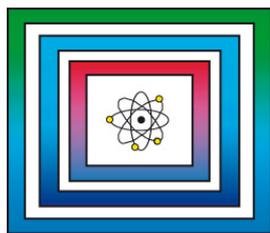


F+E Endlagerung

9Y2013040000

Subglaziale Rinnen – Darstellung und Bewertung des Kenntnisstandes



Abschlussbericht

Hannover, September 2017

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

F+E Endlagerung

Pleistozäne übertiefte Strukturen und ihre Bedeutung
für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte
in Süddeutschland

Subglaziale Rinnen –
Darstellung und Bewertung des Kenntnisstandes

Abschlussbericht

Autoren:	Weitkamp, Axel Bebiolka, Anke Christina
Auftraggeber:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Auftragsnummer:	9Y2013040000
Geschäftszeichen:	B3.4/B50112-44/2016-0004/002
Datum:	01.09.2017
TK-Nummer:	diverse

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste

Stellvertretende Abteilungsleitung (B3) und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	3
Abstract.....	4
1 Einleitung und Veranlassung.....	5
2 Aussagen der BGR zu subglazialen Rinnenbildungen (Stand 2010).....	5
2.1 Klima.....	5
2.2 Rinnenlage und Geometrie.....	6
2.3 Rinnengenese.....	8
2.3.1 Einfluss verschiedener Gesteine auf die Tiefe der Rinnen.....	9
2.3.2 Rinnen und Salzstrukturen.....	10
2.4 Rinnenfüllung.....	10
3 Aktueller Stand der wissenschaftlichen Bearbeitung.....	11
3.1 Klima.....	11
3.2 Rinnenlage und Geometrie.....	11
3.3 Rinnengenese.....	13
3.3.1 Einfluss verschiedener Gesteine auf Rinnenbildung.....	18
3.3.2 Rinnen und Salzstrukturen.....	18
3.4 Rinnenfüllung.....	20
3.4.1 Stratigraphische Einordnung.....	22
4 Zusammenfassende Bewertung der Aktualität der BGR-Aussagen.....	23
5 Ausblick.....	25
Literaturverzeichnis.....	26
Abbildungsverzeichnis.....	35

Gesamtblattzahl: 35

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Weitkamp, Axel Bebiolka, Anke Christina
Titel:	Subglaziale Rinnen – Darstellung und Bewertung des Kenntnisstandes
Schlagwörter:	Langzeitsicherheit, Norddeutschland, Pleistozän, Subglaziale Rinnen

Der im Zuge des Arbeitspaketes „Rinnen Süd“ entstandene Bericht fasst zunächst die Kernaussagen der BGR-Publikationen zur Thematik der subglazialen Rinnen in Norddeutschland bis zum Jahr 2010 zusammen. Des Weiteren werden die in Langzeitsicherheitsbetrachtungen dargestellten Einflüsse auf die Rinnenbildung wiedergegeben. Es wird auf Vorkommen verschiedener Rinnenformen eingegangen und besonders die Aspekte Lage, Geometrie, Genese und Füllung der Rinnen werden diskutiert. Zu den wichtigen Einflüssen auf die Bildung zählen die klimatischen Verhältnisse, vertikale Krustenbewegungen und unterschiedliche Gesteinsarten. Um zu prüfen, ob die Aussagen nach heutigem Wissensstand gültig sind, erfolgt im nächsten Schritt die Darstellung des aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes. Es wurden keine grundlegenden Abweichungen zwischen den bis 2010 vertretenen Positionen und dem aktuellen Kenntnisstand identifiziert. Einzelne Aspekte wie der Einfluss von Salzstrukturen auf die Rinnenbildung bedürfen weiterer Untersuchungen.

Abstract

Authors: Weitkamp, Axel
Bebiolka, Anke Christina

Title: Subglacial Valleys – Presentation and
Assessment of the State of Knowledge

Keywords: long-term safety, northern Germany
Pleistocene, subglacial valleys

This report was prepared in the course of the work package „Rinnen Süd“. First of all it summarizes the key statements from all BGR publications up to 2010 created in context with the issue of subglacial tunnel valleys in northern Germany. The influences on tunnel valley genesis which play a role in long – term safety assessments are presented. Varying forms of valleys are discussed with regard to location, geometry, genesis and filling. Identified factors with a major impact on tunnel valley formation are climatic conditions, vertical movements of the earth’s crust and different rock species. In the next step the preexisting statements are compared with the current state of scientific knowledge. As a result of this process no fundamental discrepancies between the BGR positions held until 2010 and the actual state of the art knowledge could be identified. Only some aspects like the impact of salt structures on the formation of tunnel valley structures have a notable potential to be considered in future long – term safety assessments.

1 Einleitung und Veranlassung

Subglaziale Rinnen sind Thema zahlreicher Publikationen im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle, da sie ein sicherheitsrelevanter Faktor der zukünftigen Entwicklung des Standortes sind und bei der Festlegung der Tiefe des möglichen Endlagers berücksichtigt werden müssen. Mit Schreiben von 16.09.2013 erhielt die BGR vom BMWi den Auftrag (AZ III C/-32507/7), die vorliegenden geowissenschaftlichen Informationen zu eiszeitlichen Rinnensystemen in Süddeutschland bzw. im Alpenvorland entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik aufzuarbeiten. Mit dem im Jahr 2015 begonnenen Projekt „Rinnen Süd“ weitet die BGR deshalb ihre Forschungsarbeit auch auf die alpine und voralpine Zone Süddeutschlands aus. Damit sollen Erkenntnisse über subglaziale Rinnen im Zusammenhang mit der Alpenvergletscherung gewonnen werden, da dieses Phänomen auch dort für die Suche nach potentiellen Endlagerstandorten relevant sein kann. Die Ergebnisse zu den Rinnensystemen in Süddeutschland werden im Bericht REINHARDT et al. (2017) dargestellt.

Im Zuge dessen wird auch die bisherige Sichtweise der BGR zu den norddeutschen Verhältnissen auf Aktualität geprüft und hinsichtlich des Standes von Wissenschaft und Technik bewertet. Zu diesem Zweck werden Aussagen aus bis zum Jahr 2010 vorliegenden Publikationen der BGR im Folgenden kurz dargestellt und mit aktuellen Ergebnissen anderer Autoren verglichen.

2 Aussagen der BGR zu subglazialen Rinnenbildungen (Stand 2010)

Die Veröffentlichungen von KELLER (2009) „Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland“ und KELLER (2010) „Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland“ stehen in engem inhaltlichen Zusammenhang und werden daher in diesem Kapitel zusammengefasst und in den folgenden Kapiteln 3 und 4 gemeinsam auf ihre Aktualität hinsichtlich des Standes von Wissenschaft und Technik geprüft.

2.1 *Klima*

Aus dem Klimaverlauf der letzten Million Jahre wird von KELLER (2009) abgeleitet, dass auch in Zukunft mit Kaltzeiten und damit einhergehend mit dem Auftreten von Inlandsvereisungen in Norddeutschland gerechnet werden muss. Tritt eine Inlandsvereisung auf, kann auch eine subglaziale Bildung von Rinnensystemen in Norddeutschland nicht ausgeschlossen werden.

KELLER (2009) geht davon aus, dass für einen Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre mit bis zu zehn weiteren Kaltzeiten zu rechnen ist, von denen mindestens eine das Ausmaß der Elster-Kaltzeit erreichen wird. In diesem Zusammenhang wird auf die Korrelation zwischen Milanković-Zyklen und Messwerten von Klimaindikatoren wie z. B. der Sauerstoffisotopenkurve hingewiesen, die als Grundlage für die Extrapolation des vergangenen Klimageschehens angesehen wird. Voraussetzung dafür ist, dass sich die natürlichen Gesetzmäßigkeiten z. B. durch anthropogenen Einfluss nicht grundlegend ändern. Letzterer könnte eine längere Fortführung warmzeitlicher Verhältnisse bedeuten.

2.2 Rinnenlage und Geometrie

In Norddeutschland sind glazigene Rinnen mit unterschiedlichen Dimensionen aus der Elster-, Saale- und Weichsel-Kaltzeit bekannt. Insgesamt ist ihre Verbreitung auf die Gebiete begrenzt, die zur jeweiligen Zeit unter Eisbedeckung lagen. Die Rinnen mit Tiefen über 200 m haben zueinander einen Abstand von 10 bis mehr als 50 km und sind generell senkrecht auf den ehemaligen Gletscherrand ausgerichtet (KELLER 2010). Die Verlaufsrichtungen werden als relativ einheitlich von NNO nach SSW im westlichen Norddeutschland bis NO nach SW weiter östlich angegeben. Aus der räumlichen Verteilung der Rinnen in Norddeutschland konnten keine bevorzugten Orte für die Anlage von Rinnenstrukturen abgeleitet werden.

In die Betrachtung der Lage tiefer Rinnen bezieht KELLER (2010) auch die von STACKEBRANDT (2009) postulierte Möglichkeit einer Verbindung zur mitteleuropäischen Subsidenzzone mit mächtigen känozoischen leicht erodierbaren Lockersedimenten an der Oberfläche in seine Überlegungen mit ein.

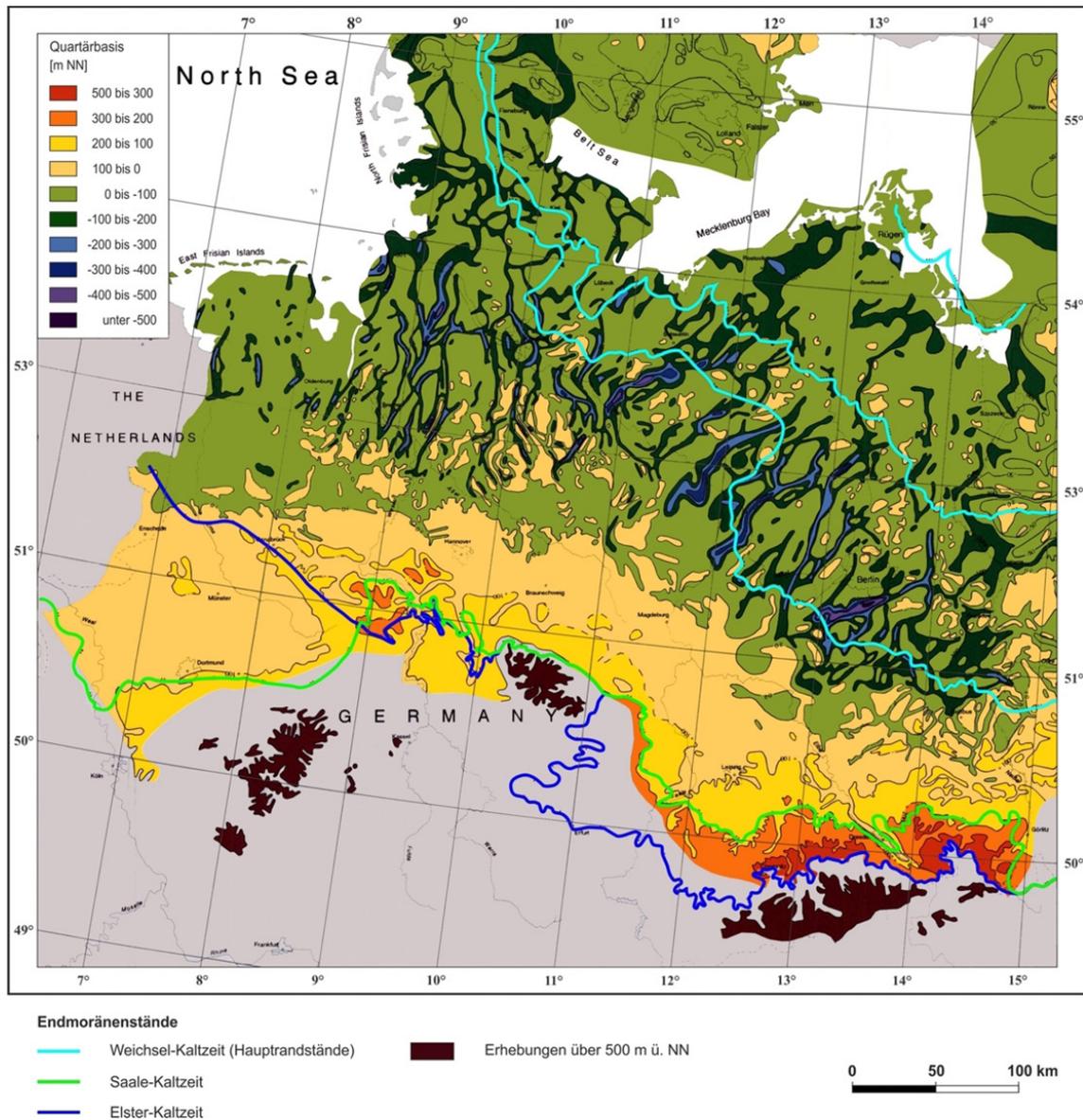


Abb. 1: Rinnenverteilung und Eisrandstände in Norddeutschland (aus MRUGALLA (2011), geändert nach STACKEBRANDT et al. (2001))

