

Geowissenschaftliche Langzeitprognose

Bericht zum Arbeitspaket 2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Erstellt von:



Geowissenschaftliche Langzeitprognose

Bericht zum Arbeitspaket 2

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Sabine Mrugalla (BGR)

Juli 2011

Änderung der Vorbemerkung
Dezember 2012

Anmerkung:

Das FuE-Vorhaben UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

Ursprüngliche Zielsetzung

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnissstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

Aktualisierte Zielsetzung

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

Aktualisierte Projektplanung

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

Projektpartner

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

Arbeitspakete

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

Deskriptoren:

Deck- und Nebengebirge, Geologie, Gorleben, Hydrogeologie, Kaltzeiten, Klima, Langzeitprognose, Salzstock

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziel und Inhalt der geowissenschaftlichen Langzeitprognose für den Standort Gorleben	3
3	Rahmenbedingungen am Standort Gorleben	5
3.1	Klima	5
3.1.1	Erdbahnparameter (Milanković-Zyklen)	6
3.1.2	Primäre Sonnenstrahlung	7
3.1.3	Plattentektonik (Kontinentaldrift)	8
3.1.4	Gebirgsbildung und Vulkanismus.....	11
3.1.5	Atmosphärische Parameter	11
3.1.6	Paläoklima als Prognosebasis der zukünftigen Entwicklung	13
3.1.7	Grundlagen und Ergebnisse von unterschiedlichen modellgestützten Klimaprognosen.....	16
3.1.8	Paläoklima am Standort Gorleben	19
3.1.9	Ableitung der zukünftigen Klimaentwicklung am Standort Gorleben	23
3.1.10	Ungewissheiten bei der Abschätzung der Klimaentwicklung	24
3.2	Geomorphologie	26
3.2.1	Topographie	26
3.2.2	Oberflächengewässer	29
3.2.3	Ungewissheiten bei der Prognose der zukünftigen Geomorphologie	29
3.3	Deck- und Nebengebirge	30
3.3.1	Aufbau und Entwicklung des Deck- und Nebengebirges.....	30
3.3.2	Ungewissheiten bei der Prognose der Entwicklung des Deck- und Nebengebirges	34
3.4	Hydrogeologie	34
3.4.1	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge.....	34
3.4.2	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge.....	38

3.4.3	Ungewissheiten bei der Prognose der Entwicklung des hydrogeologischen Systems	40
3.5	Salzstock Gorleben.....	41
3.5.1	Zusammensetzung und Aufbau des Salzstocks.....	43
3.5.2	Klüfte und Störungen im Salinar des Salzstocks Gorleben	48
3.5.3	Fluide im Salinar des Salzstocks Gorleben	53
3.5.4	Kohlenwasserstoffe im Salinar des Salzstocks Gorleben.....	59
3.5.5	Ungewissheiten bei der Prognose der Entwicklung des Salzstocks Gorleben.....	63
4	Wahrscheinliche zukünftige geologische Entwicklungen am Standort Gorleben	65
4.1	Überregionale Entwicklungen mit Einwirkungen auf den Standort Gorleben.....	65
4.1.1	Senkung der Erdkruste	65
4.1.2	Ungewissheiten bei der Prognose der Senkung der Erdkruste	66
4.1.3	Krustendeformation	66
4.1.4	Ungewissheiten bei der Prognose von Krustendeformationen	69
4.1.5	Neotektonische Vorgänge.....	69
4.1.6	Ungewissheiten bei der Prognose der Neotektonik.....	71
4.1.7	Erdbeben.....	71
4.1.8	Ungewissheiten bei der Prognose von Erdbeben.....	75
4.2	Kaltzeitliche Entwicklungen.....	76
4.2.1	Permafrost.....	78
4.2.2	Ungewissheiten bei der Prognose der Permafrostentwicklung.....	87
4.2.3	Kryogene Klüfte im Salinar	87
4.2.4	Ungewissheiten bei der Prognose der Entstehung von kryogenen Klüften	89
4.2.5	Inlandvereisung in randlicher Lage	90
4.2.6	Ungewissheiten bei der Prognose einer Inlandvereisung in randlicher Lage	93
4.2.7	Vollständige Inlandvereisung	93
4.2.8	Ungewissheiten bei der Prognose einer vollständigen Inlandvereisung ...	97

4.2.9	Glazigene Rinnen	98
4.2.10	Ungewissheiten bei der Prognose der Rinnenbildung	108
4.2.11	Glazigene Deformationen im Deck- und Nebengebirge	109
4.2.12	Ungewissheiten bei der Prognose von glazigenen Deformationen im Deck- und Nebengebirge	110
4.3	Entwicklungen der Geomorphologie sowie des Deck- und Nebengebirges	110
4.3.1	Transgression oder Regression	110
4.3.2	Ungewissheiten bei der Prognose der Transgression und Regression ..	113
4.3.3	Erosion	113
4.3.4	Ungewissheiten bei der Prognose der Erosion	115
4.3.5	Sedimentation.....	116
4.3.6	Ungewissheiten bei der Prognose der Sedimentation	117
4.3.7	Diagenese	118
4.3.8	Ungewissheiten bei der Prognose der Diagenese.....	118
4.3.9	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge	119
4.3.10	Ungewissheiten bei der Prognose von Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge	121
4.3.11	Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge.....	122
4.3.12	Ungewissheiten bei der Prognose der mikrobiellen Prozesse im Deck- und Nebengebirge	124
4.4	Zukünftige Entwicklungen des hydrogeologischen Systems am Standort Gorleben	124
4.4.1	Einflüsse mikrobieller Prozesse auf die Hydrogeologie	124
4.4.2	Ungewissheiten bei der Prognose der mikrobiellen Einflüsse auf die Hydrogeologie	126
4.5	Zukünftige salinarspezifische Entwicklungen des Salzstocks Gorleben	126
4.5.1	Diapirismus und Halokinese	126
4.5.2	Ungewissheiten bei der Prognose des Diapirismus	129
4.5.3	Subrosion	129
4.5.4	Ungewissheiten bei der Prognose der Subrosion.....	136

5	Erläuterung von wenig wahrscheinlichen oder auszuschließenden Entwicklungen des Standortes Gorleben	139
5.1	Überregionale Entwicklungen ohne nachweisbare Einwirkungen auf den Standort Gorleben	139
5.1.1	Hebung der Erdkruste.....	139
5.1.2	Orogenese.....	139
5.1.3	Überregionale Grabenzonenbildung	140
5.2	Regionale Entwicklungen ohne nachweisbare Einwirkungen auf den Standort Gorleben	142
5.2.1	Magmatismus	142
5.2.2	Hydrothermale Aktivität.....	143
5.2.3	Gesteinsmetamorphose.....	144
5.2.4	Meteoriteneinschlag.....	145
	Literaturverzeichnis.....	149
	Abbildungsverzeichnis.....	165
	Tabellenverzeichnis.....	169

1 Einleitung

Seit Ende der 1970er Jahre erfolgt die geologische Erkundung des Salzstockes Gorleben mit einer Unterbrechung zwischen Oktober 2000 und November 2010 (Zeitraum des Gorleben Moratoriums). Mit den Erkundungsarbeiten soll eine Datengrundlage geschaffen werden, mit der u. a. geprüft wird, ob geologische Gegebenheiten vorliegen, die am Standort einen sicheren Einschluss für endzulagernde radioaktive Abfälle gewährleisten können und die Errichtung eines möglichen Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle ermöglichen.

Auf Beschluss des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit ist ab 2010 in einem mehrstufigen Verfahren auf der Basis einer Sicherheitsanalyse, eines aktualisierten Endlagerkonzeptes und eines internationalen Reviews unabhängiger Wissenschaftler zu prüfen, ob Gorleben als Endlager in Frage kommt.

Antworten zur Eignungsfrage sollen im Rahmen des Vorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) erarbeitet werden. Dazu ist:

- eine vorläufige Sicherheitsanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Langzeitsicherheit durchzuführen,
- ein Endlagerkonzept unter Berücksichtigung der betrieblichen Sicherheit zu entwickeln und, soweit dies während der Laufzeit des Vorhabens VSG möglich ist, zu optimieren und
- der weitere Untersuchungs- und Erkundungsbedarf festzustellen.

