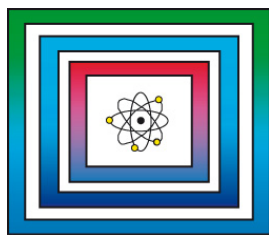


F+E Endlagerung

9Y3207000000

Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells



Zwischenbericht

Hannover, Januar 2013

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

F+E Endlagerung

Methodenentwicklung und Anwendung eines
Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-
Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT)

Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des
geologischen Endlagerstandortmodells

Zwischenbericht

Autoren: Reinhold, Klaus; Jahn, Steffen, Dr.
Kühnlenz, Tatjana; Ptock, Lennart
Sönke, Jürgen

Auftraggeber: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Projekträger Karlsruhe; Wassertechnologie
und Entsorgung (PTKA-WTE) für das
Bundesministerium für Wirtschaft und
Technologie

Auftragsnummer: Förderkennzeichen: 02E11061C
Geschäftszeichen: B3.1/B50112-43/2012-0009/001

Datum: 02.01.2013

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

Direktor und Professor Dr. V. Bräuer (Abteilungsleiter B3), Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung und Zielsetzung.....	4
2 Allgemeine Geologie im Gebiet des Referenzprofils NORD.....	4
2.1 Sedimentologische Verhältnisse	9
2.2 Hydrogeologie.....	16
2.2.1 Hydrogeologie des Süßwasserstockwerkes.....	17
2.2.2 Hydrogeologie des Salzwasserstockwerkes.....	19
3 Aufbau und Geologie des Endlagerstandortmodells NORD.....	21
3.1 Geomorphologie.....	22
3.2 Struktureologische Gegebenheiten.....	23
3.3 Die stratigraphischen Modell-Einheiten.....	26
3.4 Hydrogeologischen Verhältnisse im Endlagerstandortmodell.....	40
3.5 Temperatur-Tiefenverteilung und thermische Reife.....	45
4 Wirtsgestein – Modell-Einheiten Hauterivium und Barremium.....	48
4.1 Hauterivium.....	50
4.2 Barremium.....	51
5 Zusammenfassung.....	54
Literaturverzeichnis.....	57
Tabellenverzeichnis.....	68
Abbildungsverzeichnis.....	69

Gesamtblattzahl: 71

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Reinhold, Klaus; Jahn, Steffen, Dr. Kühnlenz, Tatjana; Ptock, Lennart Sönke, Jürgen
Titel:	Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells
Stichwörter:	Endlagerstandortmodell, Norddeutschland, Tongestein

Im Rahmen des Vorhabens AnSichT werden mit diesem Zwischenbericht die geologischen Grundlagen für die Erstellung des Endlagerstandortmodells NORD dokumentiert und der Aufbau des Modells beschrieben. Das Modell der geologischen Gesamtsituation beinhaltet 17 Modell-Einheiten vom Zechstein bis zum Quartär. Die Modell-Einheiten sind relativ homogen entwickelte und regional gut charakterisierbare geologische Einheiten. Dadurch lassen sich die hydraulischen und gesteinsphysikalischen Parameter durch einen repräsentativen Wert für die jeweilige Modell-Einheit im Endlagerstandortmodell NORD beschreiben. Der Bericht wird durch die Berichte Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis (JAHN & SÖNNKE 2013) und Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises (NOWAK & MASSMANN 2013) ergänzt und fortgeführt.

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Vorhaben AnSicht hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Tongestein zu erarbeiten und dessen Anwendbarkeit für generische Endlagerstandorte in Nord- und Süddeutschland zu testen.

Zur Erstellung eines geologischen Endlagerstandortmodells NORD wurden von REINHOLD & SÖNNKE (2012) ein Referenzprofil NORD für das östliche Niedersächsische Becken ausgewiesen und mögliche Wirtsgesteinsformationen in den stratigraphischen Einheiten Hauterivium und Barremium (marine Fazies der Unterkreide) vorgeschlagen. Dabei wurden die wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen des AkEND (2002) berücksichtigt. Diese Wirtsgesteinsinformationen sind Teil der in der „Regionalen Tonstudie“ der BGR ausgewiesenen untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen (HOTH et al. 2007).

Grundlage für die Erstellung des Endlagerstandortmodells NORD ist die Beschreibung der strukturgeologischen und sedimentologischen Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils NORD. Ziel ist es, in einem 3D-Modell eine vereinfachte Geologie anhand des Referenzprofils NORD abzubilden. Die entsprechenden lithologischen Eigenschaften der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD werden im Bericht dokumentiert.

Da in Norddeutschland keine Ergebnisse aus Standortuntersuchungen für einen HAW-Endlagerstandort im Tongestein vorliegen, werden Festlegungen zur geologischen Gesamtsituation in einem Endlagerstandortmodell NORD getroffen, die auf Analogieschlüssen und Vergleichen beruhen und als Grundlage für ein entsprechendes Endlagerkonzept dienen.

2 Allgemeine Geologie im Gebiet des Referenzprofils NORD

Im Gebiet des Referenzprofils NORD, wie auch im Gesamtgebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Norddeutschland, ist eine Gliederung des Gebirges in Stockwerke (Grundgebirge, Deckgebirge und quartäre Lockersedimente) typisch, die jeweils deutlich unterschiedliche petrophysikalische und lithologische Eigenschaften besitzen. Das Grundgebirge besteht aus stark gefalteten bis geschieferten Sedimenten sowie Magmatiten, Vulkaniten und Metamorphiten. Darüber lagert diskordant das Deckgebirge mit weniger stark deformierten und nicht metamorph überprägten Sedimenten (HENNINGSEN & KATZUNG 2002). Im östlichen Niedersächsischen Becken beginnt das mehrere tausend Meter mächtige Deckgebirge vereinzelt mit Ablagerungen des Oberkarbon (FRANKE et al. 1996, DROZDZEWSKI et al. 2009), flächendeckend mit den Ablagerungen des Perm (ZIEGLER 1990, PLEIN 1995, FRISCH & KOCKEL 2003).

Im Deckgebirge haben die gesteinsmechanischen Eigenschaften sowie die hohe Mächtigkeit der salinaren Ablagerungen des Zechsteins oft zu einer Entkopplung der tektonischen Beanspruchung von Schichtenfolgen des prä- und post-Zechstein geführt (RÖCKEL & LEMPP 2003, KLEY et al. 2008). Durch diese mechanische Entkopplung treten oberhalb und unterhalb der Basis des Zechstein-Salzes im Deckgebirge unterschiedliche strukturelle Baustile auf (KOSSOW 2001, SCHECK-WENDEROTH et al. 2008). Der Teil des Untergrundes, der unterhalb der Basis des Staßfurt-Salzes liegt, wird im Gebiet des Referenzprofils NORD als Sockel bezeichnet (BRÜCKNER-RÖHLING et al. 2002). Im Gegensatz zum Sockel sind die Lagerungsverhältnisse oberhalb dieser Grenze zusätzlich durch salztektonische Prozesse (inkl. der Halokinese) beeinflusst (s. Abb. 1). Im Gegensatz zu den älteren verfestigten Sedimenten besteht die jüngste geologische Einheit des Deckgebirges aus quartären Lockersedimenten, die im norddeutschen Tiefland weit verbreitet sind. Im Gebiet des Referenzprofils NORD sind die tertiären Ablagerungen und die geringmächtigen Schichten der Oberkreide häufig nur lückenhaft verbreitet und werden daher im Bericht nicht beschrieben.

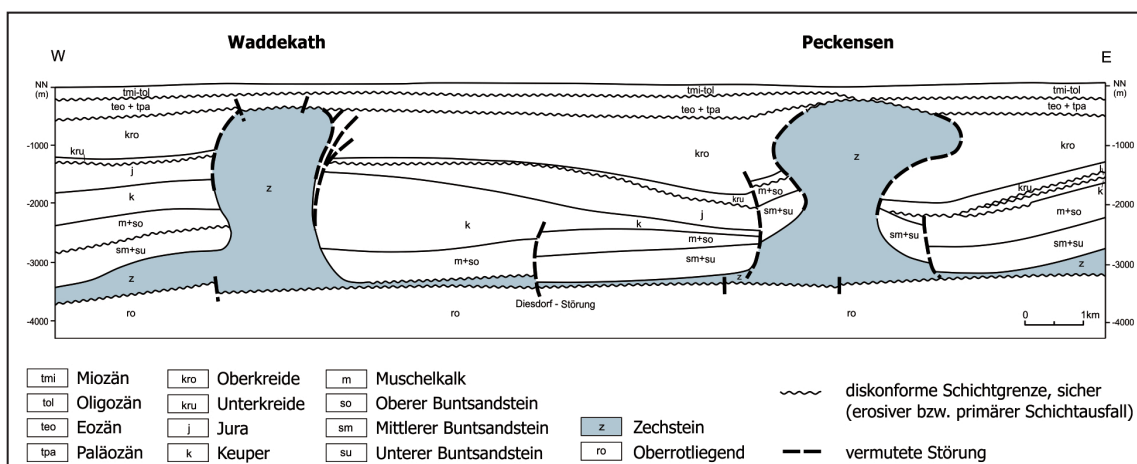


Abb. 1: Beispiel für das Vorkommen und die Mächtigkeit mesozoischer und känozoischer Ablagerungen in Verbindung mit halokinetischen und tektonischen Prozessen in der West-Altmark (KRULL in REINHOLD et al. 2008)

Die im Endlagerstandortmodell NORD berücksichtigten sedimentären Schichtenfolgen vom Zechstein bis zum Quartär wurden durch die kinematische Entwicklung des Norddeutschen Beckens und global wirkende Faktoren (z.B. Klima- und Meeresspiegelschwankungen) wesentlich geprägt. Verschiedene Epochen der kinematischen Entwicklung sind u.a. in HOTH et al. (1997), KOSSOW (2001), WOLFGGRAMM (2002), KLEY et al. (2008) und SCHECK-WENDEROTH et al. (2008) zusammenfassend dargestellt. Danach entwickelte sich das Norddeutsche Becken wie folgt:

- Die Ablagerungen des Zechstein bis zur Mittel-Trias (Muschelkalk) sind Teil der Epoche einer verstärkten thermischen Subsidenz des Norddeutschen Beckens, deren Maximum im Zechstein lag.
- Ab dem Buntsandstein entwickelte sich zunehmend ein etwa Ost-West verlaufendes Dehnungsregime, das die Bedeutung der thermischen Subsidenz für die Beckenausformung ersetzte. Im Zusammenhang mit der Extension in der Trias erfolgte eine erste Mobilisierung der Zechsteinsalze und es entstanden Salinarstrukturen, die neben der Reaktivierung von Bruchzonen des prä-Zechstein zunehmend zur Differenzierung des Sedimentationsraums beitrugen.
- Im Übergang vom Oberjura zur Unterkreide kam es zu einer Änderung des Spannungsfeldes. In einem Nordost-Südwest gerichtetem Dehnungsregime entstand – in dem schon deutlich intern gegliederten Senkungsraum des Norddeutschen Beckens – das Niedersächsische Becken als eine Großstruktur. Andere Großstrukturen, wie der Pompeckij-Block, deuten in dieser Phase der Beckenentwicklung auf ein kompressives Stressfeld hin.
- Im Zeitraum Oberkreide bis Paläogen wirkte eine Nordnordost-Südsüdwest gerichtete Kompression auf das Norddeutsche Becken ein. Die vorherigen aktiven Dehnungsstrukturen am Südrand des Norddeutschen Beckens wurden als Aufschiebungen reaktiviert und ehemals tief versenkte Schichtenfolgen wurden gehoben.
- Im Neogen und Quartär setzte sich das heutige überregionale Stressfeld (SIPPEL et al. 2009) durch, das u.a. zur andauernden Absenkung der Mitteleuropäischen Senkungszone führte.

Ein Aspekt der kinematischen Entwicklung des Norddeutschen Beckens ist sein Einfluss auf die Versenkungsgeschichte der Sedimente. Für Tongesteine verweisen HOTH et al. (2007) auf die Wichtigkeit der Diagenese als ein Merkmal für die Beurteilung der barrierewirksamen Eigenschaften. Ein bedeutender Indikator für die Abschätzung der möglichen temperaturbedingten Änderungen der Gesteinseigenschaften ist die maximale Temperaturbelastung, die Tongesteine während der Versenkung erfahren haben. Die Vitrinit-Reflexionsmessung (% R_r) wird allgemein als Parameter für den Reife- oder Inkohlungsgrad der organischen Substanz des Gesteins verwendet. Dieser kann Hinweise auf die zeitliche Abfolge tektonischer und thermischer Entwicklungen einer Region geben und bietet somit zumindest einen Vergleich der Diagenese von Sedimentgesteinen in unterschiedlichen Regionen (s. Abb. 2). In Norddeutschland liegt der Inkohlungsgrad (Vitrinitreflexionsvermögen) im Tiefenniveau von 500 m meist zwischen 0,25 % und 0,80 % (HOTH et al. 2007). Demnach erfuhren die Tongesteine während ihrer geologischen Geschichte eine unterschiedliche Temperaturbelastung, überwiegend mit Werten zwischen 30 °C und 70 °C, stellenweise liegen die Temperaturen auch etwas darüber (HOTH et al. 2007).

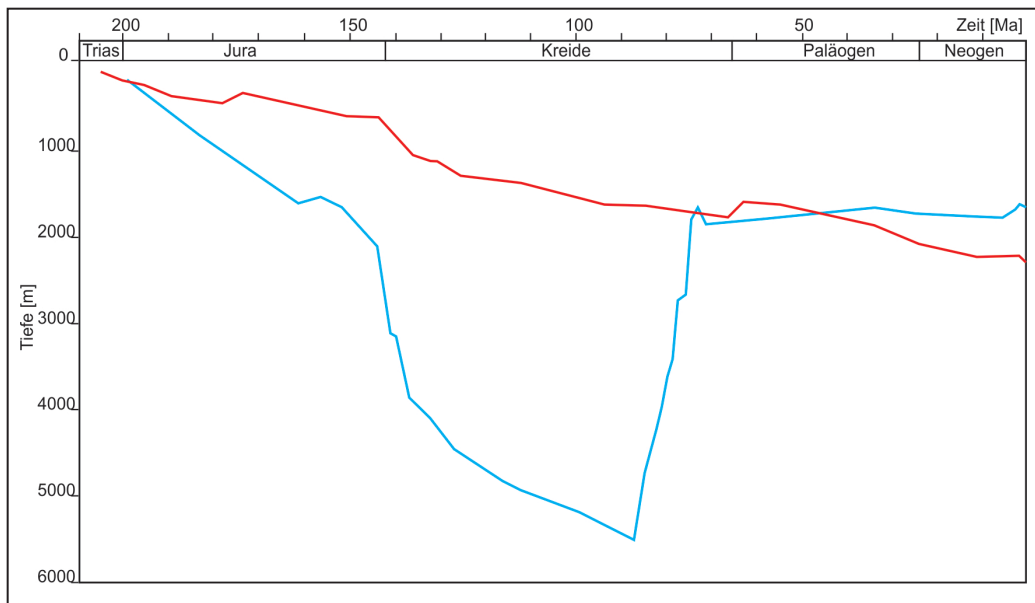


Abb. 2: Regionale Beispiele für die modellierte Versenkungsgeschichte der Sedimente aus der Oberen Trias bis Unter Jura des Nordostdeutschen Beckens (rot) und des südlichen Niedersächsischen Beckens (blau) (nach LITTKÉ et al. 2008a)

Die in Abb. 2 dargestellte unterschiedliche Versenkungsgeschichte ist ein Indikator für die interne Differenzierung des Norddeutschen Beckens und ein Hinweis darauf, dass die Tongesteine einer stratigraphischen Einheit regional abweichende diagenetische Veränderungen erfahren haben. Zusätzlich wurden die sedimentologischen Verhältnisse im Mesozoikum und Känozoikum durch die Entwicklung kleinräumiger Schwellen- und Senkungsbereiche beeinflusst. Diese wurde bspw. durch die weit verbreitete Halokinese im Norddeutschen Becken oder durch eine Reaktivierung tiefreichender Bruchzonen und den damit verbundenen Vertikalbewegungen verursacht. Daher treten Veränderungen der Lagerungsverhältnisse, Mächtigkeits- und Faziesänderungen oder Schichtausfälle in Abhängigkeit von der paläogeographischen Position des Sedimentationsraums auf.

Zusammenfassende Ausführungen zur geologischen Entwicklung Norddeutschlands, zur Verbreitung der Formationen und den strukturellen Verhältnissen im Untergrund wurden u. a. von BOIGK (1981), BALDSCHUHN & KOCKEL (1998), HENNINGSSEN & KATZUNG (2002), MENNING & HENDRICH (2005), WALTER (2007), LITTKÉ et al. (2008b) und McCANN (2008) publiziert. Wegen des regional unterschiedlichen strukturellen Baus des Norddeutschen Beckens wurde hier eine schematisierte lithologische Abfolge des Karbons und des Deckgebirges erstellt (Abb. 3), die als maßgeblich für das Referenzprofil NORD gilt.

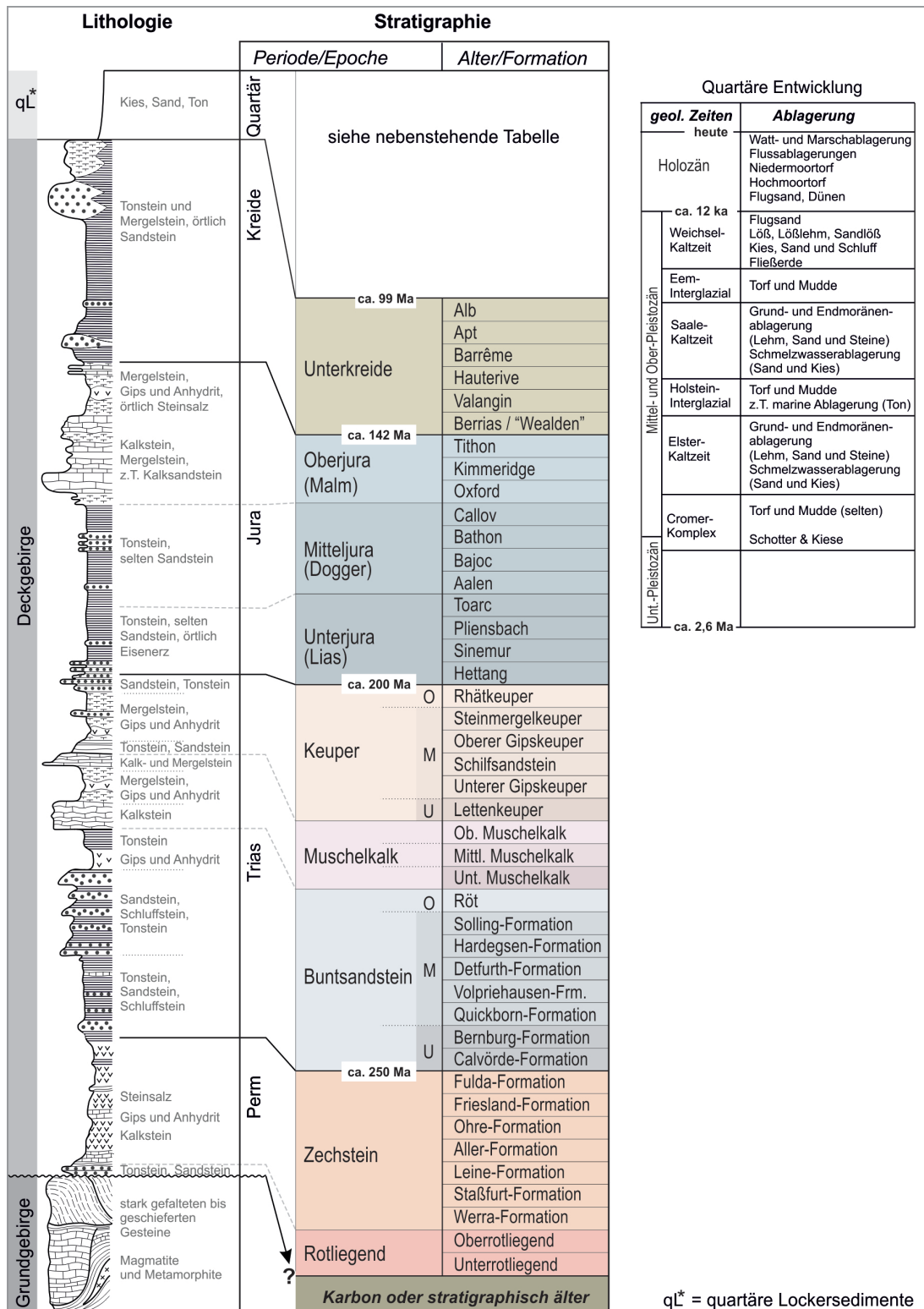


Abb. 3: Schematisches geologisches Referenzprofil NORD und Stratigraphie zusammengestellt aus NLFB (1986), MENNING & HENDRICH (2002) und HEUNISCH et al. (2007)

2.1 Sedimentologische Verhältnisse

Im Folgenden sind die Schichtenfolgen vom Älteren zum Jüngeren gegliedert (Stratigraphie) und werden anhand von Gesteinsmerkmalen (z.B. Tongestein, Sandstein, Kalkstein u.a.) sowie den Ablagerungsbedingungen beschrieben (s. Abb. 3). Die Beschreibung der allgemeinen sedimentologischen Entwicklung im Gebiet des Referenzprofils NORD orientiert sich an den geologischen Gegebenheiten des Norddeutschen Beckens und beginnt, entsprechend der strukturgeologischen Stockwerksgliederung, direkt oberhalb des Sockels mit den Ablagerungen des Zechstein (s. Kap. 2).

Zechstein

Bei den Ablagerungen des Zechstein handelt es sich vorrangig um marine Evaporite, wobei untergeordnet auch geringmächtigere Tongesteinshorizonte auftreten. Infolge mehrerer Transgressionen und der Evaporation des Meerwassers entstanden zyklisch gegliederte Ablagerungsfolgen (z.B. PERYT et al. 2010). Ein vollständig entwickelter Zechstein-Zyklus der Beckenfazies besteht aus basalen feinklastischen Ablagerungen, gefolgt von Karbonaten und einer evaporitischen Ausfällungsfolge (Anhydrit, Stein- und Kalisalz). Die Verbreitung der Ablagerungen wurde durch – regional und zeitlich – variierende Beckengrößen und -tiefen sowie die Gliederung des Beckenrandbereiches in Schwellen und Senken beeinflusst (KULICK et al. 1984, KÄDING 2005). Im Gebiet des Referenzprofils NORD sind die Zechsteinsalze im Meso- und Känozoikum mobilisiert worden, wodurch die Mächtigkeit des Steinsalzes in den Salzabwanderungsgebieten reduziert und in den entstandenen Salzkissen und Salzstöcken erhöht wurde (s. Abb. 4).

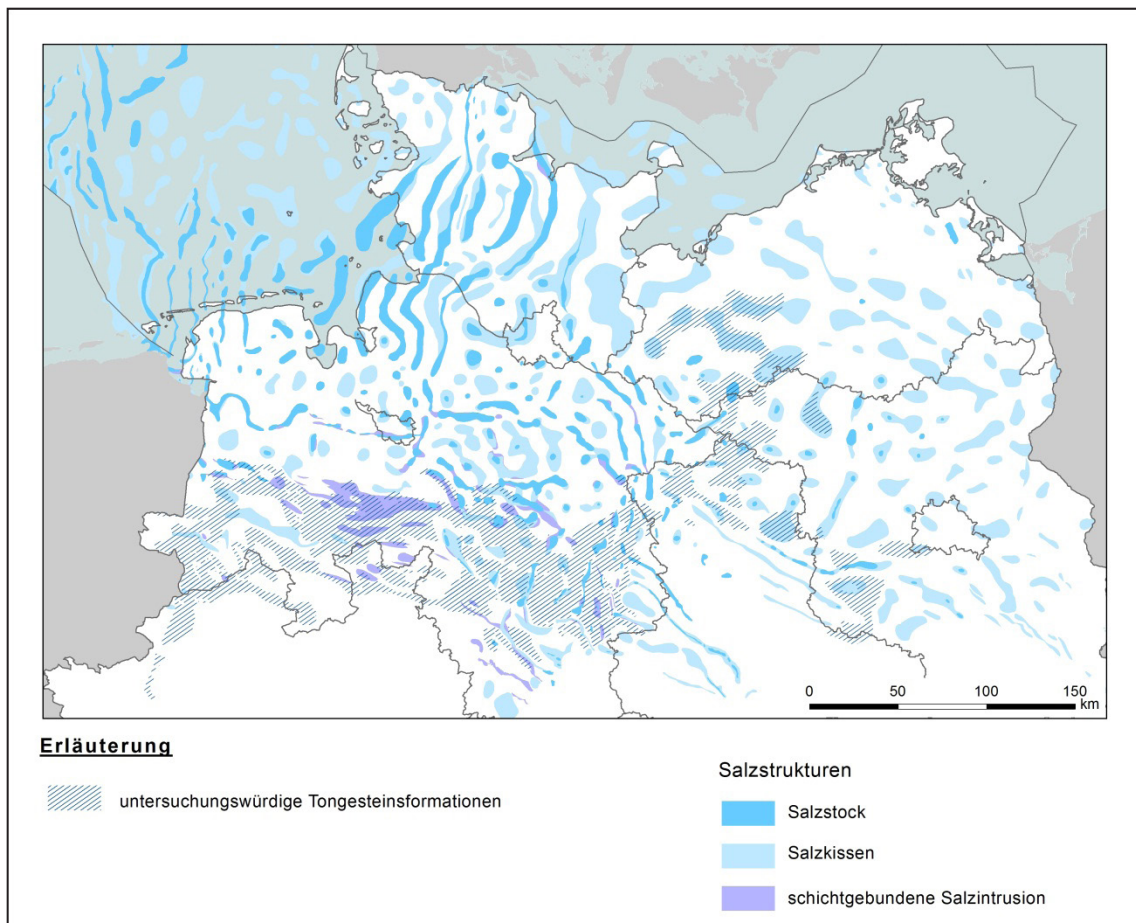


Abb. 4: Untersuchungswürdige Tongesteinsformationen und Salzstrukturen in Norddeutschland (zusammengestellt aus HOTH et al. 2007 und REINHOLD et al. 2008)

Buntsandstein

Über dem Zechstein folgen die Ablagerungen des Buntsandstein, die durch fluviatile und limnische Sedimente gekennzeichnet sind (HAUSCHKE & WILDE 1999). Der Buntsandstein wird lithostratigraphisch in die Untergruppen Unterer, Mittlerer und Oberer Buntsandstein unterteilt (RADZINSKI 2008). Die Schichtenfolgen des Unteren Buntsandstein werden von tonigen und feinsandigen Ablagerungen dominiert. Die Sedimente des Mittleren Buntsandstein werden aufgrund der Korngrößenverteilung in vier Sohlbank-Zyklen gegliedert. Die Sohlbank-Zyklen beginnen mit Sandsteinen und gehen zum Hangenden in eine Wechselfolge von Ton- und Siltsteinen mit nur noch geringem Sandanteil über. Zu Beginn des Oberen Buntsandstein (Röt-Formation) dominierten im Ablagerungsraum flachmarine Verhältnisse, die zu Ablagerungen karbonatischer, sulfatischer und halitischer Sedimente (Rötsalzlager) in einer insgesamt vorwiegend tonig-mergeligen Schichtfolge führten (HAUSCHKE & WILDE 1999).

