



© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Geozentrum Hannover Stilleweg 2 30655 Hannover

www.bgr.bund.de

ISBN 978-3-9813373-3-4



Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland

Hannover, August 2009

Siegfried Keller



Inhalt	sverzeichnis	Seite
1	Einleitung	5
2	Perspektiven einer zukünftigen klimatischen Entwicklung	
	abgeleitet aus dem Klimaverlauf der letzten Million Jahre	6
2.1	Die Vergangenheit	6
2.2	Die Zukunft	9
3	Eiszeitliche Rinnenbildungen	12
4	Bedeutung subglazialer Rinnen für die Langzeitsicherheit	
	von Endlagerstandorten in Norddeutschland	13
4.1	Standorte im Wirtsgestein Steinsalz	14
4.2	Standorte im Wirtsgestein Ton	16
5	Zusammenfassung und Fazit	18
	Literaturverzeichnis	20



1 Einleitung

In Deutschland kommen für die Einlagerung von hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen (HAW) grundsätzlich die Wirtsgesteine Steinsalz und
Tongestein in Betracht. Wegen der Akkumulation von mächtigen Salzgesteinen
mit günstigen Eigenschaften gelten die durch einen Gewinnungsbergbau oder
andere Nutzungen unbeeinflussten Salzstöcke in Norddeutschland als mögliche
Endlagerstandorte für HAW. Zudem haben sich Tongesteinsformationen des
Erdmittelalters in Norddeutschland als untersuchungswürdig erwiesen (Нотн, Р.,
Wirth, H. et al. 2007: vgl. Abb. 4.30).

Im deutschen Endlagerkonzept soll die geologische Barriere die Hauptlast der Isolation hochradioaktiver Abfälle tragen. Schlüsselelement hierbei ist der so genannte Einschluss wirksame Gebirgsbereich (vgl. Akend 2002). Dieser soll den sicheren Einschluss der Abfälle (HAW) und ihre Isolierung von der Biosphäre aufgrund der besonderen Eigenschaften des jeweiligen Wirtsgesteins in Verbindung mit technischen Barrieren gewährleisten. Das Deckgebirge des Wirtsgesteins ist in der Regel kein Bestandteil des Einschluss wirksamen Gebirgsbereiches, wodurch dem Deckgebirge keine maßgebliche Barriererelevanz zukommt. Dennoch hat es im Rahmen des angestrebten Isolationszeitraumes von einer Million Jahre langfristig u. a. durch seine Schutzfunktion für das Wirtsgestein bzw. für den Einschluss wirksamen Gebirgsbereich gegen exogene Einflüsse eine Bedeutung.

Der Salzstock Gorleben wird seit 1979 auf seine Eignung für ein mögliches Endlager für hochradioaktive, wärmeentwickelnde Abfälle erkundet. Die übertägige Erkundung hat ergeben, dass das Deckgebirge eine eiszeitlich gebildete Rinne aufweist, in deren Bereich ehemals vorhandene, gering durchlässige tonige Schichten der Kreide- und Tertiär-Zeit vollständig erodiert wurden. Hierdurch kam es bei entsprechend ausgeprägten hydrogeologischen Bedingungen zu einer verstärkten Subrosion am Salzspiegel. Dieses bedeutet bei den im langfristigen Mittel zu erwartenden Ablaugungsraten von 0,01 bis 0,05 mm/Jahr (10 - 50 m/Millionen Jahre) eine geringe Reduzierung der ca. 600 m mächtigen Barriere Salzgestein im Salzstock Gorleben (Bornemann, O., Behlau, J. et al. 2008). Im Falle Gorleben oder möglicher anderer Standorte im Wirtsgestein Steinsalz sieht das Einlagerungskonzept deshalb die Auffahrung von Einlagerungsbereichen in großer Tiefe zwischen etwa 800 und 1000 m vor.



Die Tiefenlage von untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen liegt im Vergleich dazu zwischen 300 und 1000 m, wobei Tiefen von 300 bis 400 m aus gesteinsphysikalischen, technischen und ökonomischen Gründen für eine Einlagerung von HAW anzustreben wären (vgl. Amelung, P., Jobmann, M. et al. 2007; BGR 2007; Hoth, P., Wirth, H. et al. 2007; Jobmann, M., Amelung, P. et al. 2006; Uhlig, L., Amelung, P. et al. 2007).

Bei der Erstellung eines Sicherheitsnachweises für einen möglichen Endlagerstandort mit den Wirtsgesteinen Steinsalz oder Tongestein muss im Rahmen der Langzeitsicherheitsbetrachtungen generell eine Beschreibung der Deckgebirgsentwicklung erfolgen. Sie enthält eine Bewertung geologischer und klimatisch bedingter Prozesse, die über dem Isolationszeitraum als Verursacher für eine grundlegende Umgestaltung der Deckgebirgseigenschaften in Frage kommen und damit Auswirkungen auf das Isolationsvermögen der Wirtsgesteine ermöglichen.

Im Folgenden werden klimatische Perspektiven für die nächste Million Jahre aufgezeigt und die Genese von subglazialen Rinnen angesprochen. Die heutige und mögliche zukünftige Verbreitung der Rinnen wird beschrieben und ihre Bedeutung für mögliche Endlagerstandorte mit den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein diskutiert.

2 Perspektiven einer zukünftigen klimatischen Entwicklung abgeleitet aus dem Klimaverlauf der letzten Million Jahre

2.1 Die Vergangenheit

Der Energieeintrag an Solarstrahlung in das irdische Klimasystem hängt u. a. von der Position und Orientierung der Erde gegenüber der Sonne ab. Astronomische Parameter wie die Exzentrizität der Erdumlaufbahn, die Schiefe der Ekliptik sowie die Präzession der Erdrotationsachse unterliegen aufgrund gravitativer Einwirkungen von Sonne, Mond und Planeten charakteristischen Variationszyklen (Milanković-Zyklen), die mit knapp 100.000 Jahren (Exzentrizität), ca. 41.000 Jahren (Obliquität) und etwa 22.000 Jahren (Präzession) entsprechend lang andauernde klimatische Veränderungen auslösen können. Die



breiten- und saisonabhängigen Insolationsschwankungen aus diesen Milanković-Zyklen sind vor allem bei langfristigen Klimavariationen wirksam und werden heute als Schrittmacher der pleistozänen Klimazyklen mit Wechseln von Glazialen (Eiszeiten) und Interglazialen (Zwischeneiszeiten = Warmzeiten) angesehen.