Grundlegende Voraussetzungen für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsanalyse sind u. a. die im Arbeitspaket 2 (AP 2) verankerte geowissenschaftliche Standortbeschreibung und die geowissenschaftliche Langzeitprognose. Die Standortcharakterisierung und die geowissenschaftliche Langzeitprognose fassen die aus der Standorterkundung gewonnenen Erkenntnisse zum strukturellen Aufbau der geologischen Formationen und zu ihren Eigenschaften sowie zur Prognose ihrer Entwicklung im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre zusammen. Bei der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden mögliche Einflüsse auf die Prozesse und Ereignisse durch ein Endlager und durch wärmeerzeugende radioaktive Abfälle nicht betrachtet. Mögliche Verläufe der Standortentwicklung unter Berücksichtigung eines verschlossenen

und verfüllten Endlagers, des Sicherheits- und des gewählten Endlagerkonzeptes werden in der Systemanalyse des Standortes (AP 7 – AP 12) untersucht.

2 Ziel und Inhalt der geowissenschaftlichen Langzeitprognose für den Standort Gorleben

Im Rahmen der VSG wird im AP 2 eine geowissenschaftliche Langzeitprognose für den Standort Gorleben durchgeführt. Ziel ist es, die geologische Entwicklung ohne die Einflüsse eines Endlagers für die nächsten eine Million Jahre abzuschätzen. Dadurch soll der natürliche Hintergrund der Entwicklung des Standortes verdeutlicht werden, um die Abweichungen mit Einflüssen eines Endlagers besser abgrenzen und bewerten zu können.

Die geowissenschaftliche Langzeitprognose basiert auf den Erkundungsergebnissen, die bis zur Unterbrechung der geologischen Standortuntersuchungen im Herbst 2000 bzw. bis zum Beginn des Moratoriums in Gorleben gewonnen wurden. In diesem Zusammenhang erfolgt ein Abgleich mit den Inhalten des FEP-Katalogs, der in AP 7 erarbeitet wird und mit den Standortbeschreibungen Gorleben Band 1 bis 3 (/KLI 07/, /KÖT 07/ und /BOR 08/. Ergänzend wurde vor allem für die Beschreibung der allgemeinen, nicht auf Gorleben bezogenen Inhalte eine Literaturrecherche durchgeführt.

Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung des Standortes wird das Aktualitätsprinzip angewendet, das besagt, dass die naturwissenschaftlichen Grundgesetze auch in Zukunft gültig sind und dass die daraus resultierenden Prozesse, in gleicher Weise wie in der Vergangenheit ablaufen werden. Auf dieser Basis können bekannte vergangene Entwicklungen in die Zukunft extrapoliert werden, wodurch eine Abschätzung von zukünftigen Gegebenheiten am Standort Gorleben möglich ist.

Angelehnt an die Einstufungen im FEP-Katalog sind die Hauptgliederungsebenen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose für den Standort Gorleben die Beschreibung der Rahmenbedingungen, der wahrscheinlichen Entwicklungen sowie der wenig wahrscheinlichen oder auszuschließenden Standortentwicklungen. In diesen Ebenen wurde eine Unterteilung der Rahmenbedingungen und Prozesse vorgenommen, die mit den Erläuterungen der überregionalen oder an der Oberfläche wirkenden Entwicklungen beginnt, darauf folgen die Prozesse im Deck- und Nebengebirge, das hydrogeologische System und abschließend die Beschreibung der Vorgänge im Salinar des Salzstocks Gorleben.

3 Rahmenbedingungen am Standort Gorleben

Unter Rahmenbedingungen werden Merkmale verstanden, welche die derzeitigen geomorphologischen, geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten am Standort Gorleben beschreiben und somit die Ausgangssituation für die zukünftigen Entwicklungen darstellen. Über diese Zusammenstellung hinaus wird auch die vergangene Entwicklung erläutert, die zum heutigen Stand geführt hat. Daraus lässt sich, entsprechend des Aktualitätsprinzips, ableiten, wie die Entwicklung am Standort in der Zukunft verläuft. In diesem Kapitel wird vor den standortspezifischen Merkmalen auch das überregional wirkende Klima erläutert, da es in viele Prozesse steuernd eingreift oder als wichtiger Auslöser zu werten ist.

3.1 Klima

Ein Schwerpunkt bei der Erläuterung des überregional wirkenden Klimas ist die Zusammenstellung und Beschreibung der nachzeitigem Forschungsstand (s. a. /IPC 01/ und /IPC 07/) als wichtig eingestuft, beeinflussenden Faktoren. Deren kurze Beschreibung erfolgt, da auf einige dieser Faktoren in geologischen Prozessen Bezug genommen wird. Die konkreten Einflüsse des Klimas auf diese Prozesse werden in den entsprechenden Kapiteln behandelt. Außerdem erfolgt eine Darstellung des Paläo- und derzeitigen Klimas am Standort Gorleben und auf dieser Grundlage eine Extrapolation der klimatischen Entwicklung in die Zukunft.

Im Verlauf der Erdgeschichte unterlag das Klima ständigen z. T. auch extremen Änderungen, die insbesondere bei Koppelungen und einer weiteren Verstärkung durch Rückkoppelungen (v. a. Albedo) mehrerer Einflussfaktoren entstanden. Als natürliche Auslöser der Klimaänderungen kommen die nachfolgenden Faktoren in Frage:

- Erdbahnparameter, mit der Neigung der Erdachse und Änderungen der Erdbahnelemente (Milanković-Zyklus),
- Änderung der primären Sonneneinstrahlung,
- Plattentektonik, also kontinentale Drift, Verteilung von Kontinenten und Ozeanen, Veränderung der großen Meeresströmungen,
- Gebirgsbildung, Vulkanismus, Verwitterung,

- atmosphärische Parameter, wie Zusammensetzung der Atmosphäre mit Wasserdampf-, Kohlendioxid-, Methananteil und anderen Treibhausgasen.

Derzeit sind noch weitere mögliche Einflüsse auf das Klima Gegenstand der Forschung, wie z. B. die Kippung der Erdbahnebene oder der Einfluss von Gezeitenwirkungen auf Meeresströmungen (s. a. Kapitel 3.1.10). Neben den natürlichen Faktoren werden auch anthropogene Einflüsse auf das Klima und deren Auswirkungen erforscht. Aufgrund der engen Verknüpfung mit den atmosphärischen Parametern (Kapitel 3.1.5), werden die möglichen anthropogenen Anteile dort erläutert.

3.1.1 Erdbahnparameter (Milanković-Zyklen)

Sowohl die Umlaufbahn der Erde um die Sonne als auch die Neigung der Erdachse zeigen periodische Schwankungen (Abb. 3.1), in deren Folge sich die Energieeinstrahlung der Sonne auf die Erde und damit das Klima ändert. Zusammengefasst werden sie in den Milanković-Zyklen, die nachfolgend erläutert werden.

- **Exzentrizität:** Maß für die Abweichung der Erdumlaufbahn um die Sonne (leicht elliptisch bis fast kreisrund, Ellipsengröße variabel). Abhängig von der Entfernung der Erde zur Sonne verändert sich die solare Einstrahlung und führt so zu globalen Temperaturänderungen.
Die Zyklusdauer beträgt etwa 100.000 Jahre.
- **Obliquität:** Schwankung der Erdachsenneigung (ca. 22 bis 25° Abweichung von der Senkrechten). Dies hat Einfluss auf die Ausprägung der Jahreszeiten und führt bei größerer Neigung zu kälteren Wintern und wärmeren Sommern und bei geringerer Neigung zu einem verminderten Unterschied zwischen polarer und äquatorialer Sonneneinstrahlung.
Die Zyklusdauer beträgt etwa 41.000 Jahre.
- **Präzession:** „Trudeln“ der Erdrotationsachse um die Senkrechte. Daraus resultiert, dass die Jahreszeitenwechsel nicht immer am gleichen Punkt der Erdumlaufbahn eintreten und entsprechend stärker oder schwächer ausfallen.
Die Zyklusdauer beträgt etwa 22.000 Jahre.