Muschelkalk

Der Muschelkalk ist durch eine marine, kalkige Fazies gekennzeichnet. Er wird stratigraphisch in den Unteren Muschelkalk, Mittleren Muschelkalk und Oberen Muschelkalk gegliedert (HAGEDORN & SIMON 2005). Der Untere Muschelkalk ist durch marine Flachwasserkalke gekennzeichnet. Charakteristisch sind Wechselfolgen von dünnplattigem, meist bioturbatem Kalkstein, tonigem Kalkstein mit millimeterdünnen Mergelstein-Zwischenlagen (Wellenkalk) sowie darin eingeschaltete dickplattige bis bankige Kalksteine, die teils Bruchschill, Intraklasten sowie andere Karbonatkomponenten führen.

Im Mittleren Muschelkalk kam es verstärkt zur Bildung von mehreren Metern mächtigen Steinsalz-Lagern mit zwischengeschalteten Dolomit- und Anhydritlagen. Im Oberen Muschelkalk wurden wieder vorrangig Kalke, aber auch Mergel, abgelagert.

Keuper

Die sehr mächtigen Ablagerungen des Keuper bestehen aus Tongesteinen mit Einschaltungen geringmächtiger Karbonatbänke, Sandsteinen sowie evaporitischen Ablagerungen. Vorherrschend sind terrestrische Ablagerungsbedingungen, die mit stark wechselnden faziellen Verhältnissen verbunden sind. Neben der aktiven Subsidenz des Norddeutschen Beckens wurde die Mächtigkeitsverteilung der Sedimente im Gebiet des Referenzprofils NORD mit der Zeit zunehmend durch die Halokinese mitbestimmt.

Die Lithologie der einzelnen Formationen des Keuper ist zum Teil sehr unterschiedlich. Die Sedimente des Lettenkeuper (unterer Keuper; Erfurt-Formation) sind durch einen raschen Wechsel fluviatiler sandig-toniger und tonig-karbonatischer Horizonte, mit eingeschalteten Kohleflözen geprägt. Über den Ablagerungen des Lettenkeuper folgen evaporitische-tonig-dolomitische Sedimente des Unteren Gipskeuper (Grabfeld-Formation), die älteste Formation des Mittleren Keuper. Darüber folgt der Schilfsandstein (Stuttgart-Formation), dessen sandige und siltig-tonige Sedimentfazies auf fluviatile und lakustrine Sedimentationsverhältnisse hinweisen. Der Oberer Gipskeuper (Weser-Formation) wird einer tonig-karbonatisch-evaporitischen Beckenfazies zugeordnet. Der Steinmergelkeuper (Arnstadt-Formation) bildet die letzte Formation des Mittleren Keuper mit vorwiegend lakustrinen Tongesteinen, in denen rhythmisch tonige Karbonatbänke eingeschaltet sind. Der Rhätkeuper (Exter-Formation) ist der Obere Keuper und besteht in seinem unteren Abschnitt aus deltaischen Sandsteinen und Tongesteinen. Im mittleren Teil liegen marine dunkle Tongesteine und marine bis deltaisch-paralische Sandsteine vor. Der obere Abschnitt wird wiederum von limnischen bis brackischen Tongesteinen in Wechsellagerung mit deltaischen Sandsteinen eingenommen (BARNASCH 2009). Die Ablagerungen im Rhätkeuper und des nachfolgenden

Lias sind durch einen Wechsel der Fazies von vorwiegend limnisch-fluviatil bis litoral im Rhätkeuper, hin zu vorwiegend tonigen Sedimenten im Lias gekennzeichnet. Der Rhät-Sandstein bildet zusammen mit den Sandsteinen des Hettangium insbesondere im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens häufig ein zusammenhängendes heterogenes Aquifersystem (BRANDES & OBST 2011).

Unterkjura (Lias)

Im unteren Lias setzen sich die Sedimentationsbedingungen des Rhätkeuper kontinuierlich fort, wodurch eine lithologische Abgrenzung zum Rhätkeuper häufig schwierig ist. Im Hettangium treten im Gebiet des Referenzprofils NORD noch geringmächtige Sand-schüttungen aus östlicher Richtung auf. Erst im Sinemurium entstand auch hier ein fast vollständig mariner Ablagerungsraum. Die Schichtenfolge des marinen Unterkjura ist in den Beckenbereichen vor allem durch tonige Sedimente charakterisiert. Ein markanter Leithorizont ist der Posidonienschiefer (Lias ϵ) des unteren Toarcium, ein etwa 20 m bis 40 m mächtiger Ton- bis Mergelsteinhorizont mit einem Anteil von bis zu 15 % an organischem Kohlenstoff (Erdölmuttergestein).

Mitteljura (Dogger)

Im Vergleich zu den gleichförmigen tonigen Formationen des Unterkjura ist der Mitteljura durch wesentlich inhomogenere Verhältnisse (häufige lithofazielle Wechsel) gekennzeichnet. Die Ablagerungen des Mitteljura sind geprägt durch einzelne fluviatil bis deltaische Sandsteine und sehr mächtige marine Ton- und Siltsteine. Daher besteht die Schichtfolgen vorwiegend aus Ton- und Tonmergelsteinen; lokal kommen insbesondere im Aalenium und Bathonium auch Sandsteine und kalkig-sandige Gesteine vor. Die Sandsteinhorizonte sind regional wichtige Speichergesteine für Kohlenwasserstoffe.

Oberjura (Malm)

Nach der Ablagerung geringmächtiger Tonmergelgesteine im tieferen Oberjura kam es zunehmend zur Bildung kalkiger Sedimente. Dazu gehört der sehr mächtige Korallenoolith des Oxfordium mit marin-sedimentären Eisenoolithlagern an der Basis und mächtigen oolithischen Kalksteinen im Hangenden. Im Kimmeridgium werden feinklastische Sedimente ebenfalls in großer Mächtigkeit abgelagert, in denen zahlreiche harte Kalkbänke auftreten.

Dabei sind regional die Ablagerungen durch eine hypersalinare Fazies mit Anhydritbänken charakterisiert (z.B. GERARDI 1985). Auch der höhere Oberjura (Tithonium) ist durch das Auftreten von Evaporiten gekennzeichnet, die auf eine weitere Zunahme der Salinität im Ablagerungsraum und eine Änderung der paläogeographischen Verhältnisse hinweisen. Erst am Ende des Oberjura (Münder Mergel) deuten die faziellen Verhältnisse auf zunehmende Süßwassereinflüsse hin.

Unterkreide

Im östlichen Teil des Niedersächsischen Beckens wurden Sedimente vom Berriasium bis zum Albium abgelagert. Die Ablagerungen der Unterkreide erreichen eine Gesamtmächtigkeit von maximal etwa 1300 m. Der weitaus größere Teil davon wird von der höheren Unterkreide (Barremium bis Albium) eingenommen, wohingegen die tiefere Unterkreide (Berriasium bis Hauterivium) deutlich geringmächtiger ist. Während die Ablagerungen des Valanginium, Aptium und Albium häufig durch Schichtlücken gekennzeichnet sind, sind Hauterivium und Barremium dagegen oft vollständig ausgebildet. In Abb. 5 sind die Stratigraphie und lithologischen Merkmale der Unterkreide für das Gebiet des Referenzprofils NORD zusammengefasst.

In den verwendeten Unterlagen für das Endlagerstandortmodell NORD (dieser Bericht) und für die Zusammenstellung der Parameterwerte (JAHN & SÖNNKE 2013) wurde statt des international gültigen stratigraphischen Begriffs Berriasium der Terminus „Wealden“ verwendet. Im Kap. 3 wird daher für die älteste Modell-Einheit der Unterkreide die Bezeichnung „Wealden“ verwendet.

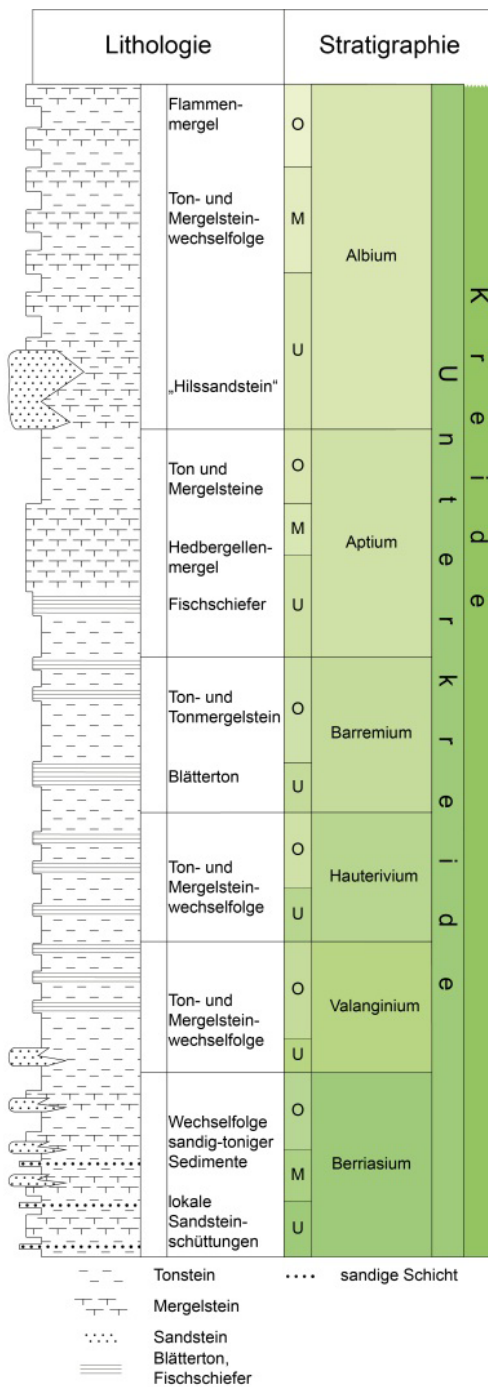


Abb. 5: Stratigraphie und schematischen Darstellung der lithologischen Abfolge der Unterkreide im Gebiet des Referenzprofils NORD (nach MUTTERLOSE 2000 & HEUNISCH et al. 2007)

Die Ablagerungen der Unterkreide beginnen im Berriasium mit brackischen, sandig bis tonig dominierten Sedimenten, die durch eine enge Wechsellagerung und Verzahnung von Ton- und Sandsteinen gekennzeichnet sind. Mit Beginn des Valanginium kommen zunehmend marine, tonige Sedimente vor. Im Verlaufe der Transgression sind geringmächtige Gerölllagen mit teilweise glaukonitischen Sanden entstanden, so dass vereinzelt dünne, sandige Schichten als Linsen an der Basis der tonigen Schichtenfolge eingeschaltet sind.

Die Ablagerungen der stratigraphischen Einheiten Hauterivium und Barremium werden im Rahmen des Projektes AnSichT als das Wirtsgestein im Endlagerstandortmodell NORD angesehen. Ihre Beschreibung erfolgt gesondert im Kap. 4.

Die im Hangenden des Wirtsgesteins folgenden Ablagerungen des Aptium sind durch tonige, z.T. stark bituminöse, marine Sedimente gekennzeichnet. Die feinlaminierten bituminösen Fischeschiefer treten vorwiegend im Unter-Aptium auf. Im Ober-Aptium treten tuffitische Lagen mit hohen Smektitanteilen in karbonatarmen Tongesteinen auf (KEMPER & ZIMMERLE 1982, ECKHARDT 1989, BENESCH 1997). Im Albium erreichte das Meer der Unterkreide seine weiteste Verbreitung in Norddeutschland. Im Unter-Albium dominieren noch tonig-mergliche Ablagerungen. Ein Sandsteinhorizont (Hilssandstein) im Unter-Albium ist im Bereich des Referenzprofils NORD verbreitet. Die seit dem Mittel-Albium zunehmend dominierenden mergeligen und kalkigen Sedimente leiten in die lithofazielle Entwicklung der Oberkreide über.

Quartär

Die Schichten des Quartär sind im Gebiet des Referenzprofils NORD flächenhaft verbreitet und werden folgend u.a. nach FELDMANN (2002) beschrieben. Infolge der mehrfachen vollständigen Überlagerung durch Gletscher bzw. der ehemaligen periglaziären Lage (Abb. 6) sind in der Region südöstliches Niedersachsen vorwiegend glaziale und periglaziale Sedimente der verschiedenen Eiszeiten verbreitet. In den mächtigen quartären Lockergesteinsfolgen kommen mehrere weiträumig verbreitete Grundwasserkörper mit einer hohen Ergiebigkeit vor, die durch Grundwasserhemmer (Geschiebelehm und -mergel, Tone, Schluffe) vertikal untergliedert sind (MANHENKE et al. 2001, ELBRACHT et al. 2010).

Eine Besonderheit der quartären Schichtenfolge in Norddeutschland sind die elsterkaltzeitlichen und in geringem Maße auch saale- und weichselkaltzeitlichen Rinnensysteme, die tiefe Einschnitte in den Untergrund verursachten. Die tiefsten, im Zuge der Inlandvereisungen entstandenen glaziären Rinnen bildeten sich während der Elster-Kaltzeit im nördlichen Norddeutschland und im Nordsee-Bereich (vgl. STACKEBRANDT et al. 2001). Sie erreichen in Lockergesteinen meist Tiefen zwischen 200 m und 300 m, im Extremfall bis über 500 m (z.B. Hagenower Rinne; SCHULZ 2000), Breiten von mehreren Kilometern und Längen bis über hundert Kilometer (s. Abb. 6). Die Rinnenbildungen der jüngeren Kaltzeiten sind dagegen in Norddeutschland seltener und weisen geringere Dimensionen mit Tiefen von ca. 100 m bis 200 m auf. Im Festgestein ist die Tiefenerosion aufgrund von Rinnenbildungen wesentlich geringer und auch im südlichen Niedersachsen, wo die Eismächtigkeit nur einige hundert Meter betrug, sind nur flachere Rinnen bekannt. Die Rinnenfüllungen bestehen im Wesentlichen aus Schmelzwassersanden, Tonen und Geschiebemergeln.

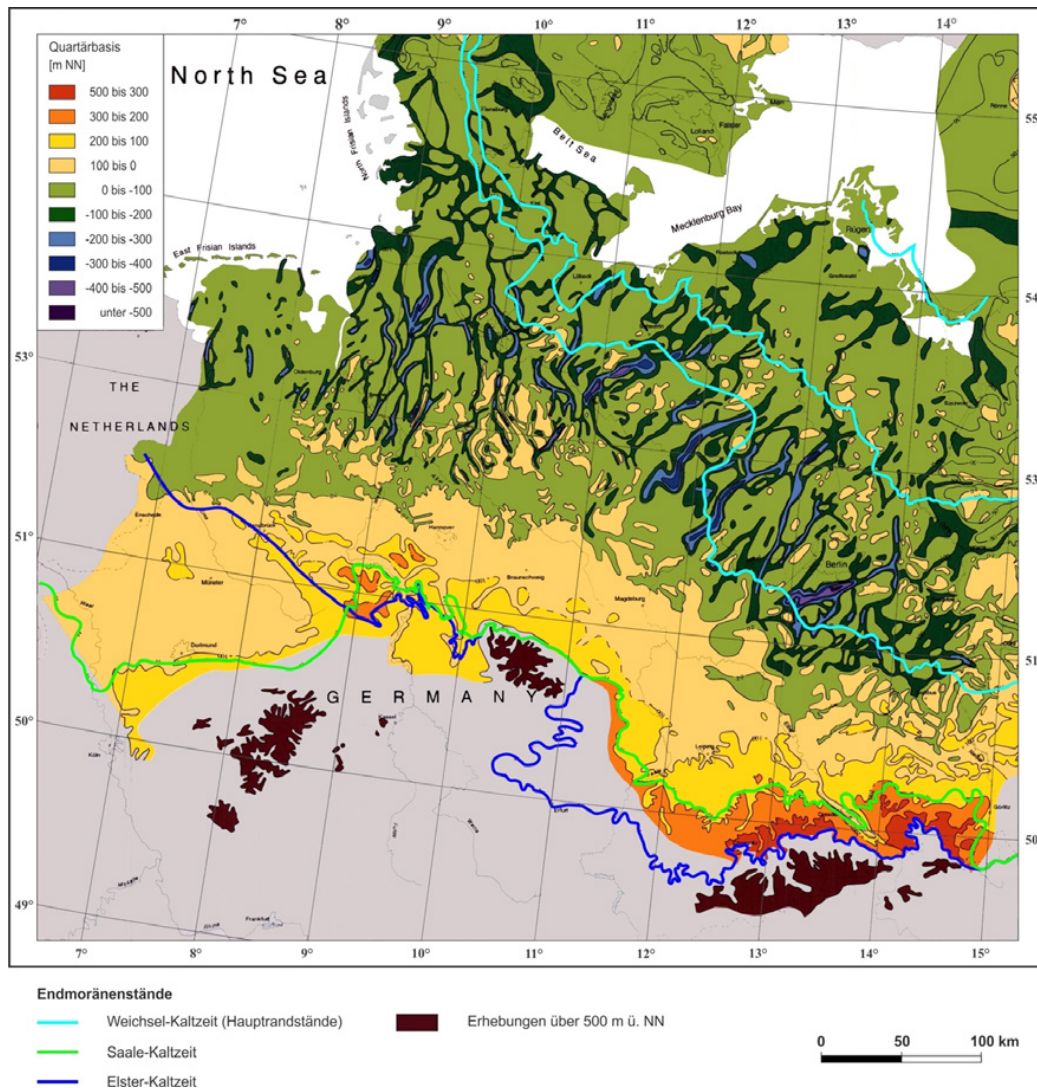


Abb. 6: Verbreitung glazialer Rinnen und Eisrandlagen in Norddeutschland (aus MRUGALLA 2011, nach STACKEBRANDT et al. 2001)

2.2 Hydrogeologie

Im Gebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen von Norddeutschland sind sowohl die hydrogeologischen Gegebenheiten des Süßwasser-führenden Grundwasserstockwerkes als auch die Eigenschaften der tieferen, Salzwasser-führenden Aquifere regional sehr unterschiedlich (z.B. JORDAN & WEDER 1995, HOTH et al. 1997, MANHENKE et al. 2001, ELBRACHT et al. 2010, WOLFGRAMM et al. 2011). Dies hat zur Konsequenz, dass eine Festlegung der hydrogeologischen Verhältnisse für das generische Endlagerstandortmodell NORD erfolgt (Kap. 3.4), die nur einen Teil der Möglichkeiten berücksichtigt. Die folgenden allgemeinen Ausführungen zur Hydrogeologie dienen der späteren Charakterisierung der

hydrogeologischen Verhältnisse der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD (s. Kap. 3.4).

Für die hydrogeologischen Verhältnisse in Norddeutschland gilt allgemein, dass entsprechend der Salinität der Grundwässer ein oberes, Süßwasser-führendes Grundwasserstockwerk unterschiedlicher Mächtigkeit von einem Salzwasser-führenden Grundwasserstockwerk unterlagert wird (GRUBE et al. 2000). Als Süßwasser können alle Wässer mit einem Gesamtsalzgehalt (Salinität) von weniger als 1 g/l bezeichnet werden. Salzwässer besitzen dagegen eine Konzentration von mehr als 10 g/l (HÖLTING 1992). Durch aufsteigendes Salzwassers oder die Ablaugung oberflächennaher Salzstöcke kann es zu einer Versalzung des Süßwassers kommen, wodurch die genannte generelle Stockwerksgliederung gestört sein kann (GRUBE et al. 2000).

2.2.1 Hydrogeologie des Süßwasserstockwerkes

Bezogen auf das Süßwasserstockwerk gehört das Gebiet des Referenzprofils NORD zum hydrogeologischen Großraum „Nord- und mitteldeutsches Lockergesteinsgebiet“ (s. Abb. 7). Die bestimmenden Landschaftsformen sind dabei die des eiszeitlich geprägten Flachlandes (Altmoränenlandschaft), gegliedert in Hochflächen der Grund- und Endmoränen sowie in Niederungsgebiete der Sander und Urstromtäler. In den mächtigen quartären Ablagerungen kommen mehrere weiträumig verbreitete Grundwasserkörper mit einer hohen Ergiebigkeit vor, die durch Grundwasserhemmer (Geschiebelehm und -mergel, Tone, Schluffe) vertikal untergliedert sind (MANHENKE et al. 2001). Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Grundwasserhemmer liegen in einem charakteristischen Bereich zwischen 10^{-7} m/s und 10^{-11} m/s (ADAM et al. 2000, MATTHESS & UBELL 2003). Die Grundwasserleiter bestehen überwiegend aus Sanden und Kiesen, besitzen ein hohes Porenvolumen und eine Durchlässigkeit von etwa 10^{-4} m/s. Die Mächtigkeit der Grundwasserleiter schwankt sehr stark, beträgt im Durchschnitt etwa 20 m und kann beispielsweise in den glazialen Rinnen auch über 100 m erreichen (JORDAN & WEDER 1995, BurVal Working Group 2006). Der Grundwasserflurabstand des oberen Grundwasserleiters ist häufig sehr gering.

Der Wasserchemismus ist durch die unterschiedlichen Gesteinskomponenten der Aquifere im hydrogeologischen Großraum „Nord- und mitteldeutsches Lockergesteinsgebiet“ insgesamt sehr wechselhaft. Die chemische Heterogenität der Wässer wird zudem durch die hohen Fließgeschwindigkeiten in den Aquiferen gesteuert, die mit entsprechend kürzeren Verweilzeiten des Grundwassers und folglich mit einer geringeren Intensität der Lösungsprozesse im Speichergestein verbunden ist. Generell sind die Grundwässer in den vorweichselkaltzeitlichen oberflächennahen Aquiferen (südwestlich einer Linie Flensburg - Hamburg - Schwerin - Wittstock - Brandenburg) meist Wässer mit geringem Lösungsinhalt (200 mg/l bis 350 mg/l) und nach ihrem chemischen Stoffbestand überwiegend

erdalkalische, karbonatisch-sulfatische Wässer mit einer Gesamthärte von 0-12 °dH (Wasserhärte). Zudem sind in den oberflächennahen Aquiferen der Niederungsgebiete Norddeutschlands häufig erhöhte Eisen- und Mangangehalte anzutreffen, mehr als 0,1 mg/l Eisen bzw. mehr als 0,05 mg/l Mangan, was auf sauerstoffarme Grundwässer sowie einen niedrigen pH-Wert hinweist (BMU 2001).

Durch die Schwerkraft bestimmt, fließt das Grundwasser näherungsweise von den Höhen der Altmoränengebiete den Niederungen zu und die Flüsse stehen generell in direkter hydraulischer Verbindung mit den oberen Grundwasserleitern. Die Hauptvorfluter des Gewässernetzes im Gebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen von Norddeutschland sind Rhein, Ems, Weser sowie Elbe und verlaufen, dem Oberflächengefälle folgend, in Richtung S-N oder SE-NW (JORDAN & WEDER 1995).