Nach den sehr warmen globalen klimatischen Verhältnissen während der Kreide- und frühen Tertiär-Zeit begannen die Temperaturen vor etwa 35 bis 40 Millionen Jahren zu sinken, so dass es im Bereich des antarktischen Kontinents zu ersten Vereisungen kam. Die Vereisung der nördlichen Halbkugel setzte sehr viel später vor ca. 3 Millionen Jahren ein. Daraus ist abzuleiten, dass für die erreichten tiefen Temperaturen auf der Nordhalbkugel zunächst Voraussetzungen oder Verstärkungsmechanismen geschaffen werden mussten (plattentektonische Prozesse, Umstellung der Ozeanzirkulation, Eis-Albedo-Temperatur-Rückkopplung, natürliche Schwankungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration, etc.), die moduliert durch die Milanković-Zyklen letztlich zu dem für die vergangene Million Jahre typischen Wechsel von Eis- und Warmzeiten führten. Abbildung 1A zeigt die klimatische Entwicklung auf der Erde, wie sie aus den durchschnittlichen Sauerstoffisotopen-Daten für die letzten 70 Millionen Jahre (70 Ma) abgeleitet wurden (Bartlein, P. J. 2007). Die Daten weisen auf eine stetige Abkühlung des Erdklimas hin, die zu bestimmten Zeitabschnitten von wärmeren Klimaperioden unterbrochen wird.

Die aus verschiedenen Sauerstoffisotopen-Kurven zusammengesetzte Darstellung des Klimaverlaufs in Abbildung 1B verdeutlicht durch die grau schattierte Fläche einen Wechsel bei etwa 2,7 Millionen Jahre (2,7 Ma) der astronomischen Zyklen mit der Länge von 19-23 Tausend Jahre (19-23 ka) hin zu Zyklenlängen von 41.000 Jahren (41 ka). Mit diesem Wechsel setzten auch die Vereisungen im arktischen Bereich ein, die im Nordatlantik indirekt durch vom Eis verfrachtete Materialien nachzuweisen sind. Die Gründe für die gegenüber der Antarktisvergletscherung verzögerte Vereisung der nördlichen Hemisphäre sowie für den weiteren Wechsel von 41 ka-Zyklen zu 100 ka-Zyklen im Verlauf einer Übergangszeit um etwa 800.000 Jahre vor heute (Mittelpleistozäne Übergangszone: MPÜ) sind bislang nur ungenügend aufgeklärt. Der Wechsel wird von einigen Klimaforschern mit einer langzeitlichen Abnahme des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre oder kontinentalen Verwitterungsvorgängen in Verbindung gebracht. Huybers, P. (2009) vertritt eine alternative Ansicht, nach der die



pleistozäne glaziale Variabilität chaotisch verläuft und die Übergänge von den 41 ka- zu den 100 ka-Zyklen spontan erfolgen. Augenfällig im Klimageschehen der letzten Jahrhunderttausende nach der Zeit der Mittelpleistozänen Übergangszone sind die größeren Amplituden im Temperaturverlauf, d. h. die Temperaturunterschiede zwischen Glazialen und Interglazialen sind extremer als für die Zeiten vor der Mittelpleistozänen Übergangszone. Dabei geht eine Wiedererwärmung insbesondere nach ausgeprägten glazialen Verhältnissen zeitlich wesentlich schneller vonstatten als der Aufbau des Inlandeises. Der Beginn einer Wiedererwärmung korreliert dabei mit dem erfolgten Aufbau einer für die Klimaentwicklung kritischen Menge an Inlandeis. Unterschiede in den Amplitudenhöhen bestehen nach der Mittelpleistozäne Übergangszone auch zwischen den einzelnen Eiszeiten.

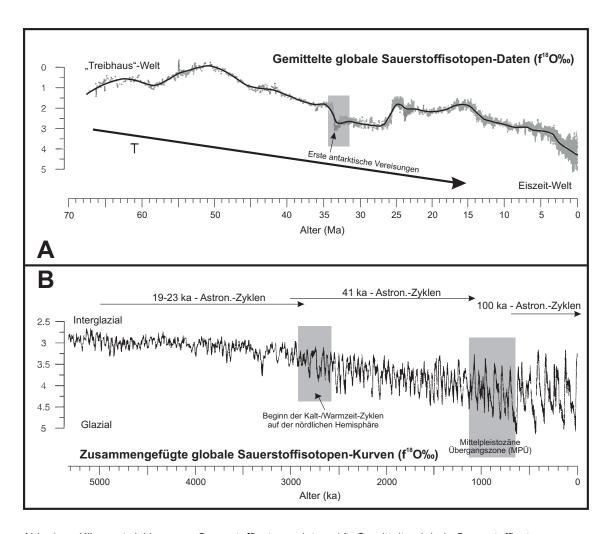


Abb. 1: Klimaentwicklung aus Sauerstoffisotopendaten. 1A: Gemittelte globale Sauerstoffisotopen-Daten; 1B: Zusammengefügte globale Sauerstoffisotopen-Kurven (veränd. nach BARTLEIN 2007; KÖHLER & BINTANIA 2008; POORE 2007).