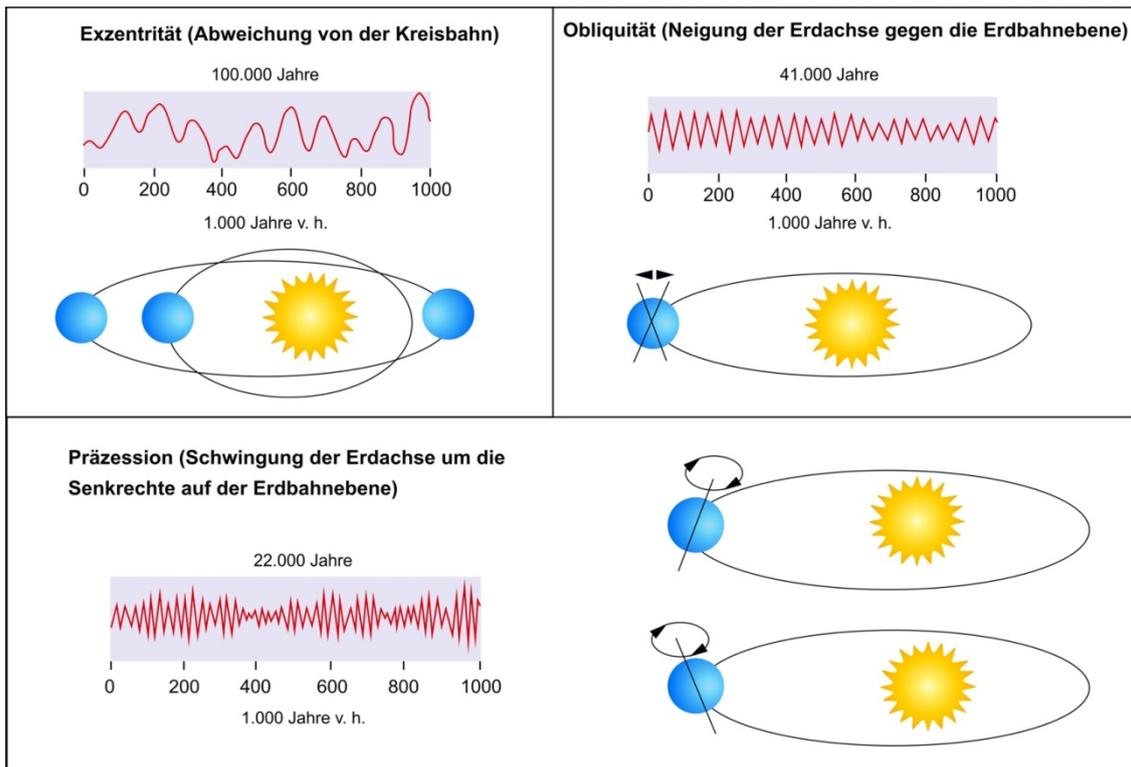


Abb. 3.1 Komponenten der Milanković-Zyklen (geändert nach /ZAC 01/)

Auf Basis der Milanković-Zyklen wird eine Schwankungskurve der Sonneneinstrahlung berechnet, indem die einzelnen Komponenten überlagert werden. Das Ergebnis dieser Berechnung korreliert mit den Kaltzeit-Warmzeit-Zyklen der Erdgeschichte, weshalb ein enger Zusammenhang mit der globalen Klimaentwicklung angenommen wird. Allerdings hat im Laufe der Erdgeschichte ein Wechsel in der Zyklusdauer der Kalt- und Warmzeiten stattgefunden. Bis vor etwa 800.000 Jahren (Unterpleistozän) betrug diese Zyklusdauer im Mittel ungefähr 40.000 Jahre. Erst danach stellte sich die mit den Milanković-Zyklen gut korrelierende Dauer von etwa 100.000 Jahren ein, die bis heute vorherrscht. Dies verdeutlicht, dass auch andere Faktoren die Klimaänderungen beeinflussen.

3.1.2 Primäre Sonnenstrahlung

Einen korrelierbaren zyklischen Einfluss auf das globale Klima hat auch die primäre Sonneneinstrahlung. Schon geringe und kurz andauernde Änderungen, wie z. B. die 11-jährigen Sonnenfleckenzyklen, können drastische Klimawechsel erzeugen. Phasen mit geringer Fleckenanzahl gehen mit kälteren Klimaperioden einher, da die Bildung von Sonnenflecken mit einer erhöhten Energieabstrahlung verbunden ist, die bei feh-

lender Fleckenbildung entsprechend erniedrigt ist. Ein Beispiel für einen verringerten Energieeintrag ist das Maunder-Minimum während des 17. und 18. Jahrhunderts, das auch als „Kleine Eiszeit“ bezeichnet wird.

Neben den Sonnenflecken werden auch andere Einflüsse auf die Menge der auf der Erde eintreffenden primären Sonnenstrahlung kontrovers diskutiert. In einem Artikel von /SCK 07/ wird dabei auf den Einfluss von lokalen Änderungen in der interstellaren Materie eingegangen, die mit Änderungen der kosmischen Strahlung einhergeht. In welchem Maß die geänderte kosmische Strahlung das Klima beeinflusst, ist jedoch noch ungeklärt.

3.1.3 Plattentektonik (Kontinentaldrift)

Über den gesamten Verlauf der Erdgeschichte ändern sich durch die plattentektonisch hervorgerufene Kontinentaldrift Verteilung und Lage der Kontinente und Ozeane sowie die davon abhängigen Meeresströmungen, was zu einer langfristigen Beeinflussung des globalen Klimas führt. Klimawirksam ist dabei das Reflexionsvermögen (Albedo) von Landmassen, Eis und Schnee sowie von Wasserflächen, die die Energie der Sonnenstrahlung unterschiedlich stark aufnehmen und reflektieren (Abb. 3.2).

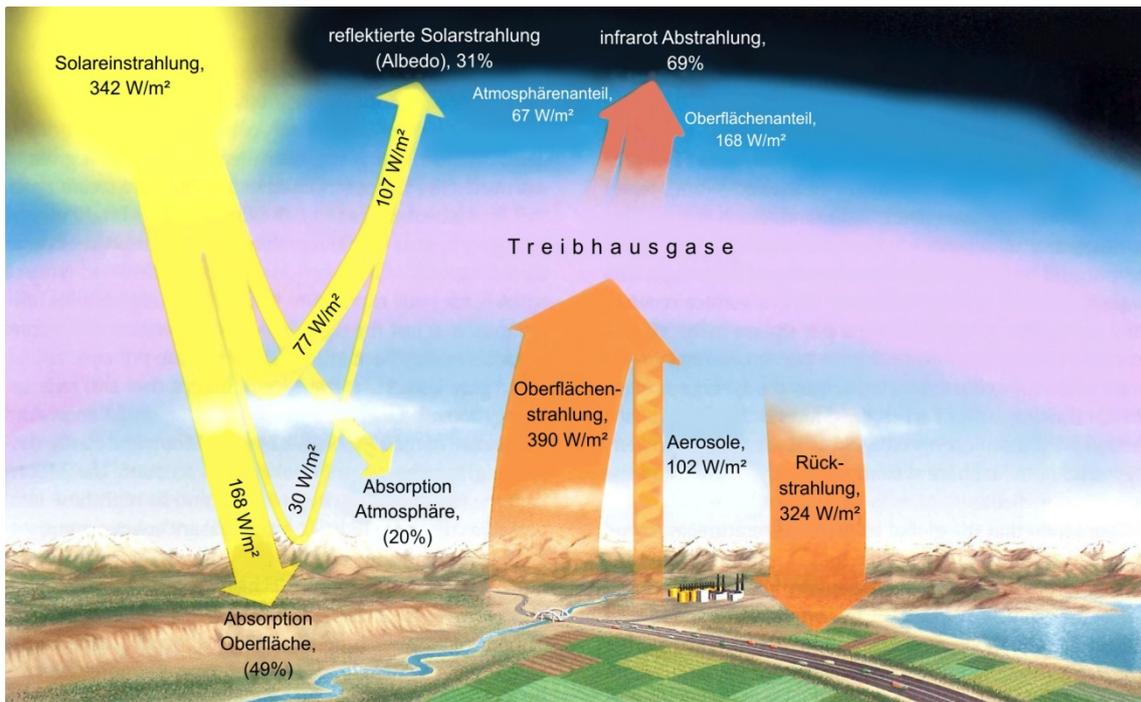


Abb. 3.2 Globale Strahlenbilanz (geändert nach /GRO 10/)

Bei den Albedowerten werden für verschiedene Oberflächen unterschiedliche Reflektionsintensitäten der eintreffenden Globalstrahlung erreicht. Die nachfolgende Liste stellt eine beispielhafte Auswahl der in /KAP 09/ veröffentlichten Werte dar:

- Wasserflächen (Einfallswinkel der Sonnenstrahlung $40 - 50^\circ$) 7 bis 10 %
- trockene Sandflächen 35 – 40 %
- Gras-/Getreideflächen 10 – 25 %
- Laubwald 10 – 20 %
- Schnee 75 – 95 % (frisch) und 40 – 70 % (alt)
- See-Eis 30 – 40 %

Die unterschiedlichen Werte zeigen an, dass auch das Verhältnis zwischen Land- und Wasserfläche an der Erdoberfläche über die Albedo eine Rolle für die Klimaentwicklung spielt. Ebenso ist die globale Lage der Landmassen und die Bedeckung mit Eis und Schnee eine wichtige Einflussgröße. Landmassen in Polnähe, wie z. B. heute die Antarktis, fördern die Entstehung von Kaltzeiten, indem sie bewirken, dass Niederschläge dort verstärkt als Schnee fallen und Eis bilden, wodurch die Albedo erhöht wird. Diese Bindung von Wasser als Eis hat jedoch zur Folge, dass der Meeresspiegel

sinkt und die globale Wasserfläche und die Verdunstung vermindert wird. Daraus resultieren eine Abnahme der mittleren Niederschlagsmengen und schließlich ein verlangsamtes Wachstum der Eis- und Schneeflächen. Liegen an den Polen keine Landmassen sind tiefe globale Jahresmitteltemperaturen nötig, um dort die Bildung von Eisflächen zu ermöglichen. Die Erhöhung der Albedo in diesen Bereichen führt dann ebenfalls zu einer Verstärkung der Abkühlung und damit zu einem weiteren Wachstum der Eisflächen.

