckens sind jedoch nicht möglich (s. Kapitel 8.1).

8.6.1 Langfristige Offenhaltung, maximale Teufe und mögliche Rückholbarkeit von und aus unterirdischen Deponiebauwerken in Tonen/Tonsteinen

Eine langfristige Offenhaltung unterirdischer Bauwerke setzt die Abtragung von Lasten über eingebrachte Konstruktionen oder die Gewölbewirkung des Gesteins voraus. Für Bauwerke in Tonen/Tonsteinen ist aufgrund zu erwartender Kriechverformungen, des Quellvermögens und weiterer Einflüsse im Bereich einer EDZ ein Ausbau in der Regel erforderlich, um Verformungen zu begrenzen und die Standsicherheit für den beabsichtigten Zeitraum zu gewährleisten (zu Veränderungen von Tonstein infolge des Aushubes siehe insbesondere Kapitel 8.4 und 8.5). Abhängig von den lokalen Bedingungen muss die Ausbauart ausgewählt und anhand definierter Anforderungen angepasst werden. In Anwesenheit von Wasser, insbesondere wenn dieses salzhaltig ist, kann Korrosion von Stählen zum Risiko für die Dauerhaftigkeit der Bauwerke werden. Die Exposition gegenüber weiteren Einflüssen (z. B. chemische Einflüsse) ist ebenfalls zu beachten. Ausbauten in Massivbauweise mit Stahlbetonkonstruktionen sind u. a. aufgrund der fortschreitenden Depassivierung des Betons immer nur zeitlich begrenzt vor korrosiven Einflüssen geschützt. Sobald Bewehrungsstähle nicht mehr durch die ursprünglich hohen pH-Werte des Betons geschützt sind, kann es zu Korrosion kommen und infolge der Volumenzunahme beim Korrosionsprozess Schäden am Beton auftreten (Stahr et al., 2013; Zilch et al., 2013; Rudolph et al., 2021). Unter der Dauerhaftigkeit eines Bauwerks versteht man den Erhalt der Eigenschaften, die für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit notwendig sind. Typischerweise werden hier Zeiträume von 50 bis 100 Jahren angesetzt, innerhalb derer die Eigenschaften auf Basis der Einhaltung von hauptsächlich empirischen Konstruktionsregeln sichergestellt werden sollen

(Zilch et al., 2013). Der Erhalt der Dauerhaftigkeit von Ingenieurbauwerken für erheblich längere Zeiträume ist für gewöhnlich nicht vorgesehen. Obwohl Bauschäden teilweise auch saniert werden können (Stahr et al., 2013), ist eine lange Offenhaltung unterirdischer Bauwerke im Rahmen der Endlagerung atomarer Abfälle dennoch immer nur für einen begrenzten Zeitraum möglich. Eine Abschätzung dieser Zeiträume ist im Rahmen dieser Literaturstudie aufgrund der Komplexität von Dauerhaftigkeitsbetrachtungen nicht möglich.

Technische Möglichkeiten der Rückholbarkeit unterirdisch deponierter Abfälle setzen eine Zugänglichkeit zu den Lagerstätten voraus. Die hierfür erforderliche Standsicherheit der Ausbauten ist, wie zuvor beschrieben, infolge der begrenzten Dauerhaftigkeit von Ingenieurbauwerken nur zeitlich begrenzt gegeben. Der Einsatz von Verfüllmaterialien wie Bentonit als Teil der EBS, kann die Prognose der Rückholbarkeit negativ beeinflussen. Sollten die Behälter, in denen die radioaktiven Stoffe eingeschlossen wurden, durch langfristige Einflüsse beschädigt worden sein, so erschwert eine Verfüllung die Feststellung des Zustandes und die Lokalisierung der Behälter. Bei einer Entfernung der Verfüllmaterialien könnte ausgetretenes radioaktives Material weiter verteilt werden oder es könnten Beschädigungen der Behältnisse verursacht werden, falls die vermutete, ursprüngliche Lokalisierung der Behälter sich durch geologische Prozesse verändert hat. Die Grundzüge der Methodik zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines geologischen Endlagers in Tonsteinen ist beispielsweise in Gautschi & Zuidema (1996) beschrieben. Darin wird klargestellt, dass es schwer ist, alle kritischen Prozesse mit absoluter Sicherheit nachzuweisen. Die Analyse der Langzeitsicherheit kann nur auf einem sogenannten "robusten" Nachweis basieren, bei dem konservative Annahmen getroffen und alle denkbaren negativen Einflüsse berücksichtigt werden. Eine solche Analyse ist hochkomplex und muss interdisziplinär erfolgen, weswegen die hier getroffenen ingenieurtechnischen Betrachtungen nicht alle potentiell kritischen Phänomene einbeziehen können.

Für komplexe, unterirdische Bauwerke ist die genaue Ermittlung der in-situ Spannungsverhältnisse aroßer Bedeutung. Eine Beurteilung von Standsicherheiten von oder Gebrauchstauglichkeiten unter Anwendung von ingenieurtechnischen Methoden und Prinzipien ist ohne entsprechende Kenntnisse nicht möglich (Villaescusa et al., 2003). Auch wenn beispielsweise die Höhe von subvertikalen Hauptspannungen in einigen Fällen näherungsweise dem Gewicht des Deckgebirges entspricht (Gens et al., 2007), ist ein Rückschluss auf vorherrschende Spannungen ohne in-situ Messungen nicht vorherzusagen. Da Spannungsumlagerungen, assoziierte Verformungen und Rissbildungen infolge von Aushub- und Bohrarbeiten auftreten (s. Kapitel 8.4), hängt die technische Machbarkeit von Hohlraum-Auffahrungen unter anderem auch von den Spannungen in situ ab. Eine Kenntnis der in-situ Spannungen wird beispielsweise benötigt, um numerische Modellierungen vorzunehmen (Villaescusa et al., 2003). Für den Opalinuston (OPA) schlussfolgert Bossart (2017) in Bezug auf 20 Jahre Forschungsergebnisse im URL Mont Terri (Schweiz), dass der Bau von unterirdischen Lagerstätten in größeren Tiefen von beispielsweise 800 m, zur vermehrten Ausbildung von Rissen und Klüften führen könnte, die dann durch größere Abstände der Lagerstätten der exothermen HWL-Abfälle begrenzt werden müssten, um den Erhalt der Standsicherheit zu gewährleisten. Für die Endlagersuche in der Schweiz fasste Gautschi (2017) zusammen, dass nur Tiefen von maximal 900 m berücksichtigt werden, da die Machbarkeit entsprechender unterirdischer Bauwerke in größerer Tiefe in Frage steht.

Detailliertere Beschreibungen dazu finden sich in den Berichten der NAGRA (2014) und ENSI (2017).

Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Auswertungen und ortspezifischer Daten zu unterirdischen Bauwerken in paläogenen Tonen/Tongesteinen in Norddeutschland können, im Rahmen dieser Literaturstudie, mit der gebotenen ingenieurwissenschaftlichen Sorgfalt, keine Aussagen zur möglichen Teufe von Hohlräumen getroffen werden.

8.6.2 Geotechnische Erfahrungen mit unterirdischen Bauwerken und Auffahrungen in Tonen/Tonsteinen

Erfahrungen beim Aushub eines großen Tunnels mit einer Teilschnittmaschine im schweizer Tonsteinlabor *Mont Terri*, in einer Tiefe von ca. 250–320 m, sind bei Yong et al. (2017) dokumentiert. Die aufgetretenen Rissschäden des senkrecht zur Schichtorientierung angelegten Tunnels, mit 3,8 m Durchmesser und 6,7 m Länge, lassen sich in zwei Zonen einteilen: Eine innere Zone mit etwa 20 cm Tiefe, in der makroskopisch große Risse auftraten, sowie eine tiefere Zone im Bereich von 50–80 cm Tiefe, bei der mit Ultraschallmessungen noch Störungen festgestellt wurden. Insbesondere die Seitenwände und eine obere Wand waren am stärksten von direkten Abplatzungen betroffen (Yong et al., 2017).

Im Bericht der NAGRA (2002) sind die Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf das Wirtsgestein und die Entwicklung des Stollenumfelds beschrieben. Bei der Auffahrung eines Tunnels wird vorerst von einem weitestgehend ungestörten Zustand ausgegangen. Durch die Auffahrung entsteht eine mechanische Entlastung des Tunnelumfelds und eine Auflockerungszone. Um dem entgegenzuwirken, werden Stützmaßnahmen getroffen. Trotz der Stützmaßnahmen findet eine Spannungsumlagerung im Ausbaubereich statt, welche zu einer Veränderung der Eigenschaften des Gesteins, besonders im Hinblick auf die hydraulischen Eigenschaften sowie die Festigkeit, führen. Dies ist vor allem in Hinblick auf austretende Radionuklide aus den Behältern im Endlager wichtig, falls die Barrierewirkung dadurch nicht gesichert werden kann. Eine Verfüllung wirkt einer zeitabhängigen langfristigen Änderung der Gegebenheiten entgegen, führt aber durch Aufsättigung (kann mehrere 100 oder 1000 Jahre dauern) und Quellen der Verfüllmaterialien auch zu weiteren Beeinflussungen der Tunnelumgebung. In Abhängig vom Spannungsfeld sollten die Bauwerke parallel zur maximalen Hauptnormalspannung ausgerichtet sein (NAGRA, 2002).

Im Bericht der NAGRA (2002) werden vier verschiedene, teilweise sehr alte Tunnelbauwerke im Opalinuston (OPA) beschrieben, bei welchen es zu Sohlhebungen und teilweise zu Querschnittsveränderungen kam. Als ursächlich wird der Eintritt von Wasser in die Auflockerungszone und der damit verbundene Quelldruck im Tunnelumfeld vermutet. Die Auffahrung des Tunnels des Felslabors in Mont Terri wurde daraufhin ohne Eintrag von Wasser durchgeführt, woraufhin sich in den Jahren danach kaum Sohlhebungen zeigten. Der Einfluss von Wasser in der Auflockerungszone wird somit deutlich. Økland & Cook (1998) und Rummel & Weber (2002) konnten dies in Labortests bestätigen. Sie zeigten außerdem, dass das ausgeprägtere Schadensbild bei Bohrungen auftrat, die parallel zur Schichtung verlaufen.



Eine Vielzahl von Fallbeispielen für Tunnelbauwerke in quellfähigem Gestein findet sich bei Anagnostou (1992). Hieraus können Erkenntnisse für Auffahrungen in Tonstein im Allgemeinen gewonnen werden. Die mehr als 100 jährigen Erfahrungen im Tunnelbau im schweizer Opalinuston (OPA) zeigen, dass ein Tunnelbau bis zu einer Überlagerung von 700–800 m kein größeres Problem darstellt und Sohlhebungen und daraus entstandene Schäden größtenteils durch Wassereintritt entstehen (NAGRA, 2002). Eine zeitabhängige Deformation lässt sich durch entsprechende Stützmaßnahmen verringern und die Auflockerungszone somit minimieren.

Zusammenfassung Kapitel 8

Die geomechanischen und -technischen Eigenschaften paläogener Tone/Tonsteine des Norddeutschen Beckens sind kaum bekannt. Eine systematische Analyse der in-situ Eigenschaften mit begleitenden Modellierungen und Validierungen von Stoffgesetzen und Abhängigkeiten hat bisher nicht erkennbar stattgefunden.

Für das geomechanische Verhalten von Ton/Tonstein spielen viele unterschiedliche geotechnische Parameter eine wichtige Rolle. Zudem beeinflussen diese sich gegenseitig und können nicht nur jeweils als Einzelwert betrachtet werden. Eine Übertragung der geotechnischen Parameter eines Standortes auf einen anderen Standort mit scheinbar ähnlichen Randbedingungen ist in der Regel nicht möglich und kann zu einer Fehleinschätzung des mechanischen Verhaltens von Tonen/Tonsteinen führen. Eine standortspezifische Untersuchung der geotechnischen Kenngrößen muss somit in jedem Fall vor Ort stattfinden und es besteht weiterhin großer Forschungsbedarf zu den verschiedenen Einflüssen und Kopplungen, zu geeigneten Stoffgesetzen und zur Ableitung von Material- und Modellparametern aus Versuchen, in situ und im Labor.

Der Vergleich verschiedener Tonsteine aus unterschiedlichen Teufen zeigt, dass nicht nur die Teufe und die daraus resultierende Auflastspannung maßgebend für die Spannungsverhältnisse im Gestein ist, sondern auch das rezente tektonische Spannungsfeld großen Einfluss hat.

Aufgrund fehlender wissenschaftlicher Auswertungen und ortspezifischer Daten zu unterirdischen Bauwerken in paläogenen Tonen/Tonsteinen in Norddeutschland können, im Rahmen dieser Literaturstudie, mit der gebotenen ingenieurwissenschaftlichen Sorgfalt, keine Aussagen zur möglichen Teufe von Hohlräumen getroffen werden.

9. Wissenslücken in Bezug auf die Eignung paläogener Tone und Tonsteine für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und Fazit

Unsere Literaturstudie zeigt, dass die paläogenen Ablagerungen des Norddeutschen Beckens heterogen aufgebaut sind und in ihrer faziellen Ausbildung stark variieren können. Auch gibt es aufgrund differentieller Subsidenz und der Bildung sekundärer Salz-Randsenken große Mächtigkeits-Unterschiede.

Im Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg wurden von der BGE (2020, 2020j, 2020l Teil 2) die transgressiven Tone und Tonsteine des Thanetiums (Oberpaläozän) und des Ypresiums (Untereozän) als potenzielle Endlagerwirtsgesteine ausgewiesen (insbesondere Ablagerungen der


Basbeck-Formation, Oberpaläozän-Formation, Lamstedt-Formation, Fehmarn-Formation, der Helle-Formation, Schlieven-Formation, Marnitz-Formation und Zerben-Formation). Diese oberpaläozänen und untereozänen Ablagerungen bestehen zwar überwiegend aus sehr feinkörnigen Tonen und Tonsteinen, enthalten aber alle gröbere Einschaltungen von Schluff, Sand/Sandstein und Feinkies, die lokal stark variieren können. Insbesondere in den südlichen Beckenrand-Bereichen sind die Ablagerungen gröberklastisch. Die Tone und Tonsteine besitzen wechselnde Kalkgehalte (von kalkfrei bis stark kalkhaltig), sind überwiegend pyrithaltig, teilweise glaukonithaltig und enthalten z. T. mikro- bis makroskopische Mengen an organischer Substanz.

Die durchschnittlichen Mächtigkeiten der oberpaläozänen Ablagerungen liegen unter 100m, so dass die nach § 23 StandAG erforderliche Mindestmächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) von 100 m vermutlich in vielen Bereichen des ausgewiesenen Teilgebietes nicht erreicht wird. Lokal können Ablagerungen des Oberpaläozäns jedoch Mächtigkeiten von einigen 100 m erreichen (z. B. Helle-Formation). Die untereozänen Ablagerungen haben Mächtigkeiten von durchschnittlich 100 m bis 500 m. Hier liegen die Ablagerungen jedoch teilweise nicht tief genug. Nach § 23 StandAG muss die Mindestteufe des ewG 300 m unter GOK betragen. In Gebieten, in denen im Nachweiszeitraum von 1 Ma mit exogenen Prozessen wie insbesondere eiszeitlich bedingter intensiver Erosion zu rechnen ist, muss die Oberfläche des ewG tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkungen liegen (BGBI, 2020). In Norddeutschland sind Pleistozäne subglaziale Rinnen weit verbreitet, die Tiefen von bis zu 580 m erreichen. Da zu erwarten ist, dass sich bei zukünftigen Vereisungen erneut tiefe Rinnen in den Untergrund einschneiden werden, muss ein potenzielles Endlager tiefer als 600 m liegen.

In sekundären Salz-Randsenken, besonders im Norden des Teilgebietes 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg, können deutlich höhere Mächtigkeiten von mehreren 100 m auftreten (z. B. im Bereich des Glückstadt Grabens). Dort liegen die oberpaläozänen bis untereozänen Ablagerungen jedoch teilweise in Tiefen von mehr als 1500 m.

Die feinkörnigen Ablagerungen des Unteroligozäns ("Rupelton") liegen, mit Ausnahme der tiefen sekundären Salz-Randsenken, nicht in ausreichender Tiefe.

Erhebliche Wissenslücken gibt es hinsichtlich der mineralogischen Zusammensetzung, der Diagenese, Absenkungsgeschichte und Verfestigung der paläogenen Tone und Tonsteine des Norddeutschen Beckens. Auch sind keine relevanten Daten zu Gebirgsdurchlässigkeiten, effektiven Gebirgsporositäten und den geomechanisch/geotechnischen Eigenschaften der paläogenen Tone/Tonsteine in Norddeutschland publiziert.

In der Literatur werden sowohl unverfestigte Tone als auch verfestige Tonsteine beschrieben. In den meisten Fällen scheinen unverfestigte Tone vorzuliegen, die Einschaltungen von verfestigten Tonsteinen enthalten.

Die genauere mineralogische Zusammensetzung der Tone und Tonsteine ist nur aus wenigen Forschungsbohrungen bekannt. Für größere Gebiete existieren dagegen nur Übersichtsbeschreibungen. Diese wurden in Niedersachsen teilweise an alten, unsachgemäß gelagerten, Bohrkernproben durchgeführt, so dass es zu Änderungen des Mineralbestandes gekommen sein kann. Aktuelle Arbeiten, die sich explizit mit der Diagenese und der Versenkungsgeschichte der paläogenen Sedimente des Norddeutschen Beckens befassen, liegen ebenfalls nicht vor. Dementsprechend kann nicht bewertet werden, inwiefern es zu Verfestigungsprozessen, Mineralumwandlungen oder Reifeprozessen (organischer Substanzen) gekommen ist und welche Paläomaximaltemperaturen zu erwarten sind. Im Rahmen der Eignungsprüfung für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sollten daher zu all diesen Aspekten umfangreiche, standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden.

Auch aus der Bearbeitung der geotechnischen/geomechanischen Fragestellungen ergeben sich umfangreiche Kenntnislücken zu den Eigenschaften der paläogenen Tone und Tonsteine des Norddeutschen Beckens. Für aussagekräftige Schlussfolgerungen bedarf es in jedem Fall der Ermittlung von Kennwerten in Laboruntersuchungen und Tests in situ. Eine allgemeine Ableitung der benötigten Eigenschaften ohne standortspezifische Kenntnisse stellt eine starke Vereinfachung der komplexen interdisziplinären Fragestellungen dar. Unter anderem ungeklärt sind die Spannungszustände im Gebirge, Gebirgsdurchlässigkeiten, räumliche Ausdehnung von Klüften oder durchlässigeren Bereichen im Gestein oder das Vorhandensein quell- oder schwellfähiger Bestandteile. Es ist unumgänglich, verschiedene Prozesse für Erforschung, Bau und Betrieb ei-Endlagers sorgfältig zu simulieren und insbesondere die dafür verwendeten nes Materialparameter zu validieren und die Gültigkeit der jeweils verwendeten Stoffgesetze sicherzustellen. Eine abschließende Aufzählung aller unbekannten geotechnischen und mechanischen Kenngrößen und Zusammenhänge kann im Rahmen dieser Studie nicht erstellt werden. Vielmehr sei auf die umfangreiche internationale Forschung verwiesen, welche für die hier zusammengestellten Informationen zu Rate gezogen worden ist. Ähnliche, aber nicht zwangsläufig deckungsgleiche Fragestellungen, wie sie in Belgien, Frankreich und der Schweiz und weiteren Ländern für Endlager in Tonen/Tonsteinen gestellt und teilweise beantwortet worden sind, werden sich auch für ein deutsches Endlager innerhalb von Tonen/Tonsteinen stellen. Gleichwohl zeigen viele offene Punkte selbst in den jüngeren Veröffentlichungen, dass kaum ein Aspekt in hinreichender wissenschaftlicher Tiefe untersucht worden ist.

Auf Grundlage der ausgewerteten Literatur und den vorhandenen großen Wissenslücken kann daher keine abschließende Bewertung der Eignung paläogener Tone und Tonsteine des Norddeutschen Beckens als potenzielle Endlagerwirtsgesteine für hochradioaktive Abfälle vorgenommen werden.



Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerung, Köln.
- Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R., Wolf, J. (2020): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit (T2) - Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. B. T. GmbH, Braunschweig.
- Alonso, E.E., Gens, A., Josa, A. (1990): A constitutive model for partially saturated soils. Géotechnique 40, 405-430.
- Allen, P.A., Allen, J.R. (2013): Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment. John Wiley & Sons, Ltd., Oxford.
- Anagnostou, G. (1992): Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge. Dissertation. ETH Zürich.
- ANDRA (1999): Reférentiel géologique du site Meuse/Haute-Marne. Rapport ADS 99-005. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Paris.
- ANDRA (2001): Dossier 2001 argile Sur l'avancement des études et recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et a vie longe en formation géologique profonde. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Paris.
- ANDRA (2005a): Dossier 2005 Argile Tome Phenomenological evolution of a geological repository. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Paris.
- ANDRA (2005b): Dossier 2005 Référentiel du site Meuse/Haute Marne. Report ANDRA CRPADS040022. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Chatenay-Malabry.
- Arfai, J., Jähne, F., Lutz, R., Franke, D., Gaedicke, C., Kley, J. (2014): Late Paleozoic to Early Cenozoic geological evolution of the northwestern German North Sea (Entenschnabel): new results and insights. Netherlands Journal of Geosciences 93, 147-174.
- Arfai, J., Franke, D., Lutz, R., Reinhardt, L., Kley, J., Gaedicke, C. (2018): Rapid Quaternary subsidence in the northwestern German North Sea. Scientific Reports 8, 11524.
- Armand, G., Noiret, A., Zghondi, J., Seyedi, D.M. (2013): Short-and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5, 221-230.
- Armand, G., Leveau, F., Nussbaum, C., de La Vaissiere, R., Noiret, A., Jaeggi, D., Landrein, P., Righini, C. (2014): Geometry and properties of the excavation-induced fractures at the Meuse/Haute-Marne URL drifts. Rock Mechanics and Rock Engineering 47, 21-41.
- Armand, G., Bumbieler, F., Conil, N., de La Vaissière, R., Bosgiraud, J.M., Vu, M.N. (2017a): Main outcomes from in situ thermo-hydro-mechanical experiments programme to demonstrate feasibility of radioactive high-level waste disposal in the Callovo-Oxfordian claystone. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 9, 415-427.
- Armand, G., Conil, N., Talandier, J., Seyedi, D.M. (2017b): Fundamental aspects of the hydromechanical behaviour of Callovo-Oxfordian claystone: from experimental studies to model calibration and validation. Computers and Geotechnics 85, 277-286.
- Arthaud, F., Matte, P. (1977): Late Paleozoic strike-slip faulting in southern Europe and northern Africa: Result of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals. Geological Society of America Bulletin 88, 1305-1320.