2.2 Die Zukunft

Wenn aus den Erkenntnissen zum klimatischen Verlauf der Vergangenheit die klimatischen Perspektiven der Zukunft abgeleitet werden sollen, ergibt sich die Problematik, dass der Klimaverlauf während der letzten einen Million Jahre nicht gleichmäßig verlaufen ist und die dafür verantwortlichen Regeln nicht bekannt sind. Zudem kann der menschliche Einfluss auf das zukünftige langfristige Klimageschehen bislang nur spekulativ vorhergesagt werden. Müller, U. C. & Pross, J. (2007) vermuten, dass die durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen den eigentlich zu erwartenden Wechsel vom gegenwärtigen Interglazial zu eiszeitlichen Klimabedingungen bereits verzögert haben, so dass sich glaziale Verhältnisse frühestens ab ca. 50.000 Jahre nach heute einstellen werden. Mysak, L. A. (2006) schätzt, dass aufgrund der anthropogenen Klimabeeinflussung zukünftig sogar für etwa 500.000 Jahre warmzeitliche Verhältnisse dominieren könnten (vgl. a. Cochelin, A.-S. B., Mysak, L. A. et al. 2006).

Aus der Zwangslage, dass der Klimaverlauf der Vergangenheit nicht unmittelbar auf die Zukunft von einer Million Jahre extrapoliert werden kann, muss im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen über den Zeitraum der nächsten einen Million Jahre ein hypothetisches Klimabild bestimmt werden. Aus konservativen Gründen wird daher das Klimageschehen nach der Zeit der Mittelpleistozänen Übergangszone als Basis für die weiteren Überlegungen zur geologischen Entwicklung des Deckgebirges über Wirtsgesteinen von HAW-Endlagern herangezogen. Dies berücksichtigt die großen Temperaturunterschiede zwischen Warm- und Eiszeiten und die großflächige Verbreitung des Inlandeises in Mitteleuropa, die in diesem Ausmaß vor der Zeit der Mittelpleistozänen Übergangszone nicht vorhanden waren.

Für das hypothetische Klimabild wird daher vorausgesetzt, dass

- die Abläufe der Vergangenheit nach der Zeit der Mittelpleistozänen
 Übergangszone die Basis für die klimatischen Perspektiven in der Zukunft des Betrachtungszeitraumes von 1 Million Jahre liefern,
- die durch eine zyklische Variation von astronomischen Parametern wie die Exzentrizität, Obliquität und die Präzession (→ Milanković-Zyklen) verursachten Änderungen der Sonneneinstrahlung weiterhin als Schrittmacher



wirksam sind, was um ca. 100.000 Jahre nach heute eine erneute Vereisung der nördlichen Hemisphäre und die Ausbreitung von Inlandeis bedeutet.

- vergleichbare Änderungen im Klimaablauf (Zyklenwechsel) wie zur Zeit der Mittelpleistozänen Übergangszone vor etwa 800.000 Jahren nicht stattfinden,
- keine großräumigen globalen Veränderungen erfolgen, die z. B. Meeresströmungen ändern oder Gebirge entstehen lassen und die trotz eines Fortbestandes der Milanković-Zyklen mit Insolationsminima zu einer grundsätzlichen Änderung der klimatischen Verhältnisse mit einer fehlenden Vergletscherung auf der Nordhalbkugel führen könnten, und
- die Auswirkungen der heutigen Treibhausgasemissionen unberücksichtigt bleiben.

Die Konsequenzen des anthropogenen Einflusses auf das zukünftige Klima führen eher dazu, dass die Anzahl möglicher zukünftiger Eiszeiten reduziert und somit im Betrachtungszeitraum glazigene Beeinflussungen von Deckgebirgen geringer ausfallen.

Weiterhin werden die Angaben von LISIECKI, L. E. & RAYMO, M. E. (2005) berücksichtigt, die für den Zeitraum von etwa 800.000 Jahre (Mittelpleistozäne Übergangszone) bis heute neun Glazial-/Interglazial-Zyklen angeben.

Darauf aufbauend ergeben sich für das hypothetische Klimabild im Zeitrahmen der nächsten Million Jahre zehn weitere Eiszeiten, von denen einige auch das Ausmaß der Elster- oder der Saale-Eiszeit erreichen könnten (s. Eisrandlagen in Abb. 2 und 3).

Danach würde in Norddeutschland das Eis während einer zukünftigen mit der vergangenen Elster- und Saale-Eiszeit vergleichbaren Eiszeit die Mittelgebirge erreichen. Analog zur jüngsten Eiszeit (Weichsel) kämen zukünftige Gletscher schon nördlich der Elbe zum Stehen. Der Aufbau eines Inlandeisgletschers würde unterbrochen von zwischenzeitlichen Erwärmungen (Interstadiale) einen Zeitraum von mehreren Zehntausend Jahren umfassen. Danach ist für ca. 20 bis 40 Tausend Jahre im Zuge der maximalen Gletschervorstöße eine Überdeckung von weiten Teilen Norddeutschlands mit Eis zu erwarten.



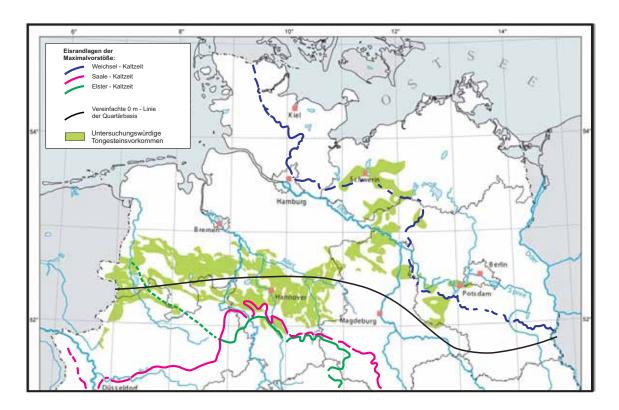


Abb. 2: Verbreitung von untersuchungswürdigen Tongesteinsvorkommen, Eisrandlagen der Maximalvorstöße und vereinfachte 0 m-Linie der Quartärbasis (ergänzt nach: Нотн, Р., Wirth, H. et al. 2007).