Einfluss auf das Klima haben auch die als „globales Förderband“ bezeichneten umlaufenden Meeresströmungen (Abb. 3.3), die durch Temperatur- und Salzgehaltunterschiede, die die Dichte des Wassers ändern, angetrieben werden. Ein Beispiel dafür ist der atlantische Golfstrom, der warmes Wasser weit nach Norden transportiert und dort für höhere Jahresmitteltemperaturen sorgt, die die Vegetation fördern und die Ausbreitung von Schnee und Eis behindern. Ändert sich durch die Kontinentaldrift die Lage und Größe von Meeresverbindungen wird der Transport von warmen und kalten Wassermassen verlagert und das Klima entsprechend beeinflusst.

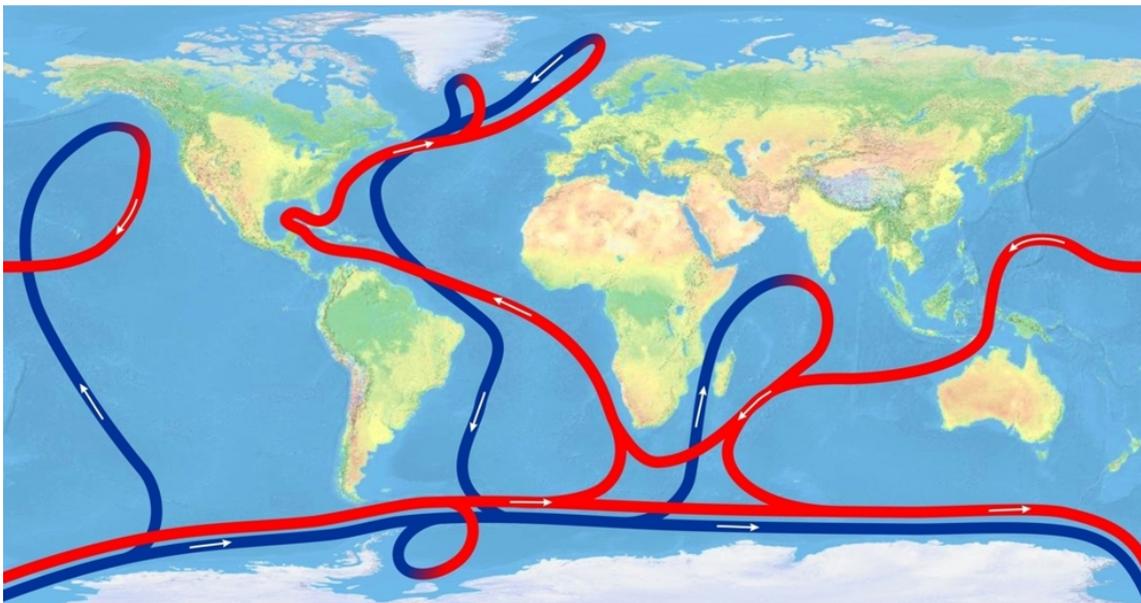


Abb. 3.3 Meeresströmungen „Globales Förderband“

Die roten Linien stellen warme, salzarme Meeresströmungen an der Oberfläche dar und die blauen kalte, salzreiche Strömungen in der Tiefe

3.1.4 Gebirgsbildung und Vulkanismus

In direktem Zusammenhang mit der Kontinentaldrift stehen auch die klimawirksamen Prozesse der Gebirgsbildung und des Vulkanismus.

Weiträumige Gebirgsbildungen mit hohen Hebungsraten, wie z. B. beim Himalaya, können globale Umlenkungen von Luftströmungen in der Atmosphäre verursachen. Als Folge davon ändert sich langfristig die Verteilung von kalten und warmen Luftmassen, was wiederum Einfluss auf Art und Menge von Niederschlägen hat. Zudem sind in den entstandenen Hochgebirgsregionen Gletscher und ausgedehnte Schneefelder mit einer hohen Albedo zu erwarten, die globale Abkühlungsprozesse unterstützen.

Vulkanismus (s. a. Kapitel 5.2.1) greift vor allem dann kurz- bis langfristig in das Klimageschehen ein, wenn freigesetzte Asche und Gase in große Höhen bis zur Stratosphäre transportiert werden. Aus den Gasen können sich dabei Aerosole bilden, die ebenso wie die Aschepartikel die Energieeinstrahlung der Sonne vermindern. Ein Beispiel für eine dadurch hervorgerufene kurzfristige Abkühlung ist das „Jahr ohne Sommer“, das einem Ausbruch des Vulkans Tambora auf der indonesischen Insel Sumbawa im April 1815 folgte. Andererseits wird in Zeiten mit global verstärkter vulkanischer Aktivität Kohlendioxid frei, das sich in der Atmosphäre anreichert und zu einer Erwärmung führt (s. Kapitel 3.1.5). Dieser natürliche Treibhauseffekt wirkte in der Vergangenheit während der Kreide und während des Paläogens.

3.1.5 Atmosphärische Parameter

In der Erdatmosphäre sind Inhaltsstoffe, wie „Treibhausgase“ (z. B. Kohlendioxid) und daran gekoppelte Stoffkreisläufe, Wasserdampf (Wolken) und Aerosole vorhanden und klimawirksam.

Ein klimawirksamer Bestandteil, der bereits in höheren Bereichen der Atmosphäre als Schicht angereichert ist und einen Teil des Sonnenlichts reflektiert, ist das Ozon (Abb. 3.2). „Treibhausgase“ wirken hingegen wie Glasscheiben eines Treibhauses, die die Solarstrahlung zur Erdoberfläche durchlassen, die dort abgestrahlte Wärmestrahlung jedoch größtenteils zurückhalten. Sie sind Bestandteil der oberflächennahen Erdatmosphäre und oft in komplexe Stoffkreisläufe eingebunden. Exemplarisch wird nachfolgend die Wirkungsweise des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2) erläutert, das die Infrarotstrahlung der Sonne absorbiert und so zur Erwärmung der Erde beiträgt.

Derzeit liegt der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre bei 0,038 % mit einer steigenden Tendenz, die auch auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen ist. Global ist es in den natürlichen Kohlenstoffkreislauf eingebunden, dessen Hauptkomponenten in Abb. 3.4 dargestellt sind. Daraus wird ersichtlich, dass es auch in langfristig wirksame geologische Prozesse, wie die Kalkausfällung und die Verwitterung eingebunden ist. Im Verlauf der Erdgeschichte variierte der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre durch diese natürlichen Prozesse zu allen Zeiten stark. Hohe Konzentrationen erreichte es z. B. im Zeitraum von 600 bis 400 Millionen Jahren vor heute und zwischen 200 bis 150 Millionen Jahren.