Davon abweichend ist die hydrogeologische Situation der Gebiete im südlichen Niedersachsen, die Teil des Großraums „Mitteldeutsches Bruchschollenland“ sind (s. Abb. 7) und sich durch das flächenhafte und oberflächennahe Vorkommen tektonisch beanspruchter, mesozoischer Sedimentgesteine auszeichnen. Durch den sehr heterogenen geologischen Aufbau der oberflächennahen und anstehenden mesozoischen Einheiten sind hier auch die hydrogeologischen Verhältnisse sehr wechselhaft (ELBRACHT et al. 2010). Da diese sehr stark standortabhängig sind, werden solche speziellen hydrogeologischen Verhältnisse im Gebiet des Endlagerstandortmodells NORD nicht weiter berücksichtigt.

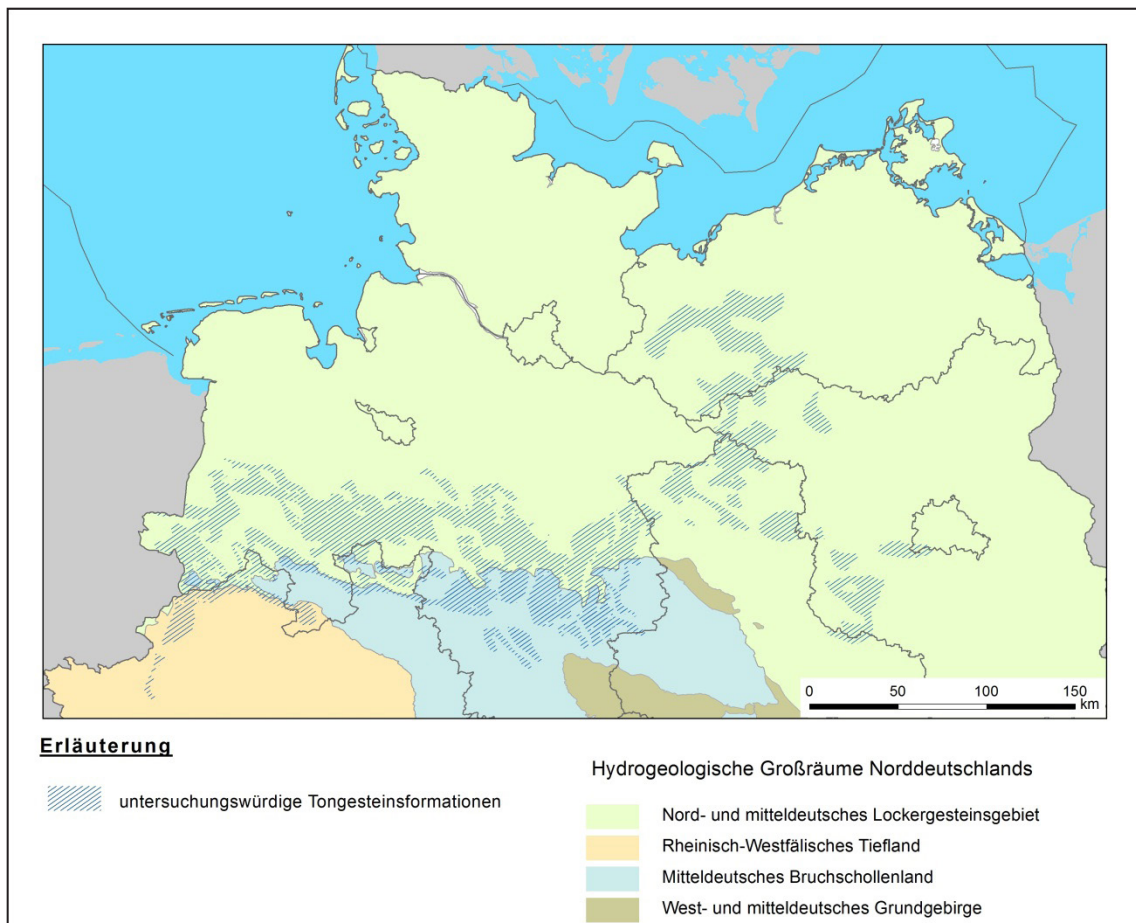


Abb. 7: Hydrogeologische Großräume und untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in Norddeutschland (zusammengestellt aus ELBRACHT et al. 2010 und HOTH et al. 2007)

2.2.2 Hydrogeologie des Salzwasserstockwerkes

Im hydrogeologischen Großraum „Nord- und mitteldeutsches Lockergesteinsgebiet“ grenzen mächtige tonige Ablagerungen, wie der Rupelton (Unter-Oligozän) oder die Unterkreide-Tone, die Süßwasser-Aquifere von dem Salzwasser führenden Grundwasserstockwerk ab. In Norddeutschland weit verbreitete Salzwasser führende Aquifere treten u.a. in den Ablagerungen des Mittleren Buntsandstein, der Stuttgart-Formation, des Rhätkeuper-Lias, des Dogger und der Unterkreide auf. Neben diesen Sandstein-Aquiferen können auch kalkig dominierte Aquifere, wie der Korallenoolith (Oberjura), gute Aquifereigenschaften besitzen (SCHULZ & RÖHLING 2000, FELDRAPPE et al. 2008, MÜLLER & REINHOLD 2011).

Zusammenfassende Arbeiten zur Genese und Verbreitung der Tiefenwässer in Norddeutschland wurden z.B. von HÖLTING (1970), MÜLLER & PAPENDIECK (1975), MÜLLER & NEBEL (1976), THOMAS (1994), HOTH et al. (1997), WOLFGGRAMM (2002, 2011) und MAGRI et al. (2008) erstellt. Danach wird der Chemismus der salinaren Wässer in den Aquiferen durch die

Bildungsbedingungen, diagenetische Prozesse, teilweise durch Ablaugungsprozesse oder eine Infiltration von Wasser in den Aquifer sowie auch von mikrobiologischen Prozessen beeinflusst. Charakteristisch für einen großen Teil des Norddeutschen Sedimentbeckens ist eine Zunahme der Salinität der Wässer mit steigender Tiefe (HOTH et al. 1997). So liegt der Salinitätsgradient in Norddeutschland für die Wässer der Unterkreide bis zum Rhätkeuper im Durchschnitt bei 10 g/l bis 13 g/l pro 100 m. Die Salinitäten der älteren Aquifere (Schilfsandstein und Mittlerer Buntsandstein) sind häufig höher und der Salinitätsgradient liegt etwa bei 15 g/l pro 100 m. Abweichungen von diesem Trend, d. h. ein Salinitätsgradient von 20 g/l bis 25 g/l pro 100 m, sind zumeist durch Ablaugung von Salzgestein bedingt, die in den Ablagerungen des Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper und Malm vorkommen (Abb. 3). Ab einer Tiefe von 2 km bis 3 km oder ab einer Salinität von 250 g/l nimmt die Gesamtmineralisation der Wässer kaum noch zu. Eine Gesamtkonzentration zwischen 300 g/l bis 350 g/l ist an evaporitische Wässer gebunden (WOLFGRAMM et al. 2011).

Die Salinität der Wässer wird durch ihre Hauptbestandteile Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} bestimmt, deren Mengenverhältnis der Klassifikation der Wässer dient. Dabei handelt es sich bei den salinaren Wässern Norddeutschlands überwiegend um Na-Cl- und Na-Ca-Cl-Wässer, wobei für Aquifere mit Tiefenlagen größer 2 km der Ca^{2+} -Gehalt auf Kosten des Na^+ -Gehalts steigt (WOLFGRAMM et al. 2011). Bei den Anionen dominiert Cl^- . Der Cl^- Anteil steigt mit zunehmender Tiefe deutlich an, dagegen kommt es zur Abnahme der HCO_3^- - und SO_4^{2-} -Gehalte. Auch das Redoxpotential und der pH-Wert der Wässer nehmen mit der Tiefe ab, wobei sich der pH-Wert meist zwischen 5 und 7,5 befindet (HOTH et al. 1997, WOLFGRAMM et al. 2011).

Neben der hydraulischen Leitfähigkeit der Gesteine ist die Grundwasserströmung in den tieferen Aquifere stark mit den Lagerungsverhältnissen der Schichten, den Temperaturverhältnissen sowie mit der Viskosität und Dichte der Wässer verknüpft. MAGRI et al. (2008) nehmen für das gesamte mesozoische Grundwasserstockwerk eine geringe Grundwasserströmung (10^{-6} m/a bis 10^{-3} m/a) an.

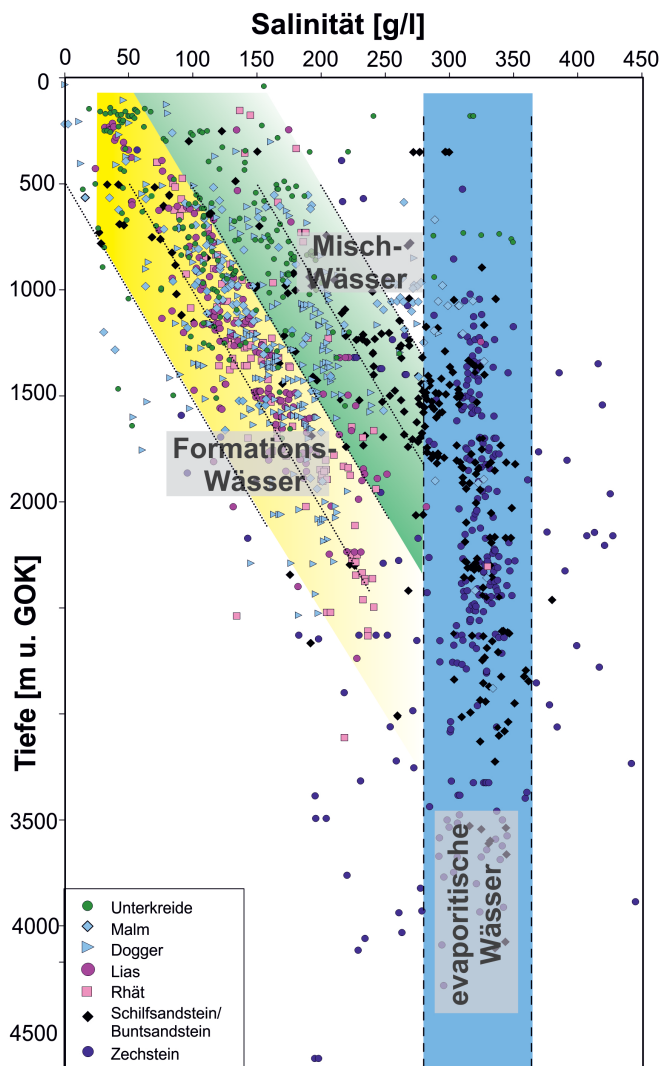


Abb. 8: Salinität der Tiefenwässer des Norddeutschen Beckens (nach WOLFGRAMM et al. 2011)

3 Aufbau und Geologie des Endlagerstandortmodells NORD

Das etwa 70 km² große generische Endlagerstandortmodell wurde auf Grundlage der Arbeiten von BALDSCHUHN et al. (2001) und SCHOTT (1967) mit dem Programm openGEO erstellt (Abb. 9). Basierend auf den geowissenschaftlichen Daten im Bereich des Referenzprofils NORD (REINHOLD & SÖNNKE 2012) und der im Kap. 2 dargestellten geologischen Gesamtsituation wurde ein Endlagerstandortmodell NORD erarbeitet. Es beinhaltet 14 stratigraphische Einheiten vom Zechstein bis zum Quartär und zusätzlich drei sandige Aquifere (Rhätsandstein, Aalensandstein und Hilssandstein). Die Lithologie der Modell-Einheiten (Kap. 3.3) beruht auf den maßgeblichen Merkmalen der im Kap. 2.1 beschriebenen sedimentologischen Verhältnisse. Unter Beachtung der im Kap. 2.2 beschriebenen

Hydrogeologie und der Lithologie der Modell-Einheiten werden im Kap. 3.4 die qualitativen hydrogeologischen Verhältnisse für das Endlagerstandortmodell NORD abgeleitet.

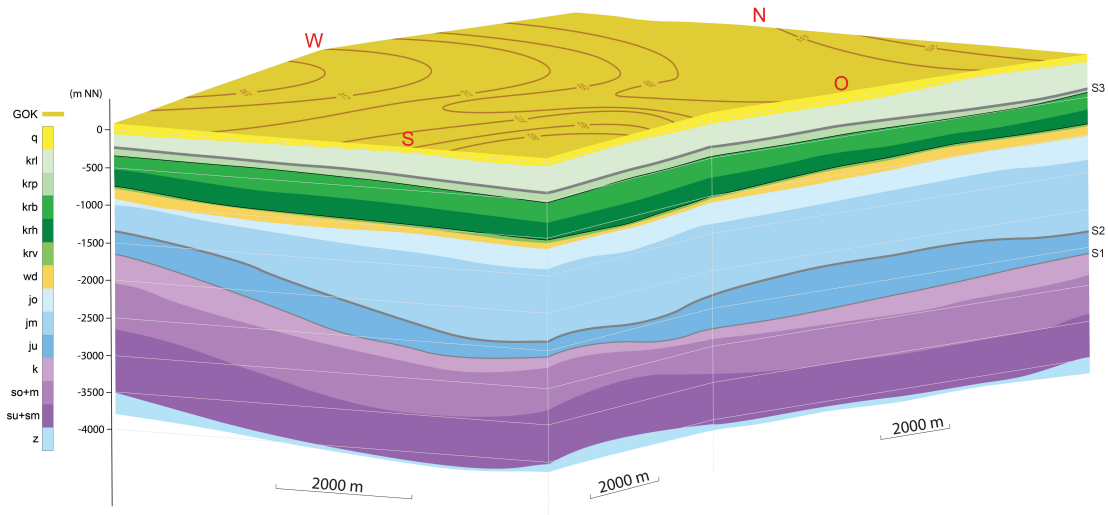


Abb. 9: 3D-Blockbild der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD (Abkürzungen: z = Zechstein, su+sm = unterer und mittlerer Buntsandstein, so+m = oberer Buntsandstein und Muschelkalk, k = Keuper, ju = Unterjura, jm = Mitteljura, jo = Oberjura, wd = Wealden, kvv = Valanginium, krh = Hauterivium, krb = Barremium, krp = Aptium, krl = Albium, q = Quartär, GOK = Geländeoberkante, S1 = Rhätsandstein, S2 = Aalensandstein, S3 = Hilssandstein)

Angaben von gesteinsphysikalischen Parametern des Wirtsgesteins (Modell-Einheiten Hauterivium und Barremium) werden in Teil II des Gesamtberichts von JAHN & SÖNNKE (2013) und zusammenfassend im Kap. 4 beschrieben. In Teil III (NOWAK & MASSMANN 2013) ist die Auswahl von Parameterwerten für erste thermische, hydraulische und mechanische (THM) Modellberechnungen für das Endlagerstandortmodell NORD dokumentiert.

3.1 Geomorphologie

In REINHOLD & SÖNNKE (2012) wird ein Referenzprofil NORD vorgeschlagen, dessen untersuchungswürdige Tongesteine der Unterkreide (HOTH et al. 2007) sich überwiegend in einem Gebiet mit topografischen Höhen zwischen 50 m und 85 m befinden. Dem entsprechend wurden für das Endlagerstandortmodell NORD topografische Höhen von etwa 55 m bis 85 m über NN festgelegt, wobei die Werte geringfügig darunter bzw. darüber liegen können (Abb. 10).

Im Gebiet des etwa 70 km² großen Endlagerstandortmodells NORD beruht das Relief auf den Vorkommen von glazialen Sedimenten (Grund- und Endmoränen der Saale-Kaltzeit). Es wurde durch periglaziale Prozesse beeinflusst sowie durch die klimatischen Bedingungen des Holozäns mitbestimmt. Kennzeichnend für die Topographie des Endlagerstandortmodells

NORD ist eine Neigung des Oberflächengefälles insgesamt in Richtung Norden. Der in Abb. 10 dargestellte Einschnitt eines kleinen Tales in Richtung Südwesten besitzt keinen oberirdischen Abfluss.

Die Analyse der Reliefentwicklung gibt Hinweise auf tektonische Prozesse, wie die Hebungs- oder Senkungstendenzen einer Region. Die Tiefenlage der Basis des Rupeltons (Unter-Oligozän) etwa auf Höhe von NN (GAST et al. 2012) und die geringe Mächtigkeit der quartären Ablagerungen deuten darauf hin, dass sich das Referenzprofil NORD südlich und außerhalb der Zentraleuropäischen Subsidenzzone (LUDWIG 2001) befindet. Für die Region südlich der Zentraleuropäischen Subsidenzzone werden von LUDWIG (2001) Hebungstendenzen bis zur Mittelgebirgsregion beschrieben, die auch mit den Angaben aus BfS (2002) übereinstimmen. Dementsprechend wird am Endlagerstandortmodell NORD eine geringe Hebungstendenz von 0,1 mm/a angenommen.

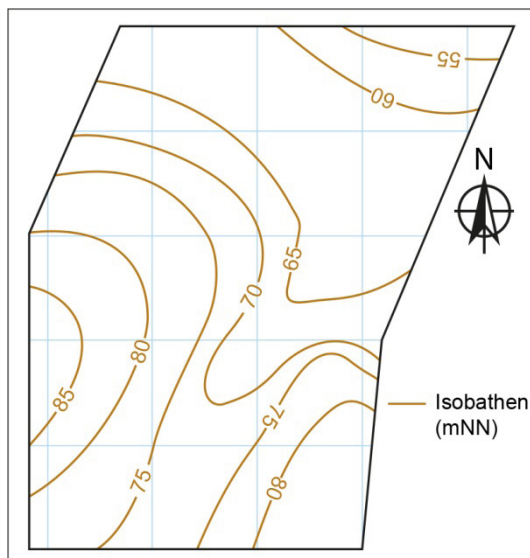


Abb. 10: Topografie für das Endlagerstandortmodell NORD (Gitterlinienabstand 2 km)

3.2 **Strukturgeologische Gegebenheiten**

Im Projekt AnSichT werden für das Endlagerstandortmodell NORD Informationen zur Bedeutung von Klüften und Störungen bei einer Sicherheitsanalyse aus den Untersuchungen von Tongesteinen ähnlicher Zusammensetzung sowie Ergebnisse von Standorterkundungsprogrammen im Rahmen von Endlagerprojekten in der Schweiz und in Frankreich berücksichtigt. Im Folgenden werden die strukturgeologischen Gegebenheiten für das Endlagerstandortmodell NORD generell beschrieben, ein generisches Kluft- und Störungsinventar wurde jedoch nicht modelliert.

Im Gebiet des Referenzprofils NORD (REINHOLD & SÖNNKE 2012) sind zahlreiche geologische Strukturzüge bekannt, die entweder in der NNE-SSW-Richtung verlaufen oder aber etwa der WNW-ESE- bis NW-SE-Richtung folgen. Teil dieser meist mit mehreren Zehnerkilometer Abstand auftretenden Strukturzüge sind Störungszonen, tektonische Gräben, Salzstöcke oder Salzkissen, die in entsprechenden Richtungen orientiert sind (BALDSCHUHN & KOCKEL 1998). Die meisten dieser Strukturzüge wurden im älteren Mesozoikum als stockwerksübergreifende Störungszonen angelegt. Im jüngeren Mesozoikum und teilweise auch im Tertiär kam es an diesen geologischen Schwächezonen wiederholt zu tektonischen Bewegungen (vgl. BALDSCHUHN & KOCKEL 1998, BRÜCKNER-RÖHLING et al. 2002). Aktive bruchtektonische Bewegungen in den Störungszonen werden ausgeschlossen, da im Gebiet des Referenzprofils NORD für die jüngste Vergangenheit (seit etwa 1200 Jahren) nur eine geringe Seismizität nachzuweisen ist (Erdbebenzone 0 nach LEYDECKER et al. 1999). Für die Zukunft wird erwartet, dass sich endogen verursachte Gebirgsspannungen durch Bewegungen in diesen existierenden geologischen Schwächezonen abbauen. Entsprechende Vorstellungen liegen den Standorten in Meuse/Haute-Marne (ANDRA 2005: 158-165) und im Zürcher Weinland (NAGRA 2008: 92) zugrunde.

Die Lage des Endlagerstandortmodells NORD wurde so gewählt, dass es von keinem dieser typischen Strukturzüge durchquert wird. Die mesozoischen und känozoischen Schichtenfolgen des generischen 3D-Modells sind daher nicht durch markante bruchtektonische, salinartektonische oder halokinetische Strukturen verstellt. Parallel zu den Modellgrenzen und mit mehreren Kilometern Abstand verlaufen fiktive NNE-SSW gerichtete stockwerksübergreifende Störungszonen, an die langgestreckte Salinarstrukturen gebunden sind. Die Mächtigkeiten und Lagerungsverhältnisse insbesondere der präkretazischen Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD sind durch die Salzabwanderung im Untergrund beeinflusst (s. Kap. 3.3). Da heute die Salzstöcke im Gebiet des Referenzprofils NORD oft nur noch von schmalen Salzkissen begleitet sind, wird für die Salzstöcke in der unmittelbaren Umgebung des Endlagerstandortmodells NORD eine hohe strukturelle Reife angenommen.

Allgemein nimmt in Richtung größerer Störungszonen die Zahl begleitender Störungen und Klüfte zu. Eigenschaften und Ausprägung von Störungen werden u.a. durch die sowohl zeitlich als auch räumlich und in der Intensität unterschiedlichen Kompressions-, Dehnungs- und Scherkräfte (JACOBSHAGEN et al. 2000) beeinflusst. Sie sind auch abhängig von der Lithologie, den Druck- und Temperaturbedingungen (CAINE et al. 1996). Ein Kluftsystem am Endlagerstandortmodell NORD kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Dementsprechend wird für das Endlagerstandortmodell NORD festgelegt, dass die in der Vergangenheit aufgetretenen Gebirgsspannungen zur Entstehung von Trennflächen mit geringfügigem Versatz und bevorzugten räumlichen Ausrichtungen führten. Anhand

der Ausrichtungen der Strukturzüge am Referenzprofil NORD werden folgende Hauptstreichrichtung von generischen Klüftscharen im tieferen Untergrund angenommen: eine NNE-SSW streichende Richtung sowie untergeordnet eine NW-SE streichende Richtung.

Für die hydraulische Durchlässigkeit von Störungen und Klüften in Tongestein wurde bei Untersuchungen und Beobachtungen in Bohrungen und Tunneln im Opalinuston festgestellt, dass sich diese nicht signifikant von derjenigen des ungestörten Tongesteins unterscheidet, sofern die Gebirgsmächtigkeit im Hangenden mindestens 200 m beträgt (NAGRA 1994, 2008). Auch die Existenz von Erdöl- und Erdgaslagerstätten, in von Störungen geprägten Gebieten, liefert deutliche Hinweise auf eine fehlende hydraulische Wirksamkeit der Klüfte und Störungen in der tonigen, abdeckenden und in ausreichenden Tiefen liegenden Schichtenfolge (BOIGK 1981).

Aufgrund der unterschiedlichen Lithologie der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD kann angenommen werden, dass auch Klüfte und Störungen in den einzelnen Modell-Einheiten hinsichtlich ihrer hydraulischen Wirksamkeit unterschiedlich ausgeprägt sind. Für die lagenweise vorkommenden Kalksteine und Dolomite in den Modell-Einheiten Oberer Buntsandstein und Muschelkalk, Keuper und Oberjura sind evtl. hydraulisch durchlässige Klüfte zu erwarten. Im Gegensatz dazu wird für die durch Tongestein dominierten Modell-Einheiten, inklusive des Wirtsgesteins, ein System von geschlossenen, hydraulisch undurchlässigen Klüften angenommen.

Neben den endogen bedingten Gesteinsdeformationen können Klüfte und Störungen auch atektonisch (pseudotektonisch) entstehen. Diese oft im oberflächennahen Bereich anzutreffenden Strukturen sind vorrangig auf gravitative, chemische, thermische oder glaziale Beanspruchungen zurückzuführen. Beispiele dafür sind: Schrumpfrisse, die durch die Entwässerung von Sedimenten entstehen (bspw. bei der Kompaktion), Entlastungsklüfte subparallel zur Geländeoberfläche, Subrosion, die zur Deformation des hangenden Gebirges führt oder Klüfte und Störungen, die durch die Auflast und Bewegung des Inlandeises (Eistektonik) im oberflächennahen Bereich entstehen (REUTER et al. 1996, JACOBSHAGEN et al. 2000). Da sich das Gebiet des Referenzprofils NORD im Verlaufe der Elster- und der Saale-Kaltzeit im Bereich der vollständigen Eisbedeckung und nahe dem südlichen Eisrand (EHLERS 2011) befand, werden oberflächennahe Störungen in den quartären Abfolgen, die aufgrund eistektonischer Prozesse entstanden sind, am Endlagerstandortmodell NORD angenommen.