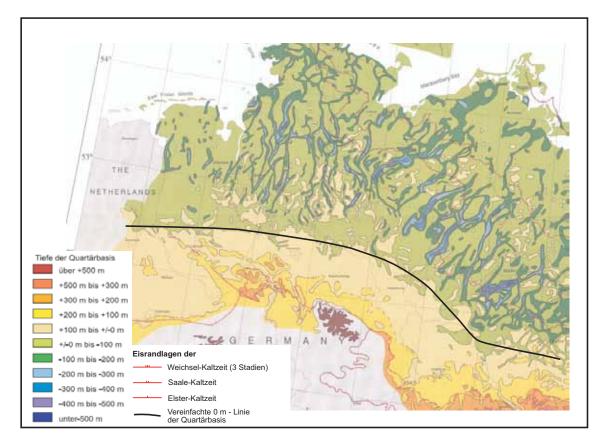


Abb. 3: Verbreitung elsterzeitlicher Rinnensysteme dargestellt durch die Tiefenlage der Quartärbasis (aus: Stakebrandt, W., Ludwig, A. O. & Ostaficzuk, S. 2001).



3 Eiszeitliche Rinnenbildungen

Während einer Eiszeit mit einer Inlandeisvergletscherung in Mitteleuropa ist die Bildung von Rinnensystemen möglich, die durch den Abfluss großer Schmelzwassermengen entstehen. Die Rinnen können entweder unterhalb des Inlandeises (subglazial) oder vor dem Eisrand vorhanden sein.

Die vor dem Rand des Inlandeises gebildeten Rinnen stehen häufig im genetischen Zusammenhang mit Eisstauseen, deren Wassermassen sich nach dem Bruch des Stauriegels in einem katastrophalen Abflussereignis erosiv in den Untergrund einschneiden. Eisstauseen bildeten sich in Norddeutschland an verschiedenen Stellen des Mittelgebirgsrandbereiches, wo die aus Süden kommenden Oberflächenwässer zusammen mit Schmelzwässern durch das weit bis zu den Mittelgebirgen vorgerückte Inlandeis aufgestaut und am natürlichen Abfluss in Richtung Nordsee gehindert wurden (vgl. Feldmann, L. 2002; Thiermann, A., Koch, M. et al. 1970; Thome, K. N. 1980). Die dabei entstehenden Rinnen sind in ihren Dimensionen mit Flusstälern zu vergleichen. In Abhängigkeit von den abfließenden Wassermengen lassen diese Rinnenbildungen analog für die zukünftigen norddeutschen Verhältnisse Erosionstiefen von einigen zehner Metern erwarten. Sie werden damit in ihrem Ausmaß verglichen mit entsprechenden eiszeitlichen Bildungen in Nordamerika (vgl. Kehew, A. E., Lord, M. L. et al. 2007) eher bescheiden ausgeprägt sein.

Die unterhalb des Inlandeises, subglazial, entstandenen Rinnensysteme erreichten dagegen während der Elster-Eiszeit eine Tiefe von bis zu 500 m, Längen von einigen zehner bis über hundert und Breiten von mehreren Kilometern (s. Abb. 3; Kuster, H. & Meyer, K.-D. 1979; Stakebrandt, W., Ludwig, A. O. et al. 2001). Die Verlaufsrichtungen bewegen sich relativ einheitlich um NNE bis SSW im westlichen Norddeutschland und um NE bis SW im östlichen Norddeutschland. Bevorzugte Orte für die Rinnenbildungen sind nicht zu erkennen. Vergleichbare tiefe Rinnensysteme wurden bei der nachfolgenden Saale-Eiszeit in Norddeutschland dagegen nicht gebildet, obwohl das Inlandeis ähnlich weit und stellenweise sogar weiter als das der Elster-Eiszeit nach Süden vordrang. Saalezeitliche tiefe Rinnen bzw. solche der jüngsten Eiszeit (Weichsel) sind nur aus den weiter im Norden liegenden Gebieten der Nordsee und Dänemarks oder von den im Osten gelegenen Gebieten Polens und des Baltikums bekannt. Glazigene Becken der Saale-Eiszeit in Verbindung mit tiefen Rinnen beschreiben Van Dijke, I. J. & Veldkamp, A. (1996) von den nördlichen Niederlanden.



Die Bildungsbedingungen der diversen subglazialen Rinnenvorkommen werden kontrovers diskutiert (Kehew, A. E., Lord, M. L. et al. 2007: 826). Insgesamt gilt aber für die meisten und insbesondere für die elsterzeitlichen norddeutschen Vorkommen, dass sie durch Schmelzwässer erklärt werden, die unter einem hohen hydraulischen Druck standen und sich in einem einzigen Ereignis oder durch einen stetigen Prozess in den Untergrund erosiv einschnitten. Randbedingungen wie die mittlere Lufttemperatur, Vorhandensein eines Permafrostes am Eisrand, fehlender Permafrost unterhalb des Inlandeises in sich anschließenden randfernen Bereichen, Eismächtigkeit, eine großflächige Inlandeisverbreitung in flachen Ebenen u. a. gelten als verursachend oder voraussetzend für die Bildung und Ausprägung der subglazialen Rinnen. Die Rinnentiefe wurde anscheinend nicht nur durch genügend große Wassermengen, sondern insbesondere auch durch die Permeabilität sowie die Art und Härte des Untergrundes bestimmt. Je permeabler und weicher die Schichten unterhalb des Inlandeises waren, umso deutlicher konnte eine Rinnenbildung erfolgen.

Solche für das Entstehen der Rinnen z. T. nicht näher bekannten Randbedingungen bestimmen offensichtlich auch die Gebiete, in denen subglaziale Rinnen überhaupt nachgewiesen werden können. Die tiefen Rinnenbildungen der Elster-Eiszeit sind nur nördlich der in Abbildung 3 eingezeichneten vereinfachten 0 m-Isolinie der Quartärbasis bislang nachgewiesen, obwohl das Eis deutlich weiter nach Süden vordrang. Wie vorher erwähnt, fanden ähnliche ausgeprägte tiefe Rinnenbildungen während der Saale- und Weichsel-Eiszeit in Norddeutschland nicht statt, was wiederum darauf schließen lässt, dass andere Randbedingungen auch während der verschiedenen Eiszeiten unterstellt werden müssen.