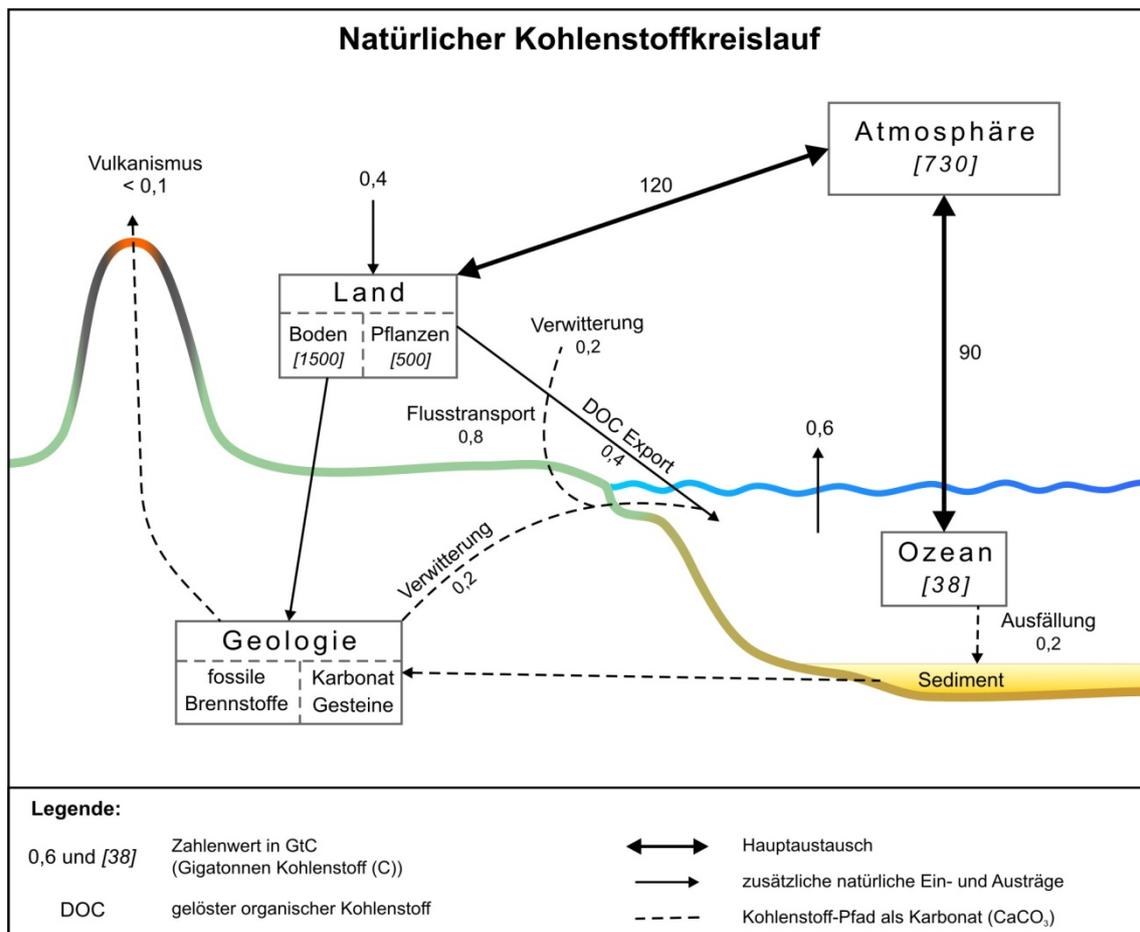


Abb. 3.4 Hauptkomponenten des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs (geändert nach /IPC 01/)

Der Einfluss von Wolken auf das Klima ist abhängig von deren Art und Höhenlage. Hohe dünne Wolken tragen zur Erderwärmung bei, indem sie die Solarstrahlung fast unreflektiert passieren lassen, die an der Erdoberfläche abgestrahlte Wärmestrahlung jedoch teilweise zurückhalten. Im Gegensatz dazu haben tiefe und meist dickere Wolken eine höhere Albedo und vermindern somit die Oberflächenerwärmung. Außerdem

sind sie aufgrund der höheren Umgebungstemperatur wärmer und strahlen deshalb mehr Wärmeenergie ins All ab. Damit leisten tiefe Wolken einen Beitrag zur Abkühlung der Erde /NAS 99/.

Auf ähnliche Weise am Klimageschehen beteiligt sind auch Aerosole, bei denen es sich um sehr feine feste oder flüssige Partikel handelt, die natürlich (z. B. Vulkanasche) oder durch menschliche Einflüsse (z. B. Ruß aus Abgasen) in der Atmosphäre vorkommen. Sie wirken einerseits direkt über Reflexion oder Absorption der Solarstrahlung auf das Klima und andererseits indirekt über die Beeinflussung der Wolkenbildung, z. B. als Kondensationskern (/IPC 07/).

Anthropogene Einflüsse zeigen sich bei den atmosphärischen Parametern vor allem beim Eintrag von Treibhausgasen und Aerosolen. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe führt sowohl zu einem CO₂- als auch zu dem bereits genannten Ruß-Ausstoß. Hinzu kommt auch eine erhöhte Produktion des Treibhausgases Methan durch die Landwirtschaft. Inwieweit diese Einflüsse die Klimaentwicklung beeinflussen ist Gegenstand der aktuellen Forschung und kann derzeit noch nicht abschließend bewertet werden. In einigen in die Zukunft gerichteten Klimamodellierungen wurden diese Parameter als Eingangsdaten bereits berücksichtigt und zeigen je nach angenommener Konzentration unterschiedliche Auswirkungen (→ Kapitel 3.1.7 und Abb. 3.7).

3.1.6 Paläoklima als Prognosebasis der zukünftigen Entwicklung

Die vorangehend erläuterten Prozesse greifen alle in das Klimageschehen ein und führten zu einem stark variierenden Paläoklima. Innerhalb der letzten ca. 550 Millionen Jahre konnten z. B. vier große global wirkende Eiszeit- mit dazwischen liegenden Warmzeit-Phasen identifiziert werden. Vor allem bei der Erforschung des jüngeren Paläoklimas, das sich durch einen steten Wechsel von Kalt- und Warmzeiten auszeichnet, kommen verschiedene Methoden zum Einsatz. In Eiskernen z. B. gibt das gemessene Sauerstoffisotopen-Verhältnis Auskunft über den Klimaverlauf und die Dauer von Kaltzeiten. In Sedimenten werden zur entsprechenden Bestimmung des Sauerstoffisotopen-Verhältnisses Mikrofossilien genutzt. Abb. 3.5 zeigt eine Gegenüberstellung der am Eisbohrkern DOME C (Antarktis), an Seesedimenten im südbaltischen Raum und an der ODP-Bohrung 677 im Atlantik (Äquator) ermittelten Klimaänderungen. Alle Kurven zeigen gute Übereinstimmungen in ihren Verläufen. In Kurve 1 wurden anhand der Daten aus dem Eisbohrkern die Temperaturabweichungen zur heutigen Jahresmittel-

temperatur ermittelt. Das Maximum der Abweichung lag demnach für Warmzeiten bei ca. 4,5 °C und das Minimum für Kaltzeiten bei unter -10 °C. Im betrachteten Zeitraum fallen diese Abweichungen jedoch auch schwächer aus, ohne dass ein Trend erkennbar wäre, der typische Kalt- und Warmzeit-Temperaturen anzeigt. Eindeutige kalte oder warme Klimaphasen wurden in diesen Kurven als Marine Isotope Stages (MIS) durchnummeriert.

Des Weiteren kann der Abbildung entnommen werden, dass die Klimaänderungen oft sprunghaft in einem kurzen Zeitraum abliefen. Auffallend ist auch, dass Warmzeiten deutlich kürzer andauern als Kaltzeiten und meist durch einen plötzlichen Beginn gekennzeichnet sind. Der Temperaturanstieg erfolgt dabei sehr schnell, wo hingegen der Übergang zu einer Kaltzeit oft schrittweise und mit Schwankungen vollzogen wird. In den Kaltzeiten werden die tiefsten Temperaturen meist gegen Ende der Phase erreicht.