Für die in Abbildung 1 dargestellte Quartärbasis wurden im Rahmen eines internationalen Projektes vielfältige Informationen aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen. Die beschränkte Genauigkeit der verwendeten Daten beeinflusst die Eignung der Quartärbasis als Referenzhorizont für die Bestimmung der Rinnentiefe, erlaubt aber grundlegende Rückschlüsse auf die Rinnenverbreitung (STACKEBRANDT et al. 2001). Offensichtlich war nicht die gesamte von Eis bedeckte Fläche Norddeutschlands von Rinnenbildung betroffen (vgl. Abb. 1). Entlang einer Linie von Magdeburg über Hannover bis nach Osnabrück enden die tiefen elsterzeitlich angelegten Rinnenstrukturen relativ abrupt, obwohl das Eis der Inlandgletscher bis an den Rand der Mittelgebirge vorstieß und deshalb auch

weiter südlich vergleichbare Rinnenstrukturen zu erwarten wären. KELLER (2010) führt dazu aus, dass die erforderlichen hydraulischen Verhältnisse in den Regionen südlich der genannten Linie vermutlich wegen des zu schnellen Rückzugs des Eises oder einer zu geringen Eismächtigkeit nicht vorlagen.

KELLER (2010) geht davon aus, dass zwar die ortstypische Morphologie und Beschaffenheit des Untergrundes initial wichtig für die Anlage von Rinnen sind, diese aber nicht deren weitere Ausformung und ihren Verlauf steuern. KELLER (2010) stellt aufgrund seiner Literaturanalysen fest, dass die Rinnenböden oft ein unregelmäßiges Relief besitzen und dass die Rinnen in Richtung des ehemaligen Eisrandes rampenartig ansteigen können.

2.3 Rinnengenese

Für die Bildung subglazialer Rinnen sind nach KELLER (2010) große Wassermengen eine Voraussetzung. Diese fallen vermehrt in Tauphasen eines Gletschers an. Sie können z. B. über Gletscherspalten bis an dessen Basis gelangen und dort subglazial abströmen. Große Schmelzwassermengen können eine erhebliche Erosionsleistung aufweisen und so die Anlage von Rinnen begünstigen. Der rinnenbildende Abfluss subglazialer Schmelzwässer wird als Abfolge wiederkehrender plötzlicher Ereignisse gesehen, bei denen sich unter dem Gletscher aufgestaute Wasserreservoirs vornehmlich während des Gletscherrückzugs spontan entleeren. Nur ein derart katastrophales Entleeren scheint die beobachteten Erosionsleistungen erklären zu können, während ein ausschließlich konstanter Grund- und Schmelzwasserabstrom angesichts des ausgedehnten Rinnensystems nur schwer mit einer ausreichenden Wassermenge gespeist werden könnte (KELLER 2010).

Aus der Aufarbeitung der kontrovers geführten internationalen Diskussion in KELLER (2009 & 2010) geht hervor, dass unter hohem hydraulischen Druck stehende Schmelzwässer, die entweder durch katastrophale Einzelereignisse oder in einem stetigen Prozess die Gletscherbasis erodiert haben, ein wichtiger Faktor für die Genese subglazialer Rinnen sind. Als überregional gültige Randbedingungen, die die Genese beeinflussen können, wurden z. B. die Jahresmitteltemperatur, die Niederschlagsverhältnisse, die Permafrostverbreitung, die Eismächtigkeit und -ausbreitung sowie die Untergrundbeschaffenheit identifiziert. Außerdem werden stabile Eisrandlagen während eines generellen Rückzugstrends und evtl. die großräumige Geländemorphologie als Faktoren für die variierend starke Ausbildung von Rinnen zu unterschiedlichen Kaltzeiten vermutet (KELLER 2010). Die Rinnentiefe ist insbesondere abhängig von der Schmelzwassermenge sowie den Eigenschaften des Untergrundes, z. B. dessen Festigkeit (s. Kap. 3.3.1) und Permeabilität.

Abweichende Randbedingungen der einzelnen Vereisungsphasen könnten ein Grund für die unterschiedlich starke subglaziale Rinnenbildung sein. Die später angelegten saalezeitlichen Rinnen in Norddeutschland zeichnen sich durch eine deutlich geringere Tiefenerosion gegenüber elsterzeitlichen aus, obwohl die maximale Eisrandlage in einigen Abschnitten im Vergleich zur Elster-Kaltzeit noch weiter südlich lokalisiert wurde. Die Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden.

Neben dem anfangs vorgestellten Genesemodell (s. o.) diskutiert KELLER (2010) weitere Einflussfaktoren. So werden die Verflüssigung von unkonsolidierten Sedimenten an der Gletscherbasis durch den hohen Überlagerungsdruck des Eises und die anschließende Bildung röhrenförmiger Abflusswege („Piping“) als wichtige Vorgänge bei der Rinnengenese betrachtet. Dazu zählt auch die Hypothese des sogenannten „Supercooling“ (z. B. KRISTENSEN et al. (2008)), die darauf beruht, dass unterkühltes und unter hohem Druck stehendes Schmelzwasser bei Aufstieg und Druckentlastung zusammen mit dem umgebenden Sediment an der Gletscherstirn wieder gefriert und so die Entstehung einiger für subglaziale Rinnen typischer Sedimentabfolgen erklären könnte. Im Gegensatz zu den im Zusammenhang mit den oben beschriebenen Geneseansätzen genannten Einflussfaktoren wird der Einfluss tektonischer Vorgänge bzw. tektonischer Vorprägungen und fluviatiler Prozesse als nachrangig angesehen.

2.3.1 Einfluss verschiedener Gesteine auf die Tiefe der Rinnen

Ein Zusammenhang zwischen dem Vorkommen tiefer elsterzeitlicher Rinnen und der Art des Untergrundes konnte nach KELLER (2010) nicht zweifelsfrei belegt werden. Ein Beispiel dafür ist die Annahme, dass das Vorkommen oberflächennaher, oligozäner bis untermiozäner Schluffe und Tone die Bildung tiefer Rinnen begünstigt. Dies ist nicht bei allen tiefen norddeutschen Rinnen sowie allen Nordseerinnen der Fall. Vielmehr wird eine Eisrandlage des Elster-Eises mit günstigen hydraulischen Bedingungen als potentieller Erklärungsansatz für die südliche Begrenzung des Gebietes mit tiefen Rinnen favorisiert.

Neben der Tatsache, dass mächtige leicht erodierbare Lockergesteine vorliegen, was möglicherweise in Bezug auf das Ausmaß der Rinnentiefe von Bedeutung ist, wird darauf hingewiesen, dass auch vertikale Bewegungen der Erdkruste über die Prozesse Sedimentation und Erosion einen Einfluss auf die Mächtigkeit der Lockergesteine haben. Die vertikalen Bewegungen haben zudem Auswirkungen auf die Höhenlage der Quartärbasis.

Norddeutsche Tongesteine aus dem Quartär, Tertiär oder der Unterkreide werden aufgrund ihres relativ geringen Härtegrades als erosionsanfälliger als z. B. Salzgesteine und deren Residualbildungen angesehen (KELLER 2009). KELLER (2009) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Untersuchungen von an der Oberfläche anstehenden Gesteinen des

Muschelkalk bzw. Kreidekalken und -mergeln an zwei Standorten in Norddeutschland ergaben, dass die Rinnen dort nur ca. 30 bzw. 50 m Tiefe erreichen.

2.3.2 Rinnen und Salzstrukturen

Auch die Bedeutung von Salzstrukturen und der mit ihnen verbundenen Rand- und Subrosionssenken im Zusammenhang mit der Rinnengenese wird von KELLER (2010) diskutiert. Salzstrukturen werden vermutlich nicht bevorzugt erodiert, da sie, und insbesondere ihr Hutgestein, eher die Eigenschaften von Festgesteinen als von Lockergesteinen aufweisen. Dies könnte für die Lage und den Verlauf von Rinnen relevant sein. Untersuchungen zu Subrosion und halokinetischen Prozessen sind laut KELLER (2010) auch aus Schleswig-Holstein bekannt. FELDMANN (2002) zeigt für Niedersachsen ähnliche Beispiele, wo an halokinetisch aktiven Salzstöcken ein bevorzugter Verlauf der Rinnen in den Randsenken erfolgt und bei hoch liegenden Salzstöcken vorhandene Subrosionssenken in den Rinnenverlauf mit einbezogen werden. Dabei haben sich bei einigen Strukturen die Rinnen bis zum Gipshut eingeschnitten und enden dort z. T. abrupt, nachdem sie zuvor noch tief eingeschnitten waren (KUSTER & MEYER 1979). KELLER (2010) folgert daraus, dass Salzstrukturen zwar nicht als Auslöser für Rinnenbildung in Frage kommen, wohl aber den Rinnenverlauf beeinflussen können. Im Gegensatz zu den Lockersedimenten in den Rand- und Subrosionssenken ihres Umfeldes besitzen sie, wie bereits im Kontext mit der Rinnentiefe angesprochen, eher die Eigenschaften eines Festgesteins.

2.4 Rinnenfüllung

Beim Abschmelzen des Gletschers werden die durch den Gletscher gebildeten Vertiefungen wieder mit Sedimenten verfüllt, die vorher im Gletschereis gebunden waren. Die Rinnensedimente bestehen laut KELLER (2010) in vielen Fällen hauptsächlich aus Sanden und Kiesen, die lateral und an der Basis vereinzelt von Grundmoränenrelikten unterlagert werden (vgl. z. B. KÖTHE et al. (2007) zur Gorlebener Rinne). An den Rinnenflanken vorkommende Grundmoränenrelikte und andere Sedimentmassen werden auch als Rutschungen interpretiert (vgl. z. B. STACKEBRANDT 2009), die beim Einschneiden der Rinnen in weiche, unkonsolidierte Sedimente entstanden sind. Durch die Rutschungen wurden die Flanken abgeflacht und das Rinnenprofil zusätzlich verbreitert. Glazilimnische Sedimente wie der elsterzeitliche Lauenburger Ton und seine Äquivalente, die die Rinnenfüllung weitgehend abschließt, sind ebenfalls vorhanden. Jüngere Sedimente wie warmzeitliche Abfolgen des Holstein zeigen im Bereich der Rinnen keine größeren Mächtigkeitzunahmen, woraus geschlossen wird, dass die Verfüllung der Hohlformen relativ rasch erfolgt sein muss (KELLER 2010). Einige Sedimentfüllungen liefern Hinweise auf mehrere Bildungs-/Ablagerungsereignisse. Dies wird aus lokalen Beobachtungen von

variierenden Rinnenverläufen interpretiert, die belegen, dass Rinnenfüllungen zeitlich aufeinander folgend entstanden sind. Im Fall von sich schneidenden Rinnen konnte gezeigt werden, dass diese in einer oder zu unterschiedlichen Kaltzeiten entstanden sein können.