- Ashraf, M.A.M., Yusoh, R., Sazalil, M.A., Abidin, M.H.Z. (2018): Aquifer Characterization and groundwater potential evaluation in sedimentary rock formation. Journal of Physics: Conference Series 995, 012106.
- Auvray, C., Arnold, G., Armand, G. (2015): Experimental study of elastic properties of different constituents of partially saturated argillite using nano-indentation tests. Engineering Geology 191, 61-70.
- Bär, K. (2012): Untersuchung der tiefengeothermischen Potenziale von Hessen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.
- Bahlburg, H., Breitkreuz, C. (2017): Grundlagen der Geologie. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Baldi, G., Hueckel, T., Pellegrini, R. (1988): Thermal volume changes of the mineral–water system in lowporosity clay soils. Canadian Geotechnical Journal 25, 807-825.
- Baldi, G., Hueckel, T., Peano, A., Pellegrini, R. (1991): Developments in modelling of thermohydro-geomechanical behaviour of Boom clay and clay-based buffer materials (volume 2). Report No. EUR-13365/2. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Baldschuhn, R. (1993): 3.6.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Meyer, K.-D. (Hrsg): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2827 Amelinghausen. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 43-46.
- Baldschuhn, R. (1995): 3.7.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Höfle, H.-C. (Hrsg): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2826 Egestorf. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 51-53.
- Barckhausen, J., Streif, H. (1978): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Emden West Nr. 2608. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 80.
- Barckhausen, J., Streif, H. (1995): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2616 Brake. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 183.
- Bastiaens, W., Bernier, F., Li, X.L. (2006): An overview of longterm HM measurements around HADES URF. In: Van Cotthem, A., Charlier, R., Thimus, J. F. and Tshibangu, J. P. (Eds.): EUROCK 2006: Multiphysics Coupling and Long Term Behaviour in Rock Mechanics. Taylor & Francis, London, pp. 15-25.
- Bastiaens, W., Bernier, F., Li, X. L. (2007): SELFRAC: Experiments and conclusions on fracturing, selfhealing and self-sealing processes in clays. Physics and Chemistry of the Earth 32, 600-615.
- Behrmann, R.B. (1949): Geologie und Lagerstätte des Ölfeldes Reitbrook bei Hamburg. In: Bentz, A. (Hrsg.): Erdöl und Tektonik in Nordwestdeutschland, 190-221.
- Bellmann, H.-J. (1979): Neuere Ergebnisse über die Phosphorit Konkretionen in den mitteloligozänen Schichten der Leipziger Bucht. Zeitschrift für angewandte Geologie 25, 124-128.
- Belanteur, N., Tacherifet, S., Pakzad, M. (1997): Étude des comportements mécanique, thermo-mécanique et hydro-mécanique des argiles gonflantes et non gonflantes fortement compactées. Revue Française de Géotechnique 78, 31-50.
- Belmokhtar, M., Delage, P., Ghabezloo, S., Conil, N. (2017a): Thermal volume changes and creep in the callovo-oxfordian claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering 50, 2297-2309.
- Belmokhtar, M., Delage, P., Ghabezloo, S., Tang, A.M., Menaceur, H., Conil, N. (2017b): Poroelasticity of the Callovo-Oxfordian Claystone. Rock Mechanics & Rock Engineering 50, 871-889.
- Bemer, E., Longuemare, P., Vincké, O. (2004): Poroelastic parameters of Meuse/Haute Marne argillites: effect of loading and saturation states. Applied Clay Science 26, 359-366.
- Benda, L. (1989): Vorwort. In: Benda, L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel,



F., Kruzer, H., Kuster, H., Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner, H.: Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, pp. 5-6.

- Benda, L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel, F., Kruzer, H., Kuster, H., Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner, H. (1989): Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, pp. 542.
- Bernier, F., Neerdael, B. (1996): Overview of in-situ thermomechanical experiments in clay: Concept, results and interpretation. Engineering Geology 41, 51-64.
- Bernier, F., Volckaert, G., Alonso, E., Villar, M. (1997): Suction-controlled experiments on Boom clay. Engineering Geology 47, 325-338.
- Bernier, F., Li, X.L., Bastiaens, W., Ortiz, L., Van Geet, M., Wouters, L., Frieg, B., Blümling, P., Desrues, J., Viaggiani, G., Coll, C., Chanchole, S., De Greef, V., Hamza, R., Malinsky, L., Vervoort, A., Vanbrabant, Y., Debecker, B., Verstraelen, J., Govaerts, A., Wevers, M., Labiouse, V., Escoffier, S., Mathier, J.-F., Gastaldo, L., Bühler, C.H. (2006): Fractures and self-healing within the excavation disturbed zone in clays. SELFRAC Final technical report. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Best, G., Jürgens, U., Susin, G. (1988): 2.2.11 Section L-L': The Federal Republic of Germany, Gifhorn (SE)-Neuwerk (NW)(based on borehole data with seismic control). In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 125-127.
- Best, G., Jürgens, L., Kockel, F. (1989): Die Position der Forschungsbohrung Wursterheide innerhalb des nordwestdeutschen Paläogen-Beckens. In: Benda, L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel, F., Kruzer, H., Kuster, H., Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner, H.: Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, pp. 9-20.
- Bettenstedt, F. (1949): Paläogeographie des nordwestdeutschen Tertiär mit besonderer Berücksichtigung der Mikropaläontologie. In: Bentz, A. (Hrsg.): Erdöl und Tektonik in Nordwestdeutschland. Amt für Bodenforschung, Hannover-Celle, pp. 143-172.
- Betz, D., Führer, F., Greiner, G., Plein, E. (1987): Evolution of the Lower Saxony Basin. Tectonophysics 137, 127-170.
- BGBI (Hrsg.) (2020): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG). Vom 5. Mai 2017 (BGBI. I 2017, Nr. 26, S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBI. I 2020, Nr. 60, S. 2760). Bundesgesetzblatt (BGBI), Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln.
- BGE (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine.
- BGE (2020ag): Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Ergebnisse der Bewertung: Teil A (Teilgebiete). Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine.
- BGE (2020b): Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG. Grundlagen. Stand 01.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine.
- BGE (2020h): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine.



- BGE (2020j): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete. Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine.
- BGE (2020k): Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine.
- BGE (2020I Teil 2): Datenbericht Teil 2 von 4. Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 Stand AG. Untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete. Anhang. Stand 28.09.2020. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Peine.
- BGR (Hrsg.) (1977): Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle Katalog geeigneter geologischer Formationen in der Bundesrepublik Deutschland. Bericht zum Studienvertrag 025-76-9-WASD. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Biot, M.A. (1941): General theory of three-dimensional consolidation. Journal of Applied Physics 12, 155-164.
- Bjerrum, L. (1967): The third Terzaghi lectures; Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 93, 1-49.
- Bjørlykke, K. (2010): Petroleum Geoscience. From sedimentary environments to rock physics. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Blaise, T., Barbarand, J., Kars, M., Ploquin, F., Aubourg, C., Brigaud, B., Cathelineau, M., El Albani, A., Gautheron, C., Izart, A., Janots, D., Michels, R., Pagel, M., Pozzi, J.-P., Boiron, M.-C., Landrein, P. (2013) : Reconstruction of low temperature (<100 °C) burial in sedimentary basins : A comparison of geothermometer in intracontinental Basin. Marine and Petroleum Geology 53, 71-87.
- Blumenstengel, H. (1998): 3.6 Tertiär. In: Stottmeister, L. (Hrsg): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1 : 25 000 von Sachsen-Anhalt (GK 25). Blatt Arendsee 3134, 1. Auflage. Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt, Halle, pp. 40-50.
- Blumenstengel, H., Krutzsch, W. (2008): Tertiär. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner, M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. Schweizerbart, Stuttgart, pp. 267-292.
- Bock, H. (2001): RA experiment Rock mechanics analyses and synthesis: Data report on rock mechanics, Technical Report TR 2000-02, Mont Terri Project.
- Bock, H. (2009): RA Experiment. Updated review of the Opalinus Clay of the Mont Terri URL based on Laboratory and Field testing. Technical Report TR 2008-04.
- Böse, M., Lüthgens, C., Lee, J.R., Rose, J. (2012): Quaternary glaciations of northern Europe. Quaternary Science Reviews 44, 1-25.
- Boisson, J.-Y. (2005): Radioactive Waste Management. Clay Club Cataloque of Characteristics of Argillaceous Rocks. Organisation for Economic Cooperation and Development, Nuclear Energy Agency, Paris.
- Bosch, A., Bakker, M.A.J., Gunnink, J.L., Paap, B.F. (2009): Airborne electromagnetic measurements as basis for a 3D geological model of an Elsterian incision. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 160, 249-258.
- Boudali, M., Leroueil, S., Srinivasa Murthy, B.R. (1994): Viscous hebaviour of natural clays. Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Vol. 1, 411-416.
- Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, A., Trick, T., Mayor, J.C. (2002): Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory. Engineering Geology 66, 19-38.



- Bossart, P. (2008): Annex 4: Characteristics of the Opalinus Clay at Mont Terri. In: Bossart, P. & Thury, M. (Eds.): Mont Terri Rock Laboratory Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Reports of the Swiss Geological Survey 3, pp. 4-1 4-12.
- Bossart, P. (2017): Twenty years of research at the Mont Terri rock laboratory: what we have learnt. Swiss Journal of Geosciences 110, 405-411.
- Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A., Weyand, T. (2019): Untersuchungen zu den "maximalen physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Bericht GRS-A-3948. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH., Köln.
- Brandes, C., Pollok, L., Schmidt, C., Wilde, V., Winsemann, J. (2012): Basin modelling of a lignite-bearing salt rim syncline: insights into rim syncline evolution and salt diapirism in NW Germany. Basin Research 24, 699-716.
- Brandes, C., Schmidt, C., Tanner, D.C., Winsemann, J. (2013): Paleostress pattern and salt tectonics within a developing foreland basin (north-western Subhercynian Basin, northern Germany). International Journal of Earth Sciences 102, 2239-2254.
- Brandes, C., Steffen, H., Steffen R., Wu, P. (2015): Intraplate seismicity in northern Central Europe is induced by the last glaciation. Geology 43, 611-614.
- Brandes, C., Steffen, H., Sandersen, P.B.E., Wu, P., Winsemann, J. (2018): Glacially induced faulting along the NW segment of the Sorgenfrei-Tornquist Zone, northern Denmark: Implications for neotectonics and Lateglacial fault-bound basin formation. Quaternary Science Reviews 189, 149-168.
- Brandes, C., Plenefisch, T., Tanner, D., Gestermann, N., Steffen, H. (2019): Evaluation of deep crustal earthquakes in northern Germany possible tectonic causes. Terra Nova 31, 83-93.
- Braun, P., Ghabezloo, S., Delage, P., Sulem, J., Conil, N. (2021): Transversely isotropic poroelastic behaviour of the Callovo-Oxfordian claystone: A set of stress-dependent parameters. Rock Mechanics and Rock Engineering 54, 377-396.
- Bruns, B., Littke, R., Gasparik, M., van Weest, J.-D., Nelskamp, S. (2016): Thermal evolution and shale gas potential estimation of the Wealden and Posidonia Shale in NW-Germany and the Netherlands: a 3D basin modelling study. Basin Research 28, 2-33.
- BT-Drs. 18/11398 (2017): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017.
- Bühmann, D. (1979): Mineralparagenesen als zusätzliche Hilfen bei der stratigraphischen Korrelation im Nordwestdeutschen Tertiärbecken. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 130, 211-216.
- Bühmann, D. (1981): Paleogene Mineral Sequences and Marker Horizons from the North German Lowlands and the Hesse Depression. Abstracts, 7th International Clay Conference, 6-12 September 1981, Bologna and Pavia, Italy.
- Bühmann, D. (1986): Mineralogic Correlation of Northwest German Paleogene Sediments. In: Tobien, H. (Ed.): Northwest Germany during the Tertiary. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 114-133.
- Bühmann, D. (1989): The Mineralogic Composition of Tertiary Sediments from Wursterheide. In: Benda,
 L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel, F., Kruzer, H., Kuster, H.,
 Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner,
 H.: Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, pp. 147-159.
- Buntebarth, G. (2005): Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften an Tonstein-Proben der Unterkreide. Bericht Geophysikalisch-technisches Büro, Clausthal-Zellerfeld.



- Busschers, F.S., van Balen, R.T., Cohen, K.M., Kasse, C., Weerts, H.J.T., Wallinga, J., Bunnik, F.P.M. (2008): Response of the Rhine-Meuse fluvial system to Saalian ice-sheet dynamics. Boreas 37, 377-398.
- Campanella, R.G., Mitchell, J.K. (1968): Influence of temperature variations on soil behavior. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 94, 709-734.
- Carrasquilla, A., Silva, R. (2019): A Petrophysical Multivariate Approach Using Geophysical Well Logs and Laboratory Measurements to Characterize an Albian Carbonate Reservoir in the Campos Basin, Southeast Brazil. Society for Sedimentary Geology Special Publication 112, 61-72.
- Caspers, G., Jordan, H., Merkt, J., Meyer, K.-D., Müller, H., Streif, H. (1995): III. Niedersachsen. In Benda, L. (Ed.): Das Quartär Deutschlands. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 23-58.
- Chen, G.J., Maes, T., Vandervoort, F., Sillen, X., Van Marcke, P., Honty, M., Dierick, M., Vanderniepen, P. (2014): Thermal Impact on Damaged Boom Clay and Opalinus Clay: Permeameter and isostatic tests with µCT scanning. Rock Mechanics and Rock Engineering 47, 87-99.
- Chen, W.F., McCarron, W.O. (1986): Plasticity Modelling and its Application to Geomechanics. Proceeding of International Symposium on Recent Developments Laboratory and Field Testing and Analysis of Geotechnical Problems, Bangkok, A.A. Balkema, 467-510.
- Chen, W.F., Mizuno, E. (1990): Nonlinear analysis in soil mechanics Theory and Implementation. Developments in Geotechnical Engieneering 53. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Chen, Z., Montavon, G., Ribet, S., Guo, Z., Robinet, J.C., David, K., Tounassat, C., Grambow, B., Landesman, C. (2014): Key factors to understand in-situ behavior of Cs in Callovo-Oxfordian clay-rock (France). Chemical Geology 387, 47-58.
- Cheng, A.D. (1997): Material coefficients of anisotropic poroelasticity. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 34, 199-205.
- Cheng, W., Hong, P.Y., Pereira, J.M., Cui, Y.J., Tang, A.M., Chen, R.P. (2020): Thermo-elasto-plastic modeling of saturated clays under undrained conditions. Computers and Geotechnics 125, 103688.
- Cheng, W., Chen, R.-P., Pereira, J.-M., Cui, Y.-J. (2021): Undrained cylindrical cavity expansion/contraction in stiff clays using a two-surface plasticity model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 46, 570-593.
- Clauer, N., Liewig, N., Zwingmann, H. (2012): Time-constrained illitization in gas-bearing Rotliegende (Permian) sandstones from northern Germany by illite potassium-argon dating. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 96, 519-543.
- Colback, P.S., Wiid, B.L. (1965): The influence of moisture content on the compressive strength of rocks. Proceedings of the 3rd Rock Mechanics Symposium, Toronto, 65-83.
- Coll, C. (2005): Endommagement des roches argileuses et perméabilité induite au voisinage d'ouvrages souterrains. Dissertation. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Collin, F., Li, X. L., Radu, J.P., Charlier, R. (2002): Thermo-hydro-mechanical coupling in clay barriers. Engineering Geology 64, 179-193.
- Collo, G., Dávila, F.M., Nóbile, J., Astini, R.A., Gehrels, G. (2011): Clay mineralogy and thermal history of the Neogene Vinchina Basin, central Andes of Argentina: Analysis of factors controlling the heating conditions. Tectonics 30, 1-18.
- Conil, N., Vitel, M., Plua, C., Vu, M.N., Seyedi, D., Armand, G. (2020): In situ investigation of the THM behavior of the Callovo-Oxfordian claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering 53, 2747-2769.
- Connolly, J.A., Podladchikov, Y.Y. (2015): An analytical solution for solitary porosity waves: dynamic permeability and fluidization of nonlinear viscous and viscoplastic rock. Geofluids 15, 269-292.

- Corkum, A.G. (2006). Non-linear behaviour of Opalinus Clay around underground excavations. Dissertation. University of Alberta.
- Corkum, A.G., Martin, C.D. (2007): The mechanical behaviour of weak mudstone (Opalinus Clay) at low stresses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44, 196-209.
- Corkum, A.G. (2020): A Model for Pore Pressure Response of a Claystone due to Liberated Residual Stress Dilation. Rock Mechanics and Rock Engineering 53, 587-600.
- Coughlan, M., Fleischer, M., Wheeler, A.J., Hepp, D.A., Hebbeln, D., Mörz, T. (2018): A revised stratigraphical framework for the Quaternary deposits of the German North Sea sector: a geologicalgeotechnical approach. Boreas 47, 80-105.
- Crisci, E., Ferrari, A., Giger, S.B., Laloui, L. (2019): Hydro-mechanical behaviour of shallow Opalinus Clay shale. Engineering Geology 251, 214-227.
- Croisé, J., Schlickenrieder, L., Marschall, P., Boisson, J.Y., Vogel, P., Yamamoto, S. (2004): Hydrogeological investigations in a low permeability claystone formation: the Mont Terri Rock Laboratory. Physics and Chemistry of the Earth 29, 3-15.
- Cui, Y.J., Sultan, N., Delage, P. (2000): A thermomechanical model for saturated clays. Canadian Geotechnical Journal 37, 607-620.
- Cui, Y J., Le, T.T., Tang, A.M., Delage, P., Li, X.L. (2009): Investigating the time-dependent behaviour of Boom clay under thermomechanical loading. Géotechnique 59, 319-329.
- Czaikowski, O. (2011): Laborative und rechnerische Untersuchungen zu geomechanisch-geohydraulischen Wechselwirkungen im Tongestein im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Dissertation. TU Claustahl.
- Davies, C., Bernier, F. (2005): Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories. EUR 21028 EN. Proceedings of the European Commission CLUSTER Conference and Workshopn Luxembourg, 3.-5. November 2003.
- DBE (1998): Schachtanlage Konrad Geomechanisches Normalprofil. CAD-Nr. 26315200, 01/1998. DBE Technology GmbH, Peine.
- Deecke, H., Kubella, K. (1956): Ölfeld Wietze. Symposium sobre yacimientos de petroleo y gas. 20. Congreso geologico International, Mexiko, 71-84.
- De Bruyn, D., Thimus, J.F. (1995): The influence of anisotropy on clay strength at high temperature. Proceedings of the 11th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering 3, 37-42.
- De Bruyn, D., Labat, S. (2002): The second phase of ATLAS: the continuation of a running THM test in the HADES underground research facility at Mol. Engineering Geology 64, 309-316.
- De Craen, M., Swennen, R., Keppens, E.M., Macaulay, C.I., Kiriakoulakis, K. (1999): Bacterially mediated formation of carbonate concretions in the Oligocene Boom Clay of northern Belgium. Journal of Sedimentary Research 69, 1099-1106.
- De Craen, M., Wang, L., Van Geet, M., Moors, H. (2004): Geochemistry of Boom Clay pore water at the Mol site. SCK CEN Scientific Report BLG-990. Waste & Disposal Department SCK CEN, Mol, Belgium.
- Delage, P., Sultan, N., Cui, Y.J. (2000): On the thermal consolidation of Boom clay. Canadian Geotechnical Journal 37, 343-354.
- De Man, E., Van Simaeys, S., De Meuter, F., King, C., Steurbaut, E. (2004): Oligocene benthic foraminiferal zonation for the southern North Sea Basin. Bulletin van het Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen 74, 177-195.

- Demars, K.R., Charles, R.D. (1982): Soil volume changes induced by temperature cycling. Canadian Geotechnical Journal 19, 188-194.
- Desai, C.S., Zaman, M.M., Lightner, J.G., Siriwardane, H.J. (1984): Thin-Layer element for interfaces and joints. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 8, 19-43.
- DGGT (Hrsg.) (2010): Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit in schwach durchlässigem Untergrund. GDA-Empfehlungen, 3. Auflage 1997 S.24, Bautechnik 9/1999, Überarbeitung 7/2010. Empfehlungen des AK 6.1 (Geotechnik der Deponiebauwerke). Deutsche Gesellschaft für Geoetechnik e.V. (DGGT), Essen.
- Dienemann, W., Scharf, W. (1931): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern. Blatt Eckwarde. [2415 Butjadingen West]. Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 80.
- Djouadi, I., Giot, R., Raude, S., Cuvilliez, S., Laigle, F., Fernandes, R. (2020): Integration of Transverse Isotropy in the Instantaneous Behaviour of Geomaterials with Application to Numerical Modelling of Underground Structures. Geotechnical and Geological Engineering 38, 4917-4938.
- Ehlers, J., Linke, G. (1989): The origin of deep buried channels of Elsterian age in northwest Germany. Journal of Quaternary Science 4, 255-265.
- Ehlers, J., Grube, A., Stephan, H.J., Wansa, S. (2011): Chapter 13 Pleistocene Glaciations of North Germany - new results. In: Ehlers, J., Gibbard, P.L., Hughes, P.D. (Eds.): Quaternary Glaciations -Extent and Chronology – A closer look. Developments in Quaternary Science 15, 149-162.
- Eissmann, L. (2002): Quaternary geology of eastern Germany (Saxony, Saxon-Anhalt, South Brandenburg, Thuringia), type area of the Elsterian and Saalian Stages in Europe. Quaternary Science Reviews 21, 1275-1346.
- Elbracht, J., Meyer, R., Reutter, E. (2016): GeoBerichte 3. Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. 3. Auflage. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover.
- ENSI (2017): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Brugg.
- Eriksson, L.G. (1989): Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays. Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Taylor & Francis, A.A. Balkema, 2087-2090.
- Espinoza, D.N., Kim, S.H., Santamarina, J.C. (2011): CO2 Geological storage Geotechnical implications. KSCE Journal of Civil Engineering 15, 707-719.
- Espitia, J.M., Caicedo, B. (2014): Mechanical behavior of unsaturated argillaceous rocks under uniaxial compression through acoustic emission. 6th International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2014, Sydney, Taylor & Francis, A.A. Balkema, 1597–1603.
- Esri (2020): Bundesländer 2020 [Shapefile]. Maßstab keine Angabe. Offiziellen Bundesländergrenzen Deutschlands des Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, optimiert für Analyse und statistische Berechnungen. 01.01.2020 https://opendata-esri-de.opendata.arcgis.com/datasets/esri-de-content::bundesl%C3%A4ndergrenzen-2020/explore?location=51.164254%2C10.454033%2C6.78 (07.11.2021). Environmental System Research Institute (ESRI).
- Esri (2021): World Countries [Shapefile]. Maßstab keine Angaben. 12.10.2021 https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d974d9c6bc924ae0a2ffea0a46d71e3d (08.11.2021). Environmental System Research Institute (ESRI).
- EU (1979): European cataloque of geological formations having favourable characteristics for the disposal of solidified high-level and/or long-lived radioactive wastes. EU Commission of the European Communities, Paris.