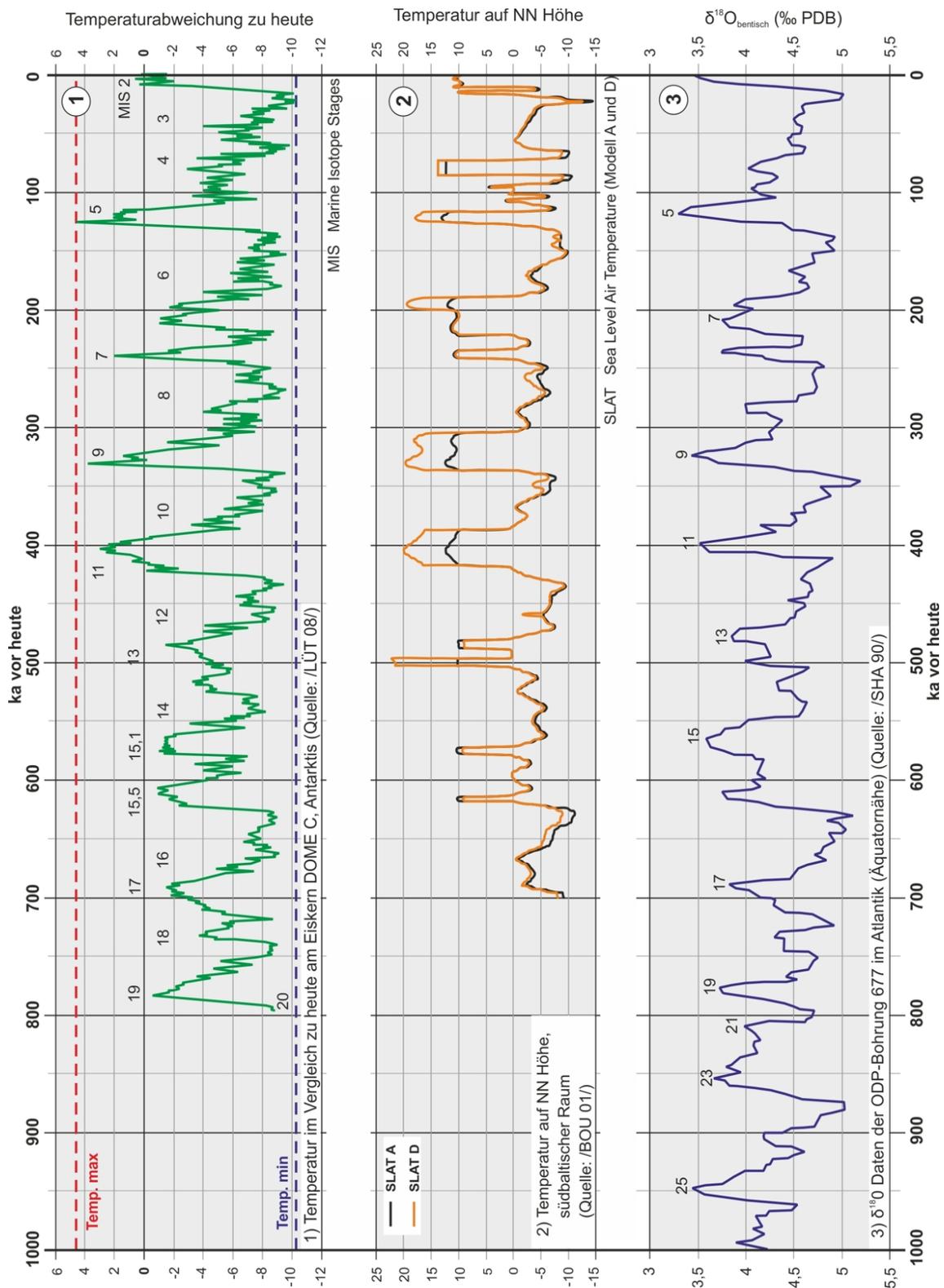


Abb. 3.5 Gegenüberstellung von Klimaverläufen, die global an verschiedenen Stellen ermittelt wurden

Auf Basis dieser Klimakurven und anhand der Kenntnisse über die verschiedenen Eingangsparameter aus den Prozessen, die die Klimaentwicklung bewirken, kann der Kli-

maverlauf in die Zukunft gerichtet modelliert werden. Eine Zusammenstellung von verwendeten Grundlagen und den daraus resultierenden Ergebnissen unterschiedlicher Klimamodelle werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

Auch im VSG-Projekt werden Klimaverläufe als Eingangsparameter für Modellierungen genutzt. So werden in AP 9 z. B. Klimadaten verwendet um die Auswirkungen unterschiedlicher Kaltzeitausprägungen auf den Untergrund und vor allem auf den Salzstock Gorleben zu modellieren. Die verwendeten Klimaverläufe stammen aus der Veröffentlichung /DEL 07/ und geben den Klimaverlauf der letzten 120.000 Jahre und damit die weichselzeitlichen Bedingungen wieder. Darauf aufbauend wurden drei typische Klimaszenarien für Permafrost, Eisrandlage und Eisüberdeckung am Standort Gorleben für die Modellrechnungen abgeleitet. Die Beschreibungen der Vorgehensweise und die entsprechenden Modelle werden in den Berichten zu AP 9 erläutert.

3.1.7 Grundlagen und Ergebnisse von unterschiedlichen modellgestützten Klimaprognosen

Ein Ziel der internationalen Klimaforschung ist es, Modelle aufzustellen, mit denen eine Prognose des zukünftigen regionalen und globalen Klimas möglich ist. Diese Modelle wurden im Lauf der Zeit immer weiter verfeinert und durch zahlreiche Einflussfaktoren ergänzt. Abb. 3.6 gibt einen Überblick über die historische Entwicklung der Klimamodellierung.

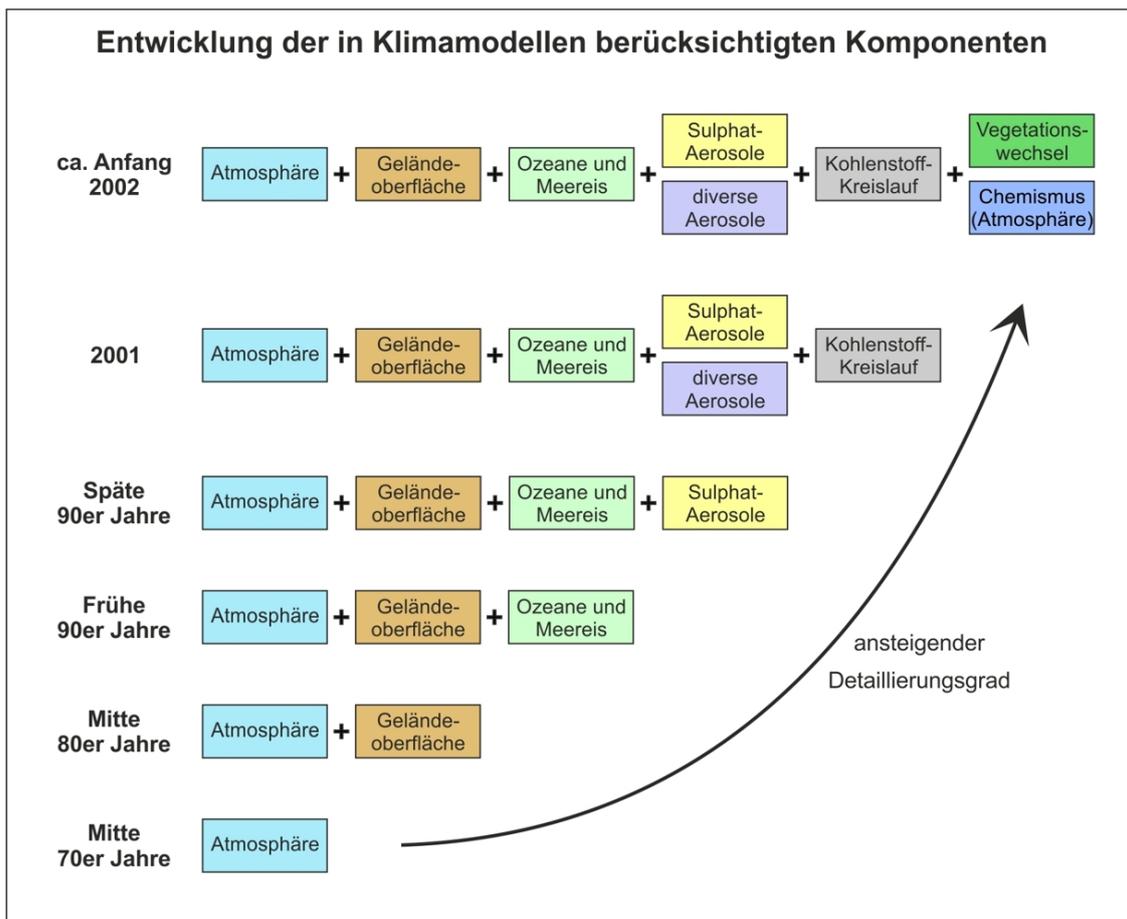


Abb. 3.6 Entwicklung der in Klimamodelle eingehenden Komponenten seit Mitte der 1970er Jahre (geändert nach /IPC 01/, Box 3, Fig. 1)

Aus der Übersicht geht hervor, dass in den jeweiligen Modellen sehr unterschiedliche Eingangsparameter verwendet wurden, die letztlich auch in unterschiedlichen Klimaverläufen resultierten. Neben den Eingangsparametern unterscheiden sich die Modelle auch in den verwendeten numerischen Verfahren und ihrer räumlichen Auflösung. Je komplexer ein Modell ist, desto mehr Möglichkeiten bietet es einzelne Parameter zu variieren oder miteinander zu koppeln. Die Auswirkungen davon können das Modellergebnis stark beeinflussen. Daher erfolgt eine Validierung solcher Modelle darüber, dass zunächst die vergangene Klimaentwicklung in Berechnungen simuliert wird. Ist das Ergebnis ausreichend dicht an den dort gemessenen Werten, wird davon ausgegangen, dass die Randbedingungen und Eingangsparameter des Modells auch eine realistische Berechnung der zukünftigen Entwicklung ermöglichen.