Zusammenfassend stellt KELLER (2010) fest, dass die Datenbasis zur Lage und Verbreitung subglazialer Rinnen in Norddeutschland sich zwar stetig verbessert, jedoch noch kein allgemeingültiger Erklärungsansatz zu ihrer Genese identifiziert werden konnte. Auf wichtige Thesen zur Entstehung der Erosionsformen wird in KELLER (2010) und später auch in MRUGALLA (2011; 2014, s. u.) und FISCHER et al. (2015) eingegangen.

3 Aktueller Stand der wissenschaftlichen Bearbeitung

Eine Einstufung als subglaziale Rinne erfolgt, wenn einige grundlegende Merkmale erfüllt sind. Dazu gehören sowohl die im Längsprofil typisch vertikal geschwungenen Rinnenböden mit ihrer glazigenen Sedimentfüllung als auch Sedimentfächer und Endmoränen an ihrem Ende (CLAYTON et al. 1999; RUMPEL et al. 2009). Weitere Merkmale, die vornehmlich an den Flanken und am Boden auftreten, sind glazitektonische Deformationen (Stauchungen, Überschiebungen) und Riefungen in Festgesteinsgebieten. Nicht alle Rinnen sind komplett mit Sediment verfüllt. In diesem Fall lassen sie sich im Landschaftsbild durch Seen, Moor- und Sumpfgebiete erkennen.

3.1 Klima

In MRUGALLA (2014) und STARK (2014) werden Ungewissheiten diskutiert, die bei der Prognose z. B. des Bildungsortes zukünftiger Rinnen zu beachten sind. Auch die Eingrenzung des möglichen Bildungszeitpunktes ist ungewiss, da keine ausreichend präzise Klimaprognose für die nächsten eine Million Jahre zur Verfügung steht. Aus der Klimarekonstruktion des Quartärs kann nur gefolgert werden, dass auch in Zukunft bei entsprechenden klimatischen Verhältnissen die Möglichkeit von Kaltzeiten vergleichbaren Ausmaßes in Deutschland mit entsprechendem Potential zur Rinnenbildung besteht.

3.2 Rinnenlage und Geometrie

Beobachtungen

Während die saale- und weichselzeitlichen Rinnen in den Lockersedimenten im Bereich des norddeutschen Festlandes nur Tiefen bis zu 200 m aufweisen, wurden im Verlauf der

Elster-Kaltzeit Erosionstiefen von z. T. 500 - 600 m bei Längen von z. T. über 100 km und Breiten von mehreren Kilometern erreicht (FISCHER et al. 2015). Elsterzeitliche Rinnen an Land bilden ein unregelmäßiges Netzwerk aus abzweigenden Rinnen, die Tiefen von bis zu 200 m erreichen können. Die Teile des Rinnensystems mit Tiefen größer als 200 m zeigen keine Aufspaltung in mehrere Arme. Die längste an Land beobachtete Struktur erreicht eine Länge von 110 km bei einer maximalen Breite von 12 km, wobei der Verlauf als kurvig mit auch auf kurzen Distanzen variierenden Breiten beschrieben wird. Sie können nach ihrer Breite unterschieden werden. Schmalere Strukturen mit einer Breite bis zu 3 km dominieren im Nordwesten Deutschlands, während breitere mit über 5 km Querprofil weiter östlich angetroffen werden (FISCHER et al. 2015, siehe auch Abb. 1).

In der deutschen Nordsee liegen in tertiären bis quartären Sedimenten bis zu 400 m tiefe vergleichbare Rinnenstrukturen vor, deren bevorzugte Verlaufsrichtung zwischen NNW-SSO bzw. NNO-SSW schwankt. Dabei werden Breiten von bis zu 8 km und Längen von bis zu 66 km erreicht (LUTZ et al. 2009). Beobachtungen sowohl in der Nordsee als auch auf dem Festland zeigen außerdem, dass eine einzelne Rinne aufgrund des oft wellenförmigen Längsprofils mehrere Tiefenmaxima innerhalb ihres Verlaufs haben kann (FISCHER et al. 2015).

Als Beweis für die erreichten Erosionstiefen sehr tiefer Rinnen können z. B. Bohrungen genutzt werden. Eine Forschungsbohrung wurde im Jahr 1999 nach geophysikalischen Voruntersuchungen im Bereich eines Tiefenmaximums der elsterzeitlichen Hagenower Rinne in Mecklenburg-Vorpommern abgeteuft (SCHULZ 2002). Sie erreichte die Rinnenbasis bei 584 m u. GOK, was etwa 554 m u. NN entspricht und damit die tiefste in Deutschland durch eine Bohrung nachgewiesene Lage der Quartärbasis darstellt (MÜLLER & OBST 2008).

Schlussfolgerungen im Hinblick auf Lage und Geometrie zukünftiger Rinnen

Für tertiäre und quartäre Lockersedimente wird zukünftig von erneuter Rinnenbildung und vergleichbaren Erosionstiefen ausgegangen. Für den Fall, dass eine zukünftige Kaltzeit erneut das Ausmaß der Elster-Kaltzeit erreicht, muss folglich damit gerechnet werden, dass Lockergesteine in ähnlichem Umfang ausgeräumt werden. An der Oberfläche anstehendes oder in geringer Tiefe liegendes Festgestein könnte ebenfalls von einer Rinnenbildung betroffen sein, wobei jedoch die Tiefenwirkung deutlich geringer zu erwarten wäre (MRUGALLA 2014). Zur Lage und Verteilung sowie Tiefe, Breite und Längsausrichtung können dabei keine gesicherten Angaben gemacht werden. Laut MRUGALLA (2014) muss in den Gebieten, in denen tiefe Rinnen nachgewiesen wurden, auch im näheren Umfeld damit gerechnet werden, dass zukünftige Rinnen sehr dicht an das endlagerrelevante Tiefenniveau

eines Wirtsgesteins heranreichen oder es erreichen, was nach übereinstimmenden Ausführungen des AkEND (2002) und der ENDLAGERKOMMISSION (2016) bei der Endlagerplanung berücksichtigt werden muss.

Dadurch, dass Rinnen im norddeutschen Flachland i. d. R. nicht als Hohlformen an der Geländeoberfläche zurückbleiben, sondern beim Rückzug des Gletschers mit Sedimenten verfüllt werden, addieren sich Tiefenwirkungen von Rinnenbildungen aus verschiedenen Kaltzeiten selbst an gleichen Standorten nicht (MRUGALLA 2014).

Prinzipiell werden Rinnenbildungen an jedem Ort in Norddeutschland und speziell solche mit Bereichen starker Übertiefung vornehmlich in Gebieten nördlich einer Linie von Magdeburg über Hannover bis nach Osnabrück zukünftig für möglich gehalten, weil diese innerhalb der nachgewiesenen Zone der ehemaligen Eisausbreitung mit mächtigen Lockergesteinsvorkommen und somit Rinnenbildung liegen (vgl. Abb. 1). Sollten potentielle Endlagerstandorte in dieser Region liegen, ist davon auszugehen, dass die oberflächennahen Bereiche des Deckgebirges oberhalb der Einlagerungshorizonte diesbezüglichen Veränderungen unterworfen sein können. Ausgehend von den Geländebefunden im näheren Umfeld eines konkreten Bereiches muss für diesen davon ausgegangen werden, dass ähnlich tiefe Rinnen dort erneut entstehen können (MRUGALLA 2014). Abhängig von der angestrebten Tiefenlage der Einlagerungshorizonte und den spezifischen Gesteinseigenschaften wie z. B. der Erosionsbeständigkeit (vgl. Kap. 5.3.1) ergeben sich daraus unterschiedliche Gefährdungspotentiale für die Funktion der geologischen Barrieren am jeweiligen Standort.

3.3 Rinnengenese

Zur Genese subglazialer Rinnen und ihrer Sedimentfüllung ist in den letzten Jahren eine Reihe von Übersichtsarbeiten entstanden, die den aktuellen Stand der Forschung weltweit zusammengeführt und kritisch betrachtet haben. Einige ausgewählte Publikationen sollen im Folgenden kurz dargestellt und mit den bisherigen Aussagen der BGR verglichen werden.

Einige Prozesse, die zur Rinnenbildung führen, können aus älteren Vorkommen rekonstruiert werden. Andere lassen sich z. T. auch rezent bei plötzlich auftretenden katastrophalen Gletscherflutereignissen, sogenannten „Jökulhlaups“, beobachten (RUSSELL et al. 2007; FLEISHER et al. 2010). Allerdings bestehen hinsichtlich der Eignung dieser Prozesse als Analogon zur Beschreibung der Bildung pleistozäner subglazialer Rinnen auch Zweifel, da nicht belegt ist, ob die Voraussetzungen zur Bildung großer subglazialer Rinnen auch unter den heutigen Bedingungen vorliegen (JØRGENSEN & SANDERSEN 2006).

Die alleinige Bildung durch Gletscherschurf wird als unwahrscheinlich angesehen. MRUGALLA (2011) verweist in diesem Zusammenhang auf ABER & BER (2007), die ausführen, dass die durch Gletscherschurf verursachte Exaration (an der Gletscherstim) oder Detersion (unter dem Gletscher) an der Geländeoberfläche eine eher planare (flächige) Erosion bewirkt, die in Lockergesteinen bis zu 100 m tief reichen kann. Das erodierte Material wird dabei oft großflächig in Sedimentkörpern mit Mächtigkeiten bis etwa 200 m abgelagert.

Es scheint naheliegend zu sein, dass sich Breite und Tiefe der Rinnenhohlformen kontinuierlich als Summe räumlich begrenzter aufeinander folgender Erosionsereignisse entwickelt haben. Dabei wird erwartet, dass es während des Gletscherrückzugs an der Basis eher zu Sedimentverflüssigung und Abtransport als zu Exaration und Detersion von Material kommt. Allerdings wird auch darauf hingewiesen, dass dies nicht für Festgestein zutrifft und keine Belege in Form von Sedimentstrukturen für diese These vorliegen (MRUGALLA 2011).

Für die Rinnengenese liegt noch kein abschließendes einheitliches Erklärungskonzept vor, das alle beobachteten Phänomene beschreibt. Es wird davon ausgegangen, dass wahrscheinlich nur eine Kombination aus verschiedenen Erklärungsansätzen die verschiedenen Rinnenformen beschreiben kann. Von zentraler Bedeutung sind jedoch immer die Schmelzwässer, die in ausreichender Menge vor allem gegen Ende einer Kaltzeit und kurz vor bzw. während des Rückzugs der Gletscher vorliegen dürften. Das Zeitfenster für eine solche Übergangsphase wird aufgrund der verfügbaren Klimadaten auf Jahrhunderte bis wenige Jahrtausende geschätzt (MRUGALLA 2014).