- Faber, E. (1989): Head Space-Gas-Untersuchungen eingedoster Proben der Bohrung Wursterheide. In: Benda, L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel, F., Kruzer, H., Kuster, H., Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner, H.: Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, pp. 175-180.
- Fabre, G., Pellet, F. (2006): Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43, 950-960.
- Fall, M., Nasir, O., Nguyen, T.S. (2012): Coupled hydro-mechanical modelling of gas migration in Ontario's sedimentary rocks, potential host rocks for nuclear waste repositories. Proceedings of Canadian Geotechnical Conference – Geomanitoba 2012, Manitoba.
- Fall, M., Nasir, O., Nguyen, T.S. (2014): A coupled hydro-mechanical model for simulation of gas migration in host sedimentary rocks for nuclear waste repositories. Engineering Geology 176, 24-44.
- Fay, M. (1977): Herkunft und Verbreitung von Sandschüttungen im marinen Alttertiär Nordwestdeutschlands auf Grund der Verteilung der nichtopaken Schwerminerale. Dissertation. Technische Universität Berlin.
- Fay, M. (1986): Marine sand deposits of NW-German Paleogene: heavy minerals, provenance, distribution, possible subdivision. In: Tobien, H. (Hrsg.): Northwest Germany during the Tertiary. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 92-104.
- Franke, W. (1989): Variscan plate tectonics in Central Europe current ideas and open questions. Tectonophysics 169, 221-228.
- Franke, W. (2000): The mid-European segment of the Variscides: tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution. In: Franke, W., Haak, V., Oncken, O., Tanner, D. (Eds.): Orogenic processes: quantification and modelling in the Variscan belt. Geological Society Special Publications 179, pp. 35-61.
- Franke, W., Torsvik, T.H., Cocks, L.R.M. (2017): The Paleozoic Variscan oceans revisited. Gondwana Research 48, 257-284.
- Frederickx, L., Honty, M., De Craen, M., Elsen, J. (2021): Evaluating the quantification of the clay mineralogy of the Rupelian Boom Clay in Belgium by detailed study of size fractions. Applied Clay Science 201, 105954.
- Friberg, L., Poechlau, H.S., Krooss, B., Littke, R. (2000): 3D-modelling of thermal history and simulation of methane and nitrogen migration along the Northeast German seismic DEKORP profile 9601. Journal of Geochemical Exploration 67-70, 263-267.
- Frisch, U. (1984) Tertiär. In: Barckhausen, J. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25.000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2609 Emden. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 21-22.
- Frisch, U. (1995): 3.6 Tertiär. In: Barckhausen, J. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2609 Emden. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 21-22.
- Fröhlich, B. (1986): Anisotropes Quellverhalten diagenetisch verfestigter Tonsteine. Dissertation. Universität Fridericiana.
- Fuentes, W., Tafili, M., Triantafyllidis, T. (2017): An ISA-plasticity-based model for viscous and non-viscous clays. Acta Geotechnica 13, 367-386.
- Gaboreau, S., Lerouge, C., Dewonck, S., Linard, Y., Bourbon, X., Fialips, C.I., Mazurier, A., Prêt, D., Borschneck, D., Montouillout, V., Gaucher, E.C., Claret, F. (2012): In-situ interaction of cement paste and shotcrete with claystones in a deep disposal context. American Journal of Science 312, 314-356.



- Gagel, C. (1907): Über das Alter und die Lagerungsverhältnisse des Schwarzenbecker Tertiärs. Jahrbuch der Königlich Preußisch Geologischen Landesanstalt 27.
- Gagel, C., Schlunk, J. (1911): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Hamwarde. [2528 Geesthacht]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 82.
- Gagel, C., Schlunk, J. (1914): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Pötrau-Gresse. [2529 Büchen, 2530 Gresse]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 41.
- Gagel, C., Schucht, F. (1919): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Dornum. [2310 Dornum]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 34.
- Garitte, B., Gens, A., Vaunat, J., Armand, G. (2014): Thermal conductivity of argillaceous rocks: determination methodology using in situ heating tests. Rock Mechanics and Rock Engineering 47, 111-129.
- Garitte, B., Nguyen, T.S., Barnichon, J.D., Graupner, B.J., Lee, C., Maekawa, K., Manepally, C., Ofoegbu, G., Dasgupta, B., Fedors, R., Pan, P.Z., Feng, X.T., Rutqvist, J., Chen, F., Birkholzer, J., Wang, Q., Kolditz, O., Shao, H. (2017): Modelling the Mont Terri HE-D experiment for the Thermal-Hydraulic-Mechanical response of a bedded argillaceous formation to heating. Environmental Earth Sciences 76, 1–20
- Gasc-Barbier, M., Chanchole, S., Bérest, P. (2004): Creep behavior of Bure clayey rock. Applied Clay Science 26, 449–458.
- Gast, R., Pasternack, M., Piske, J., Rasch, H.-J. (1998): Das Rotliegend im Nordostdeutschen Raum, Stratigraphie, Fazies und Diagenese. Geologisches Jahrbuch A 149, 59-79.
- Gast, R., Gundlach, T. (2006): Permian strike slip and extensional tectonics in Lower Saxony, Germany. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 157, 41-56.
- Gaucher, E.C., Robelin, C., Matary, J.M., Négrel, G., Gros, Y, Heitz, J.F., Vinsot, A., Rebours, H., Cassagnabère, A., Bouchet, A. (2004): ANDRA underground research laboratory: interpretation of the mineralogical and geochemical data acquired in the Callovian-Oxfordian formation by investigative drilling. Physics and Chemistry of the Earth 29, 55-77.
- Gaucher, E.C., Blanc, P. (2006): Cement/clay interactions-a review: experiments, natural analogues, and modeling. Waste Management 26, 776-788.
- Gaucher, E.C., Tournassat, C., Pearson, F.J., Blanc, P., Crouzet, C., Lerouge, C., Altmann, S. (2009): A robust model for pore-water chemistry of clayrock. Geochimica et Cosmochimica Acta 73, 6470-6487.
- Gautschi, A. (2017): Safety-relevant hydrogeological properties of the claystone barrier of a Swiss radioactive waste repository: An evaluation using multiple lines of evidence. Grundwasser 22, 221-233.
- Gautschi, A., Zuidema, P. (1996): Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle
 Datenerhebung und Modellierung. In: Oddsson, B. (Hrsg.): Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse. Nachdiplomkurs in angewandten Erdwissenschaften. Birkhäuser Verlag, Basel-Boston-Berlin, pp. 377-389.
- Gawin, D., Baggio, P., Schrefler, B.A. (1995): Coupled heat, water and gas flow in deformable porous media. International Journal for Numerical Methods in Fluids 20, 969-987.
- Geckeis, H., Röhling, K.-J., Mengel, K. (2012): Endlagerung radioaktiver Abfälle. Teil 3 von 3. Chemie im Endlagersystem. Chemie in unserer Zeit 46, 282-293.
- Gens, A., Alonso, E.E. (1992): A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. Canadian Geotechnical Journal 29, 1013-1032.



- Gens, A. (2000): HE Experiment: Complementary Rock Laboratory Tests Laboratory Interim Report Phase 3. Mont Terri Technical Note TN 200-47, Mont Terri Project, Saint Ursanne, Switzerland.
- Gens, A., Vaunat, J., Garitte, B., Wileveau, Y. (2007): In situ behaviour of a stiff layered clay subject to thermal loading: observations and interpretation. Géotechnique 57, 207-228.
- Genske, D.D. (2021): Ingenieurgeologie. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Gramann, F., Kockel, F. (1988): Palaogeographical, lithological, palaeoecological and palaeoclimatic development of the Northwest European Tertiary Basin. In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 423-427 pp.
- Gramann, F. (1989): Forschungsbohrung Wusterheide. Benthonische Foraminiferen und verwandte Mikrofossilien, Biostratigraphie, Faziesanalyse. In: Benda, L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel, F., Kruzer, H., Kuster, H., Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner, H.: Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, pp. 287-320 pp.
- Grassmann, S., Cramer, B., Delisle, G., Messner, J., Winsemann, J. (2005): Geological history and petroleum system of the Mittelplate oil field, Northern Germany. International Journal of Earth Sciences 94, 979-989.
- Grassmann, S., Cramer, B., Winsemann, J (2006): Influence of inversion tectonics on the formation of the Bramberge oil field. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 157, 263-278.
- Grimm, K.I., Hottenrott, M. (2011): Erdgeschichtlicher Überblick. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IX. Tertiär, Teil 1. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 75, 31-41.
- Goulty, N.R., Sargent, C., Andras, P., Aplin, A. C. (2016): Compaction of diagenetically altered mudstones – Part 1: Mechanical and chemical contributions. Marine and Petroleum Geology 77, 703-713.
- Gratier, J.P., Jenatton, L., Tisserand, D., Guiguet, R. (2004): Indenter studies of the swelling, creep and pressure solution of Bure argillite. Applied Clay Science 26, 459-472.
- Guayacán-Carrillo, L.M., Ghabezloo, S., Sulem, J., Seyedi, D.M., Armand, G. (2017): Effect of anisotropy and hydro-mechanical couplings on pore pressure evolution during tunnel excavation in low-permeability ground. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 97, 1-14.
- Gürs, K. (2005): Das Tertiär Nordwestdeutschlands in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsletters on Stratigraphy 41, 313-322.
- Gürs, K., Standke. G., Wesselingh, F. (2008a): The North Sea Basin: Palaeogene. In: McCann. T. (Ed.): The Geology of Central Europe. Volume 2: Mesozoic and Cenozoic. Geological Society of London, pp. 1036-1040.
- Gürs, K., Standke. G., Wesselingh, F. (2008b): The North Sea Basin: Neogene. In: McCann. T. (Ed.): The Geology of Central Europe. Volume 2: Mesozoic and Cenozoic. Geological Society of London, pp. 1040-1042.
- Guimarães, L.D.N., Gens, A., Olivella, S. (1999): THM and reactive transport coupling in unsaturated porous media. Proceedings of the 7th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Graz, 303-308.
- Guimarães, L.D.N., Gens, A., Olivella, S. (2007): Coupled thermo-hydro-mechanical and chemical analysis of expansive clay subjected to heating and hydration. Transport in porous media 66, 341-372.
- Guimarães, L.D.N., Gens, A., Sánchez, M., Olivella, S. (2009): Coupled THMC modeling of unsaturated swelling clays: constitutive formulation and boundary value problems. Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils. Taylor & Francis, Newcastle, 515-529.



- Guterch, A., Wybraniec, S., Grad, M., Chadwick, A., Krawczyk, C., Ziegler, P., Thybo, H., De Vos, W. (2010): Crustal structure and structural framework. In: Doornenbal, J.C., Stevenson, A.G. (Eds.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. EAGE Publications, Housten, 11-23.
- Habibagahi, K. (1977): Temperature effect and the concept of effective void ratio. Indian Geotechnical Journal 7, 14-34.
- Häntzschel, W., Brand, E., Brockmann, C., Oldewage, H., Pfaffenberg, K. (1941): Zur jüngsten geologischen Entwicklung der Jade-Bucht. Senckenbergiana 23, 33-122.
- Hahne, J., Kemle, S. Merkt, J. (1994): Eem-, weichsel- und saalezeitliche Ablagerungen der Bohrung "Quakenbrück GE 2". In: Meyer, K.-D. (Ed.): Neuere Untersuchungen an Interglazialen in Niedersachsen. Geologisches Jahrbuch A 134, 9-69.
- Harbort, E., Monke, H., Stoller, J. (1911): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und beachbarten Bundesstaaten. Blatt Ebstorf. [2928 Ebstorf]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 66.
- Harbort, E., Stoller, J. (1916): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Beedenbostel. [3327 Lachendorf]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 70.
- Harbort, E., Seidel, E., Stoller, J. (1916a): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und beachbarten Bundesstaaten. Blatt Winsen a. d. Aller. [3325 Winsen (Aller)]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 82.
- Harbort, E., Seidel, E., Stoller, J. (1916b): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und beachbarten Bundesstaaten. Blatt Celle. [3326 Celle]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 66.
- Hardt, J., Norden, B., Bauer, K., Toelle, O., Krambach, J. (2021): Surface cracks geomorphological indicators for late Quaternary halotectonic movements in Northern Germany. Earth Surface Processes and Landforms 46, 2963-2983.
- Harrington, J.F., Horseman, S.T., Noy, D.J. (2001): Swelling and osmotic flow in a potential host rock. Proceedings of the 6th International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research, Paris, 169–188.
- Harrington, J.F., Milodowski, A.E., Graham, C.C., Rushton, J.C., Cuss, R.J. (2012): Evidence for gas-induced pathways in clay using a nanoparticle injection technique. Mineralogical Magazine 76, 3327-3336.
- Hebig, K.H., Ito, N., Scheytt, T., Marui, A. (2012): Review: Deep groundwater research with focus on Germany. Hydrogeology Journal 20, 227-243.
- Hekel, U. (1994): Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). Dissertation. Universität Tübingen.
- Henk, A. (1999): Did the Variscides collapse or were they torn apart?: A quantitative evaluation of the driving forces for postconvergent extension in central Europe. Tectonics 18, 774-792.
- Hepp, D.A., Hebbeln, D., Kreiter, S., Keil, H., Bathmann, C., Ehlers, J., Mörz, T. (2012): An east-westtrending Quaternary tunnel valley in the south-eastern North Sea and its seismic-sedimentological interpretation. Journal of Quaternary Sciences 27, 844-853.
- Hesse, R., Gaupp, R. (2017): Diagenese klastischer Sedimente. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Heusermann, S., Kiehl, J.R. (2021): Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem Überbohrverfahren Teil 2: Weggebersonden – Neufassung der Empfehlung Nr. 14 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der DGGT. Geotechnik 44, 1-12.
- Hinsch, W. (1961): Chatt und Miocän im östlichen Niedersachsen. Meyniania 10, 72-74.



- Hinsch, W. (1963): Gliederung und Paläogeographie des Alttertiärs und Nachweis des Latdorfs im Gifhorner Trog. Erdöl und Kohle 16, 87-92.
- Hinsch, W. (1988a): 1.2.5.3 Schleswig-Holstein. In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 77-83.
- Hinsch, W. (1988b): 2.2.12 Section M-M⁴. The Federal Republic of Germany, Lübeck (SE)-Schnelsen-Eiderstedt-Pellworm(NW)(based on borehole data with seismic control. In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 127-128.
- Hinsch, W. (1991): 2.3 Tertiär. In: Ehlers, J. (Hrsg.): Geologische Karte von Hamburg 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2426 Bergedorf. Geologisches Landesamt, Hamburg, pp. 27- 45.
- Hinsch, W. (1993): 2.3 Tertiär. In: Ehlers, J. (Hrsg.): Geologische Karte von Hamburg 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2426 Allermöhe. Geologisches Landesamt, Hamburg, pp. 27-43.
- Hinsch, W. (1995): 2.3 Tertiär. In: Ehlers, J. (Hrsg.): Geologische Karte von Hamburg 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2425 Hamburg. Geologisches Landesamt, Hamburg, pp. 27- 58.
- Hiss, M., Jansen, F., Prüfert, J. (2005): Das Tertiär des Niederrheins in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsletters in Stratigraphy 41, 307-312.
- Höfle, H.-C. (1976): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Schwanewede Nr. 2717. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 72.
- Höfle, H.-C., Jürgens, U. (1982): 3.5. Neogen. In: Höfle, H.-C. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2624 Hollenstedt. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 19-21.
- Honty, M., De Craen, M. (2012): Boom Clay mineralogy qualitative and quantitative aspects. External Report of the Belgian Nuclear Research Centre. SCK CEN, Mol, Belgium.
- Horseman, S.T., Winter, M.G., Enwistle, D.C. (1987): Geotechnical characterization of Boom clay in relation to the disposal of radioactive waste. No. EUR--10987. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P., Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin-Hannover.
- Hu, D.W., Zhang, F., Shao, J.F., Gatmiri, B. (2014a): Influences of mineralogy and water content on the mechanical properties of argillite. Rock Mechanics and Rock Engineering 47, 157-166.
- Hu, D.W., Zhang, F., Shao, J.F. (2014b): Experimental study of poromechanical behavior of saturated claystone under triaxial compression. Acta Geotechnica 9, 207-214.
- Huang, W.L., Longo, J.M., Pevear, D.R. (1993): An experimentally derived kinetic model for smectite-toillite conversion and its use as a geothermometer. Clays and Clay Minerals 41, 162-177.
- Huang, Y., Xie, S. Y., Shao, J. F. (2014): An experimental study of crack growth in claystones. European Journal of Environmental and Civil engineering 18, 307-319.
- Hueckel, T., Baldi, G. (1990): Thermoplasticity of saturated clays: experimental constitutive study. Journal of Geotechnical Engineering 116, 1778-1796.
- Hueckel, T., Borsetto, M. (1990): Thermoplasticity of saturated soils and shales: constitutive equations. Journal of Geotechnical Engineering 116, 1765-1777.
- Hughes, A.L., Gyllencreutz, R., Lohne, Ø.S., Mangerud, J., Svendsen, J.I. (2016): The last Eurasian ice sheets–a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. Boreas 45, 1-45.



- Hufnagel, H., Wehner, H. (1989): Organisch-geochemische und -petrographische Untersuchungen an Kernproben aus der Forschungsbohrung Wursterheide. In: Benda, L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel, F., Kruzer, H., Kuster, H., Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner, H.: Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, 161-174.
- Huuse, M., Clausen, O.R. (2001): Morphology and origin of major Cenozoic sequence boundaries in the eastern North Sea Basin: top Eocene, near-top Oligocene and the mid-Miocene unconformity. Basin Research 13, 17-41.
- Isert, F. (1934): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Vegesack. [2817 Vegesack]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p.48.
- lijima, A., Utada, M. (1966): Zeolites in sedimentary rocks, with reference to the depositional environment and zonal distribution. Sedimentology 7, 327-357.
- Jahn, S., Sönnke, J. (2013): F+E Endlagerung, Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT), Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Zwischenbericht. Stand 02.01.2013. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Jahn, S., Mrugalla, S., Stark, L. (2016): F+E Endlagerung, Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT), Teil II: Zusammensetzung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Ergebnisbericht. Stand 08.01.2016. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Janssen, R., Doppler, G., Grimm, K., Grimm, M., Haas, U., Hiss, M., Köthe, A., Radtke, G., Reichenbacher, B., Salamon, M., Standke, G., Teipel, U., Thomas, M., Uffenorde, H., Wielandt-Schuster, U., Subkommission Tertiär-Stratigraphie (2018): Das Tertiär in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 169, 267-294.
- Janszen, A., Moreau, J., Moscariello, A., Ehlers, J., Kröger, J. (2013): Time-transgressive tunnel-valley infill revealed by a three-dimensional sedimentary model, Hamburg, north-west Germany. Sedimentology 60, 693-719.
- Jaritz, W. (1973): 3.1 Präquartärer Untergrund. In: Meyer, K.-D., Schneekloth, H. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1: 25 000. Erläuterungen zu Blatt Neuenwalde Nr. 2318. [2318 Drangstedt]. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 7-11.
- Jaritz, W. (1975a): 3.1 Präquartärer Untergrund. In: Sindowski, K.-H. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Otterndorf Nr. 2119. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 6-18.
- Jaritz, W. (1975b): 3.1 Präquartärer Untergrund. In: Sindowski, K.-H. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Otterndorf Nr. 2119. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 6-9.
- Jensen, P.K. (1990): Analysis of the temperature field around salt diapirs. Geothermics 19, 273-283.
- Jobmann, M, Amelung, P., Billaux, D., Polster, M., Schmidt, H., Uhlig, L. (2007a): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland. GENE-SIS-Projekt. Abschlussbericht. DBE Technology GmbH, Peine.
- Jobmann, M, Amelung, P., Uhlig, L. (2007b): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland. GENESIS-Projekt. Anlagenband Geologie der Referenzregionen im Tonstein. DBE Technology GmbH, Peine.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A. & Polster, M. (2015): Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein. Projekt ANSICHT. Technischer Bericht. Gesellschaft für Anlagen- und



Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

- Joseph, C., Schmeide, K., Sachs, S., Brendler, V., Geipel, G. Bernhard, G. (2011): Sorption of uranium(VI) onto Opalinus Clay in the absence and presence of humic acid in Opalinus Clay pore water. Chemical Geology 284, 240-250.
- Joseph, C., Stockmann, M., Schmeide, K., Sachs, S., Brendler, V., Bernhard, G. (2013): Sorption of U(VI) onto Opalinus Clay: Effects of pH and humic acid. Applied Geohemistry 36, 104-117.
- Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E. (2006): Buried and open tunnel valleys in Denmark erosion beneath multiple ice sheets. Quaternary Science Reviews 25, 1339-1363.
- Jürgens, U. (1982a): 2.5.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Meyer, K.-D. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2524 Buxtehude. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 16-18.
- Jürgens, U. (1982b): 3.5.1 Paläogen. In: Höfle, H.-C. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2624 Hollenstedt. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 17-19.
- Jürgens, U. (1986): 3.5.1 Alttertiär (Paläogen). In: Harms, F.-J. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1: 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2724 Tostedt. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 21.
- Jürgens, U. (1992): 3.5.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Höfle, H.-C. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2725 Handeloh. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover (NLfB), pp. 18-20.
- Katona, M.G. (1983): A simple contact–friction interface element with applications to buried culverts. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 7, 371-384.
- Kauther, R., Herten, M., Montenegro, H., Odenwald, B. (2013): Geotechnische und geohydraulische Aspekte beim Bau der Weserschleuse in Minden. Geotechnik 36, 137-146.
- Kehew, A.E., Piotrowski, J.A., Jørgensen, F. (2012): Tunnel valleys: Concepts and controversies A review. Earth-Science Reviews 113, 33-58.
- Kempfert, H.G., Gebreselassie, B. (2006): Excavations and foundations in soft soils. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Kempfert, H.-G., Lüking, J. (2020): Geotechnik nach Eurocode. Band 1: Bodenmechanik. Grundlagen, Nachweise, Berechnungsbeispiele. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- Kiehl, J.R., Heusermann, S. (2021): Bestimmung von Gebirgsspannungen mit dem Überbohrverfahren Teil 1: Triaxialmesssonden – Neufassung der Empfehlung Nr. 14 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der DGGT. Geotechnik 44, 290-301.
- Kiesel, Y. (1970): Die Foraminifernenfauna der paläozänen und eozänen Schichtenfolge der Deutschen Demokratischen Republik. Paläontologische Abhandlungen A IV 2, 165-394.
- Kim, J.S., Kwon, S.K., Sanchez, M., Cho, G.C. (2011): Geological storage of high level nuclear waste. KSCE Journal of Civil Engineering 15, 721-737.
- King, C., Gale, A.S., Barry, T.L. (2016): A revised correlation of Tertiary rocks in British Isles and adjacent areas of NW Europe. Geological Society of London Special Report 27.
- Kley, J., Franzke, H.-J., Jähne, F., Krawczyk, C., Lohr, T., Reicherter, K., Scheck-Wenderoth, M., Sippel, J., Tanner, D., van Gent, H. (2008): Strain and stress. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Eds.): Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 97-124.