4 Bedeutung subglazialer Rinnen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland

Als Schlussfolgerung aus dem Kap. 2 kann für das zukünftige Klima im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre die Perspektive von zehn möglichen Eiszeiten abgeleitet werden, die einmal oder mehrfach das Ausmaß der Elster-Eiszeit erreichen können. Daraus ergibt sich ebenfalls, dass erneute Rinnenbildungen mit maximalen Erosionstiefen bis etwa 500 m in unkonsolidierten tertiären und quartären Lockermaterialien unterstellt werden müssen. Die Lage



möglicher zukünftiger Rinnen kann allerdings nicht vorhergesagt werden. Prinzipiell sind daher an jedem Ort in Norddeutschland Rinnenbildungen möglich.

Dies bedeutet, dass analog zum Salzstock Gorleben auch die Deckgebirge von möglichen anderen Standorten entsprechend erosiv durch zukünftige Rinnenbildungen verändert werden können. Die Verhältnisse im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben sind somit eine vorweg genommene mögliche Zukunft für andere Salz- und Tongestein-Standorte. Die Existenz einer eiszeitlichen Rinne im Deckgebirge eines möglichen Endlagerstandortes in Norddeutschland stellt somit keine Besonderheit dar, sondern muss im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen zur Deckgebirgsentwicklung aufgrund der angenommenen zukünftigen klimatischen Entwicklung als gegeben unterstellt werden.

Unterschiede zwischen Salz- und Tongestein-Standorten sind im Zusammenhang mit subglazialen Rinnen durch die unterschiedliche Tiefenlage von Einlagerungshorizonten gegeben. Als Teufenlagen im Wirtsgestein Steinsalz sind >800 m vorgesehen. Einlagerungshorizonte in tonigen Wirtsgesteinen werden schon ab >300 m Tiefe (BGR 2007; HOTH, P., WIRTH, H. et al. 2007) bzw. in dem besonders geeigneten Tiefenbereich bis ca. 400 m aufgrund der speziellen Wirtsgesteinseigenschaften als sinnvoll angesehen (vgl. AMELUNG, P., JOBMANN, M. et al. 2007; JOBMANN, M., AMELUNG, P. et al. 2006; UHLIG, L., AMELUNG, P. et al. 2007).

4.1 Standorte im Wirtsgestein Steinsalz

Viele der Salzstöcke in Norddeutschland durchliefen während der Kreide-Zeit den Höhepunkt der Diapirphase. Im Zuge des Aufstiegs verloren sie ihre ehemalige Sedimentdecke aus Oberkreidegesteinen (harte Sedimente in Pläneroder relativ weiche in Mergel- und Schreibkreide-Fazies), so dass heute die Deckgebirge wie über den Salzstock Gorleben im Wesentlichen nur aus unkonsolidierten Tertiär- und Quartärschichten aufgebaut sind. Abbildung 4 zeigt beispielhaft einen vereinfachten schematischen Schnitt durch einen norddeutschen Salzstock.

Zukünftige Rinnenbildungen würden sich in ähnlich aufgebauten permeablen Deckgebirgen alternativer Standorte entsprechend einschneiden, so dass vergleichbare Verhältnisse zu erwarten sind, wie sie bereits heute am Salzstock



Gorleben festgestellt wurden (Bornemann, O., Behlau, J. et al. 2008). Dort erodierte eine subglaziale Rinne zur Elster-Eiszeit die Schichten des Tertiär und die Reste der Unterkreide-Gesteine, so dass elsterzeitliche quartäre Rinnensedimente z. T. auf Salzgestein zu liegen kamen. Die bei diesem Schmelzwasserabfluss vorhandenen hydraulischen Drücke müssen sehr hoch gewesen sein, da bestimmte Lagen des Hutgesteins oberhalb des Salzspiegels brekziiert wurden. Dass die Brekziierung von Teilen des Hutgesteins im Zusammenhang mit der Rinnenbildung steht, beweisen eingeschaltete sandige Lagen mit Geröllen, die z. T. eine für Fließgewässer typische Schichtung und ein entsprechendes quartäres Alter aufweisen.

Die unregelmäßig gestaltete Oberfläche des Salzgesteins im Bereich der Rinne ähnelt dem Formenschatz wie er für Rinnenbildungen im Festgestein typisch ist. Ausgeprägte Erosionsformen in gering permeablen Festgesteinen beschreiben Kor, P. S. G., Shaw, J. et al. (1991) von Gebieten in Nordamerika, die auf extreme Abflussereignisse von großen Mengen schnell fließender subglazialer Schmelzwässer zurückgeführt werden. Ein Beispiel für eine Rinnenbildung aus Norddeutschland mit entsprechendem Formenschatz ist vom Muschelkalkaufschluss bei Rüdersdorf östlich von Berlin bekannt (Schroeder, J. H. 1995). Dort hat sich in Abhängigkeit von der Gesteinshärte eine Rinne von etwa 50 m Tiefe und einer Breite von etwa 5 bis 160 m in das bis zur Oberfläche anstehende Gestein eingeschnitten. Analoge Eintiefungen bis ca. 50 m in am Salzspiegel ausstreichenden gering permeablen und wechselnd harten Salzgesteinen werden im Zuge von Rinnenbildungen aus konservativen Gründen daher für möglich gehalten. Dies wird durch die Beobachtungen am Salzstock Gorleben bekräftigt. Der Salzspiegel im Bereich der Gorlebener Rinne weist zwar ein partiell durch die Rinnenbildung gestaltetes und heute erhaltenes Relief auf, liegt aber gegenüber dem umgebenden Salzspiegel nur unwesentlich tiefer (Borne-MANN, O. 1991: Anl. 16). Daraus kann eine nur geringe Auflösung und Erosion von Salzgestein während des Prozesses der elsterzeitlichen Rinnenbildung abgeleitet werden. Zudem entfaltete sich die Erosionsleistung der Schmelzwässer offenbar bevorzugt entlang des permeablen Grenzbereichs zwischen Hutgestein und Salzspiegel, was durch die Hutgesteinsbrekzie belegt wird. Wenn anstelle des als "Härtling" wirkenden Salzstocks nur unkonsolidierte Quartär-/ Tertiär- Schichten und Kreide-Tongesteine vorhanden gewesen wären, hätte die Gorlebener Rinne sich tiefer eingeschnitten. Dies wird durch einen Vergleich der Härtegrade z. B. durch die einfache Bestimmung nach Mohs von



Salzgestein und Tongestein verdeutlicht. Die norddeutschen Tongesteine aus der Quartär-, Tertiär- oder Unterkreidezeit sind ein relativ weiches Material. Sie erreichen auf der Mohs'schen Härtegradskala nur Werte zwischen 1 und 2. Salzgestein liegt bei 2,5 und Gips bei 2, der zusammen mit dem Anhydrit einen wesentlichen Bestandteil des Hutgesteins darstellt. Anhydrit hat sogar den Härtegrad von 3 bis 3,6.