Eine abwägende Betrachtung mit Argumenten, die für und wider die gängigsten Erklärungsansätze sprechen, wird von MRUGALLA (2011) durchgeführt. Die dafür zusammengestellten Prozesse sind:

- Fluviale Prozesse (Ausräumung durch große Flusssysteme)
- Tektonik (epirogenetische Hebung Norddeutschlands mit anschließendem starkem Einschneiden der Flüsse in den Untergrund)
- Halokinese (bevorzugte Bildung in Randsenken aktiv aufsteigender Salzstöcke)
- Subrosion (vorhandene Subrosionssenken werden vertieft)
- Gletscherschurf (Exaration, Detersion)
- Sedimentverflüssigung wie „Liquefaction“ oder „Piping“ (bei Überschreitung des Wasserdrucks der Schmelzwässer über den Überlagerungsdruck des Gletschers tritt eine Verflüssigung und ein Abtransport der Lockersedimente an der Gletscherbasis ein)

- Unterkühlung „Supercooling“ (Sedimentbeladene subglaziale Schmelzwässer in bereits angelegten Rinnen steigen in Richtung der Gletscherstirn auf und gefrieren durch die Druckentlastung, wobei das Sedimentmaterial dort fixiert und die Rinne im Hintergrund weiter vertieft wird)
- subglaziale Schmelzwässer (in Form von sporadisch wiederkehrenden und plötzlichen subglazialen Strömungsereignissen, die von im Eis aufgestauten Schmelzwässern ausgelöst werden und auch im Zusammenhang mit Rückzugsphasen des Gletschers zu sehen sind)

Die Diskussion zur Entstehung der Hohlformen und deren anschließender Verfüllung wird kontrovers geführt und hat die Entwicklung verschiedener Theorien vorangetrieben, die größtenteils bereits in den Veröffentlichungen von KELLER (2009, 2010) verarbeitet wurden (z. B. COFAIGH 1996; PRAEG 1996; HUUSE & LYKKE-ANDERSEN 2000b; JØRGENSEN & SANDERSEN 2006; STUMM 2010; KEHEW et al. 2012). So gibt es z. B. bezüglich des bevorzugten Ortes für ihre Entstehung unterschiedliche Aussagen. SMED (1998) favorisiert die Schnittstelle zwischen zwei Eisströmen, was aber nicht durch Aussagen anderer Autoren gestützt wird.

Der meist favorisierte Erklärungsansatz für die Entstehung subglazialer Rinnen besteht aus einer Kombination von Vorgängen (STEWART 2008), die durch fließendes Schmelzwasser und Eis in Form von direkter glazialer Erosion gesteuert werden. Dabei werden in Norddeutschland und der Nordsee selten Rinnentiefen von über 500 m erreicht (PRAEG 2003; STACKEBRANDT 2009), was auch durch die Literaturanalyse von STUMM (2010) bestätigt wird. Alle anderen vorgeschlagenen Mechanismen sind weniger gut geeignet, um die komplexen Vorgänge, die zur Entstehung von subglazialen Rinnen führen, zu erklären (JANSZEN 2012).

Da viele Modelle mit einem Erklärungsansatz, der das katastrophale Ausfließen von Schmelzwasserseen annimmt, sehr fallspezifisch sind, eignen sie sich nur unzureichend für eine allgemeingültige Beschreibung. Aus diesem Grund favorisieren VAN DER VEGT et al. (2012) ein in vielen Fällen anwendbares Modell für die Rinnengenese, das einen über einen längeren Zeitraum quasi stabilen Zustand des Wasserabstromes während des Stillstandes oder Rückzugs des Gletschers, bei dem es saisonal zu kleineren Schmelzwasserausbrüchen kommt, annimmt. Es wird vermutet, dass ohne diese Ausbrüche keine Rinnenbildung stattfinden konnte.

Unter hohem Druck stehendes Schmelzwasser, das sich entlang des hydraulischen Druckgradienten unter dem Eis bewegt, ist laut JANSZEN (2012) ein entscheidender Aspekt, um die z. T. aufwärtsgerichteten und oft senkrecht zum ehemaligen Eisrand stehenden Fließwege erklären zu können. JANSZEN (2012) weist darauf hin, dass das Einschneiden höchstwahrscheinlich durch das Nachgeben wasserundurchlässiger

Sedimentschichten begünstigt wird, die in Folge dessen bevorzugt erodiert werden. Das Nachgeben wird mit erhöhten Gradienten des Porenwasserdrucks an Stellen begründet, wo der Schmelzwasserabfluss durch das Gletscherbett behindert ist, so dass ein sich weiter verstärkender Kanalisierungseffekt eintreten kann. Es wird vermutet, dass ein Zusammenhang zwischen der Permeabilität basaler Sedimentschichten und der Dichte des Rinnensystems besteht. Je schlechter wasserdurchlässig die subglazialen Sedimentpakete sind, desto größer scheint die Dichte des Abflussnetzwerks zu sein (SANDERSEN & JØRGENSEN 2012). Mit wachsenden Abständen zwischen den Rinnen bei durchlässigeren Substraten wachsen allerdings auch die Einzugsgebiete und damit die Abflussmenge pro Rinne, was zu größeren Dimensionen der einzelnen Abflusswege führen kann (JANSZEN 2012).

Falls die Permeabilität des Sedimentes ausreicht, um das gesamte Schmelzwasser dem Grundwasser zuzuführen und abzuleiten, kann die Rinnenbildung ggf. auch völlig unterbleiben (BITINAS 1999). Derselbe Autor beschreibt für das östliche Baltikum günstige Verhältnisse für die Anlage eines dichten Rinnennetzes. Demnach wären unter den dortigen Bedingungen relativ schwach verfestigte, geklüftete, mittelpermeable Aquifere oder schwach verfestigte, stark tektonisch beanspruchte Aquitarde besonders von subglazialer Rinnenbildung betroffen.

Festgestein ist erosionsbeständiger als Lockersediment, weshalb Rinnen im Festgestein im Mittel wesentlich schmaler und flacher sind (z. B. JANSZEN (2012)). Allerdings haben sie oft steilere Flanken mit größerem Böschungswinkel. Die wichtigsten in diesem Zusammenhang ablaufenden Prozesse werden unter den Obergriffen „Gravitative Massenbewegungen“ oder „Massentransport“ einschließlich ihrer diversen Übergangsformen zusammengefasst. Gravitative Massenbewegungen laufen im Gegensatz zum Massentransport nur durch Materialverlagerung unter dem Einfluss der Schwerkraft, aber ohne den Transport in Medien wie Wasser, Eis oder Luft ab. Die Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen bei Rinnen in wenig kompaktiertem Material sind größer, sie können deshalb einen breiteren Querschnitt mit flacher einfallenden Flanken entwickeln.

Zur Abgrenzung subglazialer Rinnen von z. B. proglazialen Abflusswegen kann das beobachtete typische Breiten-Längen-Verhältnis subglazialer Rinnen von 1 : 10 herangezogen werden (BACHE et al. 2012). In Norddeutschland kann generell zwischen schmaleren bis zu 3 km breiten und größeren über 5 km breiten Rinnenformen unterschieden werden (FISCHER et al. 2015). Breiten von über 5 km werden von manchen Autoren als eher untypisch für die subglaziale Entstehung angesehen (GHIENNE et al. 2007) und wären demnach als Ausnahmefälle zu betrachten. Zusätzlich werden asymmetrische Profile und große halbkreisförmige Auslassöffnungen mit steil entgegen der Fließrichtung einfallenden versetzten Sedimentstrukturen als Indizien für subglaziale Rinnen angesehen. In der

Nordsee wurden sowohl v- als auch u-förmige Profile mit 5 - 40° Gefälle der Seitenwände beschrieben. Der gewellte Rinnenboden kann Gefälle von 1 - 10° und im Extremfall von bis zu 30° aufweisen (STEWART et al. 2013). Allerdings zeigte sich bei den Untersuchungen von STEWART et al. (2013) in der Nordsee auch, wie schwierig es einerseits ist, Rückschlüsse von der Morphologie auf die Bildungsbedingungen zu ziehen. Andererseits lässt sich aus der Orientierung der Rinnenverläufe relativ gut die jeweilige Gletscherdynamik rekonstruieren. LONERGAN et al. (2006) warnen vor allgemeinen Richtungsangaben, da, wie am Beispiel der nördlichen Nordsee verdeutlicht wird, oft ein sehr komplexes Netzwerk vorliegt, das nur anhand einer 3D-Seismik hinreichend beschrieben werden könne. Sie äußern die Vermutung, dass die Komplexität mit größerem Abstand zur maximalen Eisrandlage zunimmt, wodurch sich auch die Unterschiede zwischen südlicher (PRAEG 2003) und nördlicher Nordsee erklären ließen.

LIPPSTREU et al. (2015) gehen davon aus, dass die subglaziale Bildung tiefer Rinnen in Berlin-Brandenburg mit dem Beginn des Eiszerfalls nach dem 1. Elster-Eisvorstoß begann. Ein Zusammenhang der Übertiefungen mit Prätertiäroberflächen oder endogenen Störungen konnte ebenso wenig festgestellt werden wie ein Bezug zur rezenten Morphologie. Tektonischer Einfluss auf die Bildung der tiefen Rinnen im Bereich einer vermuteten Senkungszone im Bereich des Norddeutschen Beckens wird als Möglichkeit erwogen, für die aber noch weitere wissenschaftliche Belege erbracht werden müssten. Dies gilt auch für die These, dass ein Zusammenhang zwischen Eisisostasie und Rinnengenese bestehen könnte.

STACKEBRAND (2015) identifiziert Rahmenbedingungen, die für die Genese der übertieften elsterzeitlichen Rinnen verantwortlich sein könnten. Einerseits wird eine neotektonisch reaktivierte Mitteleuropäische Senkungszone mit wassergesättigten känozoischen Lockersedimenten postuliert. Andererseits wird von einem hohen Schmelzwasseraufkommen im äußeren Bereich des Inlandeisschildes gesprochen, das sich z. T. mit basalen Schmelzwässern vereinigte und beim Vorrücken des Eises nur verzögert abfließen konnte. Der dadurch bedingte Anstieg des hydrostatischen Druckes im Sediment unter dem Eisschild wird letztlich als Auslöser für den Kollaps der Schichtenfolge gesehen. Als Gründe für die besondere Tiefe der elsterzeitlichen Rinnen gegenüber den flacheren saale- und weichselzeitlichen Erosionsformen werden der größere Umfang von unkompaktiertem Material zu Beginn der Elster-Kaltzeit sowie eine größere Ausdehnung und Mächtigkeit des elsterzeitlichen Eisschildes angeführt.

3.3.1 Einfluss verschiedener Gesteine auf Rinnenbildung

Normalerweise zeichnen sich subglaziale Rinnen durch gerade bis leicht geschwungene Verläufe aus. In manchen Fällen scheint aber das Substrat für abweichende Geometrien verantwortlich zu sein. Solche Anomalien können z. B. durch Störungen, Salzstrukturen oder bereits existierende Flussläufe bzw. Rinnenstrukturen hervorgerufen werden (JANSZEN 2012).

Neben der hydromechanischen Erosion, die bei allen betrachteten Wirtsgesteinen wirkt, muss bei Salinalgesteinen zusätzlich die hydrochemische Erosion (Subrosion) mit einbezogen werden. Beim Kontakt mit größeren Schmelzwassermengen kann davon ausgegangen werden, dass der Ablaugungsprozess intensiver als beim Kontakt mit einem salzgesättigten langsamen Grundwasserstrom abläuft. Das gilt insbesondere für den Fall, dass ein schützendes, erosionsresistenteres, residuales Hutgestein fehlt. Salzstrukturen werden für Norddeutschland von FISCHER et al. (2015) nicht als Auslöser für die Entstehung subglazialer Rinnen gesehen, allerdings besteht die Möglichkeit, dass sie den Verlauf der Rinnen beeinflussen können. Dies kann vor Allem durch die mit Salzstrukturen assoziierten Subrosions- oder Randsenken mit erhöhten Mächtigkeiten der Lockergesteine geschehen. Bei Erreichen des Hut- bzw. Salzgesteins kann sich dann auch die spezifische Erosionsbeständigkeit dieser Festgesteine auswirken, was im Vergleich zu quartären und tertiären Lockersedimenten zu einer deutlich verringerten hydromechanisch bedingten Tiefenerosion führt.