- Kley, J., Voigt, T. (2008): Late Cretaceous intraplate thrusting in central Europe: Effect of Africa-Iberia-Europe convergence, not Alpine collision. Geology 36, 839-842.
- Kley, J. (2013): Saxonische Tektonik im 21. Jahrhundert. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 164, 295-311.
- Klimke, J., Wiederhold, H., Winsemann, J., Ertl, G., Elbracht, J. (2013): Three-dimensional mapping of Quaternary sediments improved by airborne electromagnetics (SKYTEM) in the case of the Quakenbrück Basin, Northern Germany. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 164, 369-384.
- Klinkenberg, M. (2008): Einfluss des Mikrogefüges auf ausgewählte petrophysikalische Eigenschaften von Tongesteinen und Bentoniten. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen.
- Klinkenberg, M., Kaufhold, S., Dohrmann, R., Siegesmund, S. (2009): Influence of carbonate microfabrics on the failure strength of claystones. Engineering Geology 107, 42-54.
- Kneuker, T., Blumenberg, M., Strauss, H., Dohrmann, R., Hammer, J., Zulauf, G. (2020): Structure, kinematics and composition of fluid-controlled brittle faults and veins in Lower Cretaceous claystones (Lower Saxony Basin, Northern Germany): Constraints from petrographic studies, microfabrics, stable isotopes and biomarker analyses. Chemical Geology 540, 119501.
- Kneuker, T., Furche, M. (2021): Capturing the structural and compositional variability of Opalinus Clay: constraints from multidisciplinary investigations of Mont Terri drill cores (Switzerland). Environmental Earth Sciences 80, 1-21.
- Knoth, W. (1995): VII. Sachsen-Anhalt. In: Benda, L. (Ed.): Das Quartär Deutschlands. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 148-170.
- Knox, R.W. (1984): Nannoplankton zonation and the Paleocene/Eocene boundary beds of NW-Europe: an indirect correlation by means of volcanic ash layers. Journal of the Geological Society London 141, 993-999.
- Knox, R.W. (1989): Mineralogy and stratigraphy of volcanic ash layers in Lower Palaeogene beds of the Wursterheide Borehole, northern Germany. Geologisches Jahrbuch A 111, 217-231.
- Knox, R.W.O.B., Bosch, J.H.A., Rasmussen, E.S., Heilmann-Clausen, C., Hiss, M., De Lugt, I.R., Kasińksi, J., King, C., Köthe, A., Słodkowska, B., Standke, G., Vandenberghe, N. (2010): Cenozoic. In: Doornenbal, J.C., Stevenson, A.G. (Eds.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. EAGE Publications, Housten, pp. 211-223.
- Kockel, F. (1980): Regionale Darstellung von Lagerung, Mächtigkeiten und Fazies ausgewählter Horizonte im nordwestdeutschen Tertiärbecken. Unveröffentlichter Bericht. Archiv-Nr. 86425. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Kockel, F. (1988a): 2.2.10 Section K K': The Federal Repuplic of Germany, Dinklage (S)-Wilhelmshaven-Helgoland-Westschleswig Block (N) (based on borehole data with seismic control). In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 124-125.
- Kockel, F. (1988b): The palaeogeographical maps. In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 423-427.
- Kockel, F. (2003): Inversion structures in Central Europe Expressions and reasons, an open discussion. Netherlands Journal of Geosciences 82, 367-382.
- Koert, W. (1907): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Rütenbrock. [3108 Rütenbrock]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 32.
- Koert, W. (1910): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Harburg. [2525 Harburg]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, pp. 60.



- Köwing, K. (1956): Ausbildung und Gliederung des Miozäns im Raum von Bremen. Abhandlungen des naturwissenschaflichen Vereins Bremen 34, 69-171.
- Kohlmeier, M. (2006): Coupling of thermal, hydraulic and mechanical processes for geotechnical simulations of partially saturated porous media. Dissertation. Leibniz Universität Hannover.
- Krutzsch, W. (2011): Stratigrafie und Klima des Paläogens im Mitteldeutschen Ästuar im Vergleich zur marinen nördlichen Umrahmung. Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 162, 19-46.
- Kukla, P.A., Urai, J.L., Mohr, M. (2008): Dynamics of salt structures. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Eds): Dynamics of Complex Intracontinental Basins - The Central European Basin System. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 291-306.
- Kuster, H., Meyer, K.-D. (1979): Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen. Eiszeitalter und Gegenwart 29, 135-156.
- Kuster, H. (1982): 2.5.2 Jungtertiär (Neogen, tng). In: Meyer, K.-D. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2524 Buxtehude. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 18-26.
- Kuster, H. (2005): Das jüngere Tertiär in Nord- und Nordostniedersachsen. Geologisches Jahrbuch A 158.
- Labalette, T., Harman, A., Dupuis, M.C., Ouzounian, G. (2013): CIGÉO, the French Geological Repository Project – 13022. Proceedings of the Waste Management Conference WM2013, Phoenix, Arizona, USA, pp. 9.
- Landgraf, K.F. (1972): Mineralogische Untersuchung des Mitteloligozäntones der Lagerstätte Malliß (Bezirk Schwerin, DDR). Bericht der deutschen Gesellschaft für geologische Wissenschaften 16, 437-474.
- Lang, H.D. (1980): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3224 Westenholz. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 98.
- Lang, H.D. (1981): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3324 Lindwedel. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 127.
- Lang, H.D. (1983): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3225 Offen. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 108.
- Lang, H.D. (1992): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3125 Bergen. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 100.
- Lang, J., Winsemann, J., Steinmetz, D., Pollok, L., Polom, U., Böhner, U., Serangeli, J., Brandes, C., Hampel, A., Winghart, S. (2012): The Pleistocene of Schöningen (Germany): a complex tunnel valley-fill revealed from 3D subsurface modelling (GOCAD) and shear-wave seismics. Quaternary Science Reviews 39, 86-105.
- Lang, J., Hampel, A., Brandes, C., Winsemann, J. (2014): Response of salt structures to ice-sheet loading: implications for ice-marginal and subglacial processes. Quaternary Science Reviews 101, 217-233.
- Lang, J., Böhmer, U., Polom, U., Serangeli, J., Winsemann, J. (2015): The Middle Pleistocene tunnel valley at Schöningen als a Paleolithic archive. Journal of Human Evolution 89, 18-26.
- Lang, J., Lauer, T., Winsemann, J. (2018): New age constraints for the Saalian glaciation in northern central Europe: Implications for the extent of ice sheets and related proglacial lake systems. Quaternary Science Reviews 180, 240-259.
- Lang, J., Alho, P., Kasvi, E., Goseberg, N., Winsemann, J. (2019): Impact of Middle Pleistocene (Saalian) glacial lake-outburst floods on the meltwater-drainage pathways in northern central Europe: insights from 2D numerical flood simulation. Quaternary Science Reviews 209, 82-99.
- Lanyon, G.W., Marschall, P., Trick, T., de La Vaissière, R., Shao, H., Leung, H. (2009): Hydromechanical evolution and self-sealing of damage zones around a microtunnel in a claystone formation of the



Swiss Jura Mountains. Proceedings of the 43rd US Rock Mechanics Symposium and 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium, Asheville, North Carolina.

- Larter, S.R., Head, I.M., Huang, H., Bennet, B., Jones, M., Aplin, A.C., Murray, A., Erdmann, M., Wilhelms, A., Di Primio, R. (2005): Biodegradation, gas destruction and methane generation in deep subsurface petroleum reservoirs: an overvies. In: Doré, A.G., Vining, B.A. (Eds.): Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives. Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference. Geological Society London, pp. 633-639.
- Lauer, T., Weiss, M. (2018): Timing of the Saalian and Elsterian glacial cycles and the implications for Middle–Pleistocene hominin presence in central Europe. Scientific Reports 8, 5111.
- LBEG (2021): BGE-Zwischenbericht Teilgebiete (28.09.2020). Stellungnahme des Staatlichen Geologischen Dienstes von Niedersachsen. 02. Februar 2021. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover.
- Le, A.D., Nguyen, T.S. (2015): Hydromechanical response of a bedded argillaceous rock formation to excavation and water injection. Canadian Geotechnical Journal 52, 1-17.
- Lee, C., Lee, D., Jeon, S. (2013): The influence of excavation damaged zone on the mechanical and thermal behavior of cement mortar block around an opening. KSCE Journal of Civil Engineering 17, 1263-1274.
- Lenz, O. K., Riegel, W., Wilde, V. (2021): Greenhouse conditions in lower Eocene coastal wetlands? -Lessons from Schöningen, Northern Germany. Plos one 16, e0232861.
- Levasseur, S., Charlier, R., Frieg, B., Collin, F. (2010): Hydro-mechanical modelling of the excavation damaged zone around an underground excavation at Mont Terri Rock Laboratory. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 47, 414-425.
- Leydecker, G., Kopera, J. R. (1999): Seismological hazard assessment for a site in Northern Germany, an area of low seismicity. Engineering Geology 52, 293–304.
- Leydecker, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008 [Catalog of Earthquakes in Germany and adjacent areas between 800 AD and 2008]. Geologisches Jahrbuch E 59.
- Li, L., Liu, H. H. (2015): EDZ formation and associated hydromechanical behaviour around ED-B tunnel: A numerical study based on a two-part Hooke's model (TPHM). KSCE Journal of Civil Engineering 19, 318-331.
- Lim, S. (2013): In-situ Stress Magnitude and Core Disking. Dissertation. University of Alberta.
- Lin, H., Oh, J., Masoumi, H., Canbulat, I., Zhang, C., Dou, L. (2018). A Review of In Situ Stress Measurement Techniques. Proceedings of the 18th Coal Operators' Conference, 95-102.
- Lionço, A., Assis, A. (2000): Behaviour of deep shafts in rock considering nonlinear elastic models. Tunnelling and Underground Space Technology 15, 445-451.
- Lippstreu, L. (1995): VI. Brandenburg. In: Benda, L. (Ed.): Das Quartär Deutschlands. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 116-147.
- Lisjak, A., Garitte, B., Grasselli, G., Müller, H.R., Vietor, T. (2015): The excavation of a circular tunnel in a bedded argillaceous rock (Opalinus Clay): short-term rock mass response and FDEM numerical analysis. Tunnelling and Underground Space Technology 45, 227-248.
- Lisjak, A., Tatone, B.S., Mahabadi, O.K., Grasselli, G., Marschall, P., Lanyon, G.W., Vaissière, R.d.I., Shao, H., Leung, H., Nussbaum, C. (2016): Hybrid finite-discrete element simulation of the EDZ formation and mechanical sealing process around a microtunnel in Opalinus Clay. Rock Mechanics and Rock Engineering 49, 1849-1873.
- Liszkowski, J. (1993): The effects of Pleistocene ice-sheet loading-deloading cycles on the bedrock structure of Poland. Folia Quaternaria 64, 7-23.



- Litt, T., Behre, K.-E., Meyer, K.-D., Stephan, H.-J., Wansa, S. (2007): Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes. E & G Quaternary Science Journal 56, 7–65.
- Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nehlskamp, S. (2008a): Dynamics of Complex Intracontinental Basins. The Central European Basin System. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Littke, R., Scheck-Wenderoth, M., Brix, M.R., Nelskamp, S. (2008b): Subsidence, inversion and evolution of the thermal field. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nehlskamp, S. (Eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins. The Central European Basin System. Springer- Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 125-153.
- Liu, Z., Shao, J., Xie, S., Secq, J. (2015a): Gas permeability evolution of clayey rocks in process of compressive creep test. Materials Letters 139, 422-425.
- Liu, Z. B., Xie, S. Y., Shao, J. F., Conil, N. (2015b): Effects of deviatoric stress and structural anisotropy on compressive creep behavior of a clayey rock. Applied Clay Science 114, 491-496.
- Liu, Z., Shao, J. (2016): Moisture effects on damage and failure of Bure claystone under compression. Géotechnique Letters 6, 182-186.
- Liu, Z., Shao, J., Xie, S., Conil, N. (2017): Triaxial Creep Induced Gas Permeability Change and Elastic Modulus Variation in Callovo-Oxfordian Argillite. Poromechanics VI, 1037-1044.
- Liu, Z., Shao, J., Xie, S., Conil, N., Zha, W. (2018a): Effects of relative humidity and mineral compositions on creep deformation and failure of a claystone under compression. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 103, 68–76.
- Liu, Z.B., Xie, S.Y., Shao, J.F., Conil, N. (2018b): Multi-step triaxial compressive creep behaviour and induced gas permeability change of clay-rich rock. Géotechnique 68, 281-289.
- Liu, Z., Shao, J., Xie, S., Conil, N., Talandier, J. (2019): Mechanical behavior of claystone in lateral decompression test and thermal effect. Rock Mechanics and Rock Engineering 52, 321-334.
- Lohr, T., Krawczk, C.M., Tanner, D.C., Samiee, R. Endres, H., Oncken, O., Trappe, H., Kukla, P.A. (2007): Strain partitioning due to salt: insights from interpretation of a 3D seismic data set in the NW German Basin. Basin Research 19, 579-597.
- Lohrberg, A., Schwarzer, K., Unverricht, D., Omlin, A., Krastel, S. (2020): Architecture of tunnel valleys in the southeastern North Sea: new insights from high-resolution seismic imaging. Journal of Quaternary Science 35, 892-906.
- Lohrberg, A., Krastel, S., Unverricht, D., Schwarzer, K. (2022): The Heligoland Glacitectonic Complex in the southeastern North Sea: indicators of a pre-or early-Elsterian ice margin. Boreas 51, 100-117.
- Lotsch, D., Krutzsch, W., Mai, D., Kiesel, Y., Lazar, E. (1969): Stratigraphisches Korrelationsschema für das Tertiär der Deutschen Demokratischen Republik. Abhandlungen des Zentralen Geologischen Instituts 12.
- Lotsch, D. (1979): Entwicklungsbericht zur Standadisierungsaufgabe TGL 25 234/08. Stratigraphie: Stratigraphische Skala der DDR. Tertiär. Unveröffentlichter Bericht. Zentrales Geologisches Institut, Berlin.
- Lotsch, D. (1981): Fachbereichsstandard Tertiär. Korrelationstabelle der lithostratigraphischen Einheiten des Tertiärs. Stratigraphische Skala der DDR, Tertiär, TGL 25 234/08. Zentrales Geologisches Institut, Berlin.
- 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, 225-235.
- Makhnenko, R.Y., Podladchikov, Y.Y. (2018): Experimental poroviscoelasticity of common sedimentary rocks. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 123, 7586-7603.



- Markl, O. (2015): Minerale und Gesteine. Mineralogie Petrologie Geochemie. 3. Auflage. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Marschall, P., Cuss, R., Wieczorek, K., Popp, T. (2008): State of the art on gas transport in the tunnel nearfield/EDZ. Interium Report Deliverable 4.4.1, NF-PRO.
- Martin, C.D., Lanyon, G.W. (2003): Measurement of in-situ stress in weak rocks at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40, 1077-1088.
- Martini, E. (1971): Standard Tertiary and Quarternary calcareous nannoplankton zonation. In: Farinacci, H. (Ed.): Proceedings of the II. Planktonic Conference, Roma, 1970, 739-785.
- Martino, J.B., Martin, C.D. (1996): EDZ winnipeg workshop on designing the excavation disturbed zone for a nuclear repository in hard rock. Canadian Nuclear Society.
- Martino, J.B. (2003): The 2002 international EDZ workshop: the excavation damaged zone cause and effects. Report 06819-REP-01200-10105-R00. Atomic Energy of Canada Limited.
- Marty, N.C., Munier, I., Gaucher, E.C., Tournassat, C., Gaboreau, S., Vong, C.Q., Giffaut, E., Cochepin, B., Claret, F. (2014): Simulation of cement/clay interactions: feedback on the increasing complexity of modelling strategies. Transport in Porous Media 104, 385-405.
- Mattiat, B. (1979): Sedimentologische Berichte. Unveröffentlichter Bericht. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover.
- Maystrenko, Y.P., Bayer, U., Scheck-Wenderoth, M. (2005): Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements. International Journal of Earth Sciences 94, 799-814.
- Maystrenko, Y., Bayer, U., Brink, H.-J., Little, R. (2008): The Central European Basin System An overview. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Eds.): Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 16-34.
- Mazurek, M., Gautschi, A., Marschall, P., Vigneron, G., Lebon, P., Delay, J. (2008): Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. Physics and Chemistry of the Earth 33, 95-105.
- McCann, T. (1999): The tectonosedimentary evolution of the northern margin of the Carboniferous foreland basin of NE Germany. Tectonophysics 313, 119-144.
- Meinsen, J., Winsemann, J., Weitkamp, A., Landmeyer, N., Lenz, A., Dölling, M. (2011): Middle Pleistocene lake outburst floods in the Münsterland Embayment (NW Germany): impacts and magnitudes. Quaternary Science Reviews 30, 2597-2625.
- Menaceur, H., Delage, P., Tang, A.M., Conil, N. (2016a): On the thermo-hydro-mechanical behaviour of a sheared Callovo-Oxfordian claystone sample with respect to the EDZ behaviour. Rock Mechanics and Rock Engineering 49, 1875-1888.
- Menaceur, H., Delage, P., Tang, A.M., Conil, N. (2015): The thermo-mechanical behaviour of the Callovo-Oxfordian claystone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 78, 290-303.
- Ménard, G., Molnar P. (1988): Collapse of a Hercynian Tibetan Plateau into a late Palaeozoic European Basin and Range province. Nature 334, 235-237.
- Mengel, K. (2006): Einfluss der Temperaturerhöhung auf die mineralogischen und anorganisch-chemischen Eigenschaften von Kreide-Tonformationen (Apt). Abschlussbericht. Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe, Technische Universtität Clausthal-Zellerfeld. Clausthal-Zellerfeld, Deutschland.
- Mengel, K., Röhling, K-J., Geckeis, H. (2012) Endlagerung radioaktiver Abfälle. Teil 2 von 3. Die Wirtsgesteine: Tonstein, Granit, Steinsalz. Chemie in unserer Zeit 46, 208-217.



- Mengeling, H. (1989): Makroskopische Gesteinsansprache der Schichtenfolge in der Forschungsbohrung Wursterheide. In: Benda, L., Best, G., Bühmann, D., Cepek, P., Costa, L., Faber, E., Gramann, F., Haffe, W., Heilmann-Clausen, C., Hinsch, W., Hufnagel, H., Jürgens, U., Knox, R.W.O'B., Kockel, F., Kruzer, H., Kuster, H., Mattiat, B., Mengeling, H., Meyer, K.-J., Repsold, H., Reuter, G., Spiegler, D., Uffenorde, H., Wehner, H.: Forschungsbohrung Wursterheide. Geologisches Jahrbuch A 111, pp. 33-125.
- Methner, K., Lenz, O., Riegel, W., Wilde, V., Mulch, A. (2019): Paleoenvironmental response of midlatitudinal wetlands to Paleocene–early Eocene climate change (Schöningen lignite deposits, Germany). Climate of the Past 15, 1741-1755.
- Meyer, K.-D. (1982): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2524 Buxtehude. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p.120.
- Meyer, K.-D. (2009): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2830 Dahlenburg. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover, p.34.
- Minardi, A., Crisci, E., Ferrari, A., Laloui, L. (2016): Anisotropic volumetric behaviour of Opalinus clay shale upon suction variation. Géotechnique Letters 6, 144-148.
- Mitchell, J.K. (1992): Characteristics and mechanisms of clay creep and creep rupture. In: Güven, N., Pollastro, R.M. (Eds.): Clay water interface and its rheological implications. Clay Mineral Society, CMS Workshop Lectures 4, 212-244.
- Monke, H., Stoller, J. (1912): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Wriedel. [2927 Wriedel]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 49.
- Mohajerani, M., Delage, P., Monfared, M., Tang, A.M., Sulem, J., Gatmiri, B. (2011): Oedometric compression and swelling behaviour of the Callovo-Oxfordian argillite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 48, 606-615.
- Mohajerani, M., Delage, P., Sulem, J., Monfared, M., Tang, A.M., Gatmiri, B. (2012): A laboratory investigation of thermally induced pore pressures in the Callovo-Oxfordian claystone. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 52, 112-121.
- Mohajerani, M., Delage, P., Sulem, J., Monfared, M., Tang, A.M., Gatmiri, B. (2014): The thermal volume changes of the Callovo–Oxfordian claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering 47, 131-142.
- Mohr, M., Kukla, P., Urai, J., Bresser, G. (2005): Multiphase salt tectonics evolution in NW Germany: seismic interpretation and retro-deformation. International Journal of Earth Sciences 94, 917-940.
- Monfared, M., Sulem, J., Delage, P., Mohajerani, M. (2011): A laboratory investigation on thermal properties of the Opalinus claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering 44, 735.
- Monfared, M., Sulem, J., Delage, P., Mohajerani, M. (2012): On the THM behaviour of a sheared Boom clay sample: Application to the behaviour and sealing properties of the EDZ. Engineering Geology 124, 47-58.
- Monfared, M., Delage, P., Sulem, J., Mohajerani, M., Tang, A.M. (2013): Pressurisation thermique dans l'argile de Boom. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 3383-3386.
- Monke, H., Schroeder, H., Schucht, F. (1906): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Himmelpforten. [2321 Himmelpforten]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 47.
- Montes, H.G., Duplay, J., Martinez, L., Escoffier, S., Rousset, D. (2004): Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions. Applied Clay Science 25, 187-194.
- Morton, A.C., Friis, F., Geets, S., Kosmowska-Ceranowicz, B. (1988): 3.1 The heavy mineral distribution. In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 137-139.



- Müller, C. (1986): Ergebnisse der Nannoplankton-Bearbeitung im nordwestdeutschen Tertiärbecken. In: Tobien, H. (Hrsg.): Northwest Germany during the Tertiary. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 135-151.
- Müller, G. (1904a): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Lauenburg a. d. Elbe. [2629 Lauenburg (Elbe)]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 64.
- Müller, G. (1904b): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Lüneburg. [2728 Lüneburg]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 60.
- Müller, K., Polom, U., Winsemann, J., Steffen, H., Tsukamoto, S., Günther, T., Igel, J., Spies, T., Lege, T., Frechen, M., Franzke, H.-J., Brandes, C. (2020): Structural style and neotectonic activity along the Harz Boundary Fault, northern Germany: A multimethod approach integrating geophysics, outcrop data and numerical simulations. International Journal of Earth Sciences 109, 1811-1835.
- Müller, K., Winsemann, J., Tanner, D.C., Lege, T., Spies, T., Brandes, C. (2022): Glacially-Induced Faults in Germany. In: Steffen, H., Olesen, O. and Sutinen, R. (Eds): Glacially-Triggered Faulting, Cambridge University Press, pp. 283-303.
- Müller, S. (2000): Mikrofaunatische Gliederung des Ober-Oligozän in SW-Mecklenburg. In: von Bülow, W. (Hrsg.): Geologische Entwicklung SW-Mecklenburgs seit dem Ober-Oligozän. Schriftenreihe für Geowissenschaften 11, 61-77.
- Müller, S., Reinhardt, L., Franke, D., Gaedicke, C., Winsemann, J. (2018): Shallow gas accumulations in the German North Sea. Marine and Petroleum Geology 91, 139-151.
- Müller, U., Obst, K. (2008): Junge halokinetische Bewegungen im Bereich der Salzkissen Schlieven und Marnitz in Südwest-Mecklenburg. Brandenburger geowissenschaftliche Beiträge 15, 147-154.
- Muñoz, Y.A., Littke, R., Brix, M.R. (2007): Fluid system and basin evolution of the western Lower Saxony Basin. Geofluids 7, 335-355.
- Mutterlose, J., Ziegler, B. (2018): Einführung in die Paläobiologie Teil 1. Allgemeine Paläontologie. E, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart.
- NAGRA (2001): Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht. Technischer Bericht NTB 00-01, Textband und Beilagenband. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Wettingen.
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Technischer Bericht NTB 02-03. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Wettingen.
- NAGRA (2008): Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland. Technical Report 08-07. Nationale Genossen-schaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Wettingen.
- Naumann, M., Plischke, I. (2005): Geomechanical Properties of Callovo-Oxfordian Argillites from the Neuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory: rapport d'étude. R & D final disposal 9Y321407. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Nawrocki, P.A., Dusseault, M.B., Bratli, R.K., Xu, G. (1998): Assessment of some semi-analytical models for non-linear modelling of borehole stresses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 4, 522.
- Neerdael, B., Beaufays, R., Buyens, M., Bruyn, D.D., Voet, M. (1992): Geomechanical behaviour of Boom clay under ambient and elevated temperature conditions (No. EUR 14154). Commission of the European Communities.