3.3 Die stratigraphischen Modell-Einheiten

Zechstein (z)

Entsprechend der strukturgeologischen Stockwerksgliederung im Gebiet des Referenzprofils NORD (s. Kap. 2) sind die Ablagerungen des Zechstein die unterste Modell-Einheit im Endlagerstandortmodell NORD. Die Basisfläche des Zechstein ist im Endlagerstandortmodell konkav geformt und liegt größtenteils in Tiefen unter 4000 m u. NN bis etwas tiefer als 4200 m u. NN. Die Mächtigkeit der geologischen Einheit liegt meist zwischen 50 m und 400 m. Richtung Westen treten auch höhere Mächtigkeitswerte auf (Abb. 11). Das Endlagerstandortmodell NORD befindet sich in einem Gebiet, aus dem das Salz des Zechstein in benachbarte Salinarstrukturen abgewandert ist, welche außerhalb des Endlagerstandortmodells NORD liegen (s. Kap. 3.2). Dieser Prozess ist größtenteils abgeschlossen. Lediglich im Westen ist eine höhere Mächtigkeit der Salzgesteine auszuweisen. Diese Mächtigkeitszunahme beeinflusst die Lagerungsverhältnisse der geologischen Einheiten im Hangenden. Im Endlagerstandortmodell weisen daher alle Modell-Einheiten eine Hochlage im Westen auf.

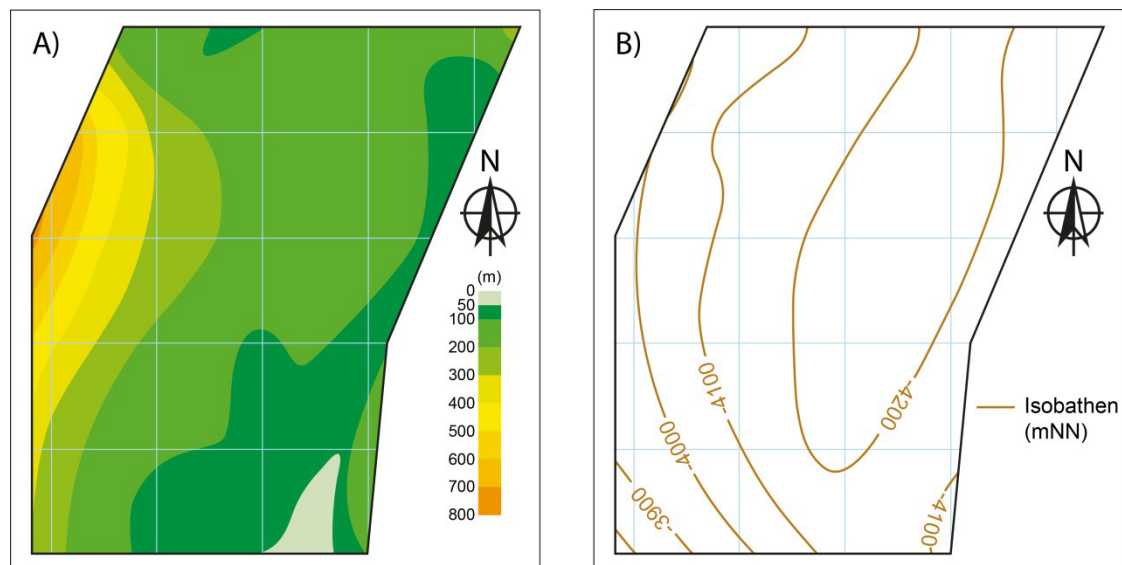


Abb. 11: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Zechstein (Gitterlinienabstand 2 km)

Unterer und Mittlerer Buntsandstein (su+sm)

Die Gesamtmächtigkeit der Modell-Einheit Unterer und Mittlerer Buntsandstein liegt zwischen 400 m und größer 900 m (Abb. 12). Der mehrere 100 m mächtige Untere Buntsandstein ist vorrangig eine Abfolge aus tonigen und feinsandigen Sedimenten. Der stärker sandig dominierte Mittlere Buntsandstein wird ebenfalls mehrere 100 m mächtig und ist durch eine zyklische Wechsellagerung aus Sand- und Tonsteinen gekennzeichnet. Die Sandsteinhorizonte des Unteren und Mittleren Buntsandstein bilden oft ein regional zusammenhängendes hydrodynamisches System und werden daher häufig als Aquifer-system zusammengefasst (s. Kap. 3.4).

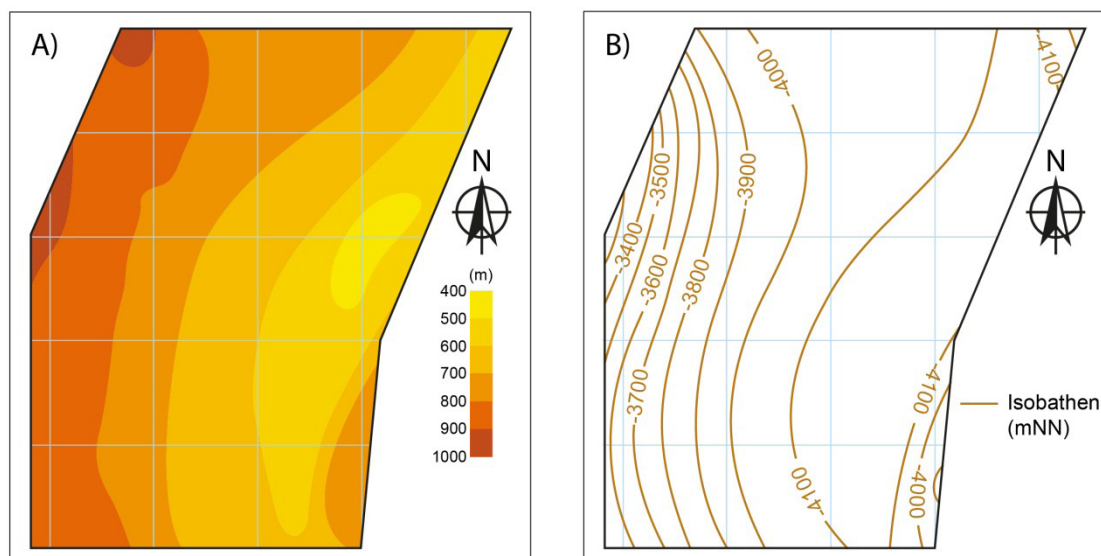


Abb. 12: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Unterer und Mittlerer Buntsandstein (Gitterlinienabstand 2 km)

Oberer Buntsandstein und Muschelkalk (so+m)

Die Basis des Oberen Buntsandsteins befindet sich im Endlagerstandortmodell NORD größtenteils in Tiefen zwischen 2800 m u. NN und 3600 m u. NN. Größere Tiefenwerte liegen im südöstlichen Teil des Modells. Richtung Westen verringert sich die Tiefenlage bis auf etwa 2300 m u. NN (Abb. 13). Im Oberen Buntsandstein (Röt-Folge) überwiegen pelitische Sedimente, wobei im unteren Teil der Röt-Folge zwei Salzlager vorkommen, die hier zusammen etwa 100 m mächtig sind.

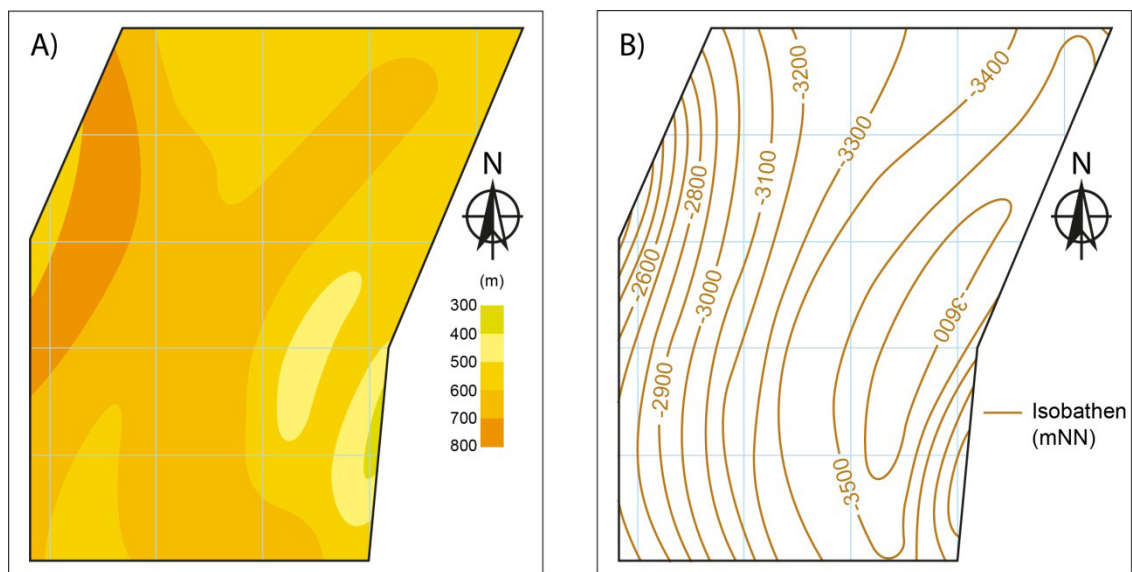


Abb. 13: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Oberen Buntsandstein und Muschelkalk (Gitterlinienabstand 2 km)

Die Gesamtmächtigkeit des Muschelkalk im Endlagerstandortmodell beträgt etwa 350 m, wobei die Ablagerungen meist in Tiefen größer als 2000 m u. NN liegen. Der Untere Muschelkalk (Wellenkalk) ist durch Kalksteine dominiert, in die Dolomit- und Anhydritlagen eingeschaltet sind. In der Abfolge enthalten sind die markanten Oolithbänke, Terebratelbänke und Schaumkalkbänke, die aufgrund der Lithofazies eine etwas größere Porosität aufweisen können. Typisch für den Mittleren Muschelkalk sind saline Schichten, die Zehnermeter mächtig sind, in einer zyklisch aufgebauten Schichtenfolge mit Kalkstein, Anhydritbänken sowie Schichten von Anhydritmergeln und Mergelsteinen. Der Obere Muschelkalk besteht vorrangig aus bankigen Kalksteinen, Mergelstein und Kalkstein-Tonstein-Wechselfolgen.

Keuper (k)

Im gesamten Endlagerstandortmodell NORD sind die lithologisch sehr heterogenen Ablagerungen der Modell-Einheit Keuper verbreitet. Im größten Teil des Modells schwankt die Gesamtmächtigkeit zwischen 400 m und 700 m (Abb. 14). Die im zentralen Teil des Modells auftretende hohe Mächtigkeit der Ablagerungen deutet auf eine Abwanderung der Zechsteinsalze und die Entstehung einer Randsenke während des Keuper hin. Die vergleichsweise deutlich geringere Mächtigkeit im Osten wird von einer im Keuper vorhandenen Schwelle verursacht, z.B.. durch ein Salzkissen im Untergrund.

Der Untere Keuper ist durch eine brackisch-lagunäre bis fluviatil-limnische Entwicklung gekennzeichnet, die zur Ablagerungen von Tongesteinen und Siltgesteinen sowie untergeordnet Fein- bis Mittelsandsteinen führte. Insgesamt ist diese Modell-Einheit wenige Zehnermeter mächtig. Der Mittlere Keuper ist marin beeinflusst. Die Sedimente entstanden auf einem flachen Schelf. Dabei handelt es sich vorwiegend um Ton- und Siltgesteine, in denen evaporitische, tonige und dolomitische Lagen auftreten. In der Stuttgart-Formation kommen Wechselfolgen von dünnen Sand- und Tongesteinslagen vor, die Aquifer-Eigenschaften besitzen können. Der Obere Keuper (Rhätkeuper) wird in den vorwiegend tonigen Unter-Rhätkeuper, den sandsteinführenden Mittel-Rhätkeuper und wieder vorwiegend tonigen Ober-Rhätkeuper gegliedert. Folglich wurde am Top der Modell-Einheit Keuper ein zehn Meter mächtiger Rhätsandstein-Horizont in das 3D-Modell eingefügt (s. Kap. 3.4).

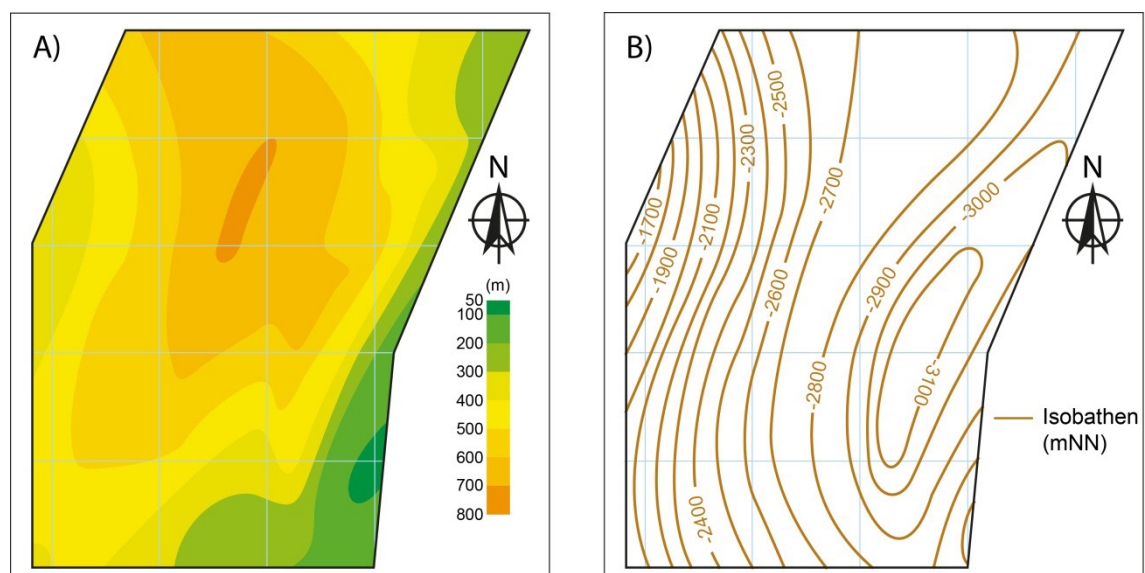


Abb. 14: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Keuper (Gitterlinienabstand 2 km)

Unterjura (ju)

Die Modell-Einheit Unterjura ist vor allem durch tonige Sedimente charakterisiert. Die Basis der jurassischen Ablagerungen im Modell liegt meist im Tiefenbereich von 1400 m u. NN bis 2800 m u. NN (Abb. 15). Die Mächtigkeit der Sedimente des Unterjura liegt größtenteils zwischen 300 m und 600 m, wobei sich das Maximum der Mächtigkeit gegenüber dem Keuper in Richtung Osten verschoben hat (vgl. Abb. 14 und Abb. 15). Die Variation der Mächtigkeit deutet auf eine bevorzugte Salzabwanderung im Untergrund in Richtung Osten. Die geringe Mächtigkeit der Sedimente des Unterjura im Nordwesten und Südosten ist mit Schwellengebieten des Unterjura verbunden, die z.B. durch die Bildung von Salzkissen im Untergrund entstanden. In der Modell-Einheit wird, analog zum Posidonienschiefer, ein etwa 20 m mächtiger Ton- bis Mergelsteinhorizont mit einem Anteil von bis zu 15 % an organischem Kohlenstoff angenommen.

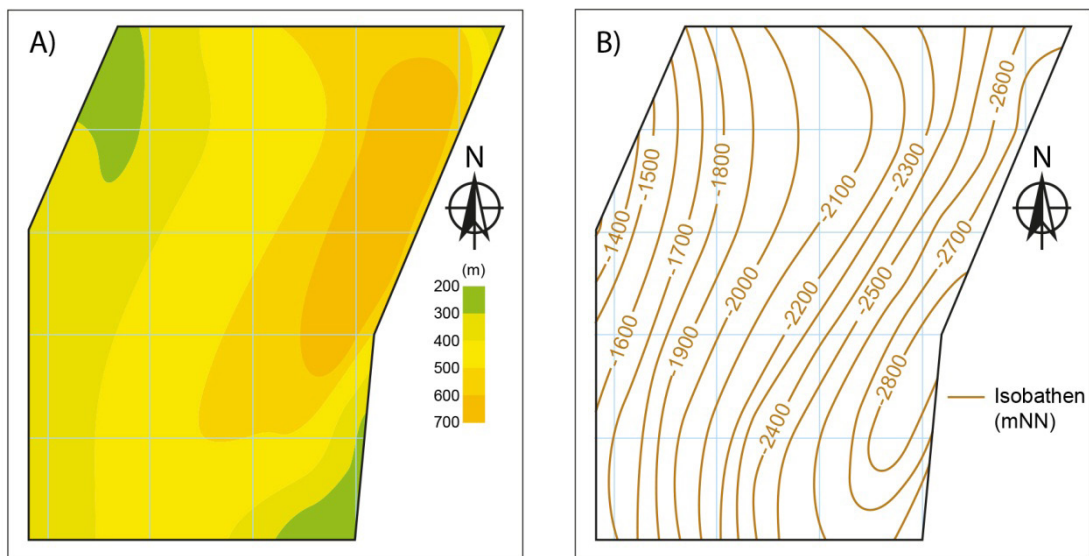


Abb. 15: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Unterjura (Gitterlinienabstand 2 km)

Mitteljura (jm)

Schichten des Mitteljura sind im gesamten Gebiet des Endlagerstandortmodells NORD verbreitet und erreichen ihre größten Tiefenwerte im Osten des Modells (Abb. 16). Dort besitzt die Modell-Einheit ein Mächtigkeitsmaximum von mehr als 900 m, wogegen die Ablagerungen im Westen nur Werte zwischen 100 m und 400 m erreichen. Die Ursache der reduzierten Mächtigkeit im Westen, ist mit dem Einfluss einer Schwellenregion begründet, z.B. durch die weitergehende Entwicklung des Salzkissens im Untergrund. Im Vergleich zur Entwicklung im Unterjura hat sich das Gebiet der maximalen Ablagerungsmächtigkeit weiter in Richtung Osten verschoben (Abb. 15 und Abb. 16). Somit hängt auch hier die Variation der Mächtigkeit, wie sie im Keuper und dem Unterjura sichtbar wird, sehr wahrscheinlich mit der Halokinese der Zechstein-Salze im Untergrund zusammen.

An der Basis der vorwiegend aus Ton- und Tonmergelgestein sowie vereinzelt Siltsteinlagen bestehenden Schichtenfolge wurde exemplarisch für die möglichen Sandsteinhorizonte im Bathonium und Aalenium ein 20 m mächtiger sandiger Aquifer mit geringer Durchlässigkeit modelliert und ins 3D-Modell integriert (Aalensandstein, s. Kap. 3.4).

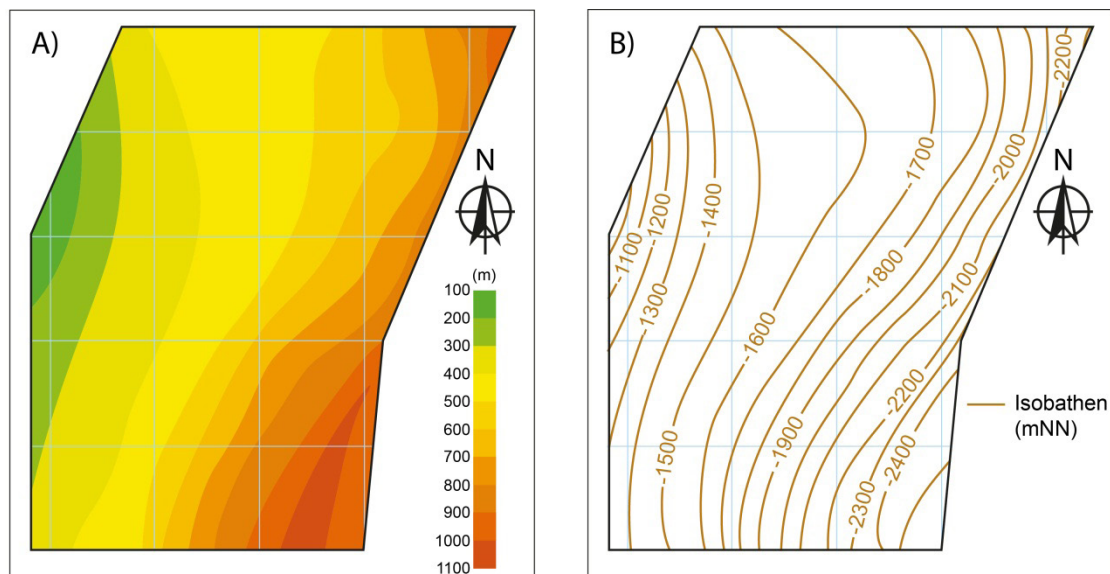


Abb. 16: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Mitteljura (Gitterlinienabstand 2 km)

Oberjura (jo)

Die vorrangig kalkig dominierten Sedimente des Oberjura liegen meist tiefer als 1000 m u. NN und haben größtenteils eine Gesamtmächtigkeit von 50 m bis 200 m (Abb. 17). Auch diese Modell-Einheit weist den Trend einer höheren Mächtigkeit und Tiefenlage in Richtung Osten auf.

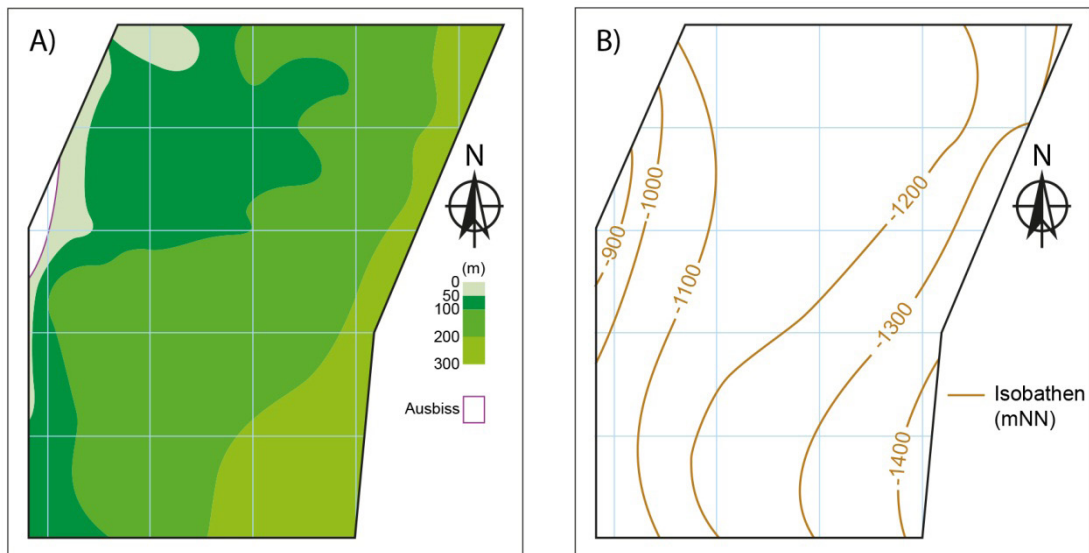


Abb. 17: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Oberjura (Gitterlinienabstand 2 km)

Wealden (wd)

Die Modell-Einheit Wealden ist durch brackische Ablagerungen gekennzeichnet, die eine enge Wechsellagerung und Verzahnung von Ton- und Sandsteinen aufweisen, z.T. mit einer bituminösen Tongestein-Fazies. Im Endlagerstandortmodell NORD liegt die Gesamtmächtigkeit dieser Ablagerungen größtenteils zwischen 100 m und 200 m (Abb. 18). Im Gegensatz zu den älteren geologischen Einheiten ist das Relief an der Basis der Modell-Einheit Wealden deutlich ausgeglichener, die Tiefenlage im Modell variiert um etwa 200 m und das Maximum der Tiefe liegt bei etwa 1100 m u. NN.

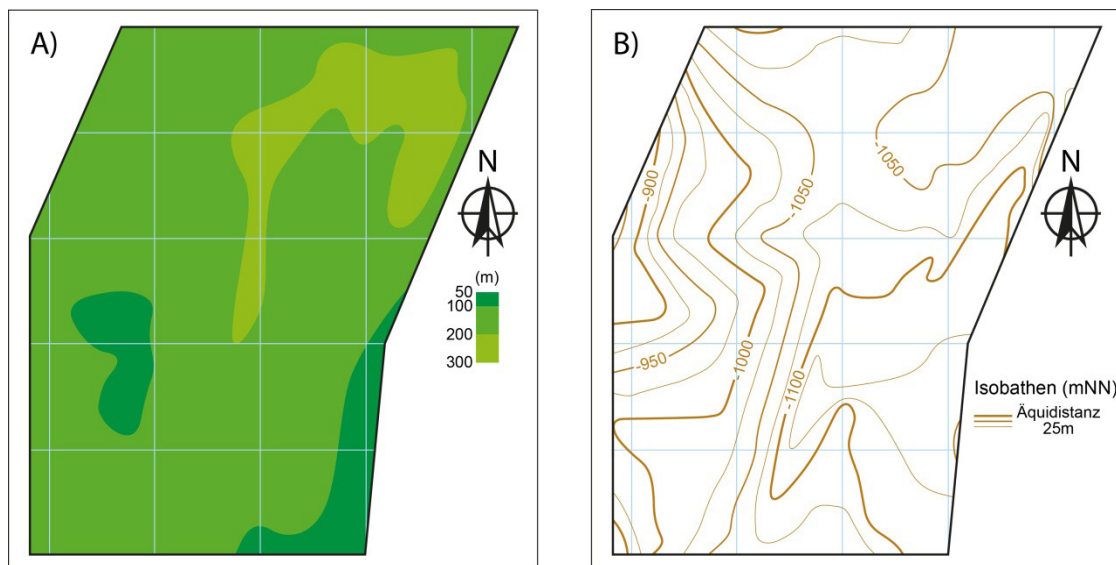


Abb.18: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Wealden (Gitterlinienabstand 2 km)

Valanginium (krv)

Im Valanginium kam es im Verlaufe einer Transgression zur Entstehung geringmächtiger Gerölllagen mit teilweise glaukonitischen Sanden, so dass vereinzelt dünne, sandige Schichten als Linsen an der Basis der tonigen Schichtenfolge eingeschaltet sind. Mit der Transgression erfolgt der Wechsel von der terrestrisch beeinflussten Modell-Einheit Wealden zur Fazies der marinen Unterkreide der Modell-Einheiten Valanginium, Hauterivium, Barremium, Aptium und Albium.