Erosionsbeständige Gesteine über dem Einlagerungsbereich können zusätzlich Schutz vor Erosion bieten. Hangende Kalksteine aus der Oberkreide können z. B. in ihrem norddeutschen Verbreitungsgebiet u. U. einen Schutz für Gesteinsformationen im Liegenden bieten sofern keine mergelig ausgeprägte weichere Fazies vorliegt und möglichst keine vertikalen Krustenbewegungen in Form von Hebungstendenzen zu erwarten sind. Für den Fall, dass die Unterkreide oberflächennah ansteht, können auch erosionsbeständige, siliziklastische Festgesteine der Unterkreide wie des oberen Alb liegende weichere Tongesteine vor Erosion schützen (FISCHER et al. 2015).

3.3.2 Rinnen und Salzstrukturen

Klärungsbedarf besteht auch hinsichtlich des Verhaltens von Salzstrukturen unter Eisauflast sowie ihres möglichen Einflusses auf subglaziale Rinnensysteme. In Norddeutschland und der Nordsee werden Rinnen beschrieben, deren Verlauf an Salzstrukturen abgelenkt wurde (PIOTROWSKI 1994; KRISTENSEN et al. 2007; KRISTENSEN et al. 2008). Andererseits sind auch Beispiele bekannt, wo Salzstrukturen von Rinnen gekreuzt werden (HINSCH 1979; HUUSE & LYKKE-ANDERSEN 2000a), was entweder die Vermutung zulässt, dass kein Einfluss vorhanden war oder dass das Deckgebirge oberhalb der Salzstrukturen durch halokinetische

Deformation (Störungen) evtl. sogar erosionsanfälliger geworden ist. FISCHER et al. (2015) gehen nicht davon aus, dass die Position von Salzstrukturen den Verlauf von subglazialen Rinnen entscheidend beeinflusst, da sowohl Verläufe entlang als auch über Salzstrukturen bekannt sind.

MÜLLER & OBST (2008) weisen darauf hin, dass abrupte Schwankungen der Quartärmächtigkeiten in Norddeutschland nicht zwangsläufig mit Rinnen in Verbindung stehen müssen. Im Gegensatz zur Hagenower Rinne (vgl. Kap. 3.2) können Strukturen mit vergleichbarer Quartärmächtigkeit und ähnlicher Tiefenlage der Quartärbasis über den Salzkissen Schlieven und Marnitz im südwestlichen Mecklenburg nicht als subglaziale Rinnen eingestuft werden. Aufgrund von tief abgesenkten Leithorizonten wird eine Verbindung mit jungen halokinetischen, evtl. glazial-isostatisch induzierten Bewegungen hergestellt. Scheiteleinbrüche an Salzkissen (z. B. Schlieven und Marnitz) kommen im Zusammenhang mit nicht glazigen bedingter Absenkung der Quartärbasis ebenso in Frage wie Subrosionserscheinungen an Salzstöcken (z. B. Kraak). Nicht ausgeschlossen wird allerdings auch, dass sich in Mecklenburg-Vorpommern, ähnlich wie von POBLOTZKI (2002) für die Altmark beschrieben, halokinetische Bewegungen und Rinnenbildungen überlagern können.

Das Verhalten von Störungen unter wechselnder Eisauflast ist seit geraumer Zeit Gegenstand wissenschaftlicher Forschungsarbeiten (z. B. HETZEL & HAMPEL 2005; HAMPEL & HETZEL 2006; HAMPEL et al. 2010a; HAMPEL et al. 2010b).

AL HSEINAT & HÜBSCHER (2014) und AL HSEINAT et al. (2016) beschreiben eine subglaziale Rinne in der südlichen Ostsee und koppeln die Anlage und den Verlauf dieser Rinne an eine darunter befindliche Störungszone. Sie stellen die These auf, dass es aufgrund von Eisauflast zur Reaktivierung einer älteren, bis in das Prä-Zechstein reichenden Störung kam, was wiederum zu Mobilisierung und Aufstieg des Zechsteinsalinars entlang der Störung und zur Bildung einer kleinen Antiklinale geführt haben soll. Des Weiteren wird vermutet, dass dieser Vorgang die Festigkeit der hangenden Einheiten durch Störungen bis zum Meeresboden herabsetzte, was wiederum die Entstehung einer Rinne begünstigt haben könnte.

Einen abgewandelten Ansatz verfolgen LANG et al. (2014) am Modellbeispiel eines Diapirs, der simulierten Beanspruchungen durch wechselnde Eisauflasten ausgesetzt wurde. Als Fallbeispiel wurden drei unterschiedliche und stark vereinfachte Profilschnitte durch eine Salzmauer aus dem subherzynen Becken verwendet. Die Mächtigkeit der Salzschiefer wurde für den größten Teil der Berechnungen konstant auf 500 m festgelegt, wobei mit einer Zechsteinbasis von 1600 bzw. 5000 m u. GOK bei einer angenommenen Gletschermächtigkeit von 300 m modelliert wurde. Dabei zeigte sich, dass Diapire unter

begünstigenden Rahmenbedingungen bereits auf Eisauflasten ab 300 m Mächtigkeit zu reagieren scheinen, wobei die Reaktion schon vor dem Überfahren durch den Druck auf flach lagernde Salzsichten im Umfeld des Diapirs einsetzen kann. Der Bereich, in dem u. U. mit plastischer Deformation des Deckgebirges gerechnet werden muss, wäre dabei auf unmittelbar oberhalb an den Diapir angrenzende Schichten beschränkt. Die Modellrechnungen ergaben Hebungen von bis zu 4 m bei einem Abstand des Gletschers von 1 km und Senkungen von bis zu 36 m bei vollständiger Eisüberdeckung.

Nach Auffassung der Autoren des hier vorliegenden Berichtes sind solche quantitativen Aussagen aufgrund der stark vereinfachten Annahmen z. B. zum Kriechverhalten des Salzes, zur Salzmächtigkeit und der Raumlage der Struktur sehr kritisch zu betrachten. Die Übertragbarkeit auf eine konkrete geologische Situation in Norddeutschland ist nicht gegeben.

Betroffen von der eisinduzierten Salzbewegung wären nach LANG et al. (2014) vor allem Erosions-, Deformations- und Ablagerungsprozesse im unmittelbaren Umfeld des Diapirs einschließlich seiner Randsenken. Die Ergebnisse stützen ältere konzeptionelle Ansätze z. B. von SIROCKO et al. (2008), die vermutlich aber zur Überschätzung von vertikalen Bewegungen des Diapirs neigen. LANG et al. (2014) vermuten, dass die durch Salzbewegungen induzierten Oberflächenbewegungen in Form von Hebung vor dem Eis durch Auflastunterschiede die Entstehung von Endmoränenwällen und durch Senkung unter dem Eis die subglaziale Erosion und somit u. U. die Entstehung subglazialer Rinnen begünstigen könnten.

Hebung der Landoberfläche an Diapiren vor dem Eis wird auch von BREGMAN & SMIT (2012) vermutet. Oberflächennahe Diapire werden von ihnen als Ursache für ein welliges Relief der präglazialen Landschaft und als Erklärung für eine verstärkte glaziale Erosion präglazialer Sedimente oberhalb dieser Salzstrukturen gesehen. LIPPSTREU et al. (2015) sehen dagegen keinen nennenswerten Einfluss von Subrosions- oder Salzaufstiegsprozessen auf die Rinnenlage und belegen dies anhand von Beispielen aus Brandenburg. Sie stellen fest, dass sich in ihrem Untersuchungsgebiet Rinnen sowohl in normal gelagertem Tertiär und den Sedimenten in Randsenken als auch direkt oberhalb von Salzstöcken nachweisen lassen.

3.4 Rinnenfüllung

Die diversen Sedimente, die die Hohlformen wieder verfüllen, können je nach Nähe zum Eisrand grundsätzlich in drei Hauptsequenzen unterteilt werden (BENN & EVANS 2010). In Eisrandnähe bzw. subglazial werden oft sehr heterogene und grobe Sedimente

abgelagert, die Anteile von Grundmoränen bzw. Rutschungsmassen beinhalten. Ihre Mächtigkeit steht im Zusammenhang mit der Gletscherdynamik, was bedeutet, dass je länger die Stagnationsphase anhält, desto mächtigere Sedimentpakete können sich entwickeln. Der beim Eisrückzug entstehende Raum, der potentiell mit Sediment verfüllt werden kann (Akkommodationsraum), wird vom entfernteren Gletscher aus mit feineren homogenen Sedimenten aus Suspensionsfracht oder Schwereströmungen ausgefüllt. Die dritte Sequenz bilden Sedimente aus einem terrestrischen, lakustrinen oder marinen Ablagerungsmilieu (JANSZEN et al. 2013). Lokal ist in unverfüllten Bereichen auch die Entwicklung von Sedimentfächern in Form von Flussdeltas innerhalb breiterer Rinnen möglich.

In einem Studiengebiet in der südlichen Nordsee konnte anhand von Bohrungen und seismischer Daten gezeigt werden, dass im Gegensatz zu verzweigten Rinnennetzwerken die Füllung einzelner isolierter Strukturen oft viel chaotischer mit großen Anteilen von schlecht aufgearbeitetem lokalem Material ist, da hier wahrscheinlich von eher kurzen Transportwegen bei einer relativ kurzen Nutzungsdauer als Abflussweg für Schmelzwässer ausgegangen werden muss (JANSZEN et al. 2012). Ein hoher Anteil lokalen aufgearbeiteten Materials wird als typisch für alle Formen subglazialer Rinnen angesehen (PRAEG 1996; JØRGENSEN & SANDERSEN 2006; JANSZEN et al. 2013).

JANSZEN (2012) versucht, die Sedimentverteilung in der Rinnenfüllung mit der Morphologie der Hohlformen in Verbindung zu bringen. Mächtige grobkörnige, in Gletschernähe abgelagerte Sequenzen, werden z. B. mit Rinnenenden, Engstellen und Bereichen mit abrupter Vertiefung in Fließrichtung korreliert, was auf länger bestehende Verankerungspunkte des Gletschers während seines Rückzugs hindeuten könnte. Glazitektonische Deformationen der Rinnenbasis und der Sedimentfüllung werden als weitere Indikatoren für eisnahe Sedimentation angesehen (HUUSE & LYKKE-ANDERSEN 2000b; MCCAROLL & RIJSDIJK 2003). Rinnensequenzen mit grobkörnigen Sedimenten in mehreren Rinnen innerhalb einer Region könnten zeitgleich entlang einer Eisrandlage entstanden sein. Feinkörnige lakustrine Ablagerungen entstehen, wenn der Abflussweg zum Meer durch die Topographie, Eisdämme oder Moränenmaterial blockiert ist und Schmelzwasser sich in ruhigen Zonen sammeln kann (JANSZEN 2012).