- Nielsen, O.B. (1988): 3.4 The clay mineralogy in the eastern and southeastern part of the Tertiary North Sea Basin. In: Vinken, R. (Ed.): The Northwest European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 141-143.
- Nielsen, O.B., Rasmussen, E.S., Thyberg, B.I. (2015): Distribution of Clay minerals in the northern North Sea Basin during the Paleogene and Neogene: A result of source-area geology and sorting processes. Journal of Sedimentary Research 85, 562-581.
- Nielsen, S.B., Thomse, E., Hansen, D.L., Clausen, O.R. (2005): Plate-wide stress relaxation explains European Paleocene basin inversion. Nature 435, 195-198.
- Nielsen, S.B., Stephenson, R., Schiffer, C. (2014): Deep control on intraplate basin inversion. In: Talwani, P. (Ed.): Intraplate Earthquakes. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 257-274.
- Nitsch, A., Leuthold, J., Machaček, J., Wichtmann, T., Grandas Tavera, C.E. (2021): Experimental investigations of the stress-dependent swelling behavior of reconstituted claystone. 24. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Fachsektionstage Geotechnik 2021, Würzburg.
- Niu, G., Cui, Y.J., Pereira, J.M., Shao, L., Sun, D. (2021): Determining Bishop's parameter χ based on poresize distribution. Géotechnique Letters 11, 74-79.
- Odenwald, B., Hekel, U., Thormann, H. (2009): Grundwasserströmung–Grundwasserhaltung. In: Witt., K.J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren. 7., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Ernst & Sohn, Berlin, pp. 485-654.
- Økland, D., Cook, J.M. (1998): Bedding-related borehole instability in high-angle wells. Presented at the SPE/ISRM Conference on Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Eurock '98, Trondheim, Norway, 1989.
- Okrusch, M., Mtthes, S. (2014): Minerlogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 9. Auflage. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A., Alonso, E.E. (1994): Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. Transport in Porous Media 15, 271-293.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., Alonso, E.E. (1996): Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Engineering Computations 13, 87-112.
- Orellana, L.F., Scuderi, M.M., Collettini, C., Violay, M. (2018a): Do scaly clays control seismicity on faulted shale rocks? Earth and Planetary Science Letters 488, 59-67.
- Orellana, L.F., Scuderi, M.M., Collettini, C., Violay, M. (2018b): Frictional properties of Opalinus Clay: Implications for nuclear waste storage. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 123, 157-175.
- Osman, A., Pollok, L., Brandes, C., Winsemann, J. (2013): Sequence stratigraphy of a Paleogene coal bearing rim syncline: interplay of salt dynamics and sea-level changes, Schöningen, Germany. Basin Research 25, 675-708.
- Overeem, I., Weltje, G.J., Bishop-Kay, C., Kroonenberg, S.B. (2001): The Late Cenozoic Eridanos delta system in the Southern North Sea Basin: a climate signal in sediment supply? Basin Research 13, 293-312.
- Paaswell, R.E. (1967): Temperature effects on clay soil consolidation. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 93, 9-22.
- Panin, A., Astakhov, V., Komatsu, G., Lotsari, E., Lang, J., Winsemann, J. (2020): Middle and Late Quaternary glacial lake-outburst floods, drainage diversions and reorganization of fluvial systems in northwestern Eurasia. Earth-Science Reviews 201,103069.
- Pape, H., Clauser, C., Iffland, J. (1999): Permeability prediction based on fractal pore-space geometry. Geophysics 64, 1447-1460.



- Pardoen, B., Levasseur, S., Collin, F. (2015): Using local second gradient model and shear strain localisation to model the excavation damaged zone in unsaturated claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering 48, 691-714.
- Pardoen, B., Collin, F. (2016): Modelling the influence of strain localisation and viscosity on the behaviour of underground drifts drilled in claystone. Computers and Geotechnics 85, 3351-367.
- Pardoen, B., Collin, F., Bésuelle, P., Dal Pont, S., Cosenza, P., Desrues, J. (2019): Modelling clay rock behaviour from macro to micro scales (and back): deformation, rupture, and hydromechanical phenomena. 3SR seminar, Grenoble, France.
- Parisio, F., Vilarrasa, V., Laloui, L. (2018): Hydro-mechanical modeling of tunnel excavation in anisotropic shale with coupled damage-plasticity and micro-dilatant regularization. Rock Mechanics and Rock Engineering 51, 3819-3833.
- Pellenard, P., Deconinck, J.F. (2006): Mineralogical variability of Callovo-Oxfordian clays from the Paris Basin and the Subalpine Basin. Comptes Rendus Geoscience 338, 854-866.
- Petmecky, S., Meier, L., Reiser, H., Littke, R. (1999): High thermal maturity in the Lower Saxony Basin: Intrusion or deep burial? Tectonophysics 304, 317-344.
- Petschick, R. (2002): Röntgendiffraktometrie in der Sedimentologie (K5). In: Hüssner, H., Hinderer, M., Götz, A.E., Petschick, R. (ed.): Sediment. Schriftenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft 18, 99-118.
- Picard, J.M., Bazargan, B., Rousset, G. (1994): Essai thermohydro-mécanique dans une argile profonde -Essai CACTUS. EUR 15482 FR. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Pimentel, E. (1996): Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein. Dissertation. Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- Piotrowski, J.A. (1994): Tunnel-valley formation in northwest Germany geology, mechanisms of formation and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley. Sedimentary Geology 89, 107-141.
- Pouya, A. (2015): A finite element method for modeling coupled flow and deformation in porous fractured media. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 39, 1836-1852.
- Pouya, A., Yazdi, P.B. (2015): A damage-plasticity model for cohesive fractures. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 73, 194-202.
- Pytte, A.M., Reynolds, R.C. (1989): Ther thermal transformation of smectite to illite. In: Naer, M.C., McCulloh, T.H. (eds.): Thermal History of Sedimentary Basins, pp. 133-140.
- Räss, L., Makhnenko, R.Y., Podladchikov, Y., Laloui, L. (2017): Quantification of viscous creep influence on storage capacity of caprock. Energy Procedia 114, 3237-3246.
- Reinhold, K., Krull, P., Kockel, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands, 1: 500.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Reinhold, K., Jahn, S. Kühnlenz, T., Ptock, L., Sönnke, J. (2013): F+E Endlagerung, Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW Endlagerstandort in Tonstein (AnSichT). Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT), Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. Zwischenbericht. Stand 02.01.2013. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Rice, J.R. (1975): On the stability of dilatant hardening for saturated rock masses. Journal of Geophysical Research 80, 1531-1536.
- Riegel W., Wilde, V., Lenz, O.K. (2012): The Early Eocene of Schöningen (N-Germany) an interim report. Austrian Journal of Earth Sciences 105, 88-109.
- Ritzkowski, S. (1990): Marine Ingressionen in den terrestrischen Sedimentfolgen des Eozäns von Helmstedt, SE-Niedersachsen. Veröffentlichungen aus dem Übersee-Museum Bremen A 10, 113-118.



- Ritzkowski, S. (1999): Ergebnisse von Bohrungen aus dem Oberoligozän des Hildesheimer Waldes bei Diekholzen. In: Rust, J. (Hrsg.): Das Oberoligozän von Diekholzen bei Hildesheim, Bodenburg und den Eichteichen bei Neuhof/Lamspringe. Mitteilungen des Roemer-Museum Hildesheim N.F. 7, pp. 5.
- Rodon, S., Littke, R. (2005): Thermal maturity in the Central European Basin system (Schleswig-Holstein area): results of 1D basin modelling and new maturity maps. International Journal of Earth Sciences 94, 815-833.
- Röhling, H.-G. (2004): 3.7.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Meyer, K.-D. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2730 Bleckede. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 56-60.
- Roskosch, J., Winsemann, J., Polom, U., Brandes, C., Tsukamoto, S., Weitkamp, A., Bartholomäus, W.A., Henningsen, D., Frechen, M. (2015): Luminescence dating of ice-marginal deposits in northern Germany: evidence for repeated glaciations during the Middle Pleistocene (MIS 12 to MIS 6). Boreas 44, 103-126.
- Rudolph, M., Orgass, M., Schneider, J., Lorenz, H., Reichel, S. Schmidt, J. (2021): Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalten aus Stahlbeton. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Brücken- und Ingenieurbau Heft B 173. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, p.153.
- Rühberg, N., Schulz, W., von Bülow, W., Müller, U., Krienke, H.-D., Bremer, F., Dann, T. (1995): V. Mecklenburg-Vorpommern. In: Benda, L. (Ed.): Das Quartär Deutschlands. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 95-115.
- Rummel, F., Weber, U. (2002): Sondierbohrung Benken: Ergänzende gesteinsphysikalische Untersuchungen – Triaxiale Druckversuche zur Hohlraumstabilität. Unveröffentlichter Bericht. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Wettingen.
- Rutqvist, J., Barr, D., Datta, R., Gens, A., Millard, A., Olivella, S., Tsang, C.F., Tsang, Y. (2005): Coupled thermal–hydrological–mechanical analyses of the Yucca Mountain Drift Scale Test—Comparison of field measurements to predictions of four different numerical models. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42, 680-697.
- Sánchez, M., Gens, A., Guimarães, L., Olivella, S. (2005): A double structure generalized plasticity model for expansive materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 29, 751-787.
- Sánchez, M., Gens, A., Guimarães, L., Olivella, S. (2008): Implementation algorithm of a generalised plasticity model for swelling clays. Computers and Geotechnics 35, 860-871.
- Sarout, J., Molez, L., Guéguen, Y., Hoteit, N. (2007): Shale dynamic properties and anisotropy under triaxial loading: Experimental and theoretical investigations. Physics and Chemistry of the Earth 32, 896-906.
- Sarout, J., Guéguen, Y. (2008): Anisotropy of elastic wave velocities in deformed shales: Part 1 Experimental results. Geophysics 73, D75-D89.
- Sattler-Kosinowski, S., Streif, H. (1985): 3.7 Tertiär. In: Streif, H. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2314 Hooksiel. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 24-30.
- Savage, D., Benbow, S., Watson, C., Takase, H., Ono, K., Oda, C., Honda, A. (2010): Natural systems evidence for the alteration of clay under alkaline conditions: an example from Searles Lake, California. Applied Clay Science 47, 72-81.
- Schad, A. (1947): Neue stratigraphische Ergebnisse im nordwestdeutschen Tertiär. Jahrbuch der Naturhistorischen Gesellschaft 94-98, 42-68.



- Schegg, R., Leu, W. (1996): Clay Mineral Diagenesis and Thermal History of the Thonex Well, Western Swiss Molasse Basin. Clays and Clay Minerals 44, 693-705.
- Scheck, M., Bayer, U., Otto, V., Lamarche, J., Banka, D., Pharaoh, T. (2002): The Elbe Fault System in North Central Europe - a basement controlled zone of crustal weakness. Tectonophysics 360, 281-299.
- Scheck-Wenderoth, M., Lamarche, J. (2005): Crustal memory and basin evolution in the Central European Basin System - new insights from a 3D structural model. Tectonophysics 397, 143-165.
- Scheck-Wenderoth, M., Maystrenko, Y., Hübscher, C., Hansen, M., Mazur, S. (2008): Dynamics of salt basins. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Eds): Dynamics of Complex Intracontinental Basins - The Central European Basin System. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 307-322.
- Schmitz, J. (1985a): 3.5.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Meyer, K.-D. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2626 Stelle. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 19-21.
- Schmitz, J. (1985b): 3.5.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Höfle, H.-C. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2726 Hanstedt. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 18-20.
- Schmitz, J. (1987): 3.5.1 Alttertiär (Paläogen, tpg). In: Merkt, J. (Hrsg.): Geologische Karte von Niedersachsen 1: 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2727 Salzhausen. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, pp. 17-19.
- Schroeder, H. (1906): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Lamstedt. [2320 Lamstedt]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 35.
- Schroeder, H., Stoller, J., Wolff, W. (1913): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Wedel. [2424 Wedel]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 43.
- Schucht, F. (1909a): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Altenwalde und die Insel Neuwerk. [2117 Cuxhaven]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 63.
- Schucht, F. (1909b): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Midlum. [2217 Nordholz]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 16.
- Schucht, F. (1912): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Langeoog. [2211 Langeoog Ost]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 44.
- Schucht, F., Schroeder, H. (1906): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Kadenberge. [2220 Cadenberge]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 59.
- Schuck, B., Kneuker, T. (2021): Claystone formations in Germany: what we (don't) know about them and how we can change this. Safety of Nuclear Waste Disposal 1, 47-48.
- Schulz, R. (2002): Forschungsbohrungen des GGA-Instituts. Zeitschrift für angewandte Geologie 48, 3-8.
- Schulz, R., Suchi, E., Öhlschgläger, D., Dittmann, J., Knopf, S., Müller, C. (2013): Geothermieatlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- Senglaub, Y., Littke, R., Brix, M.R. (2006): Numerical modelling of burial and temperature history as an approach for an alternative interpretation of the Bramsche anomaly, Lower Saxony Basin. International Journal of Earth Sciences 95, 204-224.



- Seyedi, D., Armand, G., Conil, N., Vitel, M., Vu, M.N. (2017a): On the thermo-hydro-mechanical pressurization in Callovo-Oxfordian claystone under thermal loading. Poromechanics VI, 754-761.
- Seyedi, D.M., Armand, G., Noiret, A. (2017b): "Transverse Action"–A model benchmark exercise for numerical analysis of the Callovo-Oxfordian claystone hydromechanical response to excavation operations. Computers and Geotechnics 85, 287-305.
- SGD (2021): Fachliche Position der Staatlichen Geologischen Dienste von Berlin, Brandenburg, Bremen, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zur Ausweisung des Teilgebietes "Tertiäres Tongestein" im Zwischenbericht Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH vom 28.09.2020. Staatliche Geologische Dienste (SGD), 01. Februar 2021.
- Shao, J.F., Zhu, Q.Z., Su, K. (2003): Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation. Computers and Geotechnics 30, 549-555.
- Shao, J.F., Chau, K.T., Feng, X.T. (2006): Modeling of anisotropic damage and creep deformation in brittle rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 43, 582-592.
- Shaw, R.P. (2015): The fate of repository gases (FORGE) project. In: Shaw, R.P. (Ed.): Gas Generation and Migration in Deep Geological Radioactive Waste Repositories. Society, London, Special Publications 415, pp. 1-7.
- Shi, H.L., Hosdez, J., Rougelot, T., Xie, S.Y., Shao, J.F., Talandier, J. (2021): Influences of structural anisotropy and heterogeneity on three-dimensional strain fields and cracking patterns of a clay-rich rock. Acta Geotechnica, 1-13.
- Sirocko, F., Reicherter, K., Lehné, R., Hübscher, C., Winsemann, J., Stackebrandt, W. (2008): Glaciation, salt and the present landscape. In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D., Nelskamp, S. (Eds.): Dynamics of Complex Intracontinental Basins – The Central European Basin System. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 233-245.
- Smit, J., Van Wees, J.-D., Cloetingh, S. (2016): The Thor Suture zone: From subduction to intraplate basin setting. Geology 44, 707–710.
- Song, Y., Davy, C.A., Bertier, P., Skoczylas, F., Talandier, J. (2017): On the porosity of COx claystone by gas injection. Microporous and Mesoporous Materials 239, 272-286.
- Stackebrandt, W. (2004): Zur Neotektonik in Norddeutschland. Zeitschrift für geologische Wissenschaften 32, 85-95.
- Stackebrandt, W. (2005): Neotektonische Aktivitätsgebiete in Brandenburg (Norddeutschland). Brandenburger Geowissenschaftliche Beiträge 12, 165-172.
- Stackebrandt, W. (2009) Subglacial channels of Northern Germany a brief review. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 60, 203-210.
- Staesche, K., Hiltermann, H. (1940): Mikrofaunen aus dem Tertiär Nordwestdeutschlands. Abhandlung Reichsstelle Bodenforschung NF. 201, Berlin.
- Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C. (1968): Rock Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons Ltd, London-New York-Sydney-Toronto.
- Stahr, M., du Puits, J., Pfestorf, K.H. (2013): Praxiswissen Bausanierung: Erkennen und Beheben von Bauschäden. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Standke, G., Blumenstengel, H., von Bülow, W. (2005): Das Tertiär Ostdeutschlands in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsletters on Stratigraphy 41, 323-338.
- Standke, G. (2008): Paläogeographie des älteren Tertiärs (Paleozän bis Untermiozän) im mitteldeutschen Raum. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 159, 81-108.



- Standke, G. (2015): Tertiär. In: W. Stackebrandt, D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. Schweizerbart, Stuttgart, 259-333.
- Stein, S. (2007): Approaches to continental intraplate earthquake issues, in Continental Intraplate Earthquakes. The Geological Society of America, Special Paper 425, 1-16.
- Steinmetz, D., Winsemann, J., Brandes, C., Ullmann, A., Siemon, B., Wiederhold, H., Meyer, U. (2015): Towards an improved interpretation of airborne electromagnetic data: a case study from the Cuxhaven tunnel valley and its Neogene host sediments (northwest Germany). Netherlands Journal of Geosciences 94, 201-227.
- Stephan, H.-J. (1995): I. Schleswig-Holstein. In Benda, L. (Ed.): Das Quartär Deutschlands. Gebrüder Bornträger, Berlin-Stuttgart, pp. 1-13.
- Stober, I., Bucher, K. (2012): Geothermie. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Stoller, J. (1910): Geologisch-agronomische Karte der Gegend östlich von Verden a. d. Aller nebst Erläuterungen [3021 Verden (Aller)]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 36.
- Stoller, J. (1915a): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Sülze. [3226 Sülze]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 60.
- Stoller, J. (1915b): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Eschede. [3227 Eschede]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 65.
- Stollhofen, H., Bachmann, G.H., Barnasch, J., Bayer, U., Beutler, G., Franz, M., Kästner, M., Legler, B., Mutterlose, J., Radies, D. (2008): Upper Rotliegend to Early Cretaceous basin development. In: Littke, R.; Bayer, U.; Gajewski, D.; Nelskamp, S. (Eds.), Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 181-210.
- Streif, H. (1981): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2414 Wilhelmshaven. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 111.
- Streif, H. (1993): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2516 Nordenham. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 139.
- Streif, H. (1998): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 2716 Elsfleth. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p. 177.
- Stremme, H., Aronio, B. (1911): Die Bestimmung des Gehaltes anorganischer Kolloide in zersetzten Gesteinen und deren tonigen Umlagerungsprodukten. Zeitschrift für praktische Geologie 19, 1-329.
- Šucha, V., Kraust, I., Gerthofferová, H., Peteš, J., Sereková, M. (1993): Smectite to illite conversion in bentonites and shales of the East Slovak basin. Clay Minerals 28, 243-253.
- Sultan, N., Delage, P., Cui, Y.J. (2002): Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay. Engineering Geology 64, 135-145.
- Sun, Z., Mehmani, A., Torres-Verdín, C. (2021): Pore-Scale Investigation of the Electrical Resistivity of Saturated Porous Media: Flow Patterns and Porosity Efficiency. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 126, e2021JB022608.
- Susin, G. (1979): Abschlußbericht für das Teilprojekt B: NW-deutsches Tertiärbecken im Schwerpunktprogramm "Geologische Korrelationsforschung". Bohrlochdiagramm-Korrelation. Unveröffentlichter Bericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGT), Hannover.
- Tafili, M. (2020): On the Behaviour of Cohesive Soils: Constitutive Description and Experimental Obersations. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.
- Tanner, B., Meissner, R. (1996): Caledonian deformation upon southwest Baltica and its tectonic implications: alternatives and consequences. Tectonics 15, 803-812.
- Tao, M., Li, X., Wu, C. (2012): Characteristics of the unloading process of rocks under high initial stress. Computers and Geotechnics 45, 83-92.



- Ten Veen, J.H & Bakker, M. (2021): Wechselwirkung zwischen subglazialen Rinnen und Salzstrukturen in den Niederlanden – Konsequenzen für Speicherpotenzial. Vortrag auf dem BGR Workshop "Subglaziale Rinnen", 9-10 Dezember 2021, Hannover.
- Thöle, H., Gaedicke, C., Kuhlmann, G., Reinhardt, L. (2014): Late Cenozoic sedimentary evolution of the German North Sea–A seismic stratigraphic approach. Newsletter on Stratigraphy 47, 299-329.
- Thomas, H.R., Cleall, P.J., Hashm, A.A. (2001): Thermal/Hydraulic/Chemical/Mechanical (THCM) behaviour of partly saturated soil. Proceedings of 10th Computer Methods & Advances on Geomechanics, Tucson. A.A. Balkema, Rotterdam. 743-748.
- Thomas, H.R., Cleall, P.J. (1998): Coupled thermo hydraulic mechanical behaviour of unsaturated soil, including expansive clays. In: Pusch, R. (Ed.): Workshop on Microstructural Modelling of Natural and Artificially Prepared Clay Soils with Special Emphasis on the Use of Clays for Waste Isolation, Lund, Sweden, 86-93.
- Thomas, H.R., He, Y. (1995): An analysis of coupled heat, moisture and air transfer in a deformable unsaturated soil. Géotechnique 45, 677-689.
- Thury, M. (2002): The characteristics of the Opalinus Clay investigated in the Mont Terri underground rock laboratory in Switzerland. Comptes Rendus Physique 3, 923-933.
- Thyberg, B., Jahren, J. (2011): Quartz cementation in mudstones: sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial. Petroleum Geoscience 17, 53-63.
- Tian, H., Ziegler, M., Kempka, T. (2014): Physical and mechanical behavior of claystone exposed to temperatures up to 1000°C. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 70, 144-153.
- Tietze, O. (1910): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Baccum. [3410 Lingen (Ems) Ost]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 48.
- Tidfors, M., Sällfors, G. (1989): Temperature effect on preconsolidation pressure. Geotechnical Testing Journal 12, 93-97.
- Tissot, B., Welte, H. (1984): Petroleum formation and occurence. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Torsvik, T. H., Rehnström. E. F. (2003): The Tornquist Sea and Baltica Avalonia docking. Tectonophysics 362, 67-82.
- Torsvik, T.H., Cocks, L.R. (2017): Earth History and Palaeogeography. Cambridge University Press, Cambridge.
- Toucanne, S., Zaragosi, S., Bourillet, J.F., Gibbard, P.L., Eynaud, F., Giraudeau, J., Turon, T.L., Cremer, M., Cortijo, E., Martinez, P., Rossignol, L. (2009): A 1.2 Ma record of glaciation and fluvial discharge for the west European Atlantic margin. Quaternary Science Reviews 28, 2974-2981.
- Towhata, I., Kuntiwattanaku, P., Seko, I., Ohishi, K. (1993): Volume change of clays induced by heating as observed in consolidation tests. Soils and Foundations 33, 170-183.
- Tran, E.L., Teutsch, N., Klein-BenDavid, O., Weisbrod, N. (2018): Uranium and Cesium sorption to bentonite colloids under carbonate-rich environments: Implications for radionuclide transport. Science of the Total Environment 643, 260-269.
- Tsang, C.-F., Bernier, F. (2005): Definitions of excavation disturbed zone and excavation damaged zone. In: Davies, C., Bernier, F. (Eds.): Impact of the Excavation Disturbed Zone (EDZ) on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories. EUR 21028 EN. Proceedings of a European Commission Cluster Conference and Workshopn Luxembourg, 3 to 5 November 2003, pp. 7-8.