Im Endlagerstandortmodell NORD sind die Ablagerungen des Valanginium flächendeckend vorhanden. Die Schichtenfolge der Modell-Einheit Valanginium besteht aus Ton- und Tonmergelsteinen, die maximal in Tiefen zwischen 700 m u. NN und 1100 m u. NN liegen (Abb. 19).

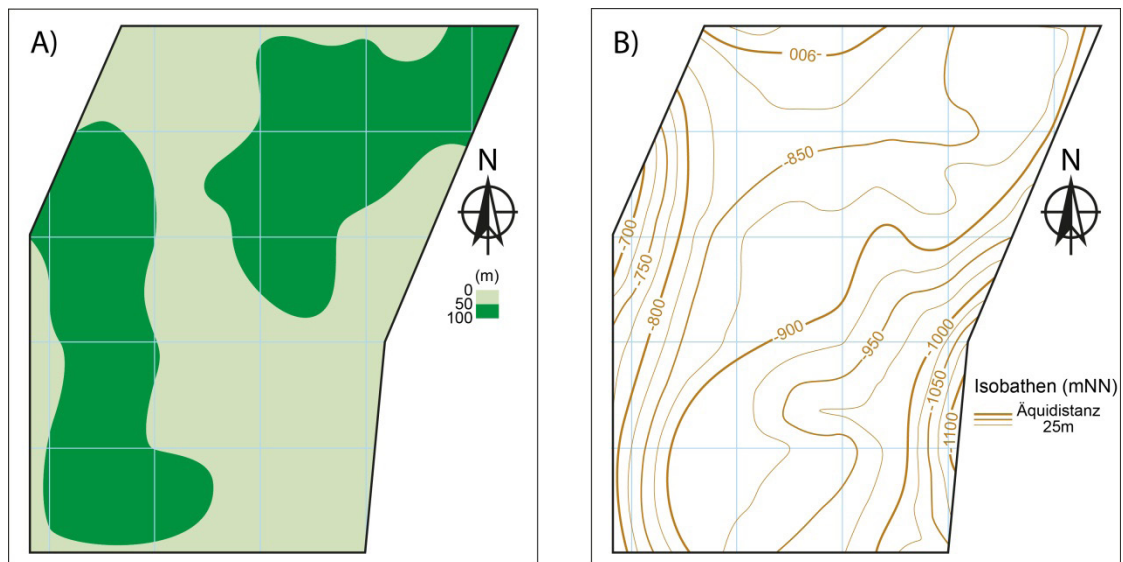


Abb. 19: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Valanginium (Gitterlinienabstand 2 km)

Hauterivium (*krh*; Wirtsgestein)

Ablagerungen des Hauterivium sind im gesamten Endlagerstandortmodell NORD flächenhaft verbreitet. Dessen Gesamtmächtigkeit schwankt zwischen 200 m und 300 m. Geringere Mächtigkeitswerte (100 m bis 200 m) finden sich in einem maximal 1 km breiten und 4 km langen Streifen am nordöstlichen Rand des Modellgebietes (Abb. 20). Die Modell-Einheit Hauterivium liegt in Tiefen zwischen 1050 m u. NN (Unterkante, Abb. 20) und 450 m u. NN (Oberkante, Abb. 21).

Die tonigen Sedimente des Hauterivium sind im Gebiet des Referenzprofils NORD in Unter- und Ober-Hauterive gegliedert, die etwa gleich mächtig sind. Während das Unter-Hauterivium durch Wechsellagerungen von Kalk- und Kalkmergelbänken mit Illit- und Kaolinit-führenden Tonstein- und Tonmergelsteinbänken mit Pyrit- und Sideritkonkretionen gekennzeichnet ist, baut sich das Ober-Hauterivium durch Wechselfolgen von schwach pyritischen Tonstein- und schwach bituminösen Tonmergelsteinlagen mit gelegentlich auftretenden mikritischen Kalkmergelbänken auf.

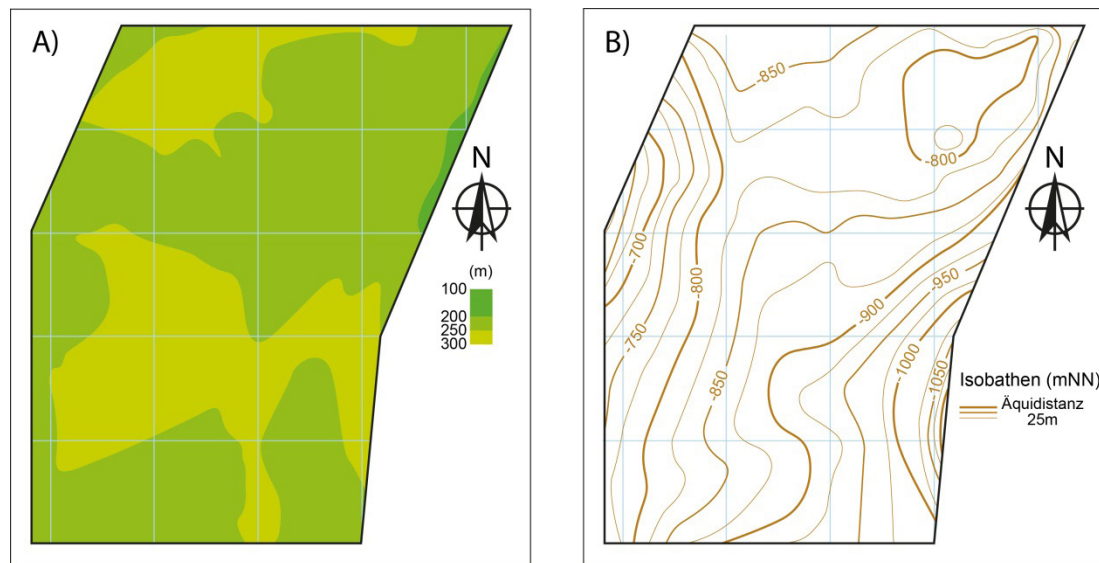


Abb. 20: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Hauterivium (Gitterlinienabstand 2 km)

Barremium (krb; Wirtsgestein)

Im Bereich des Endlagerstandortmodells NORD sind die Ablagerungen des Barremium mit Gesamtmächtigkeiten zwischen 200 m und 400 m verbreitet (Abb. 21). Die mit 300 m bis 400 m größten Mächtigkeitswerte finden sich in einem bis 4 km breiten und ca. 6 km langen Gebiet im zentralen und südöstlichen Teil des Endlagerstandortmodells NORD. Die Größe dieses Areals beträgt ca. 16 km² und nimmt damit ca. 25 % des Modellgebiets ein. Im restlichen Teil erreicht die Modell-Einheit Barremium Mächtigkeitswerte zwischen 200 m und 300 m – ausgenommen von einem schmalen Streifen geringerer Mächtigkeit am nordöstlichen Rand des Endlagerstandortmodells NORD (Abb. 21). Von der Gesamtmächtigkeit der Modell-Einheit entfallen $\frac{1}{3}$ auf das Unter-Barremium und $\frac{2}{3}$ auf das Ober-Barremium, zu dem auch das früher ausgehaltene „Mittel-Barremium“ zu zählen ist.

Das Unter-Barremium besteht aus teilweise schwach bituminösen Ton- bis Tonmergelsteinen mit lagenweise auftretenden Schalenresten und gelegentlich Fischschuppen. Große Teile des Unter-Barremium werden durch den Hauptblättertton, einen laminierten bituminösen Tonstein, eingenommen. Am Top des Unter-Barremium finden sich, vereinzelt und linsenartig, geringmächtige Feinsandlagen.

Das untere wie auch das obere Ober-Barremium bauen sich ebenfalls aus Lagen von Ton- bis zu Tonmergelsteinen auf, die im unteren Ober-Barremium schluffig ausgebildet sein können. Auch im Ober-Barremium sind schwarze, bituminöse Blättertone vorhanden, die insgesamt aber geringmächtiger als der Hauptblättertton des Unter-Barremium sind. Sie werden zur „dunklen Tonstein-Folge“ (DTF) zusammengefasst (KEMPER 1995). Im oberen Ober-Barremium können Kalkmergelbänke eingeschaltet sein. Die tonige Komponente der Ton- bis Tonmergelsteine besteht zumeist aus Illit und Kaolinit. Im gesamten Barremium ist Pyrit in Form kleiner Kristalle sowie in Konkretionen und Knollen vorhanden. Charakteristisch sind ferner Schalenreste, Fischschuppen, Ammoniten und Belemniten sowie oftmals pyritisierte Grabgänge. Die DTF ist durch Karbonatkonkretionen (teils Calcit, teils Siderit, teils Mischformen) gekennzeichnet.

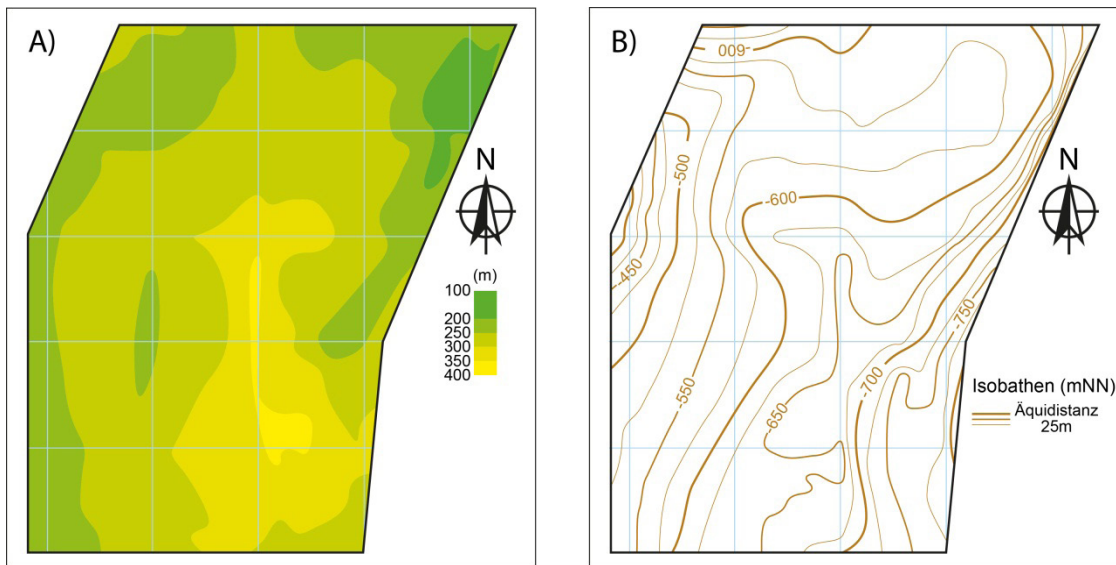


Abb. 21: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Barremium (Gitterlinienabstand 2 km)

Aptium (krp)

Die Modell-Einheit Aptium wird durch eine Schichtfolge von Ton- und Mergelgesteinen gebildet. Während im unteren Aptium die Tongesteine, z.T. als blättrige Fischechiefer, dominieren, nimmt der Anteil an helleren Mergeln im mittleren Aptium zu. Im Ober-Aptium dominieren karbonatarmer Tongesteine und es kommen smektitreiche tuffitische Lagen vor. Insgesamt erreicht die Schichtfolge eine Mächtigkeit bis zu 200 m (Abb. 22). Im zentralen Bereich des Endlagerstandortmodells NORD liegt die Schichtfolge relativ horizontal mit einer maximalen Tiefe um 300 m. Im östlichen Teil des Modellgebietes liegt die Modell-Einheit in einem ein bis zwei Kilometer breiten Streifen tiefer. Dies wurde durch die Randsenkenentwicklung einer langgestreckten NNE-SSW streichenden Salinarstruktur verursacht (Kap. 3.2).

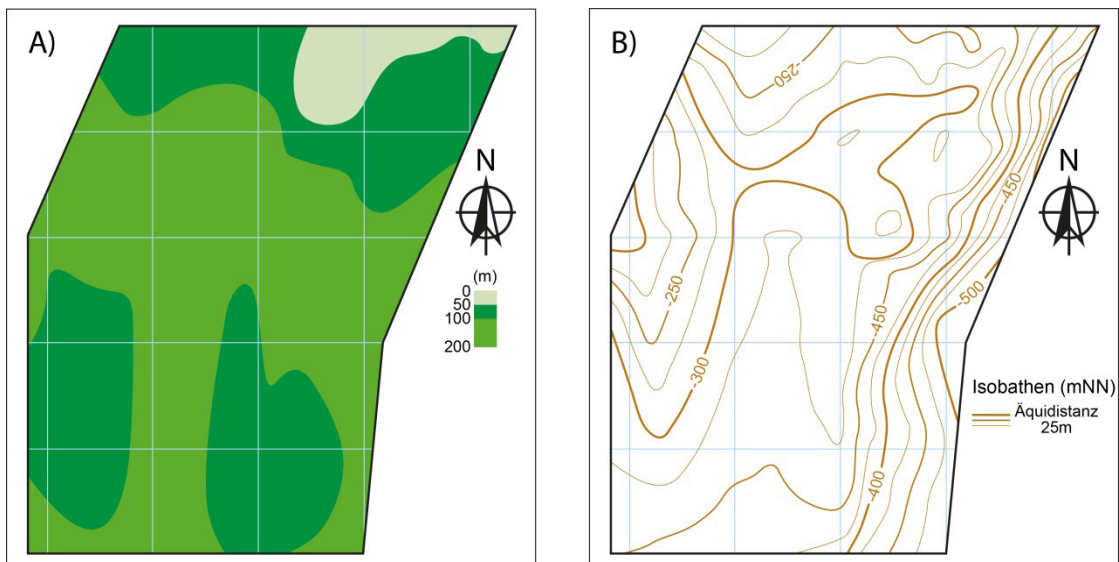


Abb. 22: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Aptium (Gitterlinienabstand 2 km)

Albium (krl)

Die jüngste Schichtenfolge der marinen Unterkreide wird vorrangig von einer Wechselfolge von Ton- und Mergelgesteinen gebildet, die zum Top zunehmend mergeliger wird. Im Topbereich treten die 25 m bis 35 m mächtige Flammenmergel auf. Diese bestehen aus schluffigen bis feinsandigen Mergel- und Mergeltonsteinen, die meist verkieselt sind und eine hohe Härte besitzen. Die Modell-Einheit Albium besitzt meist eine Mächtigkeit von 100 m bis 300 m (Abb. 23) und schließt die mesozoische Schichtenfolge im Endlagerstandortmodell NORD ab. An der Basis der Modell-Einheit Albium wurde zusätzlich ein Hilssandstein-Horizont mit einer Mächtigkeit von 35 m in das 3D-Modell integriert (s. Kap. 3.4).

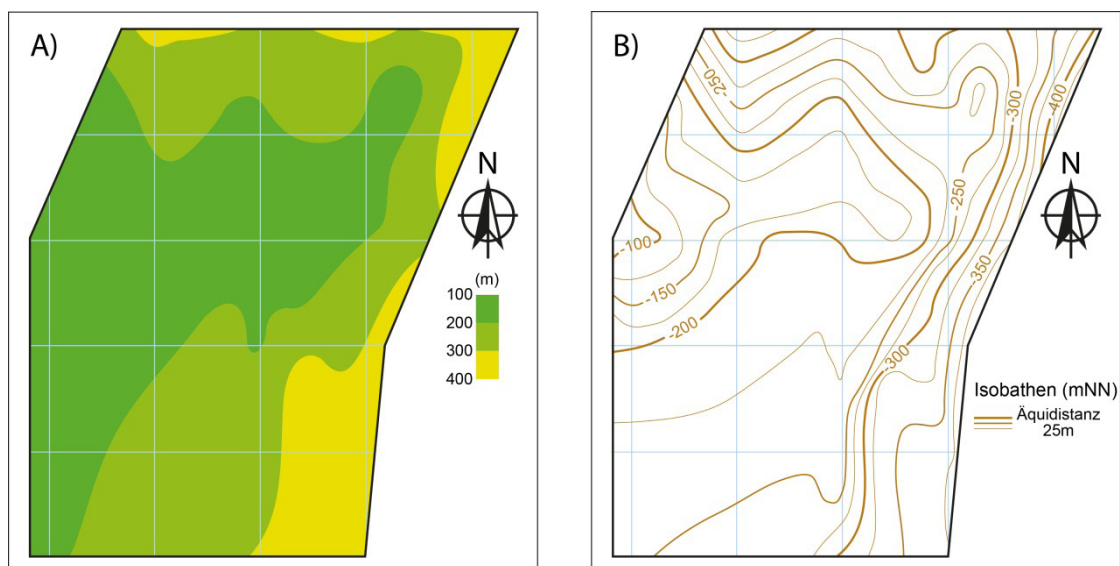


Abb. 23: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Albium (Gitterlinienabstand 2 km)

Quartär (q)

Die Ablagerungen der Modell-Einheit Quartär sind fluviatile, glazifluviatile und glaziale Sedimente, die flächendeckend die Ablagerungen der Unterkreide im Endlagerstandortmodell NORD überdecken. Die Mächtigkeit der quartären Lockersedimente erreicht maximale Werte bis etwa 150 m (Abb. 24). Das mögliche Auftreten von glazialen Rinnen (s. Kap. 2.1) wurde in der Modell-Einheit nicht berücksichtigt.

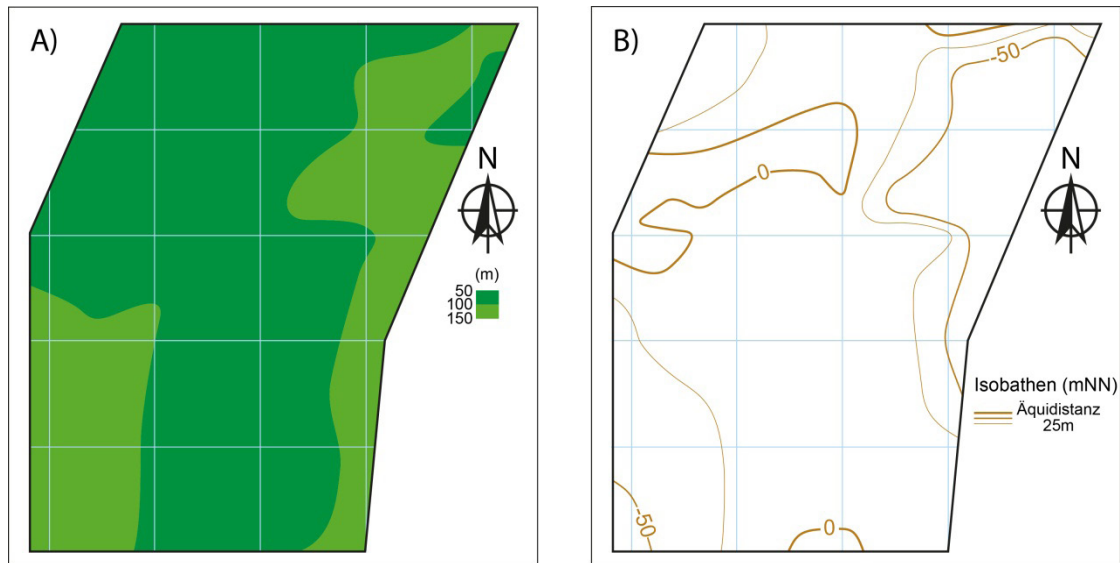


Abb. 24: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Quartär (Gitterlinienabstand 2 km)

3.4 Hydrogeologischen Verhältnisse im Endlagerstandortmodell

Unter Berücksichtigung der im Kap. 2.2 beschriebenen allgemeinen hydrogeologischen Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils NORD werden die folgenden hydrogeologischen Annahmen für die generischen Einheiten des Endlagerstandortmodells NORD getroffen (Abb. 25). Eine Zusammenstellung von hydraulischen Parametern der hier beschriebenen geologischen Einheiten erfolgte durch JAHN & SÖNNKE (2013). Die Zusammenstellung zeigt, dass die Parameterwerte eine große Bandbreite aufweisen. Die von der Fazies und dem strukturellen Aufbau bestimmten hydrogeologischen Verhältnisse werden mit dem Modell nur vereinfacht dargestellt. Jeder Einheit des Endlagerstandortmodells NORD werden jeweils ein Parameterwert nach einem Vorschlag von NOWAK & MASSMANN (2013) zugewiesen. Generell gelten die folgenden Aussagen.

Modell-Einheit	Lithologische Ausprägung	Durchlässigkeit
Quartär	Sande, Kiese sowie Geschiebelehm und -mergel, Tone, Schluffe	
Albium	Ton- und Mergelstein, zuoberst 25-35 m Flammenmergel	
Hilssandstein	Sandstein	
Aptium	Tonstein, Tonmergel- und Mergelgestein Ober-Aptium: smektitreiche tuftische Lagen Unter-Aptium: lagenweise Blättertone	
Barremium	Ton- und Tonmergelgestein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Hauterivium	Ton- und Tonmergelgestein	
Valanginium	Ton- und Tonmergelgestein	
Wealden	Wechselagerung von Ton- und Sandstein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Oberjura	Kalkstein, lagenweise Anhydrit und Evaporite	
Mitteljura	Ton- und Mergelgestein	
Aalensandstein	Sandstein	
Unterjura	Ton- und Mergelstein, z. T. mit bituminösen Tonsteinlagen	
Rhätssandstein	Sandstein	
Keuper	Ton- und Siltgestein, untergeordnet sandige und evaporitische-dolomitische Lagen	
Muschelkalk + Oberer Buntsandstein	Kalk- und Mergelgestein, Salz- und Tongestein	
Mittlerer + Unterer Buntsandstein	Sand- und Tongestein	
Zechstein	Salzgestein	

Durchlässigkeit	Grundwassergeringleiter			Grundwasserleiter			
	äußerst gering	sehr gering	gering	mäßig	mittel	hoch	sehr hoch
kf-Wert	$\leq 10^{-9}$	$>10^{-9} - 10^{-7}$	$>10^{-7} - 10^{-5}$	$>10^{-5} - 10^{-4}$	$>10^{-4} - 10^{-3}$	$>10^{-3} - 10^{-2}$	$>10^{-2}$
Grenzen (m/s)							

Hydraulische Eigenschaften

Grundwasserleiter
 kf-Wert $>10^5$

Grundwassergeringleiter
 kf-Wert $>10^{10} - 10^5$

Grundwassergeringleiter
 kf-Wert $\leq 10^{10}$

Abb. 25: Schematische Zusammenstellung der hydraulischen Eigenschaften der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD. Klassifizierung in Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter nach GRIMMELMANN (1997).

1. In Analogie zur generellen Grundwasserstockwerksgliederung in weiten Teilen Norddeutschlands ist auch im Endlagerstandortmodell NORD eine Gliederung in ein oberes Süßwasser führendes und ein tieferes Salzwasser führendes Grundwasserstockwerk gegeben.

Das Süßwasser führende Grundwasserstockwerk ist an die Modell-Einheit Quartär im Endlagerstandortmodell NORD gebunden und die Oberfläche der Modell-Einheit Albium bildet dessen Basis. Im Salzwasser führenden Grundwasserstockwerk gibt es mehrere separate Grundwasserkörper.

2. Im Endlagerstandortmodell NORD ist im obersten Grundwasserleiter ein Grundwasserflurabstand in den topografisch höher gelegenen Gebieten von etwa 10 m und in den Niederungen von etwa 3 m vorhanden. Das oberflächennahe Grundwasser strömt mit geringem Gefälle von etwa 2 ‰ in Richtung Norden ab. Oberflächengewässer (Flüsse, Seen) sind nicht im Modell enthalten.

Die Geländeoberfläche weist im Bereich des Endlagerstandortmodells NORD nur geringe Höhenunterschiede auf (s. Kap. 3.1), so dass im Gebiet selbst das hydraulische Potential nur gering ist. Der Grundwasseranstrom erfolgt aus dem weiter südlich gelegenen Mittelgebirgsraum mit Höhen von 200 m bis 300 m. Die Grundwasserentlastungsgebiete sind nördlich des Endlagerstandortmodells NORD gelegene Flussniederungen mit Höhen zwischen 40 m und 50 m. Das Fehlen von Oberflächengewässern im Gebiet des Endlagerstandortmodells ist mit einer hohen Versickerungskapazität der quartären Ablagerungen verbunden.