Für Brandenburg wird davon ausgegangen, dass bereits während der Zerfallsphase des 1. Elster-Eisvorstoßes die Verfüllung einsetzte und bis zum 2. Vorstoß andauerte (LIPPSTREU et al. 2015). Die Verfüllung verlief wahrscheinlich zeitversetzt von Süden nach Norden, blieb jedoch zunächst unvollständig. Erst im Zuge des 2. Elster-Vorstoßes wurden die meisten Rinnenabschnitte vollständig verfüllt, wobei z. T. die älteren Sedimente des 1. Vorstoßes wieder ausgeräumt wurden. Neogene und paläogene Sedimente von den Rinnenflanken wurden abgeschert und als glazigene Schollen z. T. kilometerweit transportiert

und gestaucht. Deformationen sind bis ins Präquartär nachweisbar. Als kennzeichnend für die Sedimentationsbedingungen des ersten Vorstoßes werden gravitativ verlagerte Sedimentpakete angesehen, die an den steilen Rinnenflanken z. T. staffelbruchartig abrutschten und damit den Schmelzwasserabfluss beeinträchtigen konnten. Auch Moränenmaterial aus dieser Zeit, das in tieferen Rinnenabschnitten nachgewiesen wurde, stammt demnach vermutlich aus einem höheren Niveau und wurde von dort durch Rutsch-, Fließ- und Versturzprozesse verlagert.

3.4.1 Stratigraphische Einordnung

Ein wichtiges Werkzeug zur Charakterisierung, Korrelation und Vorhersage sedimentärer Systeme ist laut JANSZEN et al. (2012) die Sequenzstratigraphie, die auf dem Konzept des Akkomodationsraumes, der von den zyklischen Schwankungen des relativen Meeresspiegels abhängt, beruht. Es geht hier um den in der regionalen oder lokalen Sedimentfolge direkt ablesbaren Meeresspiegel, der im Wesentlichen durch Eustasie, regionale vertikale Krustenbewegungen und das Sedimentangebot kontrolliert wird (vgl. z. B. MIALL (2010)). Dieser Ansatz ist auch auf den glazigen beeinflussten Sedimentationsraum übertragbar, der allerdings wesentlich komplexere Abfolgen enthält als die zuvor beschriebenen marinen Sedimente. Von den dynamischen Abläufen im Gletscherumfeld (z. B. schwankende Wasserstände in Gletscherstauseen), die insbesondere von der oft stark fluktuierenden Eisrandlage gesteuert werden, sind vor allem der Akkomodationsraum, das Sedimentangebot sowie die Ausbildung von Sedimentstrukturen betroffen. Diese Variationen zeigen sich auch in der Sedimentfüllung subglazialer Rinnen und ihrer Geometrie (JANSZEN et al. 2013). Für die Sequenzstratigraphie der komplexen Sedimentabfolgen subglazialer Rinnen liegen bisher nur einige Ansätze für Konzepte vor (z.B. BOULTON (1990), MARTINI & BROOKFIELD (1995), BROOKFIELD & MARTINI (1999), CORNER (2006) und CUMMINGS et al. (2011)). Die Sequenzstratigraphie könnte dann, neben anderen die Füllung kontrollierenden Faktoren wie der Morphologie der Rinne, der Lithologie der Gletscherbasis und besonders den Eisrandlagen, auch in der 3D Modellierung zum Einsatz kommen (vgl. MASSONAT (1999)) Jedoch ist auch klar ersichtlich, dass dieser Ansatz bei weitem noch nicht ausgereift genug ist, um zur Erklärung und möglicherweise Vorhersage von Strukturen beitragen zu können.

Das absolute Alter subglazialer Rinnen ist laut JANSZEN et al. (2012) anhand von organischer Substanz und anderem datierbaren Material (z. B. Fossilien, Pollen, Quarz und Minerale der Feldspat-Gruppe) nur schwer zu bestimmen, da, selbst wenn genug datierbares Material vorhanden ist, dieses oft aus älteren, umgelagerten Einheiten stammt. Zudem reicht die zeitliche Auflösung der zur Verfügung stehenden Datierungsmethoden oft nicht aus, um einzelne Vereisungsphasen abgrenzen zu können. Deshalb werden Rinnenfüllungen zumeist relativ zueinander und aufgrund lithostratigraphischer Befunde zeitlich eingeordnet. Untersuchungen mit Hilfe seismischer Daten in der Nordsee ergaben bis

zu sieben verschiedene Rinnengenerationen, die aufgrund von Überschneidungen einzelnen Phasen der Rinnenbildung zugeordnet werden konnten (z. B. LONERGAN et al. (2006), MOREAU et al. (2012), STEWART et al. (2013)). Allerdings ist nach wie vor nicht geklärt, ob eine Generation stellvertretend für einen kompletten Zyklus aus Glazial und Interglazial steht, oder ob und wie auch kürzere Vorstoß- bzw. Rückzugsphasen die Rinnengenerationen beeinflussen. Aus Datierungen mit optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) und der Radiokarbonmethode von spätpleistozänen Rinnen (KROHN et al. 2009; SANDERSEN et al. 2009) können Rückschlüsse auf durchschnittliche Sedimentationsraten von etwa einem Meter pro Jahr gezogen werden. Allerdings sind die Sedimentationsraten sehr variabel und stark vom Abstand zum Gletscher abhängig (BOULTON 1990). Für den Lauenburger Ton als eine distale lakustrine Sedimentfazies wurden z. B. Raten von 4 - 5 cm pro Jahr bestimmt (LINKE 1993).

Als Beispiel für eine Rinnenfüllung, die aus Sedimenten zweier Kaltzeiten besteht, kann die Hagenower Rinne (vgl. Kap. 3.2) im Südwesten Mecklenburg-Vorpommerns herangezogen werden. Innerhalb ihres Querschnitts befindet sich eine Abfolge mit bis zu 145 m mächtigen als saalezeitlich eingestuft Sedimenten über elsterzeitlichen Ablagerungen. Diese jüngere saalezeitliche Abfolge wurde als Füllung einer weiteren flacheren Rinne interpretiert. Aufgrund der räumlich begrenzt verfügbaren Daten bleibt allerdings ungeklärt, ob und wie weit die jüngere der älteren Rinne folgt und ob ein genetischer Zusammenhang zwischen den beiden Erosionsformen besteht (SCHULZ 2002).

PIERIK (2010) bezieht sich bei der Rekonstruktion saalezeitlicher Rinnen in den Niederlanden und Nordwestdeutschland z. B. auf die Interpretation von Daten aus der Nordsee von JOON et al. (1990) und PASSCHIER et al. (2010). Deren Einstufung der Rinnen beruht im Wesentlichen auf der Annahme, dass die saalezeitlichen Rinnen erosiv in elster- bzw. holsteinzeitliche Sedimentablagerungen eingebettet sind, ältere Rinnen schneiden und mit eem- bzw. weichselzeitlichen Sedimenten verfüllt wurden.

4 Zusammenfassende Bewertung der Aktualität der BGR-Aussagen

Beim Abgleich der bis zur Arbeit von KELLER (2010) von der BGR vertretenen Standpunkte mit den Ergebnissen aktueller internationaler wissenschaftlicher Veröffentlichungen zeigt sich, dass kein Anlass für eine grundlegende Revision der bis zum Jahr 2010 vertretenen Standpunkte vorliegt. Es wird deutlich, dass die Genese subglazialer Rinnen noch nicht abschließend geklärt ist. Die Beschreibung der bekannten Rinnenformen mit einem einzigen Bildungsprozess ist derzeit nicht möglich, weshalb weiterhin auch eine Kombination von unterschiedlichen Vorgängen in Frage kommt. Bei der Lithologie der Rinnenfüllung zeigt

sich, dass eine Standardisierung von lithologischen Abfolgen in einzelne Sequenzen aufgrund der oft hohen Variabilität nur äußerst schwer zu erreichen ist.

In einigen Punkten kann eine differenziertere Betrachtung durch Einbeziehung weiterer Informationsquellen nützlich sein. KELLER (2009) geht z. B. davon aus, dass Rinnenbildung umso deutlicher erfolgen konnte, je permeabler und weicher die Schichten unter dem Eis sind. Dieser Standpunkt kann durch Aussagen von JANSZEN (2012) ergänzt werden, der darauf verweist, dass durch hohe Permeabilität des Sedimentes ggf. mit verminderter Rinnenbildung gerechnet werden muss, da durch die Infiltration des basalen Schmelzwassers der für die Rinnenbildung notwendige hydrostatische Druckgradient nicht aufgebaut wird und die Abstände zwischen den Rinnen dadurch wesentlich größer ausfallen können.

Auch bei der für die Abbildung der Elsterrinnen zugrunde gelegten Quartärbasisfläche (vgl. Abb. 1) kann die Einbeziehung weiterer Informationsquellen die bisherigen Aussagen ergänzen. Die Quartärbasis ist nicht überall mit der Elster-Rinnenbasis identisch. Es gibt z. B. flache elsterzeitliche Rinnen, die südlich der Rinnen, die durch die Quartärbasiskarte von STACKEBRANDT et al. (2001) abgebildet werden, vorkommen. Hier könnten z. B. Arbeiten von FELDMANN (2002) zum Bereich des Harzes und des Allertals oder zu Lausitzer Rinnen (KUPETZ et al. 1989) ergänzend berücksichtigt werden. Die vorliegenden Lithofazieskarten Quartär 1:50.000 (LKQ 50) der neuen Bundesländer mit geologischen Profilschnitten, Horizontkarten und einer Darstellung der Quartärbasis können weitere Details zur Verfeinerung der Sichtweise liefern.

Nachdem KELLER (2009) noch von einer maximalen Rinnentiefe von 500 m ausgegangen ist, weisen spätere Publikationen der BGR bereits darauf hin, dass aufgrund einer maximal erbohrten Rinnentiefe in Norddeutschland von ca. 584 m auch tiefere Rinnen gebildet werden können. Allerdings erscheint es wenig sinnvoll, für alle Regionen die gleiche maximal mögliche Rinnentiefe für Prognosen zu verwenden. Stattdessen könnten z. B. Zonen mit repräsentativen Rinnentiefen für eine verbesserte Vorhersage definiert werden.

Die Auswirkungen von Salzstrukturen auf die Lage und Tiefe subglazialer Rinnen werden kontrovers diskutiert. Bislang konnten die ablaufenden Prozesse und eventuelle Zusammenhänge auch durch neuere Forschungsarbeiten nicht hinreichend geklärt werden. Insbesondere die exakte Tiefenlage der Salzstrukturen und ihrer Randsenken sowie der Rinnen in deren Umfeld müssen z. T. noch erhoben werden. Eine flächendeckende Auswertung liegt dazu noch nicht vor, so dass für eine konkrete Region derzeit eine Einzelfallprüfung unter Einbeziehung von Befunden im näheren Umfeld und statistischen Methoden angeraten ist.

5 Ausblick

Ein wichtiger Aspekt, der im Zusammenhang mit subglazialer Rinnenbildung eingehender untersucht werden müsste, ist die Frage, ob Störungen einen Einfluss auf die Anlage und den Verlauf der Erosionsformen haben. Trifft dies zu, müsste geklärt werden, ob dies generell oder nur unter bestimmten Bedingungen der Fall ist. Falls Störungen die Bildung und den Verlauf der Rinnen beeinflussen, wäre z. B. zu prüfen, ob dieser Effekt nur von aktiven oder auch von inaktiven Störungen ausgeht und wodurch die Reaktivierung von inaktiven Störungen ausgelöst werden kann. Die Hypothese, dass ältere Störungen im Umfeld von Salzstrukturen durch Eisauflast reaktiviert werden könnten, kann für zukünftige Langzeitsicherheitsbetrachtungen von Bedeutung sein, wenn die resultierende gestörte Lagerung der Sedimentschichten diese u. U. anfälliger für erosive Prozesse wie Rinnenbildung macht. Dafür müsste geklärt werden, welche Strukturen abhängig von ihrer Tiefenlage wie stark von der Eisauflast beeinflusst werden und welche Störungen in ihrem Umfeld besonders anfällig für Reaktivierung sind. Hier wäre eine Verknüpfung zum im Standortauswahlgesetz (StandAG) formulierten Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ angeraten. Die Fragestellung sollte nicht nur im engen Umfeld von Salzstrukturen, sondern generell im Zusammenhang mit allen Wirtsgesteinsalternativen wie Tonstein oder Kristallin (ggf. unter Überdeckung) berücksichtigt werden.