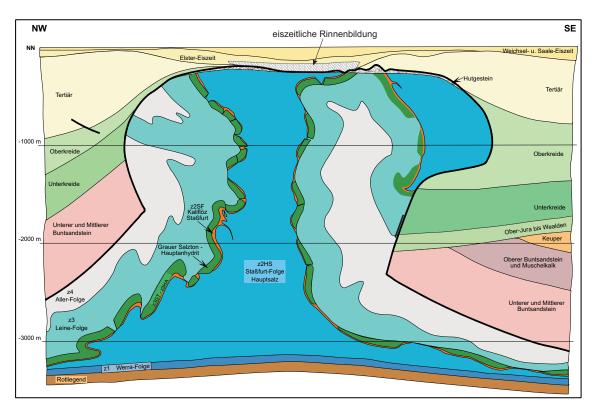


Abb. 4: Schematischer Schnitt durch einen Salzstock in Norddeutschland (nach Bornemann, O. 1991).

4.2 Standorte im Wirtsgestein Ton

Die Tiefen der untersuchungswürdigen Tongesteine in Norddeutschland liegen nach Hoth, P., Wirth, H. et al. (2007) zwischen >300 und <1000 m. Abbildung 5 zeigt einen einfachen schematischen Schnitt durch ein norddeutsches Tongesteinsvorkommen.

Sofern die Deckgebirge der Vorkommen nur aus unkonsolidierten Schichten der Tertiär- und Quartärzeit bestehen, ist eine erosive Beeinträchtigung nicht nur der Deckgebirgsschichten bis in eine Tiefe von 500 m infolge von zukünftigen eiszeitlichen Rinnenbildungen, sondern auch eine Erosion des stratigraphisch



älteren tonigen Wirtsgesteins möglich. Dies gilt prinzipiell für Gebiete nördlich der 0 m-Quartärbasislinie (Abb. 2 u. 3), in denen elsterzeitliche Rinnen ausgebildet sind und aufgrund der unterstellten klimatischen Zukunft auch wieder entstehen können. Südlich der Linie mag eine Rinnenentstehung nur von der Existenz sich rasch entleerender Eisstauseen abhängen (vgl. a. Thome, K. N. 1980), was nur geringere Erosionstiefen in den Deckgebirgsschichten erwarten lässt.

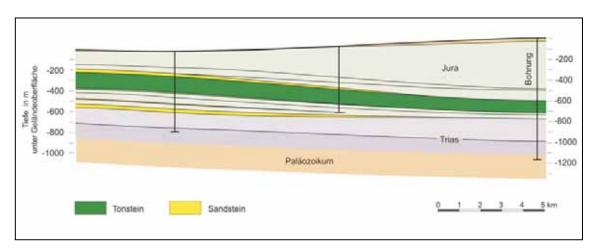


Abb. 5: Schematischer Schnitt durch ein Tongesteinsvorkommen in Norddeutschland (aus: BGR 2007).

Eine ungestörte Schichtenabfolge enthält oberhalb der unterkretazischen und älteren Tongesteine eine Abfolge aus Oberkreidegesteinen, die einerseits aus harten Plänerkalken und andererseits aus weicheren Mergeln oder Schreibkreide bestehen kann (Details in SDGG 2007). In Dänemark existieren subglaziale Rinnen, die sich 50 bis 350 m tief einschnitten (JØRGENSEN, F. & SAN-DERSEN, P. B. E. 2006), wobei einige zehner Meter an Kreidekalken im tiefen Untergrund betroffen sind. THIERMANN, A., KOCH, M. et al. (1970) beschreiben aus Nordrhein-Westfalen (Blatt 3711 Bevergern) eine Schmelzwasserrinne, die sich auf etwa 2 km Breite bis zu 25 bis 30 m unter das heutige Geländeniveau in Oberkreidemergeln eingeschnitten hat. Diese Rinne ist genetisch allerdings nicht mit den tiefen elsterzeitlichen Rinnen nördlich der 0 m-Quartärbasislinie zu vergleichen. Aus den relativ geringen Erosionsleistungen von einigen zehner Metern in den kalkigen Gesteinen kann aber abgeleitet werden, dass härtere und gering permeable Partien der kalkigen Oberkreideabfolge die darunter liegenden, tonigen und stratigraphisch älteren potentiellen Wirtsgesteine vor einer Erosion durch subglaziale Rinnenbildungen bis zu einem gewissen Grad schützen können.



Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die schützenden Oberkreidegesteine nicht mergelig weich ausgebildet sind oder durch Hebung im Betrachtungszeitraum abgetragen wurden bzw. in Zukunft werden. Die Trennung der Gebiete mit stärkeren Hebungstendenzen einerseits und Senkungstendenzen andererseits seit dem Oligozän stimmt ebenfalls ungefähr mit der 0 m-Quartärbasislinie überein. Südlich der Linie im Bereich der Mittelgebirge kam es in den letzten ca. 30 Millionen Jahre zu Hebungen um etwa 300 m, im Bereich des Harzes sogar um bis zu 600 m (Ludwig, A. O. 2001). Die untersuchungswürdigen, als Wirtsgesteine nutzbaren Tonvorkommen könnten in der Zukunft hier ihre schützenden Oberkreideschichten durch hebungsbedingte Erosion verlieren. Dagegen werden in den Gebieten nördlich der Linie Absenkungsbeträge von etwa 300 m festgestellt, die sich im Bereich der Nordsee sogar auf über 1000 m erhöhen und in ihren Auswirkungen damit eher für die Erhaltung der Schichten beitragen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Teil einer Langzeitsicherheitsanalyse für mögliche Endlagerstandorte mit hochradioaktiven, wärmeentwickelnden Abfällen (HAW) muss die Beurteilung der Deckgebirgsentwicklung über den Wirtsgesteinhorizonten sein. Wesentlicher Einfluss auf die Entwicklung eines Deckgebirges geht von den zukünftigen klimatischen Prozessen aus.

Aus der klimatischen Vergangenheit wird eine Perspektive für die klimatische Zukunft der nächsten eine Million Jahre entwickelt und darauf aufbauend die Möglichkeit einer erneuten Bildung von tiefen subglazialen Rinnensystemen in Norddeutschland im Rahmen zukünftiger Eiszeiten abgeschätzt. Für die Zukunft der nächsten Jahrmillion werden zehn weitere Eiszeiten für möglich gehalten, von denen für mindestens eine das Potential der früheren Elster-Eiszeit zu unterstellen ist, die z. B. zu der Rinnenbildung im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben führte. Da die Lage zukünftiger subglazialer Rinnenbildungen nicht vorhergesagt werden kann, sind die Deckgebirgsverhältnisse über dem Salzstock Gorleben als Zukunftsoption auch für alternative Standorte in Norddeutschland zu unterstellen.



Wegen der in Salzstöcken akkumulierten großen Mächtigkeiten von Steinsalz ist eine Abfalleinlagerung in Tiefenbereichen von 800 - 1000 m vorgesehen, die zukünftige negative Einwirkungen auf ein Endlager durch Rinnenbildungen ausschließen. Die Auswirkungen zukünftiger Rinnenbildungen werden auch durch die Härte des Salzgesteins begrenzt, da diese ein wichtiger Parameter für die die Ausbildung der subglazialen Rinnen ist.

Für die Endlagerung untersuchungswürdige Tongesteinformationen wurden bereits ab einer Tiefe >300 m ausgewiesen, wobei insbesondere die Tiefe zwischen 300 und 400 m aus gesteinsphysikalischen, technischen und ökonomischen Gründen von größerem Interesse ist (vgl. Amelung, P., Jobmann, M. et al. 2007; BGR 2007; Hoth, P., Wirth, H. et al. 2007; Jobmann, M., Amelung, P. et al. 2006; Uhlig, L., Amelung, P. et al. 2007). Die Barrierefunktion dieser in relativ geringer Tiefe gelegenen weichen Tongesteinsformationen ist durch subglaziale Rinnenbildungen mit Erosionsleistungen von bis zu 500 m Tiefe unmittelbar und insbesondere bei fehlenden harten, kalkigen und gering durchlässigen Oberkreidegesteinen gefährdet. Die im südlichen Norddeutschland vorhandenen Tongesteinsvorkommen sind zudem in einem Bereich gelegen, der sich neotektonisch durch deutliche Hebungstendenzen auszeichnet, so dass hier eine zur Zeit vorhandene günstige Oberkreideformation möglicherweise im Laufe des Betrachtungszeitraumes von einer Million Jahre abgetragen werden könnte.

Aus der Gegenüberstellung zwischen den möglichen Wirtsgesteinen Ton bzw. Steinsalz in Norddeutschland ergibt sich somit, dass für die Endlagerung hochradioaktiver und wärmeentwickelnder Abfälle Tongesteine weniger geeignet sind als Salzgesteine in durch Gewinnungsbergbau oder anderen Aktivitäten unbeeinflussten Salzstöcken. Dies gilt besonders für Standorte in Norddeutschland, die untersuchungswürdige Tongesteinsformationen in einer Tiefe ab >300 m bis etwa 500 m aufweisen.



Literaturverzeichnis

- AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd.-- Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): 260 S., 30 Abb., 14 Tab., 3 Anh.; Berlin.
- AMELUNG, P., JOBMANN, M. & UHLIG, L. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland GENESIS (Anlagenband Geologie der Referenzregionen im Tonstein).-- DBETec-Bericht, veröffentl. im Internet Stand 04/2009: 67 S., 38 Abb., 3 Tab.; Peine.
- Bartlein, P. J. (2007): Time Scales of Climate Change. (In: Elias, S. A. (ed.): Encyclopedia of Quaternary Science).-- ELSEVIER, 1. Aufl., Vol. 3: 1873-1883; Amsterdam.
- BGR (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen.-- Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR): 17 S., 3 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- Bornemann, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen.-- BfS-Schriften, 4/91: 67 S., 13 Abb., 5 Tab., 24 Anl.; Salzgitter.
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars.-- Geol. Jb., C 73: 211 S., 50 Abb., 7 Tab., 5 Anl.; Hannover.
- COCHELIN, A.-S. B., MYSAK, L. A. & WANG, Z. (2006): Simulation of long-term future climate changes with the green McGill paleoclimate model: The next glacial inception.-- Climatic Change, 79: 381-401, 10 Fig.; New York.