Die nachfolgend beispielhaft genannten Modelle Imbrie & Imbrie (1980), ACLIN, LLN 2D NH und BIOCLIM wurden dem Bericht /CED 04/ entnommen und sind dort ausführlicher beschrieben. In Abb. 3.7 sind die mit den jeweiligen Modellen erstellten

Klimaprognosen auf einer Zeitleiste von heute bis in 125.000 Jahren vergleichend gegenübergestellt.

Imbrie & Imbrie (1980)

Ziel dieser Modellierung war, unter Berücksichtigung der orbitalen Zyklen, das Klima der letzten 500.000 Jahre zu simulieren und auf die Zukunft zu übertragen. Als Ergebnis wurde das globale Eisvolumen berechnet. Die Berechnung des Eisvolumens erfolgte anhand der $\delta^{18}\text{O}$ -Verhältnisse, die in der Vergangenheit bestimmten Klimazuständen und somit auch Vereisungen entsprachen.

ACLIN (1981)

Die Modellierung stellt die Hauptklimaänderungen im Mittleren und Oberen Pleistozän bis in die nahe Zukunft dar. Basis sind ebenfalls die orbitalen Zyklen jedoch mit einer definierten Startkonstellation, die sich jeweils zu Beginn der letzten drei Interglaziale wieder einstellte.

LLN 2D NH

Das kombinierte 2D-Modell für die nördliche Hemisphäre wurde in den 1990er Jahren an der Lovaine-la-Neuve Universität in Belgien entwickelt. Es berücksichtigt neben den orbitalen Zyklen nach Milanković auch die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre. Der CO_2 -Gehalt ging als Konstante ein, so dass etwaige Anstiege durch Emissionen aus fossilen Brennstoffen nicht simuliert wurden.

BIOCLIM

Das Projekt BIOCLIM wurde von der ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs) im Rahmen der Standortbewertung für HAW-Abfälle initiiert. Es wurden drei Modellansätze definiert, in die die CO_2 -Emission in die Atmosphäre in unterschiedlicher Höhe eingeht. Basierend auf diesen Ansätzen wurden für den Standort Äspö (Schweden, in /CED 04/) Klimaentwicklungen berechnet, die in Abb. 3.7 dargestellt sind. Diese Verläufe sind nicht direkt auf den weiter südlich gelegenen Standort Gorleben übertragbar, geben jedoch einen generellen Trend wider, wann unter diesen Bedingungen Kalt- und Warmzeiten erwartet werden. Dem ersten Modellansatz (BIOCLIM 1, Abb. 3.7) werden der natürliche CO_2 -Gehalt und dessen aus der Vergangenheit bekannte natürliche Schwankung zugrunde gelegt. Die Variation im zweiten An-

satz (BIOCLIM 2, Abb. 3.7) besteht darin, dass eine geringe Erhöhung des Gehalts durch fossile Brennstoffe eingeht. Angenommen wurde eine zusätzliche Emission von 3.160 GtC (Gigatonnen Kohlenstoff) in den Jahren 2000 bis 2300. Im dritten Ansatz (BIOCLIM 3, Abb. 3.7) schließlich wurde eine hohe Beeinflussung durch fossile Brennstoffe angenommen, die bei einer zusätzlichen Emission von 5.160 GtC im Zeitraum 2000 bis 2300 liegt.

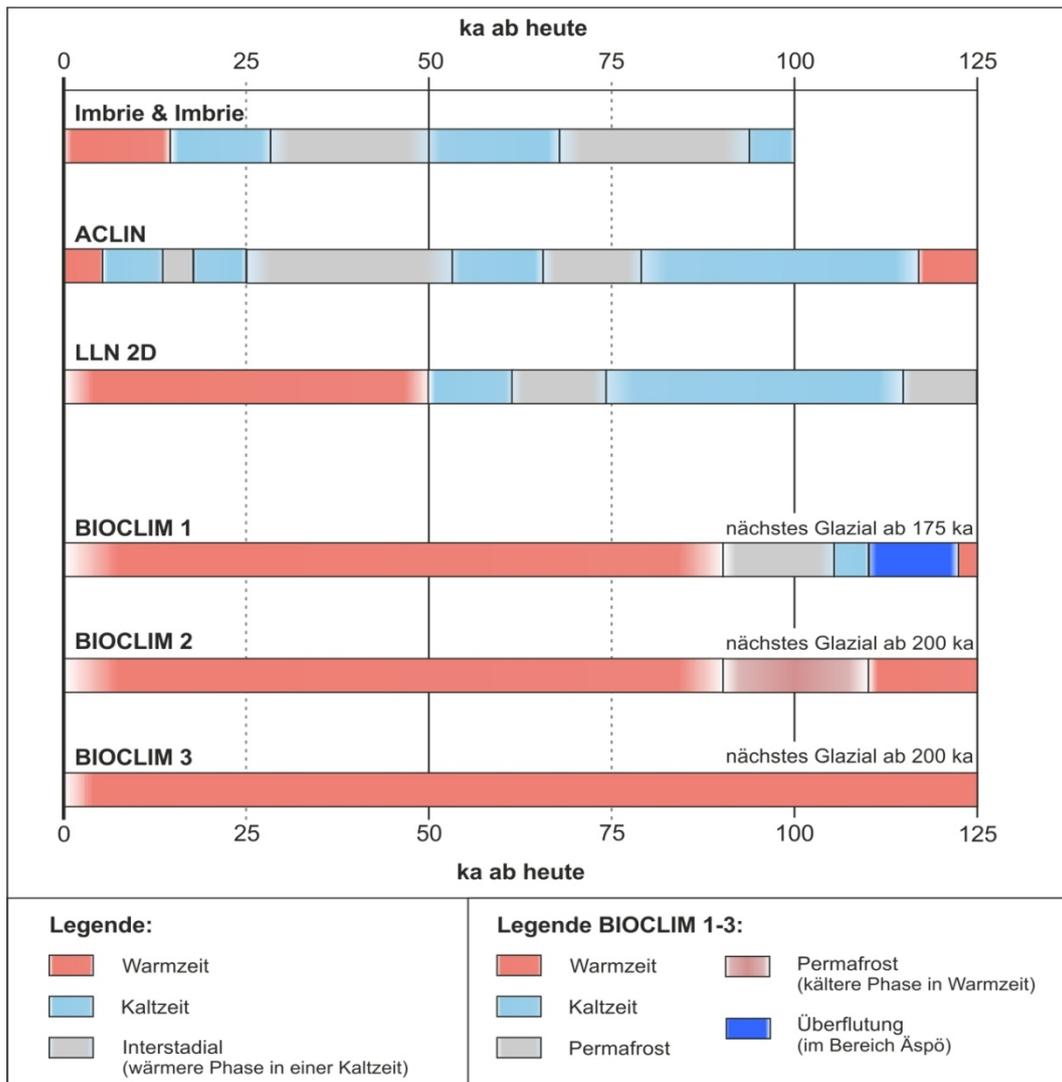


Abb. 3.7 Klimaentwicklungen in den nächsten 125.000 Jahren basierend auf verschiedenen Modellen (geändert nach /CED 04/)

3.1.8 Paläoklima am Standort Gorleben

Für die geowissenschaftliche Langzeitprognose am Standort Gorleben wird zunächst die Klimavergangenheit der letzten eine Million Jahre betrachtet, da in dieser Zeit

hauptsächlich der 100.000-Jahre-Zyklus wirksam war und Daten vorliegen, anhand derer die Auswirkungen von Kalt- und Warmzeiten abgelesen werden können. Damit stellt dieser Zeitabschnitt eine gute Basis für eine Projektion der zukünftigen Klimaentwicklung gleicher Dauer dar. Abb. 3.8 stellt drei für den norddeutschen Raum ermittelten Klimaverläufe und einen Zusammenschnitt der globalen Entwicklung für diesen Zeitabschnitt gegenüber. Dargestellt sind in drei Säulen die jeweilige stratigraphische Gliederung und die Abfolge von Kalt- (blau) und Warmzeiten (rot) in Norddeutschland. Grundlage dieser zeitlichen Einstufungen sind Ergebnisse von Altersdatierungen, die an Proben aus unterschiedlichen Aufschlüssen mit unterschiedlichen Methoden gewonnen wurden.