Die Anwendung sequenzstratigraphischer Methoden erscheint aus heutiger Sicht noch nicht geeignet, um die komplizierten Vorgänge bei der Bildung subglazialer Rinnen beschreiben zu können. Dennoch sollte eine zuverlässige Unterscheidung der saale- und elsterzeitlich angelegten Strukturen angestrebt werden.

Literaturverzeichnis

- ABER, J.S. & BER, A. (2007): Glaciotectonism. – *Developments in Quaternary Sciences*, 6: 256 pp.; Amsterdam (Elsevier).
- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. – Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. – Bundesamt für Strahlenschutz (BfS); Salzgitter.
- AL HSEINAT, M. & HÜBSCHER, C. (2014): Ice-load induced tectonics controlled tunnel valley evolution; instances from the southwestern Baltic Sea. – *Quaternary Science Reviews*, 97: 121-135, DOI: 10.1016/j.quascirev.2014.05.011; Amsterdam (Elsevier).
- AL HSEINAT, M., HÜBSCHER, C., LANG, J., LÜDMANN, T., OTT, I. & POLOM, U. (2016): Triassic to recent tectonic evolution of a crestal collapse graben above a salt-cored anticline in the Glückstadt Graben/North German Basin. – *Tectonophysics*, 680: 50-66, DOI: 10.1016/j.tecto.2016.05.008; Amsterdam (Elsevier).
- BACHE, F., MOREAU, J., RUBINO, J.L., GORINI, C. & VAN VLIET LANOE, B. (2012): The subsurface record of the Late Palaeozoic glaciation in the Chaco Basin, Bolivia. – In: HUUSE, M., REDFERN, J., LE HERON, D.P., DIXON, J.E., MOSCARIELLO, A. & CRAIG, A. [eds.]: *Glaciogenic Reservoirs and Hydrocarbon Systems*. – *Special Publications*, 368: 257-274, DOI: 10.1144/SP368.11; London (Geological Society).
- BENN, D.I. & EVANS, D.J.A. (2010): *Glaciers & Glaciation*. – 2; London (Hodder Education).
- BITINAS, A. (1999): Some remarks on the distribution and genesis of palaeoincisions in the East Baltic Area. – *Geological Quarterly*, 43, 2: 183-188; Warschau (Polish Geological Institute – National Research Institute).
- BOULTON, G.S. (1990): Sedimentary and sea level changes during glacial cycles and their control on glaciomarine facies architecture. – In: DOWDESWELL, J.A. & SCOURSE, J.D. [eds.]: *Glaciomarine Environments: Processes and Sediments*. – *Special Publications*, 53: 15-52; London (Geological Society).
- BREGMAN, E.P.H. & SMIT, F.W.H. (2012): Genesis of the Hondsrug, a Saalian megaflood, Drenthe, the Netherlands. *Aspiring european geopark*. – Province of Drenthe, Utrecht University: 123 pp.; Netherlands (EUROPEAN GEOPARK de HONDSRUG Steering Group).

- BROOKFIELD, M.E. & MARTINI, I.P. (1999): Facies architecture and sequence stratigraphy in glacially influenced basins: basic problems and water-level/glacier input-point controls (with an example from the Quaternary of Ontario Canada). – *Sediment. Geol.*, 123, 3-4: 183-197, DOI: 10.1016/S0037-0738(98)00088-8; Amsterdam (Elsevier).
- CLAYTON, L., ATTIG, J.W. & MICKELSON, D.M. (1999): Tunnel channels formed in Wisconsin during the last glaciation. – In: MICKELSON, D.M. & ATTIG, J.W. [eds.]: *Glacier Processes Past and Present*. – GSA Special Paper: 69-82, DOI: 10.1130/0-8137-2337-X.69; Boulder (Geological Society of America).
- COFAIGH, C.O. (1996): Tunnel valley genesis. – *Progress in Physical Geography*, 20, 1: 1-19, DOI: 10.1177/030913339602000101; London (Edward Arnold Publishers).
- CORNER, G.D. (2006): A transgressive-regressive model of fjord-valley infill: stratigraphy, facies and depositional controls. – In: DALRYMPLE, R.W., LECKIE, D.A. & TILLMAN, R.W. [eds.]: *Incised Valleys in Time and Space*. – Special Publications, 85: 161-178, DOI: 10.2110/pec.06.85.0161; Tulsa (Society for Sedimentary Geology (SEPM)).
- CUMMINGS, D.I., GORRELL, G., GUILBAULT, J.-P., HUNTER, J.A., LOGAN, C., PONOMARENKO, D., PUGIN, A.-J.M., PULLAN, S.E., RUSSELL, H.A.J. & SHARPE, D.R. (2011): Sequence stratigraphy of a glaciated basin fill, with a focus on esker sedimentation. – *GSA Bulletin*, 123: 1478-1496, DOI: 10.1130/B30273.1; Boulder (Geological Society of America).
- ENDLAGERKOMMISSION (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Drucksache 18/9100. – Deutscher Bundestag: 579 S.; Berlin.
- FELDMANN, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. – *Clausthaler Geowissenschaften*, Band 1: X: 149 S.; Clausthal-Zellerfeld (TU Clausthal. – Institut für Geologie und Paläontologie).
- FISCHER, U.H., BEBIOLKA, A., BRANDEFELT, J., FOLLIN, S., HIRSCHORN, S., JENSEN, M., KELLER, S., KENNEL, L., NASLUND, J.-O. & NORMANI, S. (2015): Radioactive Waste Under Conditions of Future Ice Ages. – In: HAEBERLI, W. & WHITEMAN, C. [eds.]: *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. – Hazards and Disasters Serien: 345-393, DOI: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00011-1; Amsterdam (Elsevier).

- FLEISHER, P.J., BAILEY, P.K., NATEL, E.M. & RUSSELL, A.J. (2010): Subglacial hydraulic scouring and deposition during surge-related outburst floods, Bering Glacier, Alaska. – *Quaternary Science Reviews*, 29, 17-18: 2261-2270, DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.05.027; Amsterdam (Elsevier).
- GHIENNE, J.-F., LE HERON, D.P., MOREAU, J., DENIS, M. & DEYNOUX, M. (2007): The Late Ordovician glacial sedimentary system of the north Gondwana platform. – In: HAMBREY, M.J., CHRISTOFFERSEN, P., GLASSER, N.F. & HUBBARD, B. [eds.]: *Glacial Sedimentary Processes and Products*. – IAS Special Publication, 39: 295-319, DOI: 10.1002/9781444304435.ch17; Hoboken (Wiley & Sons).
- HAMPEL, A. & HETZEL, R. (2006): Response of normal faults to glacial-interglacial fluctuations of ice and water masses on Earth's surface. – *Journal of Geophysical Research*, 111, B06406, DOI: 10.1029/2005JB004124; Hoboken (Wiley & Sons).
- HAMPEL, A., HETZEL, R. & MANIATIS, G. (2010a): Response of faults to climate-driven changes in ice and water volumes on Earth's surface. – *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 368: 2501-2517, DOI: 10.1098/rsta.2010.0031; London (The Royal Society).
- HAMPEL, A., KAROW, T., MANIATIS, G. & HETZEL, R. (2010b): Slip rate variations on faults during glacial loading and post-glacial unloading: implications for the viscosity structure of the lithosphere. – *Journal of the Geological Society*, 167, 2: 385-399, DOI: 10.1144/0016-76492008-137; London (Geological Society).
- HETZEL, R. & HAMPEL, A. (2005): Slip rate variations on normal faults during glacial-interglacial changes in surface loads. – *Nature*, 435, 7038: 81-84, DOI: 10.1038/nature03562; London (Nature Publishing Group).
- HINSCH, W. (1979): Rinnen an der Basis des glaziären Pleistozäns in Schleswig-Holstein. – *Eiszeitalter und Gegenwart*, 29, 1: 173-178, DOI: 10.3285/eg.29.1.14; Hannover (Verlag Deutsche Quartärvereinigung).
- HUUSE, M. & LYKKE-ANDERSEN, H. (2000a): Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin. – *Quaternary Science Reviews* 19, 12: 1233-1253, DOI: 10.1016/S0277-3791(99)00103-1; Amsterdam (Elsevier).
- HUUSE, M. & LYKKE-ANDERSEN, H. (2000b): Large-scale glaciotectonic thrust structures in the eastern Danish North Sea. – In: MALTMAN, A.J., HUBBARD, B. & HAMBREY, M.J. [eds.]: *Deformation of Glacial Materials*. – Special Publication, 176: 293-305, DOI: 10.1144/GSL.SP.2000.176.01.22; London (Geological Society).

- JANSZEN, A. (2012): Tunnel valleys: genetic models, sedimentary infill and 3D architecture. – PhD, Delft University of Technology; Delft.
- JANSZEN, A., SPAAK, M. & MOSCARIELLO, A. (2012): Effects of the substratum on the formation of glacial tunnel valleys; an example from the middle Pleistocene of the southern North Sea Basin. – *Boreas*, 41, 4: 629-643, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2012.00260.x; Oslo (Wiley-Blackwell).
- JANSZEN, A., MOREAU, J., MOSCARIELLO, A., EHLERS, J. & KROEGER, J. (2013): Time-transgressive tunnel-valley infill revealed by a three-dimensional sedimentary model, Hamburg, north-west Germany. – *Sedimentology*, 60, 3: 693-719, DOI: 10.1111/j.1365-3091.2012.01357.x; Oxford (Wiley-Blackwell).
- JOON, B., LABAN, C. & VAN DER MEER, B. (1990): The Saalian glaciation in the Dutch part of the Netherlands. – *Geologie en Mijnbouw*, 69, 2: 151-158; Dordrecht (Kluwer Academic Publishers).
- JØRGENSEN, F. & SANDERSEN, P.B.E. (2006): Buried and open tunnel valleys in Denmark – erosion beneath multiple ice sheets. – *Quaternary Science Reviews* 25, 11: 1339-1363, DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.11.006; Amsterdam (Elsevier).
- KEHEW, A.E., PIOTROWSKI, J.A. & JØRGENSEN, F. (2012): Tunnel valleys: Concepts and controversies - A review. – *Earth-Science Reviews*, 113, 1-2: 33-58, DOI: 10.1016/j.earscirev.2012.02.002; Amsterdam (Elsevier).
- KELLER, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 24 S.; Hannover.
- KELLER, S. (2010): Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland. – In: FLÜGGE, J. & RÜBEL, A. [eds.]: Grundsatzfragen Hydrogeologie. Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE Braunschweig, 5.-6. November 2009. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-264: 145-173; Köln (GRS).
- KÖTHE, A., HOFFMANN, N., KRULL, P., ZIRNGAST, M. & ZWIRNER, R. (2007): Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. – *Geologisches Jahrbuch Reihe C: Hydrogeologie, Ingenieurgeologie*, C 72; Hannover (Schweizerbart in Komm.).