- Tsang, C.-F., Jing, L., Stephansson, O., Kautsky, F. (2005): The DECOVALEX III project: a summary of activities and lessons learned. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 42, 593-610.
- Utada, K. (1965): Zonal distribution of authigenic zeolites in the Tertiary pyroclastic rocks in Nogami district, Yamagata Prefecture. University of Tokyo, Science Paper of the Collegiums General Education 15, 173-216.
- Valeton, I., Abdul-Razzak, A. (1974): The glauconite of the Middle Miocene (Hemmor-Stufe) from Vechta (North Germany) with special consideration of the characteristics of the potassium in view of radiometric dating. Neues Jahrbuch für Mineralogie Jahrgang 1973, 289-312.
- Van den Bosch, M., Cadee, M.C., Janssen, A.W. (1975): Lithostratigraphical and biostratigraphical subdivision of Tertiary deposits (Oligocene-Pliocene) in the Winterswijk Almelo region (eastern part of the Netherlands). Scripta Geologica 29, 1-167.
- Van Wees, J.D., Stephenson, R.A. Ziegler, P.A., Bayer, U., McCann, T., Dadlez, R., Gaupp, R., Narkiewicz, M., Bitzer, F., Scheck, M. (2000): On the origin of the Southern Permian Basin, Central Europe. Marine and Petroleum Geology 17, 43-59.
- Vergara Quezada, M. (2019): Experimental and Numerical Investigations on the Swelling Behavior of Claystone and Sulfate Rock. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie.
- Verweij, J.M., Nelskamp, S.N., Ten Veen, J.H., De Bruin, G., Geel, K., Donders, T.H. (2018): Generation, migration, entrapment and leakage of mivrobial gas in the Dutch part of the Southern North Sea. Marine and Petroleum Geology 97, 493-516.
- Villaescusa, E., Windsor, C.R., Li, J., Baird, G., Seto, M. (2003): Stress measurements from cored rock. Research Report 233. Minerals and Energy Research Institute of Western Australia.
- Vinken, R. (1988): International Geological Correlation Programme. The Northwest European Tertiary Basin: Results of the International Geological Correlation Programme Project No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, 1-508.
- Vinsot, A., Mettler, S., Wechner, S. (2008): In situ characterization of the Callovo-Oxfordian pore water composition. Physics and Chemistry of the Earth 33, 75-86.
- Vis, G.-J., Verweij, H., Koenen, M. (2016): The Rupel Clay Member in the Netherlands: towards a comprehensive understanding of its geometry and depositional environment. Netherlands Journal of Geoscience 95, 221-251.
- Vizgirda, J., O'Brien, J.J., Lerche, I. (1985): Thermal anomalies on the flank of a salt dome. Geothermics 14, 553-565.
- Vogt, J., Grünthal, G. (1994): Die Erdbebenfolge vom Herbst 1612 im Raum Bielefeld. Geowissenschaften 12, 236-240.
- Voigt, S., Wagereich, M., Surlxk, F., Walaszcyk, I., Uličný, D., Čech, S., Voigt, T., Wiese, F., Wilmsen, M., Niebuhr, B., Reich, M., Funk, H., Michalík, J., Jagt, J.W.M., Felder, P.J., Schulp, A.S. (2008): Cretaceous. In: McCann, T. (Ed.): Geology of Central Europe. Volume 2: Mesozoic and Cenozoic. Geological Society of London, London, 923-997.
- von Bülow, W., Müller, S. (2004): Tertiär. In: Katzung, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart, pp. 197-220.
- von Daniels, C.H. von, Gramann, F. (1988): The Federal Republic of Germany (Lower Rhine Embayment, Lower Saxony, Schleßwig-Holstein). In: Vinken, R. (Ed.): The Northwet European Tertiary Basin – Results of the International Geological Correlation Programm No. 124. Geologisches Jahrbuch A 100, pp. 201-213.
- Voss, H.-H. (1991): Geologische Karte von Niedersachsen 1 : 25 000. Erläuterungen zu Blatt Nr. 3321 Nienburg. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), Hannover, p.104.

- Wanninger (-Huber), T. (2020): Experimental investigations for the modelling of anhydritic swelling claystones. Dissertation. ETH Zürich.
- Warsitzka, M., Jähne-Klingberg, F., Kley, J., Kukowski, N. (2019): The timing of salt structure growth in the Southern Permian Basin (Central Europe) and implications for basin dynamics. Basin Research 31, 337-360.
- Weaver, C.E. (1989): Clays, Muds, and Silts. Developments in Sedimentology 44. Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Wenau, S., Alves, T.M. (2020): Salt-induced crestal faults control the formation of Quaternary tunnel valleys in the southern North Sea. Boreas 49, 799-812.
- Weng, M.C., Jeng, F.S., Hsieh, Y.M., Huang, T.H. (2008): A simple model for stress-induced anisotropic softening of weak sandstones. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 45, 155-166.
- Wermeille, S., Bossart, P. (1999): In-situ stresses in the Mont Terri region-data compilation. Mont Terri Project: Technical Report 99-02.
- Whiticar, M., Faber, E., Schoell, M. (1986): Biogenic methane formation in marine and freshwater environments: CO₂ reduction vs. Acetate fermentation-Isotope evidence. Geochimica et Cosmochimica Acta 50, 693-709.
- Whiticar, M. (1994): Correlation of natural gases with their sources. In: Magoon, L., Dow, W. (Eds.): The Petroleum System- From Source to Trap. American Association of Petroleum Geology Memoir 60, pp. 261-284.
- Whiticar, M.J. (1999): Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. Chemical Geology 161, 291-314.
- Wileveau, Y. (2005): THM behaviour of host rock (HE-D) experiment: Progress report. Part 1. Mont Terri Project: Technical Report TR 2005-03.
- Wileveau, Y., Rothfuchs, T. (2007): THM behaviour of host rock (HE-D experiment). Study of thermal effects on Opalinus Clay. Mont Terri Project: Technical Report 2006-01.
- Winsemann, J, Alho, P., Laamanen, L., Goseberg, N., Lang, J., Klostermann, J. (2016): Flow dynamics, sedimentation and erosion of glacial lake outburst floods along the Middle Pleistocene Scandinavian ice sheet (northern Central Europe). Boreas 45, 260-283.
- Winsemann, J., Lang, J. (2020): Flooding Northern Germany: Impacts and Magnitudes of Middle Pleistocene Glacial Lake-Outburst Floods. In: Herget J., Fontana A. (Eds.): Palaeohydrology. Geography of the Physical Environment. Springer, Cham, pp. 29-47.
- Winsemann, J., Koopmann, H., Tanner, D.C., Lutz, R., Lang, J., Brandes, C., Gaedicke, C. (2020): Seismic interpretation and structural restoration of the Heligoland glaciotectonic thrust-fault complex: implications for multiple deformation during (pre-)Elsterian to Warthian ice advances into the southern North Sea Basin. Quaternary Science Reviews 227, 106068.
- Wildvang, D. (1935): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten. Blatt Aurich, Holtrop und Hesel. [2510 Aurich, 2511 Ostgroßefehn, 2611 Hesel]. Königliche Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 47.
- Wirtz, D. (1939): Das Alttertiär in Schleswig-Holstein. Neues Jahrbuch Mineralogie und Paläontologie 81 B, 215-297.
- Wolf, M. (1988): Torf und Kohle. In: Füchtbauer, H. (Hrsg.): Sedimente und Sedimentgesteine. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart, pp. 683-730.
- Wolff, W. (1934): Erläuterungen zur geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern. Blatt Bremen. [2918 Bremen]. Preußische Geologische Landesanstalt, Berlin, p. 42.



- Xu, W., Shao, H., Marschall, P., Hesser, J., Kolditz, O. (2013): Analysis of flow path around the sealing section HG-A experiment in the Mont Terri Rock Laboratory. Environmental Earth Sciences 70, 3363-3380.
- Yang, D., Bornert, M., Chanchole, S., Wang, L., Valli, P., Gatmiri, B. (2011): Experimental investigation of the delayed behavior of unsaturated argillaceous rocks by means of Digital Image Correlation techniques. Applied Clay Science 54, 53-62.
- Yang, D., Chanchole, S., Valli, P., Chen, L. (2013): Study of the anisotropic properties of argillite under moisture and mechanical loads. Rock Mechanics and Rock Engineering 46, 247-257.
- Yang, J., Fall, M., Guo, G. (2020): A three-dimensional hydro-mechanical model for simulation of dilatancy controlled gas flow in anisotropic claystone. Rock Mechanics and Rock Engineering 53, 4091-4116.
- Yarushina, V.M., Podladchikov, Y.Y., Connolly, J.A. (2015): (De) compaction of porous viscoelastoplastic media: Solitary porosity waves. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 120, 4843-4862.
- Yong, S., Loew, S., Schuster, K., Nussbaum, C., Fidelibus, C. (2017): Characterisation of excavation-induced damage around a short test tunnel in the Opalinus Clay. Rock Mechanics and Rock Engineering 50, 1959-1985.
- Youssef, M.S. (1961): Temperature changes and their effects on some physical properties of soils. Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE) 1, 419-421.
- Zeelmaekers, E., Honty, M., Derkowski, A., Środo´n, J., De Craen, M., Vandenberghe, N., Adriaens, R., Ufer, K., Wouters, L., (2015): Qualitative and quantitative mineralogical composition of the Rupelian Boom Clay in Belgium. Clay Mineralogy 50, 249–272.
- Zhang, C.L. (2011): Experimental evidence for self-sealing of fractures in claystone. Physics and Chemistry of the Earth 36, 1972-1980.
- Zhang, F., Xie, S.Y., Hu, D.W., Shao, J.F., Gatmiri, B. (2012): Effect of water content and structural anisotropy on mechanical property of claystone. Applied Clay Science 69, 79-86.
- Zhang F, Hu D.W., Xie S.Y., Shao J.F. (2014): Influences of temperature and water content on mechanical property of argillite. European Journal of Environmental and Civil Engineering 18, 173–189.
- Ziegler, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. The Hague (Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V.). 2nd and completely revised edition. Production by Shell, The Hague, distribution by Elsevier, Amsterdam.
- Ziegler, P.A., Schumacher, M.E., Dèzes P., van Wees, J.D., Cloetingh, S. (2004): Post-Variscan evolution of the lithosphere in the Rhine Graben area: Constraints from subsidence modelling 2004. In: Wilson, B.M. (Ed.): Permo-Carboniferous Magmatism and Rifting in Europe. Geological Society Special Publication 223, pp. 289-317.
- Zienkiewicz, O.C. (1977): The finite element method. McGraw-Hill, London.
- Zilch, K., Diederichs, C.J., Katzenbach, R., Beckmann, K.J. (2013): Konstruktiver Ingenieurbau und Hochbau. In: Zilch K., Diederichs C., Katzenbach R., Beckmann K. (Hrsg.): Konstruktiver Ingenieurbau und Hochbau. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 966-1490.
- Zimmerle, W., Kuster, H., Nöltner, T. (1990): Sedimente des höheren Oligozäns bis tiefen Miozäns mit vulkanoklastischen Einschaltungen aus dem Raum zwischen Weser-Aller und Elbe. Veröffentlichungen aus dem Übersee-Museum Bremen A10, 119-177.



Appendix

Tab. A.1 Inventarisierungstabelle der Erläuterungen der Geologischen Karte 1:25.000 von Niedersachsen. Inventarisiert wurden die Kartenblätter, die sich mit dem Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg und der Landesfläche von Niedersachsen, Bremen und Hamburg überschneiden.

Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
2117	Cuxhaven West	t	168 - ?823 m	655 m	Ton (Londonton?), feinkörnig, kalkfrei bis kalkig; Feinsand, fossilführend (Bruchstücke von Conchylien);	Schucht (1909a),
				Basis Paläogen	Bohrung südlich Altenwalde.	Kuster (2005)
				nicht erreicht		
		t	252 - 438 m	186 m	Ton, einzelne Feuersteine; Tonmergel; Kies, Komponenten aus Feuersteinen und Phosphoriten, fos-	
				Basis Palaogen	silfuhrend (Bruchstucke von Kreidefossilien), Schwefelkies-Knollen bei 340 m; Bohrung nahe Doser	
		1	047 047	bei 438 m	Seedeich.	
		teou4	217 - 247 m u. N.N.	30 m	Bonrung DE96. Keine Beschreibung.	
2118	Cuxhaven	teou4	376 - 386 m u. N.N.	10 m	Bohrung UE111. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
2119	Otterndorf	t		200 - 1100 m	Tonstein, tlw. Tufflagen; Bohrungen Neuhaus 1 und Osterbruch 1.	Jaritz (1975a)
2120	Brunsbüttel	t		200 - 900 m	Tonstein, enthält tlw. Tufflagen; Bohrung Neuhaus 1;	Jaritz (1975b)
2211	Langeoog Ost				Erwähnung tiefer Bohrungen bei Aurich mit Braunkohle und Quarzsanden bei 90 m (Miozän?).	Schucht (1912)
2217	Nordholz	tolm	344 - 346 m u. N.N.	2 m	Neuengammer Gassand; Bohrung GE15. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
2218	Wanna	teou4	311 - 327 m u. N.N.	16 m	UE4 B-3-Zone; Bohrung UE89. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
		teou4	206 - 231 m	25 m	Bohrung UE103. Keine Bescheibung.	
			u. N.N.			
2220	Cadenberge	tmi				Schucht & Schro-
				min 6 m im Auf-		eder (1906),
				schluss		Kuster (2005)
		tmim				
		tmio				
		teo			Ton , grün, glaukonithaltig, tlw. Sand und kieseliger Sandstein ; kalkige Konkretionen mit Septarien, tlw. aragonitische Spaltenfüllungen und Schwerspat, fossilführend (Krebse, u. a. <i>Xanthopsis Leachi DES-MAREST</i>): Aufschlussbeschreibung aus der Tongrube der Alten Zementfabrik Hemmoor	
		teou3	121 - 194 m u. N.N.	73 m	UE3 patagonica-Zone; Bohrung UE119. Keine Beschreibung.	
2310	Dornum				Helle Quarzkiese/Quarzsande in 80 m Tiefe in einer Bohrung bei der Molkerei Dornum; evtl. Braun- kohleformation des Miozän.	Gagel & Schucht (1919)
2314	Hooksiel	tolo -		ca. 200 m	Sand (Neuengammer Gassand), glaukonithaltig, darüber Ton/Tonstein bis Mergelstein , wechselnder Schluff- und Feinsandgehalt, glaukonithaltig, tlw. tritt Glaukonit in Nestern auf, glimmerhaltig, partien-	Sattler-Kosinowski & Streif (1985),
		tolm			weise bituminös und humos.	Knox (1984),
		tolu			fehlt unter der Rupel-Transgression (Best, 1985).	Best (1985)
		teoo			Tonmergel, graugrün.	
		teom			Ton, sandig, kalkig, wechsellagernd mit Sand, tonig, Brüssel-Sand bzw. "obereozäner Kalksandstein"	
					[alte Gliederung, gemeint ist teom](karbonatische Sandeinheit); Leithorizont (Knox, 1984).	
		teou		ca. 350 m	Ton/Tonstein, meist sandfrei, glaukonithaltig, schwach glimmerhaltig, tlw. violette Tufflagen, schwach	
					kalkig bis kalkig, tlw. kalkfrei; Bohrung Rüstringen 1.	
		tpa		30 - 40 m	Tonige Sedimente, tpao; tpau-"tpam" fehlen vollständig.	



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
2318	Drangstedt	t			Hauptsächlich Ton; Kalksandstein, feinkörnig, teoo; Bohrung Westerwanna 1001, UE113.	Jaritz (1973),
		teou4	152 - 161 m	9 m	UE4 B-3-Zone; Bohrung UE73. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
			u. N.N.			
2320	Lamstedt	t			Septarienfragmente und Gipskristalle. Grube westlich von Heeßel und Gruben am Südfuß des Hollbe-	Schroeder (1906),
					cker Berges.	Kuster (2005)
		teom	239 - 251 m	12 m	OE B-4-Zone; Bohrung UE128. Keine Beschreibung	
			u. N.N.			
		teo?			Sand, weiß, schwach glaukonithaltig. Nordlich von Lamstedt.	
					Ton, intensiv grun; Sand/Sandstein, intensiv grun, enthalt glaukonithaltige kieselige Sandsteinbruch-	
					stucke, rossinunrend (schiecht ernaten, z. B. Scapnander lignarius L.), verwittert zu eisenschussigem	
					Ton. Usuich von Lamstedt. Euzah oder Milozah.	
					braukonie. Laut Oberbeigant Claustrial wurde an meinteren Stellen Braukonie erbonit, es lagen	
2221	Himmolnforton	+			aber keine weiterein Daten zu diesen vorkommen vor.	Monko ot al
2321	rinnineipiorten	Ľ			Steinkerne erhaltene (astronoden) Grude am Bahnhof Basherk-Osten: Bohrung IIE126	(1906)
		teom	90 - 137 m	47 m	OE (Fozin 5): Bohrung LIE22, Keine Beschreibung	Kuster (2005)
			U. N.N.			
		teou4	184 - 190 m	6 m	Bohrung UE16. Keine Beschreibung.	
			u. N.N.	• • • •		
2414	Wilhelmshaven	tpl				Streif (1981),
		tmi				Häntzschel et al.
		tol		~ 200 m	Ton/Tonstein bis Mergelstein, wechselnde Schluff- und Feinsandgehalte, mäßig bis stark glaukonithal-	(1941)
					tig (tritt z. T. in Nestern auf), glimmerhaltig, pyrithaltig, partienweise bituminös und humos, fossilführend.	
		teom		5 - 130 m	Ton, sandig, kalkhaltig, wechsellagernd mit Sand, tonig; Tonmergel, tlw. sandig, tlw. glaukonithaltig,	
					kalkig bis schwach kalkig, fossilführend (Molluskenschalen); Kalksandstein, fein- bis mittelkörnig,	
					schwach glaukonthaltig, tiw. dicht und fest, tiw. poros mit lagenweise unverfestigtem Sand, fossilfuh-	
		44.4.1		hia 250	rend (Molusken, tw. in Schlinagen).	
		teou		dis zu 350 m	conviously and the solution of the standard clinisen, glaukonithatig, schwach glimmernalitig, melst	
					Kalksteinhänke auf: zwischen 650 - 685 m Tuffhänke und Jagen	
2415	Butiadingen	tol	ab ca, 42 m		Sand dimmerchaltia, feldsnathaltia	Dienemann &
	West	ч р.				Scharf (1931)
2420	Ebersdorf	teom	309 - 328 m	19 m	Bohrung UE59. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
		-	u. N.N.			
		teou4				
2421	Oldendorf	teom	95 - 107 m	12 m	Bohrung UE12. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
			u. N.N.			
		teou4	116-183 m	67 m	Bohrung UE12. Keine Beschreibung.	
2424	Wodol	+	U. IN.IN.	105 m	Top dupkal alimmarbaltia anthält thu Schwafalkias und Ginskristalla garundata Quarzkämar Sonta	Schroodor of al
2424	VEUCI	Ľ	95,5 - 200,5 m	Rasis Tertiär	rien kalkhaltig wahrscheinlich tmi: Sand fein- his großkörnig guarzhaltig glimmerhaltig Braunkoble	(1913)
				nicht erreicht	tonia, sandia, dimmerhaltia, Tiefbohrung, Schulau-Tinsdahl von 1895 der Geologischen Landesanstalt.	(1010)
			72 - 120 m	48 m	Ton, sehr sandig, glimmerhaltig, kalkhaltig, fossilienführend (<i>Turritella subagulata. Pleurotoma rotata</i>):	
					Sand, grau, feinkörnig, gar nicht bis sehr tonig, glimmerhaltig, kalkfrei. Probebohrung 2 des Blankene-	
					ser Wasserwerks am Sülldorfer Weg.	
2425	Hamburg	tpl				Hinsch (1995)
		tmi				
		tol			Schluff, tonig, feinsandig; Tonmergel, grünlich; Feinsand, schluffig, glaukonithaltig.	


Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
		teo			Ton, grünlich, plastisch, fossilführend (Radiolarien); Tonstein, grün bis braun, plastisch, enthält tlw. kie-	
					seligen Feinsandstein; Tonmergelstein, grünlich; Kalksandstein, glaukonithaltig, fossilführend; Sand,	
					feinkörnig.	
0540		tpa	50.0 70	00.4	Tonstein, mittelgrau, schichtig, enthält tlw. Tufflagen, basales Flintkonglomerat.	\\//\\ / (1005)
2510	Aurich	t	58,6 – 79 m	20,4 m Decis Tertiër	Sand, tein- bis grobkornig in Wechseilagerung, tiw. schwach kiesig, tiw. tonig, glimmerhaltig, enthalt	Wildvang (1935)
				Basis Terriar	Braunkonietelichen, Nies , gebielchte Feldspätreste und Glaukonitkomonen, Tonbrocken, Holzreste.	
			80 m	nicht eneicht	Bonfung bei der Anlage des Auflicher Wasserweins.	
			00 111		1903 durch L. Otten-Bremen.	
		tpl	61 – 90 m	29,0 m	Ton, dunkel, tlw, kalkfrei, tlw, humos; Mergelsand, bräunlich bis grau; Sand, fein- bis grobkörnig,	
				Basis Tertiär	quarzhaltig, tlw. glimmerhaltig, Tonstreifen, Braunkohle. "Bohrung III", ausgeführt im Jahr 1907 auf	
				nicht erreicht	dem Hfenplatz am "Neuen Hafen" von der Wasserbauinspektion Aurich.	
		t	81,5 m		Sand, quarzhaltig, ohne nordisches Material; Bohrung V, ausgeführt im Jahr 1912 an der Chausee	
					nach Sandhorst vom Magistrat der Stadt Aurich, bearbeitet von F. Schucht;	
2516	Nordenham	tpl				Streif (1993),
		tmi	ab 40 m			Wildvang (1935) Wildvang (1935) Streif (1993), Kockel (1988), Gramann (1989) Streif (1993), Kuster (2005) Kuster (2005) Meyer (1982), Jürgens (1982a), Kuster (1982) Kuster (1982) Hinsch (1993) al-
		tol	ab 272 m		Ton/Tonstein, grun bis braun, enthält Feinsandlagen, kalkhaltig (Bohrung Seefeld 2), Kalkmergel, hell-	
					grau bis braun, wechseinde Schlutt- und Feinsandgenaite, glimmernaitig, glaukonithaitig, tiw. bituminos	
		+00		hia 74 500 m	oder numos; sand, glaukonitnalitg.	
		leo		DIS 20 500 III	rung Seefeld 1) bzw 527 m (Bohrung Seefeld 2) (teou): Sand dunkelgrün feikörnig till toto	
					daukonithatio: Kalksanstein grin hellorau bis gelb kalkhaltig mürbe fossiführend (Muschelbruch-	
					stücke. Seeigelstachen. Fischreite)	
		tpa	680 - 992 m	bis zu 40 m	Tonstein, dunkelgrau, pyrithaltig, kalkhaltig, fossilführend (Foraminiferen).	
2520	Bremervörde	teom	178 - 194 m	16 m	Bohrung UE54. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
			u. N.N.			
2524	Buxtehude	tmi				Meyer (1982),
		tol			Sand (Neuengammer Gassand).	Jürgens (1982a),
		teom		150 - 300 m	Ton, Sand, feinkörnig, glaukonithaltig.	Kuster (1982)
		teou		350 - 450 m	Tonstein, enthält in basalen Lagen Tufflagen, enthält Sandsteineinschaltungen;	
0505		tpa		40 - 80 m	Tonstein, dunkel, Einschaltungen von Feinsandsteinen.	14 (1010)
2525	Harbug	tpg			Ion, grunlich, fett, kalkfrei, nach unten hin zunehmender Sandanteil, enthalt Gesteinsbruchstucke	Koert (1910)
					(Brunsnauptner oder Heiligennaler Nieselgestein); unklar ob tatsachlich anstenstend oder Feil einer	
2526	Allermöhe	tna	Basis tmi his 711			Hinsch (1993)
2520	Allermone	uig	700 m u N N			11113611 (1995)
		tol			Tonmergel, grün: Schluff, tonig, feinsandig, tw. glaukonithaltig: Feinsand, schluffig, tlw. glaukonithal-	
					tiq, fossilführend.	
		teo		ca. 700 m	Ton/Tonstein, grün bis braun, tlw. glaukonithaltig, fossilführend (Diatomeen, Radiolarien), tlw. plastisch,	
					tlw. mürbe, tlw. kieseligee Feinsandstein; Tonmergelstein, grün; Kalksandstein, glaukonithaltig, fos-	
					silführend; Sand, feinkörnig.	
		tpa	800 m bis zu		Tonstein, mittelgrau, schichtig, enthält tlw. Tufflagen (Übergang tpat zu teoy), basales Flintkonglome-	
			1800 m		rat (tpat); Ablagerungen des Thanetiums liegen transgressiv über oberkretatzischen Kalksteinen.	
2527	Bergedorf	tng				Hinsch (1991)
		tol			Tonmergel, grün; Schluff, tonig, feinsandig, tlw. Glaukonithaltig; Sand, feinkörnig, schluffig, tlw. glau-	
1					konithaltig, fossilführend.	



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
		teo			Ton/Tonstein, grün bis braun, tlw. glaukonithaltig, fossilführend (Diatomeen, Radiolarien), tlw. plastisch,	
					mürbe, tlw. kieseliger Feinsandstein; Tonmergelstein, grün; Kalksandstein, glaukonithaltig, fossil-	
					führend; Sand, feinkörnig	
		tpa			rat (tpat); Ablagerungen des Thanetiums liegen transgressiv über oberkretatzischen Kalksteinen.	
2528	Geesthacht	tmi	ab ca. 80 m		Ton, plastisch, glimmerhaltig (teo); Sand, quarzhaltig, mit Braunkohle vergesellschaftet (tmi), Braun-	Gagel & Schlunk
		/			kohle. Ablagerungen sind Teil eines glazitekonischen Komplexes. Bohrungen und Aufschlüsse in der	(1911)
		teo			Tongrube der Ziegelei Schwarzenbek. Anstehende paläogene Tone vermutlich erst in einer Tiefe von 80 - 100 m.	
		teou			Ton , plastisch, sehr fett, seifig-schmierig, fast immer kalkfrei (im Geschiebemergel des Rühlauer Forst),	Gagel & Schlunck
					Geoden mit schlecht erhaltenen Pflanzen- u d Fossilresten, z. T. weichere Toneisensteine; große und	(1911), Otroania 8. April 10
					kreine Prosphorne (z. 1. mit großen Barytkristalien), Schwerspale-Nonkretionen, Faserafragonit-Kon- kreinen zehltreiche Eisenversbildungen, willkenische Asche in "Noestern und Streifen", och zeinger	Stremme & Aariono
					Redulieli, zaineiche Eisenverbindungen, vurkanische Asche in Nestern und Stellen , sein geiniger	(1911)
					Teil eines dazitekonischen Komplexes: aufgeschlossen in der Tongrube der Schwarzenbecker Zie-	
					gelei.	
2529	Büchen	teou			Ton, fett, schmierig, plastisch, fossilienführende Toneisenstein Geoden, Phosphorite, Faseraragonit;	Gagel & Schlunck
					vulkanische Aschen, vulkanische, harte, schwarze Basalttuffe, tlw. weichere Bänke; Aufschluss Zie-	(1914),
					gelei Schwarzenbek.	Stremme & Aariono
		teou			Ton , fette, schmierige, plastische Tone; kittartige Tonvarietät, frei von Foraminiferen, hoher Gehalt an	(1911),
					"colloidaler" I onerde. Vermutlich enthalten die I one wenig Sand oder anderen mineralischen Detritus,	Gagel (1906)
					nocritote Farbung annich wie Latent. Ablagerungen sind reir eines glazitekonischen Komplexes, vor-	
		teoo			Ton dimmerbaltig hoher Humusgehalt fossilienfrei evtl anstehend. Aufgeschlossen und erhohrt bei	
		.000			Müssen.	
2530	Gresse				Siehe Blatt 2529 Büchen	Gagel & Schlunck
2608	Emden West	tpl	Basis zw.			Barckhausen &
		tmi	877 m und			Streif (1978)
		tol	1012 m			, , ,
		teo		481 - 655 m	Ton/Tonstein, grün bis grau, enthält untergeordnet Tuffe, Tonmergel, glaukonithaltig; Schluffstein, Kalk-(Sand)stein, grün, feinkörnig, tlw. kalkiges oder kiesiges Bindemittel, glaukonithaltig, pyrithaltig, the Tonsicsenteine: Behrungen Creatives 24, 22, 25, 26, and 28.	
2609	Emden	tol				Frisch (1984)
2003	Linden	tmi	bis zu 220 m			1113011 (1304)
		tol			Tonmergel übergehend in Mergelkalkstein, schluffig, in Nestern Quarze und Glaukonit; Sandstein (Neuengammer Gassand) feinkörnig tonig	
		teo	bis zu 420 m		Toostein glaukonithalitia enthält Toneisensteine, tilw tuffitisches Material, tilw kohlige Pflanzen-	
		.00	510 24 120 11		reste. Aufarbeitungshorizont: Sandstein , grünlich, fein- bis mittelkörnig, glaukonithaltig, tiv, gerundete	
					Quarze, wechselnd kalkhaltig, tlw. fossilführend (Nummuliten- und Kalkschalenreste), tlw. porös.	
2616	Brake (Unter-	tpl				Barckhausen
	weser)	tmi				(1995)
		tol	bis zu 150 m		Ton/Tonmergelstein , grau, grün bis braun, feinsandig (lagenweise), glimmerhaltig, tlw. stark glaukonit- haltig, fossilführend (tlw. Asterigerina guerichi guerichi, Fischreste).	
		teo	bis zu 500 m		Ton(mergel)stein, grün bis grau, tlw. feinsandig, glaukonithaltig, pyrithaltig, enthält tlw. Tufflagen, (Kalk-) Sanstein (Brüssel-Sand), feinkörnig, glaukonithaltig; Bohrung Brake T1 (485 m teo).	
		tpa		1	Tonstein, dunkelgrau, pyrithaltig, kalkhaltig, fossilführend (Foraminiferen);	



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
2624	Hollenstedt	tng				Jürgens (1982b),
		tol		60 - 140 m	Sand (Neuengammer Gassand); Bohrung Moisburg 2.	Höfle & Jürgens
		teo		700 - 800 m; bis	Tonstein, basal Tufflagen; Sandstein-Einschaltungen (UE3); Sandstein, feinsandig, glaukonithaltig,	(1982),
				zu 1100 m in	kalkhaltig (teom); Bohrung Moisburg 2.	Susin (1979)
		tpa		Randsenken	Tonstein, tlw. Feinsandstein.	
2626	Stelle	tolm			Sand (Neuengammer Gas-Sand), transgressiv; Mächtigkeit tolm bis tolo meist 100 - 140 m.	Schmitz (1985a)
		teoo			tonig; Mächtigkeit teom bis tolu 120 - 180 m.	
		teom			Sand (Brüssel-Sand), feinkörnig, tiw. glaukonithaltig, kalkhaltig, fossilführend (Nummuliten).	
		tpao	Basis zw.		Tonstein, marin, Sandstein-Einschaltungen, dunne Tuffitlagen, transgressives tpao und teou.	
		-	800 m und			
2620	Lauanhura	teou	950 m	90.0 m Ton	Ten analyse descend also here a local second s	Müller (1004e)
2029	(Elbo)	ιŗ		00,0 m 10m	to dismostatis fain big graduation with a statistical provided and the statistical statistical statistical and the statistical provided and the statistical provi	wuller (1904a)
				sächliche	ig, giminentalig, rein- bis grobkornig (hach N grobkorniger), lossinennet. Onkales Aller. Ablagerungen	
				Mächtigkeit	in der Buchhörster Ziedlei	
2716	Elsfleth	tpl		maonagnon		Streif (1998).
		tmi				Stasche & Hilter-
		tol		56 bis 81 m	Tonstein, hellgraugrünlich, tlw. Feinsandig; Tonmergelsteine, grau- bis schwarzbraun, tlw. fein- bis	mann (1940)
					grobsandig, vorwiegend unverfestigt und plastisch; Mergel-/Kalkmergelsteine, hellbraun bis hellgrau,	
					grünstichig; Bohrungen Elsfleth 16, 19, 28.	
		teo		400 bis 600 m	Tonig-sandig (teou), Sand (Brüssel-Sand, teom9; tonig (teoo); Bohrung Elsfleth 28.	
		tpa			Ton/Tonmergelsteine, dunkelgrau, grünstichig, pyrithaltig; Kalkmergelsteine untergeordnet: Bohrun-	
					gen Elsfleth 16, 19, 21, 27.	
2717	Schwanewede	tmi				Höfle (1976)
		tol		64 m	Ton-/Tonmergelstein, hellgrau bis grüngrau; Bohrung A2.	
		teo		221 bis 332 m	Ionstein, grungrau, reinsandig (teou), Bohrung A 1; Ion-/Mergeistein, vereinzelt Feinsandbanke	
		the		10 m bio 07 m	(teo), Bontung A 2.	
2724	Tostodt	tol		20 20 m	Sand (Nousaammar Caseand)	lürgone (1086)
2124	TUSIEUL	teo		20 - 30 11	Sand (Nederiganimer Gassand).	Julgens (1900)
		100			tin kalkhaltin (teom)	
		tpa		40 - 80 m	Tonstein dunke tw Feinsandstein.	
2725	Handeloh	tol		70 - 170 m	Sand (Neuengammer Gassand, tolu).	Jürgens (1992)
		teo		ca. 150 m	Tonstein, basal Tuff, tilv, Sandlagen (teou): Sandstein (Brüssel-Sand), glaukonithaltig, kalkig (teom).	ou.go.io (1002)
		-			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
		tpa				
2726	Hanstedt	tol		max. 150 m	Sandig (Neuengammer Gassand, tolm).	Schmitz (1985b)
		teoo		max. 260 m	Sandstein, feinkörnig, tlw. glaukonithaltig, kalkig (teom); Ton (teoo).	
		-				
		teom				
		teou		ca. 600 m	Tonstein, dunkel, marin (tpa); Tonstein, dunkel, marin, basal Tufflagen (teou); Sandstein, in Lagen im	
		-			Tonstein (teou3 und teou4).	
070-	0	tpa				0 = 1 = (4007)
2727	Saizhausen	tolo			Sana (Neuengammer Gassand, tolm).	Scnmitz (1987)
		- tolu				
1		tolu				



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
		teoo			Ton (teoo); Sandstein, feinkörnig, kalkhaltig (teom).	
		-				
		teom				
		teou			Tonstein, marin, dunkel, enthält dünne Tuffitlagen an der Basis (teou); tlw. Sandstein-Einschaltungen	
		-			in höheren Abschnitten.	
		tpa				
2730	Bleckede	tolo			Tonstein/Tonmergelstein, tlw. dolomitisch, wahrscheinlich hauptsächlich Rupelton und oberer Teil	Röhling (2004)
		-			tolo.	
		toim		40.00.00		
		toim		19 - 20 m	Sandstein bis Wergei (Neuengammer Gassand). Bonrung Hormoort 2 und 3.	
		teoo			ionmergel (teoo); Kaiksandstein (entspricht Brussel-Sand, teom). Bonrungen Horndorf 2, 3 und 4.	
		toom				
		teou		ca 85 bis 115 m	Ton-/Schluffstein marin the feinsandia alimmerhaltia alaukonithaltia kalkfrei untergeordnet Sand-	
		ieou		ca. 05 bis 115 iii	stein feinkärnin daukonithaltin Bohrungen Kästorf 1. Horndorf 2. Jun Horndorf 3/3	
		tpa			Ton-Kohluffstein mithelarau bis dunkeloity two feins andia meist schwach diaukonithaltia (toao)	
2817	Vegesack	t t	63.5 - 220	156.5 m	Ton grau leicht glimmerhaltig, kalkfrei bis schwach kalkig, fossilführend (Eoraminiferen): Tonmergel	Isert (1934)
	rogoodon		00,0 220	Basis Tertiär	arau, etwas glimmerhaltia, fossilführend (Foraminiferen): Sand, hellgrau, fein- bis mittelkörnig, tw. tonig.	
				nicht erreicht	glimmerhaltig, leicht kalkhaltig, schaff, tlw. lose, tlw. fest, Tiefbohrung Nr. 16 auf dem Fabrikgrundstück	
					der Norddeutschen Steingutfabrik AG. in Grohn.	
2822	Rotenburg	teom	242 - 251 m	9 m	OE kerisensis-Zone; Bohrung UWO27. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
	(Wümme)		u. N.N.			
2823	Vahlde	teom	98 - 112 m	14 m	Bohrung UWO54. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
			u. N.N.			
		teou4	91 - 97 m	6 m	UE 4; Bohrung UWO55. Keine Beschreibung.	
	_		u. N.N.			
2826	Egestorf	tol			Sandstein, Neuengammer-Gassand (15 - 20 m), überlagert von Tonstein, Rupelton (80 - 100 m); tolu	Baldschuhn (1995)
					nicht hachgewiesen, feht unternalb der Erosionsdiskordanz des tolm.	
		teoo			Brussel-Sand (90 - 140 m), uberlagert von Tonmergel (40 - 60 m).	
		teom				
		teou4		bis zu 115 m	Sandstein feinkörnig Untereozän-4-Sandstein (25 - 35 m) darauf folgt eine Tonstein-/Schluffstein-	
		loou+		515 20 110 111	Serie (bis zu 80 m) enthält eingeschaltet Sandsteinbänke:	
		teou3		bis zu 120 m	Sand, UE-3-Sandstein, darauf folgrn Ton-/Tonmergelstein, graugrünlich, Sandstein, Alphabeta-	
					Sandstein.	
		teou2		30 - 40 m	Tonstein, grüngräulich.	
		teou1		90 - 110 m	Tonstein, dunkel- bis grünlichgrau, glaukonithaltig, tlw. Sandstein-Einschaltungen, marin (Kokel,	
					1980).	
		teou		ca. 400 m	Vulkanische Tuffe/Aschen, Basis teou (Knox, 1984), gefolgt von einer Serie mariner Tonsteine, Ton-	
					mergelsteine, Schluff- und Feinsandsteine.	
		tpao		70 - 90 m	Tonstein, mittel- bis dunkelgrau, feinsandig, fossilführend (NP 8 und NP 9). tpau und tpam fehlen.	
2827	Amelingehau-	tol			Sandstein, Neuengammer-Gassand (15-20 m), überlagert von Tonstein, Rupelton (80 - 110 m);	Baldschuhn (1993)
	sen	teoo		bis zu 160 m	Sand-/Kalksandstein (Brüssel-Sand), 40 - 60 m (teom), übergehend in Tonmergel (90 - 100 m) teoo.	
1		-				
		teom				
1		teou4		bis zu 135 m	UE-4-Sandstein (20 - 35 m), ubergehend in Tonstein, sandig, glaukonithaltig, kalkfrei, 90 - 100 m.	
		teou3		100 - 140 m	Ionstein, marin, ubergehend in Sandstein, Alpha-Beta-Sandstein, glaukonithaltig.	
		teou2		ca 40 m	I onstein, grunlichgrau, sandig; setzt uber den hochsten Aschelagen ein.	



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
		teou1		80 - 100 m	Tonstein, glaukonithaltig, marin; Sandstein, glaukonithaltig, marin; vulkanische Aschen.	
		tpao			Sandstein, graugrün, glaukonithaltig, überlagert von Tonstein, dunkel- bis hellgrau, marin, fossilfüh-	
					rend (NP 8 und NP 9); tpao liegt direkt auf Oberkreide; Bohrungen Betzendorf Z1 und Kolkhagen 1.	
2830	Dahlenburg	tol		88 - 139 m	Neuengammer Gassand (11 - 18 m), darüber Ton(mergel)stein ; Tiefbohrung T 1, Wasserbohrungen H 70-74;	Meyer (2009)
		teo		403 - 478 m	Tonstein , enthält tlw. Tuffitlagen (teou), und Feinsandstein (t eou3-4); Sandstein (Brüssel-Sand), feinkörnig, (teom); Ton(mergel)stein , Sandstein -Einschaltungen (teoo).	
		tpa	Basis zw. 908 m und 926 m	23 - 50 m	Tonstein, tpao; Bohrungen T 1, T 17, T 18, T 49.	
2921	Ahausen	teou4	78 - 90 m u. N.N.	12 m	Bohrung UWO 39. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
2922	Kirchwalsede	teom	237 - 351 m u. N.N.	114 m	OE B-4-Zone; Bohrung UWO14. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
2927	Wriedel	t			606,8 m tiefe Bohrung (Dorf Brockhöfe, 1907-1910) hat vermutlich Tertiär erreicht. Nicht frei einsehbar.	Monke & Stoller (1912)
2928	Ebstorf	tmi				Harbort et al.
		tol	177 - 366 m	189 m	Tonmergel , grau, feinsandig, schwach glimmerhaltig, tlw. glaukonithaltig, sehr plastisch, tlw. mit Phosphoriten; Sand , grün, glaukonitischkalkhaltig; fossilienführend (Bruchstücke von <i>Turritella Geinitzi Sp., Dentalium Kickxii Nyst.</i>); Wechsellagerung von Sand und Tonmergel , tlw. mit Kies -Einschaltungen ("gerollte Quarzkörner und feinkörnige, quarzitische Sandsteingerölle"). Tiefbohrung bei Öchtringen bis 730 m.	(1911)
		teo / tpa	366 - 600,7 m	234,7 m	Ton , blau bis grün, fett, tlw. feinsandig , glaukonithaltig, kalkfrei, plastisch; Tonmergel , blau; Sand , tonig, kalkfrei, glaukonithaltig; Glaukonit tlw. vollständig in Eisenoxidhydrat umgewandelt. Tiefbohrung bei Öchtringen bis 730 m.	
2933	Gusborn	teou1	157 - 165		Bohrung HWW126. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
2934	l enzen	10000			Forschungshohrung Gartow (GoHv994) Keine Beschreihung	Kuster (2005)
3020	Thedinghausen	teom	157 m u. N.N.	25 m	Übergang UE zu OE; Bohrung UWO194. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
		teou4				
3021	Verden (Aller)	t		434 m	Ton , grau bis grünlich, glaukonithaltig, mehr oder weniger plastisch, Wechsellagerung mit Sand , fein- körnig, tonig, quarzhaltig, nach unten zunehmender Kalkgehalt; Tiefbohrung Borstel.	Stoller (1910), Kus- ter (2005)
		tolm	176 m u. N.N.	16 m	Neuengammer Gassand; Bohrung HY28. Keine Beschreibung.	
		tolm	123,5 m u. N.N.	1 m	Neuengammer Gassand; Bohrung HY151. Keine Beschreibung.	
3108	Rütenbrock	t?	1,5 - 76	74,5 m	Ton, feinsandig, quarzhaltig, etwas glimmerhaltig, tlw. eisenstreifig, kalkfrei; Sand, grünlich-grau fein bis mittel, glimmerhaltig, gar nicht bis schwach kalkhaltig, enthält tlw. Braunkohleteilchen, Kies (Milch- quarze, Kieselschiefer, Toneisensteinen, Feuersteinsplitter und Buntsandstein); vereinzelt Fossilien. Ablagerungen vermutlich Teil eines glazitektonsichen Komplexes. Bohrung auf dem Gelände der Ziege- leitongrube von Altenberge.	Koert (1907)
3122	Häuslingen	tolm	63 m u. N.N.	6 m	Neuengammer Gassand; Bohrung NA104. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
		teom	11 - 101 m u. N.N.	90 m	Bohrung NA162. Keine Beschreibung.	
		teou	85 - 172 m u. N.N.	87 m	Bohrung NA104. Keine Beschreibung.	