3. Die Modell-Einheit Quartär ist - im Ganzen gesehen - als ein heterogener Grundwasserkörper mit einem hohen Porenvolumen aufzufassen. Es handelt sich um Wasser mit geringem Lösungsinhalt (200 mg/l bis 350 mg/l) und nach ihrem chemischen Stoffbestand überwiegend um erdalkalische karbonatisch-sulfatische Wässer mit einer Gesamthärte von 0-12 °dH (Wasserhärte).

Der Grundwasserleiter ist gekennzeichnet durch quartäre Lockersedimente, einer Wechselagerung aus feinklastischen und gröberklastischen Sedimenten glazialer und fluviatiler Entstehung. Es treten vereinzelt Lagen mit Geschiebelehm und -mergeln, Tonen und Schluffen auf. Die flächenhaft verbreiteten unterkreidezeitlichen Tongesteine der Modell-Einheit Albium trennen das Fließsystem der Modell-Einheit Quartär von den tieferen mesozoischen Aquiferen. Ein advektiver Austauschprozess zwischen den Grundwasserstockwerken wird für das Endlagerstandortmodell NORD weitestgehend ausgeschlossen.

4. Alle mesozoischen Aquifere werden im Osten und Westen, außerhalb des Endlagerstandortmodells NORD, von schmalen langgezogenen, NNE-SSW orientierten Salinarstrukturen begrenzt. Die Grundwasserfließrichtung ist hauptsächlich nach Norden gerichtet.

Die Salzgesteine der Salinarstrukturen werden als Grundwassernichtleiter klassifiziert. Das regionale Grundwasserdruckpotenzial für die mesozoischen Aquifere wird in erster Linie aus den südlichen, deutlich höher gelegenen Mittelgebirgen abgeleitet. Die Grundwasserbewegung in den Salzwasser führenden Aquiferen im Endlagerstandortmodell NORD ist somit vorrangig durch die Schwerkraft bestimmt sowie von der Dichte und der Temperaturverteilung im Gebirge beeinflusst.

5. Im Hangenden des Wirtsgesteins tritt ein Salzwasser führender Grundwassergeringleiter mit einer geringen Durchlässigkeit an der Basis der Modell-Einheit Albium auf; analog dem Hilssandstein im südöstlichen Niedersachsen wird er hier als Hilssandstein bezeichnet.

Die Modell-Einheit Hilssandstein ist eine etwa 35 m mächtige tonig-sandige und diagenetisch verfestigte Schichtenfolge in etwa 200 m Tiefe. Der Chemismus des salinaren Wassers wird als Na-Cl-Wasser mit einer hohen HCO_3^- - und SO_4^{2-} -Ionenkonzentration festgelegt. Im Hangenden wird der Aquifer durch die Tongesteine der Modell-Einheit Albium von der Süßwasser führenden Modell-Einheit Quartär hydrodynamisch getrennt.

6. Die Ton- und Tonmergelsteine des Wirtsgesteins am Endlagerstandortmodell NORD gelten als Grundwassernichtleiter bzw. Grundwassergeringleiter mit einer äußerst geringen Durchlässigkeit.
7. Die unmittelbar im Hangenden und Liegenden an das Wirtsgestein anschließenden Tongesteinsformationen der Unterkreide besitzen nahezu identische hydraulische Eigenschaften wie das Wirtsgestein.

Im Hangenden treten die Ton- und Mergelgesteine der Modell-Einheiten Aptium und Albium auf, die eine Mächtigkeit von mehreren hundert Metern erreichen und die mesozoischen Sedimentgesteine hin zu den quartären Lockergesteinen begrenzen. Im Liegenden folgen die wenige Zehnermeter mächtigen tonigen Ablagerungen der Modell-Einheit Valanginium bis in Tiefen von etwa 800 m u. NN bis 900 m u. NN.

8. Als erster Grundwassergeringleiter im Liegenden des Wirtsgesteins werden die Ablagerungen der Modell-Einheit Wealden mit einer im Vergleich zum Wirtsgestein etwas höheren Durchlässigkeit angenommen.

Die Ablagerungen sind im brackischen Milieu entstanden und durch eine enge Wechselagerung sowie Verzahnung von Ton- und Sandsteinen gekennzeichnet. Sie liegen in einer Tiefe von mehr als 800 m u. NN und sind um die 200 m mächtig (s. Kap. 3.3).

9. Die Ablagerungen des Oberjura werden hydrogeologisch zusammenfassend betrachtet. Es handelt sich vorrangig um geklüftete Kalk- und Mergelgesteine mit einer überwiegend sehr geringen Durchlässigkeit.

In den Kalksteinen des Oxfordium können Kluftwasserleiter vorkommen, deren Durchlässigkeit meist gering bis sehr gering ist. Dies beruht darauf, dass zwar lokal Klüfte mit einer höheren Durchlässigkeit auftreten können, diese aber nur eine geringe Erstreckung und nur ein geringes Kluftvolumen aufweisen. Dadurch ergeben sich insgesamt keine ausgeprägten Aquifereigenschaften, so dass im Endlagerstandortmodell NORD diese zusammen mit den überlagernden Ton- und Mergelsteinen des Kimmeridgium und der Münder-Mergel-Formation (Tithonium) als Grundwassergeringleiter mit einer sehr geringen Durchlässigkeit eingestuft werden.

10. Stellvertretend für die Verbreitung der Sandsteinhorizonte im Mitteljura wird im Endlagerstandortmodell NORD nur ein sandiger Aquifer berücksichtigt. Die Modell-Einheit wird als Aalensandstein bezeichnet.

In den sehr mächtigen marinen Ton- und Mergelgesteinen des Mitteljura treten fluviatile bis deltaische Sandsteine auf, z.B. im Bathonium und im Aalenium (s. JAHN & SÖNNKE 2013). Der Horizont Aalensandstein soll stellvertretend das Auftreten eines Sandsteinhorizontes im Mitteljura mit einer etwas höheren Durchlässigkeit im Vergleich zu den Tongesteinen der Modell-Einheiten Mitteljura simulieren. Dieser sandige Aquifer an der Basis der Modell-Einheit Mitteljura besitzt eine Mächtigkeit von 20 m.

11. Im Endlagerstandortmodell NORD gelten die Tongesteine der Modell-Einheit Unterjura als Grundwassernichtleiter bzw. Grundwassergeringleiter mit einer äußerst geringen Durchlässigkeit.

Die tonige Schichtenfolge der Modell-Einheit Unterjura liegt tiefer als 1000 m unter Gelände und ist meist mehr als 300 m mächtig (s. Kap. 3.3). In der Schichtenfolge tritt der Posidonienschiefer des unteren Toarcium auf, ein etwa 20 m mächtiger Ton- bis Mergelsteinhorizont mit einem Anteil von bis zu 15 % an organischem Kohlenstoff.

12. Die Modell-Einheit Rhätsandstein fasst die einzelnen Sandsteinlagen als ein heterogenes Aquifersystem zusammen.

Der generische, Salzwasser führende Rhätsandstein-Horizont ist ein 10 m mächtiges Sandsteinpaket.

13. Die Ablagerungen der Modell-Einheit Keuper bestehen aus einer Folge von sehr geringdurchlässigen Tongesteinen und Siltgesteinen, untergeordnet treten sandige und evaporitische, tonige und dolomitische Lagen auf.
14. Die Modell-Einheit Muschelkalk und Oberer Buntsandstein fasst zwei hydrodynamisch ähnliche geologische Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD zusammen.

Der obere und untere Muschelkalk besteht aus bankigen Kalksteinen und einer Wechselfolge von Kalk- und Tonsteinen, in denen Kluftwasserleiter vorkommen können. In größeren Tiefen wird aber allgemein mit einer stark eingeschränkten Kluftdurchlässigkeit und einer lateral geringen Kluftausdehnung gerechnet. Der mittlere Muschelkalk wird dagegen aus undurchlässigen salinaren Schichten aufgebaut. Für die Modell-Einheit Muschelkalk wird im Endlagerstandortmodell NORD festgelegt, dass diese sehr gering- bis undurchlässig ist. Die pelitischen Sedimente und salinaren Ablagerungen des Oberen Buntsandstein besitzen generell eine sehr geringe Durchlässigkeit, so dass die Modell-Einheit Muschelkalk und Oberer Buntsandstein insgesamt als ein Grundwassergeringleiter mit einer sehr geringen Durchlässigkeit angesprochen wird.

15. Die Modell-Einheit Unterer und Mittlerer Buntsandstein ist ein Grundwassergeringleiter mit einer sehr geringen Durchlässigkeit.

Die große Tiefenlage (s. Kap. 3.3) und die Entwicklung des Unteren und Mittleren Buntsandsteins im Gebiet des Referenzprofils NORD führten zu einer deutlichen Kompaktion der Sandsteinhorizonte sowie eine für die Durchlässigkeit ungünstige Korngrößenverteilung. Die Durchlässigkeit wird zudem durch eine starke Zementation des Porenraums beeinträchtigt (vgl. SCHULZ & RÖHLING 2000, RÖHLING & HEINIG 2012a). Für die wenigen Zehnermeter mächtigen Schichten des Volpriehausen-Sandsteins und des Defurth-Sandsteins (Mittlerer Buntsandstein) wird daher eine stark eingeschränkte Durchlässigkeit angenommen.

Den unteren Abschluss des Endlagerstandortmodells NORD bilden die undurchlässigen, salinaren Ablagerungen der Modell-Einheit Zechstein.

3.5 Temperatur-Tiefenverteilung und thermische Reife

Die Temperaturwerte im tieferen Untergrund steigen mit zunehmender Tiefe an, in Norddeutschland mit einem mittleren Temperaturgradienten von 32 K/km bis 34 K/km (SCHULZ & RÖHLING 2000, KATZUNG 2004, FROMME et al. 2010, AGEMAR et al. 2012). Die Temperatur-Tiefenverteilung besitzt jedoch eine deutliche räumliche Variabilität (s. Abb. 26), die durch Unterschiede im basalen Wärmestrom, unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten von Gesteinen sowie durch zirkulierende Fluide im Untergrund verursacht wird. Welchen Einfluss die einzelnen Faktoren für die Temperaturverteilung im Untergrund besitzen,

hängt von den strukturellen Verhältnissen einer Region ab (z.B. NOACK et al. 2010, NOACK et al. 2012). In Norddeutschland variieren die Temperaturen in 1500 m Tiefe im Bereich von knapp unter 50 °C bis über 70 °C (SCHULZ & RÖHLING 2000, KATZUNG 2004). Aufgrund der erhöhten Wärmeleitfähigkeit der Salzgesteine gegenüber den klastischen Sedimenten treten die positiven Temperaturanomalien dabei oft im Hangenden von Salzstrukturen (Salzstöcke und Salzkissen) auf (z.B. FROMME et al. 2010). Auch das Niedersächsische Becken ist großflächig durch höhere Temperaturgradienten von 35 K/km bis etwa 45 K/km (s. Abb. 26) gekennzeichnet (SCHULZ & RÖHLING 2000, AGEMAR et al. 2012, RÖHLING & HEINIG 2012b).

Für das Endlagerstandortmodell NORD wird ein Temperaturgradient von 40 K/km festgelegt, wobei die Temperatur an der Geländeoberfläche im Durchschnitt etwa 8,0 °C beträgt.

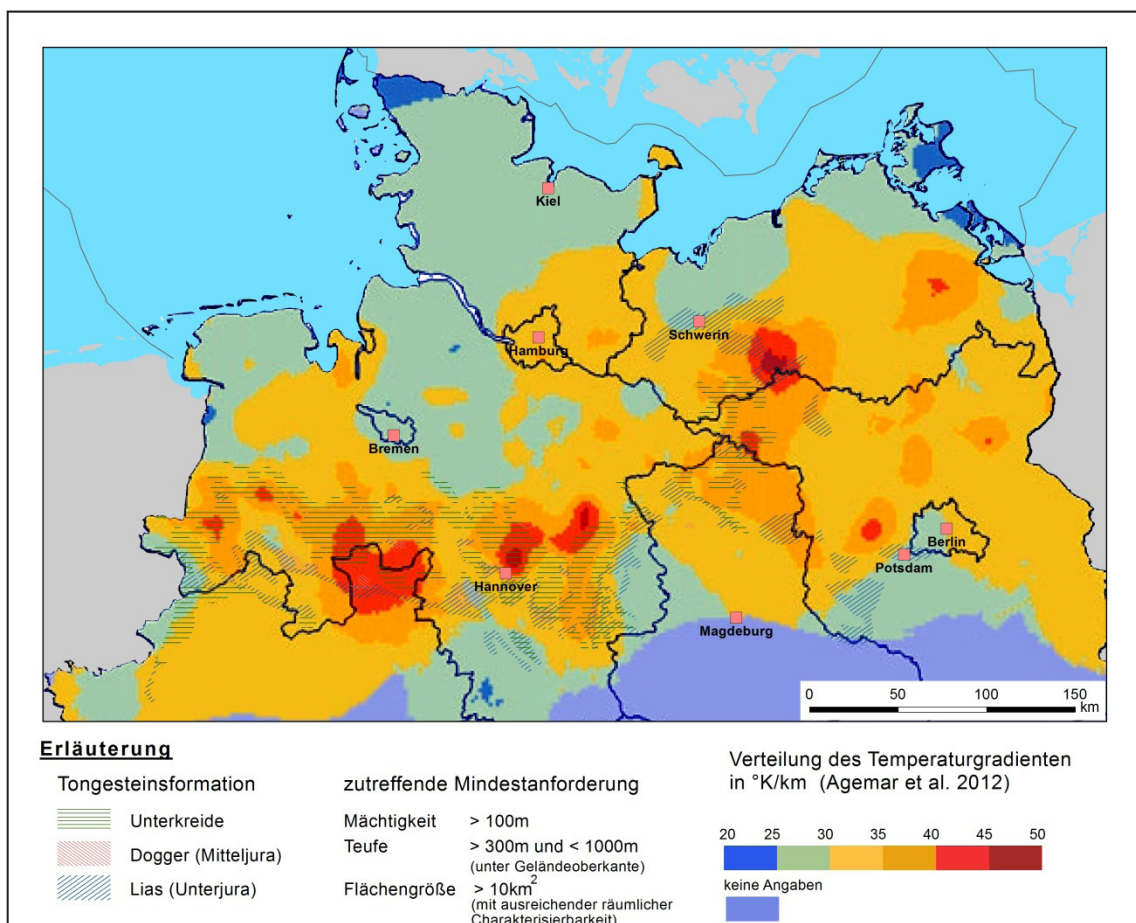


Abb. 26: Verteilung des Temperaturgradienten (nach AGEMAR et al. 2012) und die Verbreitung untersuchungswürdiger Tongesteinsformationen in Norddeutschland

Der thermische Gradient und die Versenkungsgeschichte (siehe Abb. 27) geben zusammen Hinweise zur Rekonstruktion der Reifeentwicklung möglicher Erdölmuttergesteine. Als mögliche Erdölmuttergesteine im Endlagerstandortmodell NORD können nach BGR (2012)

die Schichten des Blättertons, des Fischschiefers (s. Abb. 5) und des Berriasium (Modell-Einheit Wealden) in der Unterkreide sowie der Posidonienschiefer im Unterjura (Toarcium) betrachtet werden. Unter Berücksichtigung regionaler Arbeiten (z.B. BERNER et al. 2010, BGR 2012) wird für das Endlagerstandortmodell folgende Reifeentwicklung festgelegt:

- Das organische Material der Blättertone und des Fischschiefers haben nicht die thermische Reife zur Bildung von Öl und Gas erreicht. Die Werte der Vitrinit-Reflexionsmessung liegen um 0,4 % R_r .
- Die bituminöse Tongestein-Fazies im Berriasium (Modell-Einheit Wealden) besitzt Vitrinit-Reflexionswerte von 0,6 % R_r bei etwa 1300 m u. NN. Damit liegen diese im Grenzbereich einer möglichen Bildung von Erdöl.
- Der bituminöse Posidonienschiefer hat bei etwa 2000 m u. NN die thermische Reife zur Bildung von Erdöl erreicht und die Werte der Vitrinit-Reflexionsmessung liegen um 0,8 % R_r .

Für die mesozoischen, bituminösen Schichten wird im Endlagerstandortmodell NORD insgesamt eine kontinuierliche Zunahme des Reifegrads mit der Tiefe angenommen. Mit den postulierten Reifegraden ist die Vorstellung verbunden, dass die Tongesteine im Endlagerstandortmodell NORD in der Vergangenheit einer höheren Temperatur als heute ausgesetzt waren. Die höhere Paläotemperatur resultiert aus einer Versenkung der Schichten, die tiefer ging als ihre heutige Tiefenlage zeigt (Abb. 27). Gegenüber der heutigen Tiefenlage wird für die präquartären Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD eine um etwa 800 m höhere Paläoversenkung angenommen (vgl. REISER 1991).

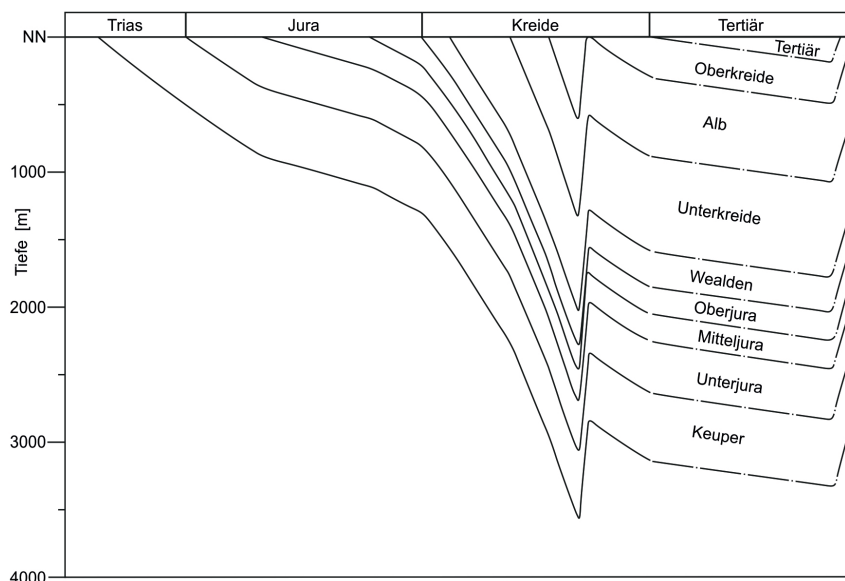


Abb. 27: Beispiel einer modellierten Versenkungsgeschichte im Bereich des östlichen Niedersächsischen Beckens (DULCE & APEL 1991)

4 Wirtsgestein – Modell-Einheiten Hauterivium und Barremium

Die Schichtenfolge des Wirtsgesteins erstreckt sich im Endlagerstandortmodell NORD von der Unterkante des Hauterivium bis zur Oberkante des Barremium. Die Basis der Modell-Einheit Hauterivium liegt zum größten Teil zwischen 700 m u. NN und 1000 m u. NN, wobei sich die größten Tiefenwerte im Südosten des Endlagerstandortmodells zeigen. Bis auf einen schmalen Streifen von 4 × 1 km Größe mit nur 100 m bis 200 m Mächtigkeit steht die Modell-Einheit Hauterivium im gesamten Gebiet des Endlagerstandortmodells NORD mit 200 m bis 300 m Mächtigkeit an (Abb. 20). Die Unterkante des Barremium weist Tiefenlagen zwischen 500 m u. NN und 800 m u. NN (Abb. 21), seine Oberkante Tiefenlagen zwischen 200 m u. NN und 500 m u. NN auf. Auch hier finden sich die jeweils größten Tiefenwerte im Südosten des Modellgebiets.

Im zentralen Bereich (mit über 60 % Flächenanteil) des ca. 70 km² großen Modellgebiets besitzt das Wirtsgestein Mächtigkeiten zwischen 500 m und 600 m (Abb. 28). Ein zentral gelegenes Gebiet von ca. 1 km² Ausdehnung zeigt eine Gesamtmächtigkeit von 600 m bis 700 m, während die randlichen Bereiche des Endlagerstandortmodells NORD Gesamtmächtigkeiten zwischen 400 m und 500 m aufweisen. Nur ganz im Nordosten des Modellgebiets findet sich ein bis 1 km breiter Streifen, in dem die Mächtigkeit des Wirtsgesteins lediglich 300 m bis 400 m erreicht.

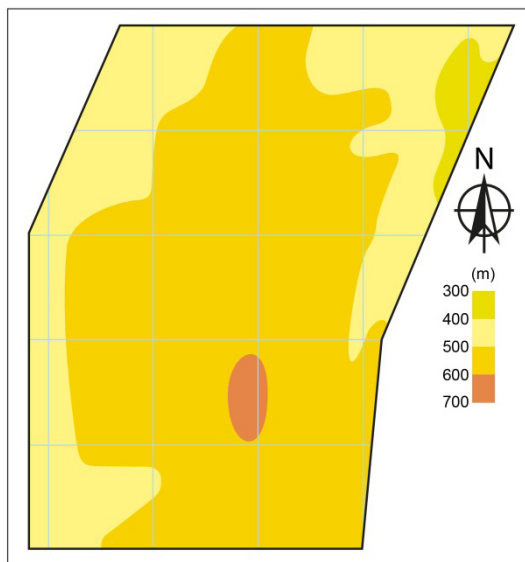


Abb. 28: Mächtigkeit des Wirtsgesteins (Gitterlinienabstand 2 km)

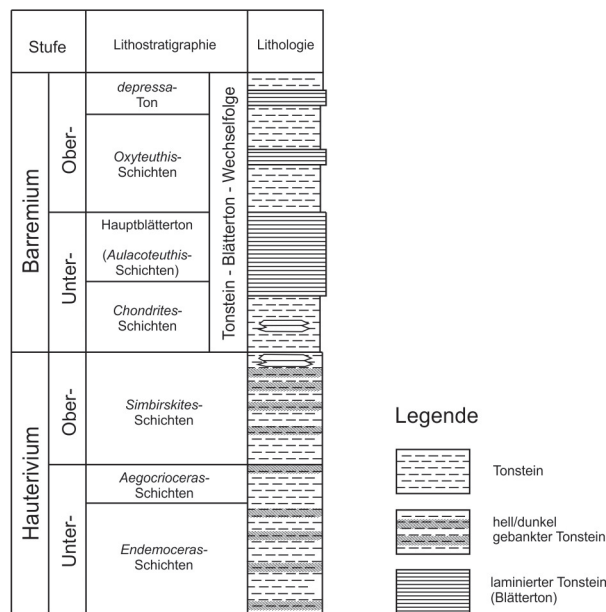


Abb. 29: Lithologie und Biostratigraphie der stratigraphischen Einheiten Hauterivium und Barremium im östlichen Zentralteil des Niedersächsischen Beckens, im Gebiet des Referenzprofils NORD (verändert nach MUTTERLOSE 2000).

Das Wirtsgestein besteht aus der Bandbreite von Tonsteinen bis Tonmergelsteinen (die hier zusammenfassend als Tongesteine bezeichnet werden) und – im Unter-Hauterivium – untergeordnet auch aus mikritischen Kalkmergelsteinbänken. An der Oberkante des Ober-Hauterivium finden sich geringmächtige schluffige bis feinsandige Bereiche. Im Gegensatz zu den im westlichen Zentralteil des Niedersächsischen Unterkreidebeckens anstehenden Tongesteinen, bei denen es sich um dunkle, harte Tonsteine handelt, sind die charakteristisch hellen Ton- bis Tonmergelsteine im östlichen Zentralteil aufgrund der fehlenden thermischen Überprägung wesentlich plastischer (MUTTERLOSE 2000: 94).

Die Hauptkomponenten (vgl. JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 28 bis 30) der im Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens angetroffenen Sedimente des Wirtsgesteins sind Schichtsilikate (35 % bis 52 %), Quarz (13 % bis 30 %) und Karbonate (Calcit, Dolomit und Siderit, 7 % bis 55 %). Hier (vgl. Kompilierung in GERARDI 2005) ist – ausgehend vom Unter-Hauterivium bis zum Ober-Barremium – über die gesamte Schichtenfolge der mittleren Unterkreide ein genereller Trend zur Abnahme der Karbonat- und zur Zunahme der Tonmineralgehalte (Zweischicht-Tonminerale wie Kaolinit, Dreischicht-Tonminerale wie Illit und Smektit und Vierschicht-Tonminerale wie Chlorite) festzustellen (vgl. dazu auch das Dreiecksdiagramm Karbonat – Tonminerale – Quarz in JAHN & SÖNNKE 2013: Abb. 3).

Die Tonminerale Illit, Kaolinit und Chlorit treten in der gesamten Schichtenfolge auf, während Illit/Smektit-Wechselagerungsminerale im Ober-Hauterivium fehlen. Smektit (Montmorillonit), dessen spezifische Oberfläche und Kationenaustauschkapazität KAK (ca. 100 mval/100 g) sehr viel höher sind als die von Illit (ca. 40 mval/100g) oder von

Kaolinit (ca. 10 mval/100g), fehlt in den Sedimenten des Unter- und Ober-Barremium. Wechsellagerungsminerale sind hier jedoch enthalten (vgl. JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 28). Die Tongesteine des Ober-Barremium weisen die höchsten Werte für die KAK (vgl. JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 36) des gesamten Wirtsgesteins auf. Der Hauptanteil wird hier von Na^+ getragen. Als weitere Komponenten wurden Goethit, Feldspäte, Pyrit und organische Bestandteile (organischer Kohlenstoff, $\text{C}_{\text{org, TOC}}$) beobachtet.