- KRISTENSEN, T.B., HUUSE, M., PIOTROWSKI, J.A. & CLAUSEN, O.R. (2007): A morphometric analysis of tunnel valleys in the eastern North Sea based on 3D seismic data. – JQS. Journal of Quaternary Science, 22, 8: 801-815, DOI: 10.1002/jqs.1123; Chichester (Wiley).
- KRISTENSEN, T.B., PIOTROWSKI, J.A., HUUSE, M., CLAUSEN, O.R. & HAMBERG, L. (2008): Time-transgressive tunnel valley formation indicated by infill sediment structure, North Sea – the role of glaciohydraulic supercooling. – Earth Surface Processes and Landforms, 33, 4: 546-559, DOI: 10.1002/esp.1668; Hoboken (Wiley).
- KROHN, C.F., LARSEN, N.K., KRONBORG, C., NIELSEN, O.B. & KNUDSEN, K.L. (2009): Litho- and chronostratigraphy of the late Weichselian in Vendsyssel, northern Denmark, with special emphasis on tunnel-valley infill in relation to a receding ice margin. – Boreas, 38, 4: 811-833, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2009.00104.x; Oslo (Wiley).
- KUPETZ, M., SCHUBERT, G., SEIFERT, A. & WOLF, L. (1989): Quartärbasis, pleistozäne Rinnen und Beispiele glazitektonischer Lagerungsstörungen im Niederlausitzer Braunkohlengebiet. – In: BRAUSE, H. & EILERS, H. [eds.]: Geoprofil, Beiträge zum Niederlausitzer Braunkohlenrevier. – 1: 2-17; Freiberg (VEB Geologische Forschung und Erkundung).
- KUSTER, H. & MEYER, K.-D. (1979): Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen. – Eiszeitalter und Gegenwart, 29: 135-156, 5 Abb., 3 Tab., 1 Kt.; Hannover.
- LANG, J., HAMPEL, A., BRANDES, C. & WINSEMANN, J. (2014): Response of salt structures to ice-sheet loading: implications for ice-marginal and subglacial processes. – Quaternary Science Reviews, 101: 217-233, DOI: 10.1016/j.quascirev.2014.07.022; Amsterdam (Elsevier).
- LINKE, G. (1993): Zur Geologie und Petrographie der Forschungsbohrungen pho 1-5 der Bohrung Hamburg-Billbrook und des Vorkommens von marinem Holstein im Gebiet Neuwerk-Scharhörn. – In: Geologisches Jahrbuch Reihe A. – 138: 35-76; Stuttgart (Schweizerbart).
- LIPPSTREU, L., HERMSDORF, N., SONNTAG, A. & STRAHL, J. (2015): Pleistozän. – In: STACKEBRAND, W. & FRANKE, D. [eds.]: Geologie von Brandenburg: 333-419; Stuttgart (Schweizerbart).
- LONERGAN, L., MAIDMENT, S.C.R. & COLLIER, J.S. (2006): Pleistocene subglacial tunnel valleys in the central North Sea basin: 3-D morphology and evolution. – JQS. Journal of Quaternary Science, 21, 8: 891-903, DOI: 10.1002/jqs.1015; Chichester (Wiley).

- LUTZ, R., KALKA, S., GAEDICKE, C., REINHARDT, L. & WINSEMANN, J. (2009): Pleistocene tunnel valleys in the German North Sea: spatial distribution and morphology. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 160, 3: 225-235, DOI: 10.1127/1860-1804/2009/0160-0225; Stuttgart (Schweizerbart).
- MARTINI, I.P. & BROOKFIELD, M.E. (1995): Sequence Analysis of Upper Pleistocene (Wisconsinian) glaciolacustrine deposits of the north-shore bluffs of Lake Ontario, Canada. – Journal of Sedimentary Research, B65, 3: 388-400, DOI: 10.1306/D426825C-2B26-11D7-8648000102C1865D; Tulsa (AAPG).
- MASSONAT, G.J. (1999): Breaking of a paradigm: Geology can provide 3D complex probability fields for stochastic facies modelling. – SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 03. - 06. October; Houston (Society of Petroleum Engineers).
- MCCARROLL, D. & RIJSDIJK, K.F. (2003): Deformation styles as a key for interpreting glacial depositional environments. – Journal of Quaternary Science, 18, 6: 473-489, DOI: 10.1002/jqs.780; Hoboken (Wiley & Sons for QRA).
- MIALL, A.D. (2010): The Geology of Stratigraphic Sequences. – 2; Berlin & Heidelberg (Springer).
- MOREAU, J., HUUSE, M., JANSZEN, A., VAN DER VEGT, P., GIBBARD, P.L. & MOSCARIELLO, A. (2012): The glaciogenic unconformity of the southern North Sea. – In: HUUSE, M., REDFERN, J., LE HERON, D.P., DIXON, J.E., MOSCARIELLO, A. & CRAIG, J. [eds.]: Glaciogenic Reservoirs and Hydrocarbon Systems. – Geological Society Special Publication, 368: 99-110, DOI: 10.1144/SP368.5; London (Geological Society).
- 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.
- MRUGALLA, S. (2014): Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Norddeutschland – ohne Endlagereinfluss. Projekt AnSicht – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht: 189 S.; Hannover.
- MÜLLER, U. & OBST, K. (2008): Junge halokinetische Bewegungen im Bereich der Salzkissen Schlieven und Marnitz in Südwest-Mecklenburg. – Brandenb. Geowiss. Beitr., 15, 1/2: 147-154; Kleinmachnow & Cottbus (LBGR).

- PASSCHIER, S., LABAN, C., MESDAG, C.S. & RIJSDIJK, K.F. (2010): Subglacial bed conditions during Late Pleistocene glaciations and their impact on ice dynamics in the southern North Sea. – *Boreas*, 39, 3: 633-647, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2009.00138.x; Oslo (Wiley).
- PIERIK, H.J. (2010): An integrated approach to reconstruct the Saalian glaciation. GIS-based construction of a new phase model for the Netherlands and NW-Germany. – MSc, Utrecht University; Utrecht.
- PIOTROWSKI, J.A. (1994): Tunnel-valley formation in Northwest Germany: geology, mechanisms of formation and subglacial bed conditions for the Bornhoeved tunnel valley. – *Sedimentary Geology*, 89, 1-2: 107-141, DOI: 10.1016/0037-0738(94)90086-8; Amsterdam (Elsevier).
- POBLOTZKI, B.V. (2002): Stratigraphie des Quartärs und quartäre Bewegungen an Salzstrukturen in der nördlichen Altmark. – *Hallesches Jahrbuch der Geowissenschaften*, B 24: 57-83; Halle.
- PRAEG, D. (1996): Morphology, Stratigraphy and Genesis of Buried Mid-pleistocene Tunnel-valleys in the Southern North Sea Basin. – PhD, University of Edinburgh: 430 pp.; Edinburgh.
- PRAEG, D. (2003): Seismic imaging of mid-Pleistocene tunnel-valleys in the North Sea basin: high resolution from low frequencies. – *Journal of Applied Geophysics*, 53, 4: 273-298, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2003.08.001; Amsterdam (Elsevier).
- REINHARDT, S., BEBIOLKA, A. & WEITKAMP, A. (2017): Pleistozäne übertiefte Strukturen in Süddeutschland. – BGR, Abschlussbericht: 150 S.; Berlin.
- RUMPEL, H.-M., BINOT, F., GABRIEL, G., SIEMON, B., STEUER, A. & WIEDERHOLD, H. (2009): The benefit of geophysical data for hydrogeological 3D modelling; an example using the Cuxhaven buried valley. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160, 3: 259-269, DOI: 10.1127/1860-1804/2009/0160-0259; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)).
- RUSSELL, A.J., GREGORY, A.R., LARGE, A.R.G., FLEISHER, P.J. & HARRIS, T.D. (2007): Tunnel channel formation during the November 1996 jökulhlaup, Skeiðarárjökull, Iceland. – *Annals of Glaciology*, 45, 1: 95-103, DOI: 10.3189/172756407782282552; Cambridge (International Glaciological Society (IGS)).

- SANDERSEN, P.B.E., JØRGENSEN, F., LARSEN, N.K., WESTERGAARD, J.H. & AUKEN, E. (2009): Rapid tunnel-valley formation beneath the receding late Weichselian ice sheet in Vendsyssel, Denmark. – *Boreas*, 38, 4: 834-851, DOI: 10.1111/j.1502-3885.2009.00105.x; Oslo (Wiley-Blackwell).
- SANDERSEN, P.B.E. & JØRGENSEN, F. (2012): Substratum control on tunnel-valley formation in Denmark. – In: HUUSE, M., REDFERN, J., LE HERON, D.P., DIXON, R.J., MOSCARIELLO, A. & CRAIG, A. [eds.]: *Glaciogenic Reservoirs and Hydrocarbon Systems*. – Geological Society Special Publications, 368: 145-157, DOI: 10.1144/SP368.12; London (Geological Society).
- SCHULZ, R. (2002): Forschungsbohrungen des GGA-Instituts. – *Zeitschr. f. angew. Geol.*, 48, 4: 3-8; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)).
- SIROCKO, F., REICHERTER, K., LEHNÉ, R., HÜBSCHER, C., WINSEMANN, J. & STACKEBRANDT, W. (2008): Glaciation, salt and the present landscape, glaciation, salt and the present landscape. – In: LITCKE, R., BAYER, U., GAJEWSKI, D. & NELSKAMP, S. [eds.]: *Dynamics of complex intracontinental basins: The Central European Basin System*: 233-245; Berlin (Springer).
- SMED, P. (1998): Die Entstehung der dänischen und norddeutschen Rinnentäler (Tunneltäler); Glaziologische Gesichtspunkte. – *Eiszeitalter und Gegenwart – Quaternary Science Journal*, 48: 1-18; (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Naegele u. Obermiller), Stuttgart).
- STACKEBRAND, W. (2015): Die elsterzeitlichen Rinnen - ein Beispiel für die Wechselwirkungen endo- und exogener landschaftsgenetischer Prozesse. – In: STACKEBRAND, W. & FRANKE, D. [eds.]: *Geologie von Brandenburg*: 487-490; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)).
- STACKEBRANDT, W., LUDWIG, A.O. & OSTAFICZUK, S. (2001): Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas. – *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 8: 13-19; Kleinmachnow (LBGR).
- STACKEBRANDT, W. (2009): Subglacial channels of northern Germany: a brief review. – *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 160, 3: 203-210, DOI: 10.1127/1860-1804/2009/0160-0203; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller)).

- STARK, L. (2014): Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland – ohne Endlagereinfluss. Projekt AnSichT – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht: 152 S.; Hannover.
- STEWART, M.A. (2008): 3D Seismic Analysis of Pleistocene Tunnel Valleys in the Central North Sea. – PhD Thesis, University of London: 312 pp.; London.
- STEWART, M.A., LONERGAN, L. & HAMPSON, G. (2013): 3D seismic analysis of buried tunnel valleys in the central North Sea; morphology, cross-cutting generations and glacial history. – Quaternary Science Reviews, 72: 1-17, DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.03.016; Amsterdam (Elsevier).
- STUMM, D. (2010): Deep glacial erosion. Review with focus on tunnel valleys in northern Europe. – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, NAB 10-33: 74 pp.; Wetingen (NAGRA).
- VAN DER VEGT, P., JANSZEN, A. & MOSCARIELLO, A. (2012): Tunnel valleys: current knowledge and future perspectives. – In: HUUSE, M., REDFERN, J., LE HERON, D.P., DIXON, R.J., MOSCARIELLO, A. & CRAIG, J. [eds.]: Glaciogenic Reservoirs and Hydrocarbon Systems. – Geological Society Special Publications, 368: 75-97, DOI: 10.1144/SP368.13; London (Geological Society).

Abbildungsverzeichnis	Seite
-----------------------	-------

Abb. 1: Rinnenverteilung und Eisrandstände in Norddeutschland (aus MRUGALLA (2011), geändert nach STACKEBRANDT et al. (2001)).....	7
--	---