- Feldmann, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär.-- Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: X + 149 S., 72 Abb., 7 Tab.; Clausthal-Zellerfeld.
- 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 f. Geowiss. u. Rohstoffe: 118 S., 44 Abb., 5 Tab.; Berlin.
- Huybers, P. (2009): Pleistocene glacial variability as a chaotic response to obliquity forcing.-- Clim. Past Discuss., 5: 237-250, 2 Fig.; Katlenburg-Lindau.
- JOBMANN, M., AMELUNG, P., UHLIG, L., POLSTER, M., SCHONEBECK, M. & SCHMIDT, H. (2006): Untersuchungen zur Sicherheitstechnischen Auslegung eines Generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland GENESIS -. In: FZKA (Hrsg.): Untertägige Entsorgung. Siebtes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen am 3. und 4. Mai 2006 in Karlsruhe).-- Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (FZKA) Wassertechnologie und Entsorgung, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 9: 167-181, 17 Abb., 4 Tab.; Karlsruhe.
- JØRGENSEN, F. & SANDERSEN, P. B. E. (2006): Buried and open tunnel valleys in Denmark erosion beneath multiple ice sheets.-- Quaternary Science Reviews, Vol. 25: 1339-1363, 12 Fig., 1 Tab.; Amsterdam/Netherlands.
- Kehew, A. E., Lord, M. L. & Koslowski, A. L. (2007): Glacifluvial Landforms of Erosion. In: Elias, S. A. (ed.): Encyclopedia of Quaternary Science.--ELSEVIER, 1. Aufl., Vol. 1: 818-831; Amsterdam.
- Köhler, P. & Bintanja, R. (2008): The carbon cycle during the Mid Pleistocene Transition: the Southern Ocean Decoupling Hypothesis.-- Clim. Past, 4, 4: 311-332, 11 Fig., 4 Tab.; Katlenburg-Lindau.



- Kor, P. S. G., Shaw, J. & Sharpe, D. R. (1991): Erosion of bedrock by subglacial meltwater, Georgian Bay, Ontario: a regional view.-- Can. J. Earth Sci., Vol. 28, 4: 623-642, 15 Fig.; Ottawa/Canada.
- Kuster, H. & Meyer, K.-D. (1979): Glaziare Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen.-- Eiszeitalter u. Gegenwart, 29: 135-156, 5 Abb., 3 Tab., 1 Kt.; Hannover.
- LISIECKI, L. E. & RAYMO, M. E. (2005): A Plio-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic δ¹⁸O records.-- Paleoceanography, Vol. 20: PA1003: 1-17, 12 Fig., 4 Tab.; Washington/USA.
- Ludwig, A. O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G. & Stackelbrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346.-- Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 5-12, 4 Fig.; Kleinmachnow.
- MÜLLER, U. C. & PROSS, J. (2007): Lesson from the past: present insolation minimum holds potential for glacial inception.-- Quaternary Science Reviews, 26: 3025-3029; Amsterdam.
- MYSAK, L. A. (2006): Glacial Inceptions: Past and Future (Alfred Wegener Medal Lecture).-- Geophysical Research Abstracts, Vol. 8: 11031; Strasbourg/ European Geosciences Union.
- Poore, R. Z. (2007): Pliocene Environments. In: Elias, S. A. (ed.): Encyclopedia of Quaternary Science.-- ELSEVIER, 1. Aufl., Vol. 3: 1948-1958; Amsterdam.
- Schroeder, J. H. (1995): Die Kreuzbrückenspalte von Rüdersdorf subglaziale Erosion im Wellenkalk.-- Berliner geowiss. Abh., Reihe A, Bd. 168: 177-189, 5 Abb., 4 Taf.; Berlin.
- SDGG (2007): Beitrag zur Stratigraphie von Deutschland. Lithostratigraphie der norddeutschen Oberkreide.-- Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 55: 136 S.; Hannover ISBN 978-3-510-49202-2.



- STAKEBRANDT, W., LUDWIG, A. O. & OSTAFICZUK, S. (2001): Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas (map 2). In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G. & Stackelbrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346.-- Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 13-19, 2 Fig.; Kleinmachnow.
- THIERMANN, A., KOCH, M. & WILL, K.-H. (1970): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1: 25000. Erläuterungen zu Blatt 3711 Bevergern.-- Geol. Landesamt Nordrhein-Westfalen: 120 S., 9 Abb., 6 Tab.; Krefeld.
- THOME, K. N. (1980): Der Vorstoß des nordeuropäischen Inlandeises in das Münsterland in Elster- und Saale-Eiszeit. Strukturelle, mechanische und morphologische Zusammenhänge -. (In: Müller-Wille, W. & Bertelsmeier, E. (Hrsg.): Quartärgeologie, Vorgeschichte und Verkehrswasserbau in Westfalen. Vorträge und Exkursionen der 46. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Nordwestdeutscher Geologen in Münster vom 5. bis 8. Juni 1979).-- Westf. Geograph. Studien: 21-40, 9 Abb.; Münster.
- Uhlig, L., Amelung, P., Billaux, D., Polster, M. & Schmidt, H. (2007):
 Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland GENESIS (Abschlussbericht).-- DBETec-Bericht, veröffentl. im Internet Stand 04/2009: 84 S., 77 Abb., 14 Tab.; Peine.
- Van Dijke, I. J. & Veldkamp, A. (1996): Climate-controlled glacial erosion in the unconsolidated sediments of northwestern Europe, based on a genetic model for tunnel valley formation.-- Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 21, 4: 327-340, 7 Fig., 1 Tab.; Chichester/U.K.



Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Klimaentwicklung aus Sauerstoffisotopendaten. 1A: Gemittelte	
	globale Sauerstoffisotopen-Daten; 1B: Zusammengefügte globale	
	Sauerstoffisotopen-Kurven (veränd. nach Bartlein 2007; Köhler &	
	BINTANIA 2008; POORE 2007).	8
Abb. 2:	Verbreitung von untersuchungswürdigen Tongesteinsvorkommen,	
	Eisrandlagen der Maximalvorstöße und vereinfachte 0 m-Linie	
	der Quartärbasis (ergänzt nach: Нотн, Р., Wirth, H. et al. 2007).	11
Abb. 3:	Verbreitung elsterzeitlicher Rinnensysteme dargestellt durch die	
	Tiefenlage der Quartärbasis (aus: Stakebrandt, W., Ludwig, A. O.	
	& Ostaficzuk, S. 2001).	11
Abb. 4:	Schematischer Schnitt durch einen Salzstock in Norddeutsch-	
	land (nach Bornemann, O. 1991).	16
Abb. 5:	Schematischer Schnitt durch ein Tongesteinsvorkommen in	
	Norddeutschland (aus: BGR 2007).	17



Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Geozentrum Hannover Stilleweg 2 30655 Hannover

www.bgr.bund.de