Die Porenräume der Tongesteine enthalten vielfach mineralische Füllungen, bei denen Calcit und Pyrit überwiegen. Große Teile der Karbonatgehalte der Tongesteine sind nicht matrixgestützt wie z.B. in den Tongesteinen von Bure, Meuse/Haute-Marne. Nach REM-Untersuchungen (ECKHARDT 1989, ECKHARDT & GERARDI 1990) handelt es sich bei ihnen vielmehr um lagenweise angereicherte Kalkschalen von Mikrofossilien (Foraminiferen und Coccolithen); daneben ließ sich auch angereicherter Detritus (fein aufgearbeiteter Calcit oder Aragonit) von Bivalvenschalen identifizieren.

4.1 Hauterivium

Große Teile der Modell-Einheit Hauterivium führen neben normalen Tonsteinen rhythmisch hell/dunkel gebankte Ton- bzw. Tonmergelgesteine. MUTTERLOSE & RUFFEL (1999) zufolge, die solche Bildungen in Ost-England und Norddeutschland untersucht haben, sind die hellen Bänke durch die Anwesenheit von Illit-Smektit-Wechsellagerungsmineralen gekennzeichnet, während die dunklen Bänke vor allem hohe Gehalte an Kaolinit und Smektit, daneben Wechsellagerungsminerale und Chlorit, aufweisen.

Angaben zur durchschnittlichen mineralogischen Zusammensetzung der Tongesteine des Unter-Hauterivium im Bereich des Endlagerstandortmodells NORD sind dem Bericht von JAHN & SÖNNKE (2013: Tab. 28) zu entnehmen. Sie besitzen die geringsten Tonmineral- und die höchsten Karbonatgehalte der gesamten Wirtsgesteinsabfolge (MEDERER et al. 1987, GERARDI 2005). Idiomorphe Pyrite (auch Nester) sowie Pyritkonkretionen und Organismenreste sind verbreitet (GERARDI 1986, Teil 2: 34, GERARDI 1988). Die Tongesteine des Unter-Hauterivium weisen auch die geringsten Gehalte an organischem Kohlenstoff C_{org} der gesamten Wirtsgesteinsabfolge auf (JAHN & SÖNNKE 2013; Tab. 28 & Tab. 31).

Eine Zusammenstellung der durchschnittlichen mineralogischen Zusammensetzung des Ober-Hauterivium erfolgte durch JAHN & SÖNNKE (2013: Tab. 28). Die Durchschnittswerte für den Tonmineralgehalt haben sich – verglichen mit dem Unter-Hauterivium – deutlich erhöht, während sich der Karbonatgehalt mehr als halbierte. Der Durchschnittswert für C_{org} ist gegenüber dem Unter-Hauterivium etwa verdoppelt so groß (GERARDI 2005, RÖSCH 1985, BEYER 1988).

4.2 Barremium

Im Gegensatz zur Dreiteilung des Barremium in Unter-, Mittel- und Ober-Barremium in den älteren der hier zitierten Arbeiten (wie RÖSCH 1985, BEYER 1988, MATTIAT & KREIMEYER 1991 und der Kompilierung von GERARDI 2005) wird diese Stufe nach heutiger Gliederung nur noch in Unter- und Ober-Barremium unterteilt (Abb. 5, Abb. 29). Das Ober-Barremium der heutigen Gliederung umfasst dabei das Mittel- und Ober-Barremium der alten Unterteilung. Wenn der Terminus „Mittel-Barremium“ aus älteren Arbeiten zitiert wird (z.B. JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 1), ist darunter das untere Ober-Barremium zu verstehen.

Die Sedimentfolge des durch regressive Tendenzen gekennzeichneten Barremium ist im östlichen Zentralteil des Niedersächsischen Beckens im Durchschnitt etwa 200 m mächtig (MUTTERLOSE 2000). Es dominieren marine dunkelgraue bis schwärzliche, z.T. schwach bituminöse Ton- und Tonmergelgesteine mit Schalenresten und gelegentlich massenhaft vorhandenen Fischschuppen.

Mit dem Einsetzen des Unter-Barremium begann eine kontinuierliche Abnahme von Sauerstoff am Meeresboden (MICHAEL 1967). Unter derartigen anoxischen Bedingungen in einem teilweise abgeschlossenen, schlecht durchlüfteten Becken kamen feingeschichtete Tone (die zu den Schwarzschiefern zählenden so genannten feinlaminierten Blättertone) zur Ablagerung. Im Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens wird ein Großteil des Unter-Barremium vom „Hauptblättertton“ (HBT) gebildet, der sich gegen das hangende untere Ober-Barremium („Mittel-Barremium“) durch einen sandigen Horizont und gegen das liegende Ober-Hauterivium durch sandig-tonige Bereiche abgrenzen lässt (vgl. GERARDI 1986, ECKARDT & GERARDI 1990).

Das obere Ober-Barremium transgrediert über unteres Ober-Barremium („Mittel-Barremium“) mit Ablagerungen von Ton- bis Tonmergelsteinen, die an der Basis dünne Feinsandlagen enthalten. Die Blättertonentwicklung setzt sich im unteren Ober-Barremium in mehreren Zyklen fort, zu denen die Oxyteuthiden-Schichten und die depressa-Tone des Ober-Barremium zu zählen sind. Aufgrund von Farbe und Zusammensetzung wird diese Folge als „dunkle Tonstein-Folge“ (DTF) bezeichnet. Ganz ähnliche Ablagerungsbedingungen herrschten auch später bei der Sedimentation des Fischschiefers (FS) im mittleren Unter-Aptium.

Zu den Beckenrändern hin gehen die Blättertone lateral in dunkle Tongesteine über (MUTTERLOSE 2000).

Generell handelt es sich bei den Blättertonen um feinlaminierte, bituminöse Sedimente (Laminite) mit hellen und dunklen Lagen. Während die hellen, um 60 µm mächtigen Lagen reich an kalkigem Nannoplankton sind, zeigen die dunklen, ca. 35 µm mächtigen

Lagen Anreicherungen von Dinoflagellaten. Die Dicke eines Hell-/Dunkel-Paares variiert von 50 bis 150 µm. Für das Endlagerstandortmodell NORD wird analog zur Situation im Beckeninneren (MUTTERLOSE & BÖCKEL 1998) angenommen, dass sich die Blättertone im mehr oder weniger rhythmischen Wechsel mit Tongesteinen über das gesamte Barremium hinweg abgelagert haben. Die Mächtigkeit der einzelnen, insgesamt etwa 20 bis 30 Blätterton-Schichten verringert sich dabei vom Unter-Barremium (5 m bis 2 m) über das Ober-Barremium (0,3 m bis 0,2 m) bis in das unterste Unter-Aptium hinein kontinuierlich.

Artenarmut, Verbreitung des Benthos sowie Erhaltung des Nektons deuten ebenso auf die erwähnten anoxischen Sedimentationsbedingungen wie hohe C_{org} -Gehalte von 2 % bis 6 % sowohl im Blätterton als auch im Fischschiefer (MUTTERLOSE 2000). Deutliche Pyrit-Anteile in den mit den Blättertonen wechsellagernden dunklen Tonschiefern sind Anzeiger für sauerstoffarme Wässer am Boden des damaligen epikontinentalen Meeres. Die Karbonat-Gehalte in den Blättertonen können bis zu 50 % betragen (MUTTERLOSE 2000). In Tab. 1 (nach GAIDA et al. 1981 und MUTTERLOSE 2000) werden die wichtigsten Komponenten und Parameter „normaler“ Tongesteine mit denen von Blättertonsteinen aus dem Unter-Barremium verglichen.

Tab. 1: Zusammenfassender Vergleich „normaler“ Tongesteine mit Blättertonsteinen des Unter-Barremium (nach GAIDA et al. 1981, MUTTERLOSE 2000)

Komponente/Parameter	Normale Tonsteine bis Tonmergelsteine	Laminierte Tonsteine bis Tonmergelsteine (Blättertonstein Typ Sarstedt)
Alter	gesamte Unterkreide	Unter-Barremium
Gesteinsfarbe megaskopisch	meist mittelgrau mit Braun- oder Grüntich	mittellichtgrau
Gesteinsfarbe mikroskopisch	grau bis braun	hellbraun
Schichtungstyp	geschichtet und bioturbat	deutliche Laminiierung, Bioturbation tritt weitgehend zurück
mikroskopisches Erscheinungsbild	uniforme Tonmatrix, von wechselnder Schichtungsintensität und Bioturbation, meist niedriger Calcitgehalt, wechselnder Pyritgehalt	engständiger Wechsel von Ton- und Kalklagen, Calcitgehalt 10 % - 30 % (Karbonatgehalt bis 50 %), mit Mikrolinsenschichtung, pyritreich
Mineralbestand nach RDA	Quarz, Feldspat, Dolomit, Calcit, Illit/Muskovit, Kaolinit, Chlorit und Wechsellagerungsminerale	Quarz, Calcit, Kaolinit, Illit/Muskovit, Pyrit, Dolomit

Komponente/Parameter	Normale Tonsteine bis Tonmergelsteine	Laminierte Tonsteine bis Tonmergelsteine (Blättertonstein Typ Sarstedt)
Silt-/Sandbeimengungen	Quarz, Quarzaggregate, Albit, Sanidin, Muskovit, Glaukonit, wenig Pyrit	Quarz, Quarzaggregate, Albit, Sanidin, Muskovit, Glaukonit, vor allem Pyrit
C _{org} [%]	0,5 - 1,5	2,0 - 6,0
Typ org. Substanz	variabel, nicht bestimmt	-
thermische Diagenese	-	unbedeutend (Auftreten von Steranen und Triterpanen)
Muttergesteinscharakter	-	gut (bei entsprechender Reife)

Die durchschnittliche mineralogische Zusammensetzung der Sedimente der Modell-Einheit Barremium ist dem Bericht von JAHN & SÖNNKE (2013: Tab. 28 bis 30, Abb. 3) zu entnehmen. Die tonige Komponente der Barremium-Sedimente besteht zumeist aus Illit und Kaolinit. Bei den Karbonaten handelt es sich vorwiegend um Calcit, jedoch ist gelegentlich auch Siderit vorwiegend in Form von Konkretionen vorhanden. Das gesamte Barremium ist durch das zum Teil makroskopisch sichtbare massenhafte Vorkommen von Pyrit in Form von fein verteilten, kleinsten Kristallen sowie Knollen und Konkretionen gekennzeichnet (GERARDI 1986, KEMPER 1995). Pyrit ist ein Anzeiger für reduzierende Ablagerungsbedingungen. Er ist in den Tongesteinen des gesamten Wirtsgesteins, vor allem aber in den Blättertonen des Barremium, vertreten. Im Unter-Barremium erreicht er im Mittel 8 Gew.-% (vgl. JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 28). Der massenhaft vorhandene Pyrit ist ferner für die relativ hohen Gehalte an Schwefel verantwortlich (GERARDI 1986, Teil 1: 11). Besonders hervorzuheben ist der hohe Anteil an organischem Kohlenstoff C_{org}, der in den Blättertonen im Unter-Barremium mit Werten von z.T. > 3 Gew.-% sein Maximum innerhalb der gesamten Wirtsgesteinsabfolge erreicht (GERARDI 2005, RÖSCH 1985, BEYER 1988, MATTIAT & KREIMEYER 1991; vgl. auch JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 31). Die Schichten des Barremium zeigen eine gute positive Korrelation der C_{org}-Gehalte mit Pyrit bzw. dem Gesamtschwefel S_{ges} (GERARDI 1986: 11, BEYER 1988: 36).

Der Tonmineralgehalt der Sedimente des Unter-Barremium hat sich gegenüber dem Hauterivium weiter erhöht, wobei sich die Tonminerale in den REM-Bildern von Tongesteinen des Barremium schichtparallel bis schlierig angeordnet zeigen. Der Gesamt-Karbonatgehalt hat sich hingegen weiter verringert. Zwar kann in Einzelfällen allein der CaCO₃-Gehalt bis zu 25 % betragen, er nimmt jedoch in den jüngeren Schichten immer weiter ab. Der Karbonat-Gehalt der Gesteine ist im Wesentlichen auf Calcit beschränkt.

In der tonmergeligen Matrix der Sedimente des unteren Ober-Barremium („Mittel-Barremium“) finden sich Quarz (mit Korngrößen im Feinsand- bis Schluffbereich) und lagenweise angereichert Glaukonit (ECKHARDT & GERARDI 1990). Tonminerale nehmen im Mittel ca. 50 Gew.-% ein. Die Summe an Karbonatmineralen hat sich gegenüber dem Unter-Barremium fast halbiert (JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 28). Der mittlere Gehalt an C_{org} liegt in der gleichen Größenordnung wie im Unter-Barremium (JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 31). Bioturbate Bereiche der Tongesteine mit deutlicher Lagentextur führen besonders viel Pyrit. Der gelegentlich in der Matrix feinverteilt angetroffene Goethit entspricht im stratigraphischen Niveau den im Salzgittergebiet sedimentierten Barremium-Trümmererzen (ECKHARDT & GERARDI 1990).

Auch im oberen Ober-Barremium treten die für das Barremium insgesamt typischen Blättertone in Erscheinung. Sie wechseln mit bioturbaten Lagen aus Ton- bis Tonmergelsteinen. Betrachtet man alle Schichtenfolgen des Wirtsgesteins, sind im Ober-Barremium im Mittel die höchsten Tonmineralgehalte und die niedrigsten Karbonatgehalte zu verzeichnen (JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 28 bis 30). Dies findet seinen Ausdruck auch im Rückgang des KAK-Wertes für Ca^{2+} vom Unter-Hauterivium zum Ober-Barremium (JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 36). Ein charakteristisches Merkmal der DTF („dunklen Tonstein-Folge“) sind die hinsichtlich Größe und Zusammensetzung sehr unterschiedlichen, in Lagen auftretenden Karbonatkonkretionen. Neben reinen Calcit-Konkretionen sind auch reine Siderit-Konkretionen und Mischformen bekannt. Die Siderit-Gehalte der DTF sind ausschließlich an solche Konkretionen gebunden (KEMPER 1995). Die Gehalte an C_{org} entsprechen in ihrer Größenordnung denen des Mittel-Barremium (JAHN & SÖNNKE 2013: Tab. 31).

5 Zusammenfassung

Der Bericht dient der Methodenentwicklung zur Durchführung einer Sicherheitsanalyse für einen HAW-Endlagerstandort im Tongestein und dokumentiert den geologischen Bau eines Endlagerstandortmodells für einen generischen Standort in Norddeutschland.

Für das Gebiet des Referenzprofils NORD (REINHOLD & SÖNNKE 2012) werden allgemeine strukturgeologische und sedimentologische Verhältnisse beschrieben. Entsprechend der strukturgeologischen Stockwerksgliederung (s. Kap. 2) umfasst die Beschreibung die stratigraphischen Einheiten Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper, Unterjura, Mitteljura, Oberjura, Unterkreide und Quartär. An die stratigraphische Einheit Quartär ist das Süßwasser führende Grundwasserstockwerk im Gebiet des Referenzprofils NORD gebunden. Dieses wird von einem Salzwasser führenden Grundwasserstockwerk unterlagert, das alle tieferen stratigraphischen Einheiten einschließt.

Das Modell der geologischen Gesamtsituation im Gebiet des Referenzprofils NORD beinhaltet 17 Modell-Einheiten (Abb. 30), die mit dem Programm openGEO modelliert wurden. Kennzeichnend für die Oberfläche des etwa 70 km² großen Endlagerstandortmodells NORD ist eine Neigung des Oberflächengefälles insgesamt in Richtung Norden.

Die Basisflächen der Modell-Einheiten Oberer Buntsandstein und Muschelkalk, Keuper, Unterjura sowie Mitteljura besitzen ein erhebliches Relief, die Differenz der Tiefenwerte einer Modell-Einheit variieren um etwa 1000 m (Abb. 30). Ab der Unterkreide variieren die Tiefenwerte der Basisflächen der Modell-Einheiten dagegen im größten Teil der Modellfläche nur noch um etwa 200 m (vgl. Abb. 30, Abb. 31). Die Lagerungsverhältnisse und die Mächtigkeit der 17 Modell-Einheiten (Abb. 30) werden durch eine langanhaltende Subsidenz im Gebiet des Endlagerstandortmodells NORD geprägt, die zusätzlich durch die Mobilisation der Zechsteinsalze beeinflusst wurde.

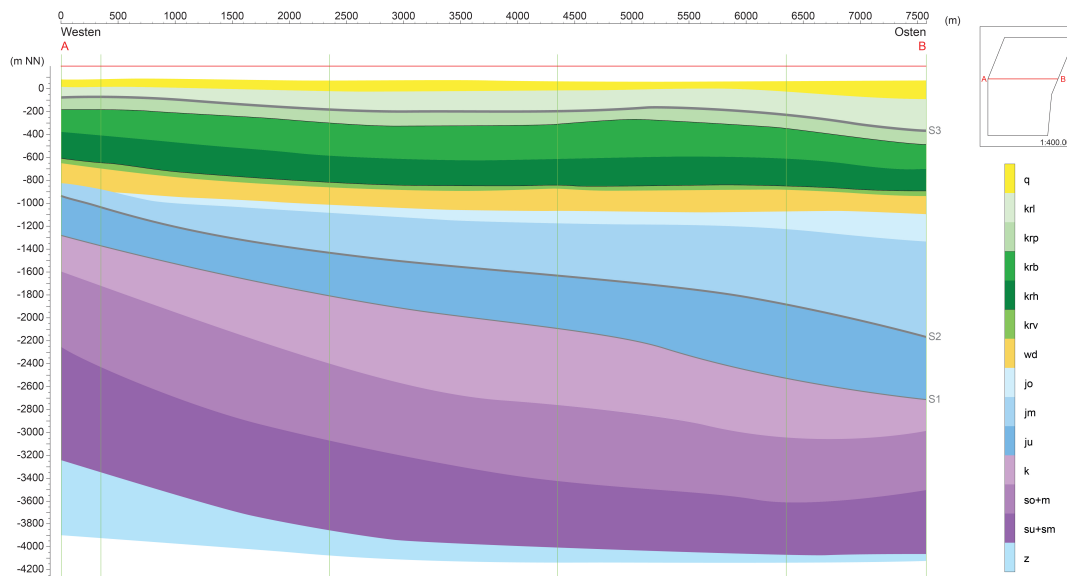


Abb. 30: Geologischer Schnitt im Endlagerstandortmodell NORD Richtung West-Ost (Abkürzungen: z = Zechstein, su+sm = unterer und mittlerer Buntsandstein, so+m = oberer Buntsandstein und Muschelkalk, k = Keuper, ju = Unterjura, jm = Mitteljura, jo = Oberjura, wd = Wealden, krw = Valanginium, krh = Hauterivium, krb = Barremium, krp = Aptium, krl = Albium, q = Quartär, S1 = Rhätsandstein, S2 = Aalensandstein, S3 = Hilssandstein)

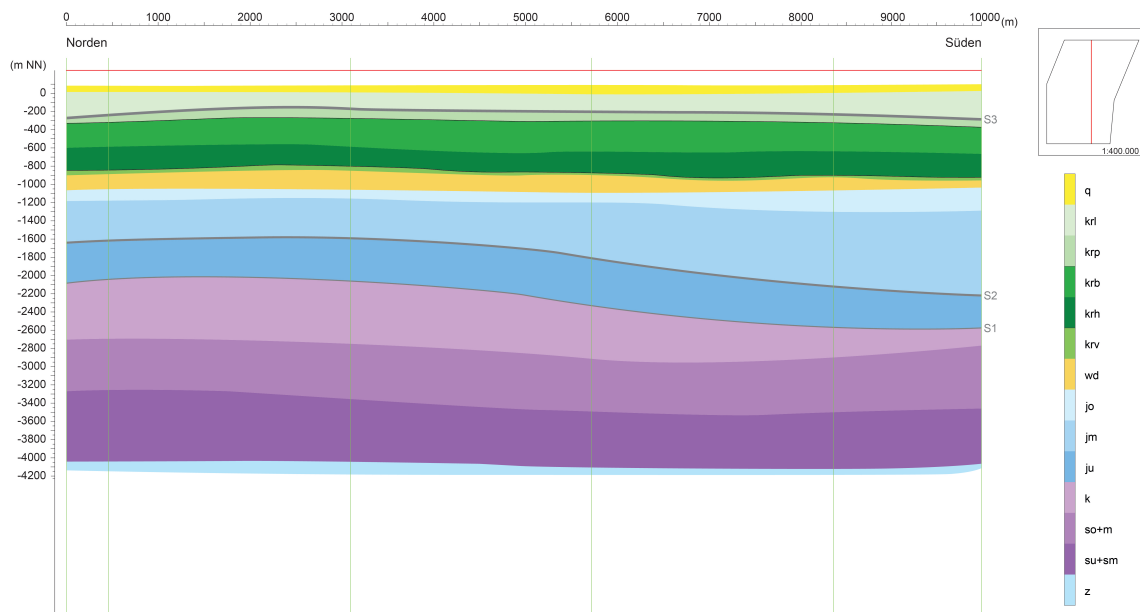


Abb. 31: Geologischer Schnitt im Endlagerstandortmodell NORD Richtung Nord-Süd (Abkürzungen siehe Abb. 30)

Die Gesamtmächtigkeit der Modell-Einheiten beträgt etwas mehr als 4000 m (Abb. 30, Abb. 31). In etwa 900 m u. NN beginnt die Modell-Einheit Valanginium, dessen Ablagerungen den Beginn der marinen Unterkreide kennzeichnen. Darüber folgt das Wirtsgestein mit den Modell-Einheiten Hauterivium und Barremium, die in etwa 60 % der Modellfläche eine Mächtigkeit von 500 m bis 600 m besitzen (s. Kap. 4). In Tiefen zwischen 0 m NN und 50 m u. NN beginnen oberhalb der Modell-Einheit Albium die quartären Lockersedimente, die das geologische Endlagerstandortmodell nach oben abschließen.

Die Modell-Einheiten werden als relativ homogen ausgebildete und regional gut charakterisierbare geologische Einheiten definiert. Obwohl durch regionale Fazieswechsel oder aufgrund der Lagerungsverhältnisse eine Variation der Parameterwerte im Endlagerstandortmodell NORD im Rahmen natürlicher Schwankungen gegeben ist (vgl. JAHN & SÖNNKE 2013), konnten die hydraulischen und gesteinsphysikalischen Parameter durch einen Wert für die jeweilige Modell-Einheit beschrieben werden (vgl. auch NOWAK & MASSMANN 2013).

Der vorliegende Bericht liefert die Grundlagen für die Beschreibung der geologischen Gesamtsituation im Gebiet des Endlagerstandortmodells NORD. Er wird durch die Zusammenstellung der hydraulischen und gesteinsphysikalischen Parameter im Teil II des Gesamtberichts von JAHN & SÖNNKE (2013) ergänzt. Im Teil III von NOWAK & MASSMANN (2013) erfolgt für die Modell-Einheiten eine Auswahl von bestimmten Parameterwerten für erste thermische, hydraulische und mechanische (THM) Modellberechnungen. Die geologischen Verhältnisse des Modells und die gewählten Parameter für Modellrechnungen sind ggf. an neue Erkenntnisse anzupassen, die sich im Verlaufe des Projektes ergeben können.

Literaturverzeichnis

- ADAM, C., GLÄSSER, W. & HÖLTING, B. (2000): Hydrogeologisches Wörterbuch. - 311 S.; Stuttgart (Enke Verl.).
- AGEMAR, T., SCHELLSCHMIDT, R. & SCHULZ, R. (2012): Subsurface temperature distribution in Germany. - Geothermics 44: 65-77; (Elsevier).
- AkEnd [Hrsg.] (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). - AkEnd: 260 S.; Köln.
- ANDRA [Hrsg.] (2005): Dossier 2005 Argile Tome - Phenomenological evolution of a geological repository Synthèse (engl.). - ANDRA: 527 S.; Châtenay-Malabry, France.
- BALDSCHUHN, R. & KOCKEL, F. (1998): Der Untergrund von Hannover und seiner Umgebung. - Bericht der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover, 140: 5-98; Hannover.
- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. - Geol. Jb., A 153: 95 S., 3 CD-ROMs; Hannover.
- BARNASCH, J. (2009): Der Keuper im Westteil des Zentraleuropäischen Beckens (Deutschland, Niederlande, England, Dänemark): Diskontinuierliche Sedimentation, Litho-, Zylo- und Sequenzstratigraphie; Beitrag zur Stratigraphie von Deutschland [Dissertation]. - Martin-Luther-Universität Halle Wittenberge, 232 S.
- BEYER, F. (1988): Konrad 101 - Petrographisch-geochemische Aspekte. - Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 13 S.; Hannover - Archiv-Nr. 0103 770.
- BENDA, L. [Hrsg.] (1995): Das Quartär Deutschlands. - 408 S.; Berlin/Stuttgart (Borntraeger Verl.).
- BENESCH, M. (1997): Mineralogische Untersuchungen von Unterkreide-Sedimenten aus dem Niedersächsischen Becken [Dissertation]. - Georg-August-Universität Göttingen, 68 S.