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
3124	Fallingbostel	tolm	44 m u. N.N.	19 m	Neuengammer Gassand; Bohrung NA151. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
		tolm	108 m u. N.N.	20 m	Neuengammer Gassand; Bohrung NA25. Keine Beschreibung.	
		tol/teo	158 - 185 m	27 m	Grenzbereich tol/teo ("OE"); Bohrung NA25 Keine Beschreibung.	
3125	Bergen	tolo		80 - 200 m	Ton, grün- bis olivgrau, schluffig, feinsandig, glaukonithaltig; 25 - 35 m mächtig.	Lang (1992)
		tolm	m		Ton, grüngrau, schluffig, mergelig, nach unten hin zunehmender Sandgehalt, geringer Glaukonitgehalt,	
					pyrithaltig (Konkretionen, Kristalle, gefüllte Grabgänge), fossilführend (Schalenbruchstücke, pyritisierte	
		t a la c			Im Ton, grün- bis olivgrau, schluffig, teinsandig, glaukonithaltig, 25 - 35 m mächtig. Ton, grüngrau, schluffig, mergielig, nach unten hin zunehmender Sandgehalt, geringer Glaukonitgehalt, pyrithaltig (Konkretionen, Kristalle, gefüllte Grabgänge), fossilführend (Schalenbruchstücke, pyritisierte Spongiennadeln, Fischzähne), etwa 120 m mächtig. Ton, hell- bis dunkelgrün, sand affrei 0 m Tonstein, grüngrau, feinsandig, schwach karbonatisch; Schluffstein, karbonatisch; Sandstein, feinkörnig, glaukonithaltig, Kalksandstein, feinkörnig; Sandsteine überwiegen nahe der Obergrenze und nahe der Basis. Tonstein, grau, grün- bis braungrau, feinsandig, plattig brechend, darüber Kalksandstein, graubraun bis grüngrau, feinkörnig, glaukonithaltig, glimmerhaltig, pyrithaltig (tlw. auch pyritgefüllte Grabgänge), fossilführend (Schwammnadeln). TonTonstein, grau bis grünlich-grau, schwach feinsandig, geringer glaukonitgehalt, geringer Pyritgehalt, mürbe; Sandstein, feinkörnig, dicht, mürbe, nahe der Basis Kalkstein, beige, mit Übergängen zu sidetiischem Dolomitstein. Tontesien, grau bis grünlich-grau, schluffig, glaukonithaltig, tlw. karbonatisch, sporadisch zwischengeschalteter Sandstein, feinkörnig, glaukonithaltig, elaukonithaltig, fukuonithaltig, glimmerhaltig (Schüppchen), enthält häufig Pyritkonkretionen, fossilführend (Schwammadeln), mäßig fest, wirkt leicht schlefrig. m Tonfmergeljstein, mittel- bis dunkelgrau, mergelig, geringer Sand- und Schluffanteil, glaukonithaltig, flext, wirkt leicht Schlefrig. m Tonfmergeljstein, mittel- bis dunkelgraue. Schluff, 45 % Ton, und 2 % Feinsand. Im höheren Teil überwiegt mit 59 % der Feinsandanteil	
		tolu		400 500	Ton, hell- bis dunkeigrun, sandtrei	
		teou4		400 - 500 m	nig, glaukonithaltig; Kalksandstein , feinkörnig; Sandsteine überwiegen nahe der Obergrenze und nahe der Basis.	
		teou3			Tonstein , grau, grün- bis braungrau, feinsandig, plattig brechend, darüber Kalksandstein , graubraun bis grüngrau, feinkörnig, glaukonithaltig, glimmerhaltig, pyrithaltig (tlw. auch pyritgefüllte Grabgänge), fossilführend (Schwammnadeln).	
	teou2 Ton/Tonstein, grau bis grünlich-grau, schwach feinsandig, geringer glaukonitgehalt, geringer Pyritgehalt, mürbe; Sandstein, hellgrau, feinkörnig, dicht, mürbe, nahe der Basis Kalkstein, beige, mit Übergängen zu sidertischem Dolomitstein. teou1 Tonstein, grau bis grüngrau, tlw. braungrau, schluffig, glaukonithaltig, tlw. karbonatisch, sporadisch zwischengeschalteter Sandstein, feinkörnig, glaukonithaltig; enthält an der Basis Tuffitbänckchen, olivgrau.					
		teou1			Tonstein , grau bis grüngrau, tlw. braungrau, schluffig, glaukonithaltig, tlw. karbonatisch, sporadisch zwischengeschalteter Sandstein , feinkörnig, glaukonithaltig; enthält an der Basis Tuffit bänckchen, olivgrau.	
		tpa		ca. 80 m	Ton(mergel)stein , mittel- bis dunkelgrau, mergelig, geringer Sand- und Schluffanteil, glaukonithaltig, glimmerhaltig (Schüppchen), enthält häufig Pyritkonkretionen, fossilführend (Schwammnadeln), mäßig fest, wirkt leicht schiefrig.	
3134	3134 Arendsee (Alt- mark) tolo 173 - 248 m Oberhalb der oligozänen Basis Ablagerungen aus 53 % Schlu heren Teil überwiegt mit 59 % der Feinsandanteil, 34 % sind S glaukonit- und glimmerhaltigen grüngrauen bis dunkelgrauen s rung 76=Kb, Arendsee 202/62, Bohrung 79 = Arendsee 3/59. tolu tolu Neuengammer Gassand (= Rupelbasissand), Rupelton	tolo		173 - 248 m	Oberhalb der oligozänen Basis Ablagerungen aus 53 % Schluff, 45 % Ton, und 2 % Feinsand. Im höheren Teil überwiegt mit 59 % der Feinsandanteil, 34 % sind Schluff und 7 % Ton bilden den Rest des glaukonit- und glimmerhaltigen grüngrauen bis dunkelgrauen Sediments; Bohrung 77 (BK 16/62), Bohrung 76=Kb, Arendsee 202/62, Bohrung 79 = Arendsee 3/59	Blumenstengel (1998)
		Neuengammer Gassand (= Rupelbasissand). Rupelton				
		teoo		173 - 236 m	Serno-Schichten, überlagert von Schönewalde-Schichten	
		teom			Nedlitz-Schichten	
		teou			Zerben-Schichten	
		tpao		15 - 40 m	Schluff und Ton, wechsellagernd, wechselnder Kalkgehalt, Helle-Schichten, Ton, Schluff, Sand, Mahlpfuhl-Schichten, enthalten Tuffite, fossilienführend (kalk- und sandschalige Foraminiferen).	
		tpau			Fehlt fast vollständig; Bohrung 191=11/84 (TK 25 3235).	
3221	Eystrup	teom	209 - 230 m u. N.N.	21 m	Bohrung NA165. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
		teou2 -	245 - 253 m u. N.N.	8 m	Bohrung NA167. Keine Beschreibung.	
		teou3				
		teou2	21 - 51 m	30 m	Bohrung HY78. Keine Beschreibung.	
		-	u. N.N.			
3222	Pethem (Aller)	teom	126 - 144 m	18 m	Bohrung NA4 Keine Beschreihung	Kuster (2005)
3222	Rethein (Aller)		120 - 144 m 11 N N	10 111		NUSIEI (2003)
		teou4	U. IN.IN.			
3224	Westenholz	tol		250 - 450 m	Schluffstein, grau- bis grüngrau, tonig; Tonstein, schluffig, tlw. feinsandig, Phosphoritknollen, Toneisensteingeoden; Bohrung NA 29.	Lang (1980), Kuster (2005)



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
		OE	144 - 166 m		Bohrung NA153. Keine Beschreibung.	
			u. N.N.			
		teo			Tonstein, dunkelgrau bis grüngrau, schluffig, glimmerhaltig; Schluffstein, tonig, tlw. Kalksteinbruchstü-	
					cke; basal violettrote Tufflagen.	
		tpa		etwa 20 m	Ton(mergel)stein, feinsandig, glaukonithaltig, trangredieren flächenhaft über Maastricht und Campan;	
3225	Offen	tol		bis zu 150 m	Tonstein, mittel-grüngräulich, schwach feinsandig, glaukonithaltig, meist kalkfrei (tolm); Ton-/Schluff-	Lang (1983),
		t a baa	70	00	stein, glaukonitnäitig (toio). Bonrung Miele 1 (Bonrung 11); tolu fenit weitestgenend.	Kuster (2005)
		toim	78 m u. n.n.	22 m	Neuengammer Gassand. Bonrung NA184.	
		OE	25 - 55 m u. N.N.		Bonrung NA 30. Keine Beschreibung.	
		teo		bis zu 400 m in	Tonstein, grau bis grüngrau, tlw. feinsandig, glaukonithaltig nach oben hin zunehmend, glimmerhaltig,	
				Randsenken	kalkfrei bis schwach kalkghaltig, tlw. Tuffsteinlagen, tlw. fossilführend (Fischschuppen, Schalenreste,	
					Kieselschwammnadeln).	
		tpa		bis zu 60 m	Tonstein, dunkelgrau, grün- bis braungrau, mehr oder weniger sandig, tlw. mergelig, glimmerhaltig,	
					glaukonithattig, pyritmattig, enthalt tw. Braunkoniebruchstucke, tossilfunrend (pyritisierte Stengel, Fu-	
2226	Sülzo	tol			Condent and Schwamminadeni), Sand (stein)insen.	Stollor (1015a)
3220	Suize	101			tonfe uvenia bis stark alukonithaltia: Kies (aut aerundeten Ouarzkärner) 0.5 - 1.0 m ächtige Ein-	Stoller (1915a)
					schaltungen.	
			35 - ?196 m	161 m	Ton, grau, feinsandig, schwach kalkhaltig, plastisch, enthält stellenweise tonige Kalkkonkretionen;	
				Basis Tertiär	Sand, dunkelgrün, fein- bis mittelkörnig, tonig, schwach bis stark glaukonithaltig, quarzhaltig, kalkfrei,	
				nicht erreicht	enthält kalkige Phosphorite. Flachbohrung Huxahl, Konsortium Saxonia 1900/1902.	
			21 - ?170 m	149 m	Ton, grau, feinsandig bis sandig, bis 30 m kalkhaltig, plastisch, in eckige Brocken brechend; Sand,	
				Basis Tertiär	grünlich bis grau, feinkörnig, schwach tonig, quarzhaltig, schach kalkhaltig; bis ca. 30 m glazial umgela-	
				nicht erreicht	gert. Flachbohrung Diesten, Konsortium Saxonia 1900/1902.	
			51 - 379 m	328 m	Ton, schwarz, grau bis blaugrau, tiw. (fein-jsandig, kalkhaltig, glaukonithaltig, Markasitausscheidungen,	
					Qualzkomet, plasusch, Sand, tenkomig, schwach tonig, (stark) graukoninnality, tw. qualzhaitig, un- gloichmeñtig kelvaltig fossilionfikrond (<i>Thuramming fayeng LINT</i>). Pupolton und Literoligoză :	
					Tiefbohrung Eversen, Konsortium Saxonia 1900/1902	
			39 - 305 m	266 m	Ton, grau, tlw, sandig, Gipskristalle unregelmäßig kalkhaltig, plastisch, tlw, fossilienführend (Foraminife-	
				Basis Tertiär	ren); Sand, fein- mittelkörnig, tlw. tonig, tlw. stark glaukonithaltig, tlw. guarzhaltig, kalkhaltig,	
				nicht erreicht	fossilienführend (mikroskopisch kleine Fossilienreste, Spongiennadeln im Bruch); Kies, sandig, stark	
					gerundete Quarze, tlw. eisenschüssig, tlw. kalkhaltig fossilienführend (Splitter von Fossilien); Tiefboh-	
					rung Sülze II, Konsortium Saxonia 1900/1902.	
			50 - 128 m	78 m	Sand, mittelkörnig, tonig, mittel bis stark glaukonithaltig. Brunnenbohrung auf dem Gutshof des Haupt-	
				Basis Tertiar	manns v. Harling in Eversen (bei der Muhle) 1913.	
1		too	270 2660 ~		Ton bollarou foincondia echwach kalkia: Morgel arou condia fossilionführend (ous 525 m Thurom	•
		leo	379 - 1000 M	201 III Basis Tertiär up-	mina papillata BRADV: Sand gray fainkörnig schwach tonig enthält Markasit Tiefbobrung Eversen	
				klar	Konsortium Saxonia 1900/1902.	
1		teo	ab 379 m		Tonmergel, hellgrau, feinsandig, enthält Markasitauscheidungen (als Stengel, Tupfen und als Impräg-	
1		-			nation); Mergel, grau, sandig, fossilienführend (Bruchstücke von Spongiennadeln); Mergel, hellgrau,	
1		tpa			hart; Sandstein, glaukonithaltig, mürbe; Tiefbohrung bei Eversen.	



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
3227	Eschede	t	87 - 521 m	434 m	Ton, hellgrün bis grau, tlw. sandig, tlw. glaukonithaltig, enthält Körner aus Milchquarz und Kieselschie-	Stoller (1915b)
				Basis Tertar nicht	fer, großtenteils kalkfrei, flw. fossilfuhrend (unbestimmbare Schalenbruchstucke); Tonmergel,	
				erreicht	schwarzgrau, mit Komern aus Quarz, Quarzit und Kieseischleier, stark kalkig, plastisc, Sand, tiw.	
					tig fossilienführend (Spongienndadeln), ab 500 m zunehmender Tonanteil: Tiefbohrung Scharnhorst	
					Norddeutsche Tiefbohr-AG., Berlin, 1911.	
			64 - 66 m	2 m	Ton, schwach sandig; Brunnenbohrung bei der Molkerei Eschede, nahe des Bahnhofs.	
				Basis Tertiär		
				nicht erreicht		
		tol	84 - 521 m	437 m	Ton, grau, mit Glaukonitsand-Einlagerungen, tlw. mit Schwefelkies-Konkretionen, Quarzkörnern, kalk-	
				Basis Tertiar	Trei bis schwach bis stark kalkhaltig; Merge l, heligrau; Sand, teinkornig, tiw. giinmerhaltig, tiw.	
				nicht erreicht	giauxonitnatitg, mergelig, tossiliunrend (Muschellinagmente); Tierbonrung Scharnhorst, Norddeutsche	
3321	Nienburg (We-	tol			Mergel grün-grau stark plastisch überlagert von Ton/Tonmergel: Bohrungen Sonnehorstel 2 (– T 67)	Voss (1991)
0021	ser)	101			Nienbruger Bruch 2 (= T 66). Langendamm 1 (= T 319).	0000 (1001)
	,	teo			Ton, schluffig; Schluff, tonig. Beide Einheiten enthalten tlw. stark glaukonithaltigen Sand, feinkörnig;	
					Bohrungen Drakenburg 1 (= T 102) und G7.	
		tpa		25 - 50 m	Tonstein, feinsandig, pyrithaltig, kalkfrei; Bohrungen Rex 6 (= T 2), Sonnenborstel 2 (= T 67), Nienbur-	
					ger Bruch 2 (= T 66).	
3324	Lindwedel	tol		1.1 000	Nicht erbohrt, stehen aber wahrscheinlich unter dem Quartär an.	Lang (1981),
	te	teo		bis zu 200 m	ionstein, mittelgrau bis grungrau, entnait tiw. Sandstein, teinsandig, pyrithaltig (UE1); ionstein, grau, mittelgrau, glaukonithaltig, vergesellschaftet mit Sandstein, grau, feinkörnig, tiw, verkieselt, kalkfrei, ent-	(1956)
					mittelgrau, graukominality, vergesenschafter mit Santustern, grau, terinkomig, two verniesen, kaikirer, erite hält tilw Braunkohlehruchstücke dicht spilitäria (UE2-3): Ton/margeletain) mittelgrau, pyrithelgrau	
					wechsellagernd mit Sandstein, grau, feinkörnig, glimmerhaltig (UE4).	
		tpa		bis zu 85 m	Tonstein, mittelgrau, feinsandig, pyrithaltig, fossilführend (Schwammnadeln, Kieselschwämme); Sand-	
					stein, grau bis grüngräulich, feinkörnig, tonig, glaukonithaltig.	
3325	Winsen (Aller)	t	55,6 - ?231 m	175,4 m	Ton, grau, tlw. sandig, tlw. mit Quarzitgeröllen; Sand, schwarz, quarzithaltig. Unklar ob Tertiär oder Ter-	Harbort et al.
				Basis Tertiär un-	tiär + Mesozoikum durchteuft wurde; Bohrung Hornbostel I (= Celle-Wietze II, Nr. 1).	(1916a)
			40 192 m	klar 142 m	Ten blou bis (avünlich)arou, thu faincondia thu alculonithaltis thu kollfrei fatt bai 155 m Cevälle	-
			40 - 162 11	142 III Basis Tortiär bei	Ton, blau bis (gruniich-)grau, itw. teinsandig, itw. graukoniinaliig, itw. kaikitei, teil, bei 155 m Gerone	
				231 m	stein. Sandstein, dazu viel Markasit und Pvrit. Bohrung 4. Maatschappy Nr. 222.	
			38 - 260 m	222 m	Ton, thy Sandig: Sandstein, thy mild: Bohrung 8, Stella Nr. 13, gebohrt 1907.	
				Basis Tertiär un-		
				klar		
			43 - 135 m	95 m	Ton (Septarienton?), grau fett; Bohrung 9. Consortium Nr. 83.	
				Basis Tertiär bei		
			CO 4 007 7 m	135 m	Ten durkeleren his helliklen och vech kellikeltig, der kellige Konkretionen, hei 450 m Ölenvern Dek	-
			69,1 - 337,7 m	200,0 III Basis Tortiär boi	Ton, durikeligiau bis nelibiau, schwach kaknalug, iuw kakige konkretionen, bei roo m Oispuren, bon-	
				337.7 m		
			36 - 82 m	46 m	Ton, grau, feinsandig, glaukonithaltig; Bohrung 19. Steinförde Nr. 8.	
				Basis Tertiär bei		
				82 m		
			69 - 662 m	593 m	Ton, blau, braun bis grau, tlw. Sandig; Sand, grün; Sandstein, tonig. Grenze zwischen Tertiät und	
				Basis Tertiär un-	Oberkreide ungeklärt; Bohrung 20. Prinz Adalbert Nr. I.	
				Klar		
1		1				



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
			57,1 - 201,1 m	144 m	Ton, blau, feinsandig; Sand, grau, tonig, mit einzelnen Ton-Einschaltungen; Sandstein, glaukonithaltig;	
				Basis Tertiär	Bohrung 24. Prinz Adalbert Nr. 1.	
				nicht erreicht		
			36 - 96 m	60 m	Ton, grau; Bohrung 35. Prinz Adalbert Nr. 12.	
				Basis Tertiar bei		
			07 165 m	90 III	Ten arow Debrung 20 Drive Adelbart Mr. 42	
			27 - 100 11	130 III Regio Tortiër hoi	ion, grau, bonrung so. Prinz Adalbert NI. 13,	
				165 m		
			28 - 213 m	185 m	Ton, grau: Bohrung 37, Prinz Adalbert Nr. 14	
			20 21311	Basis Tertiär hei		
				213 m		
			30 - 254.5 m	224.5 m	Ton, grau: Sandstein, grau: Konglomerat, Bohrung 38, Prinz Adalbert Nr. 15,	
				Basis Tertiär bei		
				254,5 m		
			41 - 301 m	260 m	Ton, grau, Sand, grün, Sandstein; Bohrung 39. Prinz Adalbert Nr. 16.	
				Basis Tertiär un-		
				klar		
			34,5 - 353 m	318,5 m	Ton , blau bis grau; Sandstein , grau; Bohrung 40. Prinz Adalbert Nr. 17.	
				Basis Tertiär un-		
				klar		
			40 - 203 m	163 m	Ton, fett; Bohrung 45. Prinz Adalbert Nr. 22.	
				Basis Tertiar		
				nicht effeicht		
			49.5 170.2 m	121.7 m	Ton (boll) grau big blau: Sandetoin, grau: Robrung 50 Handorf A1	
			40,5 - 170,2 11	Basis Tertiär un-	Ton, (heir-)grau bis blau, Sanustern, grau, bonnung so handon r Ar.	
				klar		
3326	Celle	t	62 - 371.3 m	309.3 m	Ton, sandig: Bohrung von Wackerow & Co. Brelsau, bei Garssen.	Harbort et al.
		-		Basis Tertiär bei		(1916b)
				371,29 m		· · ·
		tol	70 - 71 m	1 m	Ton, grau, feinsandig; trocken; Wasserbohrloch der Brauerei "Heidbräu" in Celle.	
				Basis Tertiär		
				nicht erreicht		
3327	Lachendorf	t	72,5 - 330 m	257,5 m	Ton, feinsandig, glaukonithaltig, tlw. mit zahlreichen Milchquarzgeröllen; Sand, schwach tonig, glauko-	Harbort & Stoller
				Basis Tertiar bei	nithaltig; Bohrung Kragen bei Scharnhorst unweit Eschede, Höhe ü. NN. + 64 m.	(1916),
				330 m		Kuster (2005)
			71,5 - 123,3 m	51,8 m Decis Tertiër hei	Ion, sandig, tw. Gipseinlagerungen; Sand, tw. mit Braunkonleresten; Kies; Bohrung Hoter III (Ge-	
				Basis Tertiar Del	werkschaft Mariagiuck), Hone u. NN. + 61 m.	
1			0 - 105 m	123,3 III 105 m	Ton the candia fast the alimmethaltia, the Gerölla the Sand Einschltungen: Sand calls onthält the	-
			0 - 105 111	Basis Tertiär un-	For, tw. sandy, lest, tw. ginnienaug, tw. Gerole, tw. Sanderinschlungen, Sand, gelo, entrial tw. Brainkohle: Bohring Herrin Gewerkeschaft Mariadlick	
1				klar		
1			94.4 - 403.5 m	309.1 m	Ton, grün bis grau, sandig, thw, mit Findlingen: Sand, grün bis grau, tonig, thw, mit Kies: Bobrung Frichs-	
1			,	Basis Tertiär	alück I bei Beedenbostel. Höhe ü. NN. + 58 m.	
1				nicht erreicht		



Nr.	Name	Alter	Tiefe	Mächtigkeit	Lithologie, Mineralogie, Lagerung, Hydrogeologie	Literatur
			79,5 - 200 m	120,5 m	Ton, grau, tlw. glaukonithaltig, fest; Kalksandstein, glaukonithaltig; Sand, feinkörnig, glaukonithaltig,	
				Basis Tertiär	glimmerhaltig; Kies , fein, quarzhaltig; Bohrung nördlich Beedenbostel, Gewerkschaft Weynhausen I,	
				nicht erreicht	Höhe ü. NN. + 58 m.	
			90 - 509,4 m	419,4 m Basis Tertiär nicht erreicht	Ton , grünlichgrau, feinsandig, glaukonithaltig, mäßig bis stark kalkhaltig, tlw. fett, tlw. mit Milchquarz- geröllen; Sand , feinkörnig, glaukonithaltig, tlw. Glaukonitsandsteinbänke; Kies , feinkörnig, enthält Milchquarz- und kieselschiefergerölle; Bohloch Weynhausen II nördlich Beedenbostel 1910/1911, Höhe ü. NN. + 52,5 m;	
			64,9 - 140 m	75,1 m Basis Tertiär nicht erreicht	Ton (Separienton?), fossilführend (Foraminiferen).	
			67 - 126 m	59 m Basis Tertiär bei 123 m	Ton , glaukonithaltig; Sand , glaukonithaltig; Sandstein , glaukonithaltig; Kalk , kohlensauer; Bohrung Habighorst I der Gewerkschafz Fallersleben am Südrand vom Blatt Eschede.	
			120 - 497,8 m	377,8 m Basis Tertiär nicht erreicht	Ton , blau, sandig, tlw. Sand-Einschaltungen; Sand , feinkörnig, tonig, enthält tlw. kohlesauren Kalk, Anhydrit und Gips; Bohrung Habighorst II der Gewerkschaft Fallersleben.	
		teo	49 - 112 m	63 m Basis Tertiär bei 112m	Ton; Bohrung Ahnsbeck 1906/07.	
		teou4	26 - 29 m		Bohrung NA169. Keine Beschreibung.	
3330	Knesebeck	OE	72 - 96 m u. N.N.	24 m	Bohrung NA144. Keine Beschreibung.	Kuster (2005)
3410	Lingen (Ems) Ost	tol			Kies , (Quarzstücke, gerundete Haifischzähne und Muschelreste), übergehend in Ton , blau, fett, kalkig, fossilführend (mitteloligozäne Foraminiferen), Septarien, Gips.	Tietze (1910)