- BERNER, U., STILLER, E., SCHEEDER, G., PLETSCH, T. K. & CRAMER, B. (2010): Organic geochemical characterization and thermal maturity of sediments of the geothermal well Gross-Buchholz GT-1 (Hannover). - Erdöl, Erdgas, Kohle, 126 (5): 198-202.
- BfS [Hrsg] (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vom 22. Mai 2002. - Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter.
- BGR [Hrsg.] (2012): Abschätzung des Erdgaspotenzials aus dichten Tongesteinen (Schiefergas) in Deutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 56 S.; Hannover.
- BMU [Hrsg] (2001): Hydrologischer Atlas von Deutschland. - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 1 CD; Bonn.
- BOIGK, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland. 330 S.; Stuttgart (Enke Verl.).
- BRANDES, J. & OBST, K. [Hrsg.] (2011): Geologische Charakterisierung potenzieller Speicher- und Barrieregesteinskomplexe in Mecklenburg-Vorpommern. - In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. [Hrsg]: Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland. - SDGG Heft 74: 61-81; Hannover (E. Schweizerbart'scher Verlag).
- BRÜCKNER-RÖHLING, S., ESPIG, M., FISCHER, M., FLEIG, S., FORSBACH, H., KOCKEL, F., KRULL, P., STIEWE, H. & WIRTH, H. (2002): Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung; Teil 1: Strukturgeologie. - Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 253 S.; Berlin, Hannover.
- BurVal Working Group (2006): Groundwater Resources in Buried Valleys - a challenge for Geosciences. - Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (GGA-Institut): 314 S.; Hannover.
- CAINE, J. S., EVANS, J. P. & FORSTER, C. B. (1996): Fault zone architecture and permeability structure. - Geology, 24 (11): 1025-1028.
- DROZDZEWSKI, G., HENSCHKEID, S., HOTH, P., JUCH, D., LITTKKE, R., VIETH, A. & WREDE, V. (2009): The pre-Permian of NW-Germany – structure and coalification map. - Z. dt. Ges. Geowiss., 160 (2): 159-172; Hannover.

- DULCE, J.-C. & APEL, C. (1991): Das Gasfeld Thönse - Strukturgeschichte. - Nds. Akad. Geowiss. Veröfftl., 6: 15-25; Hannover.
- ECKHARDT, J. (1989): Mineralogische und geochemische Untersuchungen an den Gesteinsproben der Bhg. Konrad 101. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Laborbericht zu B 4-40445: 18 S.; Hannover.
- ECKHARDT, J. & GERARDI, J. (1990): Zusammenfassende Betrachtung mineralogischer und petrographischer Untersuchungen zur Charakterisierung der Dogger-, Malm- und Kreideschichten der Schachanlage Konrad. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht: 25 S.; Hannover - Archiv-Nr. 0106809.
- ECKHARDT, F. J., RÖSCH, H. & BESANG, C. (1989): Mineralogische und geochemische Untersuchungen an Gesteinsproben der Bhg. Konrad 101.-- BGR, Ber.: 19 S., 7 Anl.; Hannover.
- EHLERS, J. (2011): Das Eiszeitalter. 363 S.; Heidelberg (Spektrum, Akad. Verl.).
- ELBRACHT, J., MEYER, R. & REUTTER, E. (2010): Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. - GeoBer., 3: 3-117; Hannover.
- FELDMANN, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. - Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: 149 S.
- FELDRAPPE, H., OBST, K. & WOLFGRAMM, M. (2008): Die mesozoischen Sandsteinaquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung. - Z. geol. Wiss., 36 (4/5): 199-222; Berlin.
- FRANKE, D., HOFFMANN, N. & LINDERT, W. (1996): The Variscan deformation front in East Germany. Part 2: tectonic interpretation. - Z. angew. Geol., 42: 44-56.
- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (2003): Der Bremen-“Knoten“ im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands; Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. - Bericht, Uni Bremen, FB Geowissenschaften Nr. 223: 379 S; Bremen.
- FROMME, K., MICHALZIK, D. & WIRTH, W. (2010): Das geothermische Potenzial von Salzstrukturen in Norddeutschland. - Z. dt. geol. Ges., 161 (3): 323-333; Hannover.

- GAIDA, K.-H., GEDENK, R., KEMPER, E., MICHAELIS, W., SCHEUCH, R., SCHMITZ, H. H. & ZIMMERLE, W. (1981): Lithologische, mineralogische und organisch-geochemische Untersuchungen an Tonsteinen und Tonmergelsteinen der Unterkreide Nordwestdeutschlands (unter besonderer Berücksichtigung der Schwarzschiefer). - Geol. Jb A 58: 15-47; Hannover.
- GAST, S., WIRTH, H., FISCHER, M. & WEBER, K. (2012): Planungsgrundlagen und geologische Informationen für die Entwicklung potenzieller CO₂-Speichervorhaben. - Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 44 S.; Hannover, Berlin.
- GERARDI, J. (1986): Bohrung Konrad 101. Teil 1 - Geologischer Bericht und Teil II - Schichtenverzeichnis. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht: 26 S. und 47 S.; Hannover - Archiv-Nr. 0099599
- GERARDI, J. (1988): Geologischer Bericht Revision von Tiefbohrungen. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht: 41 S., 6 Bände mit Schichtenverzeichnissen; Hannover - Archiv- Nr. 0100 547.
- GERARDI, J. (2005): Barrierewirksame Eigenschaften von Ton und Tonstein: Fachinformationssystem BETTON. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bereich: Geotechnik/Endlagerung, Projektlaufzeit 01/2002 - 12/2007, www.bgr.bund.de.
- GRIMMELMANN, W., HANNEMANN, M., HECHT, G., MUELLER, A., PLUM, H., PRETSCHOLD, H.-H., SCHARPFF, H.-J. & SCHLIMM, W. (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung; AD-HOC-Arbeitsgruppe Hydrogeologie. - Geol. Jb. G2: 3-157.
- GRUBE, A., WICHMANN, K., HAN, J. & NACHTIGALL, K. H. (2000): Geogene Grundwasserversalzung in den Porengrundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. - Technologiezentrum Wasser Karlsruhe (TZW), 9: 203 S.
- HAGEDORN, H. & SIMON, T. (2005): Der Muschelkalk in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. - Newsl. Stratigr., 41 (1-3): S. 143-158.
- HAUSCHKE, N. & WILDE, V. [Hrsg.] (1999): Trias - Eine ganz andere Welt. - 647 S.; München (Pfeil Verl.).
- HENNINGSEN, D. & KATZUNG, G. (2002): Einführung in die Geologie Deutschlands. 214 S. 6. Aufl.; Heidelberg, Berlin (Spektrum, Akad. Verl.).

- HEUNISCH, C., CASPERS, G., ELBRACHT, J., LANGER, A., RÖHLING, H.G., SCHWARZ, C. & STREIF, H. (2007): Erdgeschichte von Niedersachsen - Geologie und Landschaftsentwicklung. - GeoBer., 6: 3-85; Hannover.
- HÖLTING, B. (1970): Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. - Z. dt. geol. Ges., 121: 19-44; Hannover.
- HÖLTING, B. (1992): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 415 S., 4. Auflage; Stuttgart (Enke Verl.).
- HOTH, P., SEIBT, A., KELLNER, T. & HUENGES, E. (1997): Geowissenschaftliche Bewertungsgrundlagen zur Nutzung hydrothormaler Ressourcen in Norddeutschland. - Helmholtz-Zentrum Potsdam Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Scientific Technical Report 97/15: 150 S.; Potsdam.
- 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: 118 S.; Berlin / Hannover
- JAHN, S. & SÖNNKE, J. (2013): Projekt AnSichT - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein. - Endlagerstandortmodell NORD. Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 72 S.; Hannover.
- JACOBSHAGEN, V., ARNDT, J., GÖTZE, H.-J., MERTMANN, D. & WALLFASS, C. M. (2000): Einführung in die geologischen Wissenschaften. - 432 S.; Stuttgart (Verl. Eugen Ulmer GmbH & Co.).
- JORDAN, H. & WEDER, H.-J. [Hrsg.] (1995): Hydrogeologie - Grundlagen und Methoden. - 603 S.; Stuttgart (Enke Verl.).
- KÄDING, K.-C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. - Newsl. Stratigr., 41 (1-3): 123-127.
- KATZUNG, G. (2004): Geothermie. - In: Katzung, G. [Hrsg]: Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. - 444-451; Stuttgart (E. Schweizerbart'scher Verlag).

- KEMPER, E. (1995): Sedimente, Fazies und Schichtenfolge des Barrême und Apt in NW-Deutschland. - Geol. Jb., A 141: 9-45; Hannover.
- KEMPER, E. & ZIMMERLE, W. (1982): Die Tuffe des Apt und Alb Nordwestdeutschlands. - Geol. Jb., A 65: 245-254; Hannover.
- KLEY, J., FRANZKE, H.-J., JAEHNE, F., KRAWCZYK, C., LOHR, T., REICHERTER, K., SCHECK-WENDEROTH, M., SIPPEL, J., TANNER, D., VAN GENT, H., MÜLLER, R., URAI, J. L. & VOIGT, T. (2008): Strain and stress. - In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. [Hrsg]: Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin system. - 97-124; Berlin (Springer Verl.).
- KOSSOW, D. (2001): Die kinematische Entwicklung des invertierten, intrakontinentalen Nordostdeutschen Beckens [Dissertation]. - Univers. Potsdam, 101 S.; Potsdam.
- KULICK, J., LEIFELD, D., MEISL, S., PÖSCHL, W., STELLMACHER, R., STRECKER, G., THEUERJAHR, A.-K. & WOLF, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. - Geol. Jb., D 68: 3-223; Hannover.
- LEYDECKER, G., KOPERA, J.R. & RUDLOFF, A. (1999): Abschätzung der Erdbebengefährdung in Gebieten geringer Seismizität am Beispiel eines Standortes in Norddeutschland. - In: Savidì, S.A. [Hrsg.]: Entwicklungsstand in Forschung und Praxis auf den Gebieten des Erdbebeningenieurwesens, der Boden- und Baudynamik. - Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB), Publikation Nr. 10: 89-97; Berlin.
- LITCKE, R., SCHECK-WENDEROTH, M., BRIX, M. R. & NELSKAMP, S. (2008a): Subsidence, inversion and evolution of the thermal field. - In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. [Hrsg]: Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin system. - 125-153; Berlin (Springer Verl.).
- LITCKE, R., BAYER, U., GAJEWSKI, D. & NELSKAMP, S. [Hrsg.] (2008b): Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin system. 519 S.; Berlin (Springer Verl.).
- LUDWIG, A. O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage 1 : 1500000 (map 1). - In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. [Hrsg]: Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346. - Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8; Kleinmachnow.

- MAGRI, F., LITKE, R., RODON, S., BAYER, U. & URAI, J. L. (2008): Temperature fields, petroleum maturation and fluid flow in the vicinity of salt domes. - In: Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. [Hrsg]: Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin system. - 323-344 Berlin (Springer Verl.).
- MANHENKE, V., REUTTER, E., HÜBSCHMANN, M., LIMBERG, A., LÜCKSTÄDT, M., NOMMENSEN, B., PETERS, A., SCHLIMM, W., TAUGS, R. & VOIGT, H.J. (2001): Hydrostratigrafische Gliederung des nord- und mitteldeutschen känozoischen Lockergesteinsgebietes. - Z. angew. Geol., 47 (3+4): 146-152.
- MATTHESS, G. & UBELL, K. (2003): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. - 575 S.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- MATTIAT, B. & KREIMEYER, R. (1991): Mineralogisch-petrographischer Untersuchungen an Gesteinsproben aus dem Bereich der Untersuchungsstrecke 541 m Sohle (Barrême) der Schachanlage Konrad, Schacht 2. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht: 17 S.; Hannover - Archiv-Nr. 0108659.
- MCCANN, T. [Hrsg.] (2008): The Geologie of Central Europe. - Geol. Soc., Vol. 1,2: 1449 S.; London.
- MEDERER, J.; SCHÜTTE, H.; SIMON, P. & STILLA, A. (1987): Lagerungsverhältnisse der Gebirgsformation im Bereich des geplanten Endlagers für radioaktive Abfälle Konrad (erstellt im Rahmen der Begutachtung Konrad aus geologischer Sicht). - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: 112 S.; Hannover - Archiv-Nr. 0113379.
- MENNING, M. & HENDRICH, A. [Koord.] (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2002. - Forsch.-Inst. Senckenberg; Frankfurt a. M.
- MENNING, M. & HENDRICH, A. (2005): Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2005. - Newsletter on Stratigraphy. - Bd. 41: 405 S.; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- MICHAEL, E. (1967): Die Mikrofauna des NW-deutschen Barreme. Teil I: Die Foraminiferen des NW-deutschen Barreme. - Paläontographica (Supplement), 12: 176 S.
- MÜLLER, C. & REINHOLD, K. [Hrsg.] (2011): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland. SDGG Heft 74: 244 S.; Hannover (E. Schweizerbart'scher Verlag).

- MÜLLER, E.P. & PAPENDIECK, G. (1975): Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. - Z. geol. Wiss., 3: 167-196; Berlin.
- MÜLLER, E.P. & NEBEL, B. (1976): Zur Isotopengeochemie des H, O, und S in Tiefenwässern. - Zeitschrift für angewandte Geologie, 22 (8): 351-357.
- MUTTERLOSE, J. (2000): Unterkreide im Niedersächsischen Becken, In: Deutschland, Stratigraphische Kommission [Hrsg.]: Stratigraphie von Deutschland III, CFS, 226: 79-101; Frankfurt am Main.
- MUTTERLOSE, J. & BÖCKEL, B. (1998): The Barremian-Aptian interval in NW Germany: a re-view.- Cretaceous Research, 19: 539-568.
- MRUGALLA S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose. - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-275, Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben: 169 S.; Köln.
- NAGRA [Hrsg.] (1994): Sedimentstudie Zwischenbericht 1993 - Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. - NAGRA Technischer Bericht 94-10: 76 S.; Wettingen.
- NAGRA [Hrsg.] (2008): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. - NAGRA Technischer Bericht 08-03: 458 S.; Wettingen.
- NLfB [Hrsg.] (1986): Geologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1:500000. Hannover.
- NOACK, V., SCHECK-WENDEROTH, M. & CACACE, M. (2012): Sensitivity of 3D thermal models to the choice of boundary conditions and thermal properties: a case study for the area of Brandenburg (NE German Basin). - Environmental Earth Sciences: 1-17 (DOI 10.1007/s12665-012-1614-2).
- NOACK, V., CHERUBINI, Y., SCHECK-WENDEROTH, M., LEWERENZ, B., HÖDING, T., SIMON, A. & MOECK, I. (2010): Assessment of the present-day thermal field (NE German Basin)- Inferences from 3D modelling. - Chemie der Erde 70 (S3): 47-62; (Elsevier Verl.).

- NOWAK, T. & MASSMANN, J. (2013): Projekt AnSichT - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen Standort im Tonstein. - Endlagerstandortmodell Nord. Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 31 S.; Hannover.
- PERYT, T.M., GELUK, M.C., MATHIESEN, A., PAUL, J. & SMITH, K. (2010): Zechstein. - In: DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. [Hrsg]: Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area. Houten (EAGE Publications b.v.).
- PLEIN, E. [Hrsg.] (1995): Norddeutsches Rotliegend-Becken Rotliegend-Monographie (Teil II). - CFS, 183: 1-193, Frankfurt a. M.
- RADZINSKI, K.-H. (2008): Buntsandstein. - In: Bachmann, G.H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. [Hrsg]: Geologie von Sachsen-Anhalt. - 180-212; Stuttgart (E. Schweizerbart'scher Verlag).
- REINHOLD, K., KRULL, P. & KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands (1 : 500000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 1 Karte; Berlin, Hannover.
- REINHOLD, K. & SÖNNKE, J. (2012): Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle in Tongestein. - Zwischenbericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 20 S.; Hannover, Berlin.
- REISER, H. (1991): Unterkompaktion und Porenwasserüberdrücke in jurassischen Tonsteinen der Struktur Thönse. - Nds. Akad. Geowiss. Veröfftl., 6: 123-131; Hannover.
- REUTER, F., KLENGEL, K. & PASEK, J. (1996): Ingenieurgeologie. - 603 S., 3. Aufl.; Leipzig (Dt. Verl. für Grundstoffindustrie).
- RÖCKEL, T. & LEMPP, C. (2003): Der Spannungszustand im Norddeutschen Becken. - Erdöl Erdgas Kohle, 2/2003: 73-80.
- RÖHLING, H.G. & HEINIG, S. (2012a): Reservoireigenschaften des Mittleren Buntsandsteins in den Bohrungen Groß Buchholz-Gt1 (GeneSys-Projekt Hannover) und Hämelerwald-Z1: Ergebnisse petrographischer Untersuchungen. - SDGG, 80: 458; Hannover.

- RÖHLING, H.-G. & HEINIG, S. (2012b): Lithostratigraphie und Petrographie des Mittleren Buntsandsteins in der Geothermiebohrung Groß Buchholz Gt1 und der Bohrung Hämelerwald Z1. - Erdöl Erdgas Kohle, 128 (4): 144-153.
- RÖSCH, H. (1985): Tiefbohrung Konrad 101 - Laborbericht. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bericht: 29 S.; Hannover.
- SCHECK-WENDEROTH, M., KRZYWIEC, P., ZÜHLKE, R., MAYSTRENKO, Y. & FROITZHEIM, N. (2008): Permian to Cretaceous tectonics. - In: McCann, T. [Hrsg]: The Geology of Central Europa. Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic. - Geol. Soc.: 999-1030; London.
- SCHULZ, R. (2002): Forschungsbohrungen des GGA-Instituts. - Z. angew. Geol., 48 (4): 3-8.
- SCHULZ, R. & RÖHLING, H.G. (2000): Geothermische Ressourcen in Nordwestdeutschland. - Z. angew. Geol., 46 (3): 122-129.
- SCHOTT, W. [Editor] (1967): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland - mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa (Teil 1, 2). - Bundesanstalt für Bodenforschung (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe): zahlr. Karten; Hannover.
- SIPPEL, J., SCHECK-WENDEROTH, M., REICHERTER, K. & MAZUR, S. (2009): Paleostress states at the south-western margin of the Central European Basin System – Application of fault-slip analysis to unravel a polyphase deformation pattern. - Tectonophysics, 470: 129-146.
- STACKEBRANDT, W., LUDWIG, A. O. & OSTAFICZUK, S. (2001): Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas 1 : 1500000 (map 2). - In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. [Hrsg]: Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346. - Brandenburgische Geowiss. Beitr. 8; Kleinmachnow.
- THOMAS, L. G. (1994): Hydrogeochemische Untersuchungen an Ölfeldern aus NW-Deutschland und dem Oberrheingraben und ihre Modellierung unter dem Aspekt der Entwicklung eines Expertensystems für Fluid-Rock-Interactions (XPS Frocki). - Berliner geow. Abh., 165: 166 S.
- WALTER, R. (2007): Geologie von Mitteleuropa. 566 S., 7. Auflage; Stuttgart (E. Schweizerbart'scher Verlag).

- WOLFGRAMM, M. (2002): Fluidentwicklung und Diagenese im Nordostdeutschen Becken - Petrographie, Mikrothermometrie und Geochemie stabiler Isotope [Dissertation]. - Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: 208 S.; Halle.
- WOLFGRAMM, M., THORWART, K., RAUPPACH, K. & BRANDES, J. (2011): Zusammensetzung, Herkunft und Genese geothermaler Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken (NDB) und deren Relevanz für die geothermische Nutzung. - Z. geol. Wiss., 39 (3/4): 173-193; Berlin.
- ZIEGLER, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europa. - 239 S.; Den Haag (Shell Internat. Petrol. Maatsch).

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Zusammenfassender Vergleich „normaler“ Tongesteine mit Blättertonsteinen des Unter-Barremium (nach GAIDA et al. 1981, MUTTERLOSE 2000).....	52

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Beispiel für das Vorkommen und die Mächtigkeit mesozoischer und känozoischer Ablagerungen in Verbindung mit halokinetischen und tektonischen Prozessen in der West-Altmark (KRULL in REINHOLD et al. 2008).	5
Abb. 2: Regionale Beispiele für die modellierte Versenkungsgeschichte der Sedimente aus der Oberen Trias bis Unter Jura des Nordostdeutschen Beckens (rot) und des südlichen Niedersächsischen Beckens (blau) (nach LITTKKE et al. 2008a).	7
Abb. 3: Schematisches geologisches Referenzprofil NORD und Stratigraphie zusammengestellt aus NLFb (1986), MENNING & HENDRICH (2002) und HEUNISCH et al. (2007).	8
Abb. 4: Untersuchungswürdige Tongesteinsformationen und Salzstrukturen in Norddeutschland (zusammengestellt aus HOTH et al. 2007 und REINHOLD et al. 2008).	10
Abb. 5: Stratigraphie und schematischen Darstellung der lithologischen Abfolge der Unterkreide im Gebiet des Referenzprofils NORD (nach MUTTERLOSE 2000 & HEUNISCH et al. 2007).	14
Abb. 6: Verbreitung glazialer Rinnen und Eisrandlagen in Norddeutschland (aus MRUGALLA 2011, nach STACKEBRANDT et al. 2001).	16
Abb. 7: Hydrogeologische Großräume und untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in Norddeutschland (zusammengestellt aus ELBRACHT et al. 2010 und HOTH et al. 2007).	19
Abb. 8: Salinität der Tiefenwässer des Norddeutschen Beckens (nach WOLFGGRAMM et al. 2011).	21
Abb. 9: 3D-Blockbild der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD (Abkürzungen: z = Zechstein, su+sm = unterer und mittlerer Buntsandstein, so+m = oberer Buntsandstein und Muschelkalk, k = Keuper, ju = Unterjura, jm = Mitteljura, jo = Oberjura, wd = Wealden, krv = Valanginium, krh = Hauterivium, krb = Barremium, krp = Aptium, krl = Albium, q = Quartär, GOK = Geländeoberkante, S1 = Rhätsandstein, S2 = Aalensandstein, S3 = Hilssandstein).	22
Abb. 10: Topografie für das Endlagerstandortmodell NORD (Gitterlinienabstand 2 km).	23
Abb. 11: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Zechstein (Gitterlinienabstand 2 km).	26
Abb. 12: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Unterer und Mittlerer Buntsandstein (Gitterlinienabstand 2 km).	27
Abb. 13: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Oberen Buntsandstein und Muschelkalk (Gitterlinienabstand 2 km).	28
Abb. 14: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Keuper (Gitterlinienabstand 2 km).	29

Seite

Abb. 15: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Unterjura (Gitterlinienabstand 2 km).....	30
Abb. 16: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Mitteljura (Gitterlinienabstand 2 km).....	31
Abb. 17: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Oberjura (Gitterlinienabstand 2 km).....	32
Abb. 18: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Wealden (Gitterlinienabstand 2 km).....	33
Abb. 19: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Valanginium (Gitterlinienabstand 2 km).....	34
Abb. 20: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Hauterivium (Gitterlinienabstand 2 km).....	35
Abb. 21: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Barremium (Gitterlinienabstand 2 km).....	37
Abb. 22: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Aptium (Gitterlinienabstand 2 km).....	38
Abb. 23: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Albium (Gitterlinienabstand 2 km).....	39
Abb. 24: Mächtigkeit (A) und Basis (B) der Modell-Einheit Quartär (Gitterlinienabstand 2 km).....	40
Abb. 25: Schematische Zusammenstellung der hydraulischen Eigenschaften der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell NORD. Klassifizierung in Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter nach GRIMMELMANN (1997).....	41
Abb. 26: Verteilung des Temperaturgradienten (nach AGEMAR et al. 2012) und die Verbreitung untersuchungswürdiger Tongesteinsformationen in Norddeutschland.....	46
Abb. 27: Beispiel einer modellierten Versenkungsgeschichte im Bereich des östlichen Niedersächsischen Beckens (DULCE & APEL 1991).....	47
Abb. 28: Mächtigkeit des Wirtsgesteins (Gitterlinienabstand 2 km).....	48
Abb. 29: Lithologie und Biostratigraphie der stratigraphischen Einheiten Hauterivium und Barremium im östlichen Zentralteil des Niedersächsischen Beckens, im Gebiet des Referenzprofils NORD (verändert nach MUTTERLOSE 2000).....	49
Abb. 30: Geologischer Schnitt im Endlagerstandortmodell NORD Richtung West-Ost (Abkürzungen: z = Zechstein, su+sm = unterer und mittlerer Buntsandstein, so+m = oberer Buntsandstein und Muschelkalk, k = Keuper, ju = Unterjura, jm = Mitteljura, jo = Oberjura, wd = Wealden, krV = Valanginium, krh = Hauterivium, krb = Barremium, krp = Aptium, krl = Albium, q = Quartär, S1 = Rhätsandstein, S2 = Aalensandstein, S3 = Hilssandstein).....	55

Seite

Abb. 31: Geologischer Schnitt im Endlagerstandortmodell NORD Richtung Nord-Süd (Abkürzungen siehe Abb. 30).....	56
---	----