In der linken Säule ist in Abb. 3.8 die Einstufung von /LIT 07/ wiedergegeben, die auf Altersdatierungen unterschiedlicher Bearbeitungen basiert, welche miteinander korreliert wurden. Für die Schichten des Bavel- und des Cromer-Komplexes war dies allerdings nicht durchgehend möglich, so dass in diesem Zeitabschnitt keine sicheren Datierungen vorliegen. Das Gleiche gilt für die mittlere Säule, die aus einer Zusammenstellung von Lippstreu aus dem Jahr 2002 stammt und u. a. im Atlas zur Geologie von Brandenburg (/STA 04/) veröffentlicht ist. Im Rahmen der Standorterkundung in Gorleben wurde anhand von Sedimentuntersuchungen ein fast vollständiges stratigraphisches Profil (rechte Säule) der letzten eine Million Jahre aufgenommen (/KÖT 07/). Dabei wurde lediglich im Bereich der Dömnitz-Warmzeit innerhalb der Saale-Kaltzeit eine Schichtlücke identifiziert. Doch auch bei dieser Bearbeitung war eine exakte Datierung der Schichtgrenzen anhand des vorliegenden Materials nicht immer möglich. Ein Vergleich der drei unterschiedlichen stratigraphischen Einstufungen zeigt für die Eem-Warmzeit gute Übereinstimmungen, für die Holstein-Warmzeit jedoch wurde in /LIT 07/ ein jüngeres Alter angenommen. Bis ca. 200.000 Jahre vor heute korrelieren die Einstufungen außerdem gut mit der Klimakurve aus dem Antarktis-Bohrkern (grüne Kurve im oberen Abschnitt), davor treten zum Teil deutliche Abweichungen auf, die auch auf fehlende Datierungsmöglichkeiten oder unzureichendes Probematerial zurückzuführen sind.

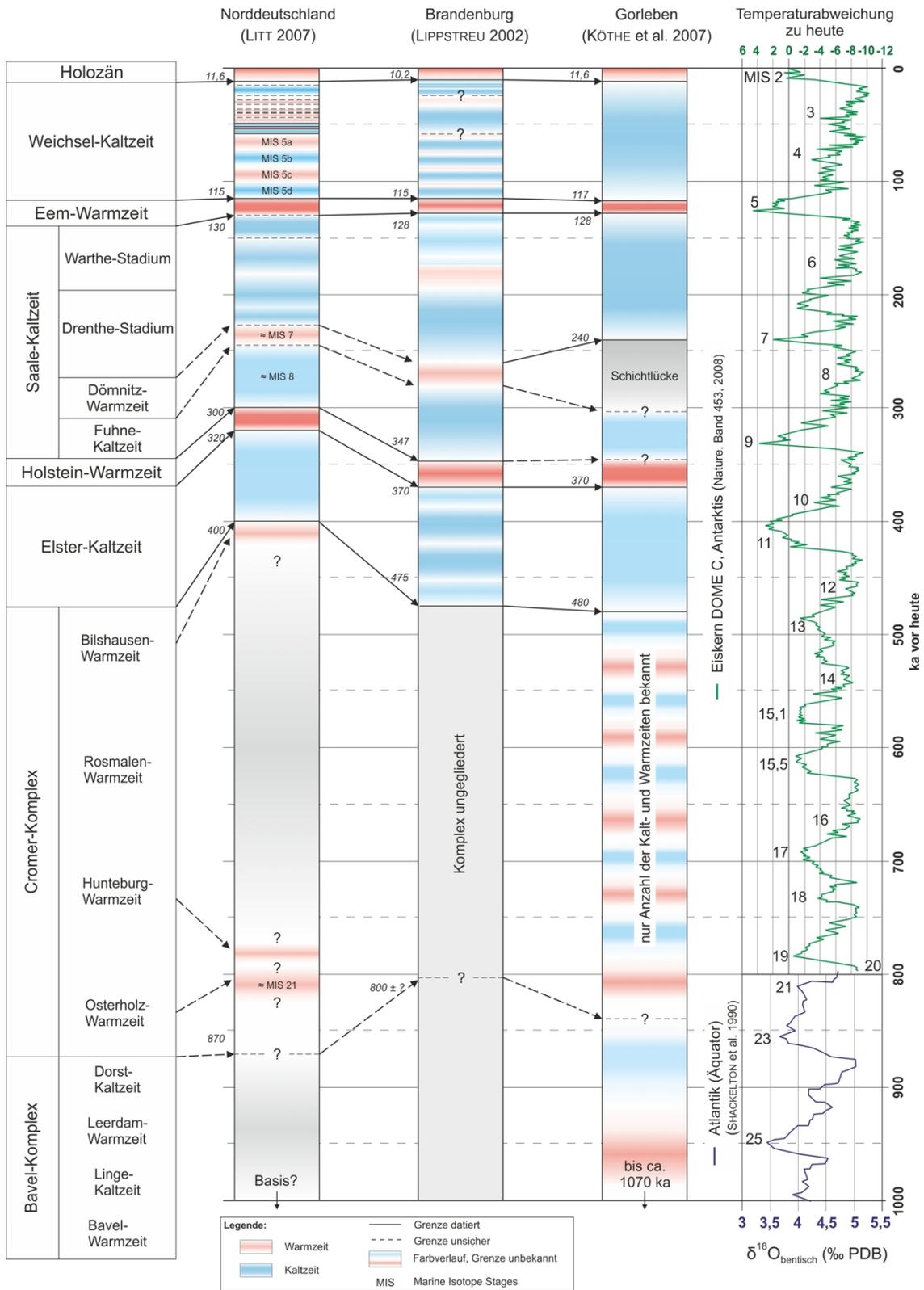


Abb. 3.8 Vergleich von mehreren Datierungen der klimatischen Entwicklung in Norddeutschland mit einem global identifizierten Klimaverlauf

MIS: durchnummerierte Marine Isotope Stages

Aus den Erkundungsergebnissen ergibt sich für den Standort Gorleben zusammengefasst eine klimatische Entwicklung, die im PrÄglazial (Beginn QuartÄr bis Elster-Kaltzeit) von Kalt- und Warmzeit-Phasen des Cromer- und Bavel-Komplexes geprÄgt ist. Die einzelnen Phasen konnten nicht genau datiert werden, sie erreichten jedoch nicht die IntensitÄt der Elster- oder Saale-Kaltzeit. Wie in der Kurve der globalen Entwicklung in Abb. 3.8 zu sehen ist, lagen die Temperaturen zur Zeit des Cromer-Komplexes durchgehend unter dem heutigen Niveau und zeigten dabei eine vergleichsweise geringe Schwankungsbreite. Der Abschnitt des Bavel-Komplexes wird in der globalen Kurve durch $\delta^{18}\text{O}$ -Daten aus marinen Sedimenten wiedergegeben, die nicht so hochauflösend sind und keine genaue Temperaturangabe darstellen.

In der Elster-Kaltzeit lag das Standortgebiet zum ersten Mal unter Eisbedeckung. Die Dauer dieser Kaltzeit wird auf ca. 110.000 Jahre geschÄtzt, wobei insbesondere die Endphase nicht mit der globalen Temperaturkurve korreliert, da sie den Temperaturanstieg um ca. 400.000 Jahre vor heute (MIS 11) nicht widerspiegelt. Das Gleiche gilt für die folgende Holstein-Warmzeit, die mit einer Dauer von ungefÄhr 20.000 Jahren angesetzt wird. Sie liegt auf der globalen Temperaturkurve in einem Kaltzeit-Bereich zwischen MIS 10 und 9. Anhand von Pollenanalysen wurde nachgewiesen, dass das Klima am Standort warm genug war, um eine Bewaldung zu ermögliehen. Auch eine Phase mit brackisch-mariner Beeinflussung ist fossil belegt. Das Holstein-Meer breitete sich dabei von der Unterelbe her nach S¼den aus und überflutete vermutlich die morphologisch tiefer liegenden Bereiche der elsterzeitlich angelegten Gorlebener Rinne.

Es folgte die Saale-Kaltzeit, die mehrere Stadiale und Interstadiale aufweist. Sie beginnt mit der Fuhne-Kaltzeit, deren Beginn und Ende nicht genau datiert werden konnten. Vor allem das Ende ist nicht belegt, da der Standort Gorleben für die Dömnitz-Warmzeit eine Schichtlücke aufweist. Die globale Temperaturentwicklung zeigt für diesen Zeitabschnitt eine Temperaturerhöhung (MIS 9), die ebenso nicht mit der Fuhne-Kaltzeit korreliert. Des Weiteren konnten Ablagerungen nachgewiesen werden, die die Drenthe- und Warthe-Stadien belegen, in denen am Standort eine Gletscherüberfahung stattfand. Diese war jedoch schwächer ausgeprÄgt als in der Elster-Kaltzeit. Insgesamt wird für die gesamte Saale-Kaltzeit am Standort eine Dauer von etwa 220.000 Jahren angenommen. Durch Sedimente nur vereinzelt belegt wird für die Eem-Warmzeit eine Dauer von 11.000 Jahren angegeben, die sehr gut mit dem Warmzeit-Abschnitt MIS 5 der globalen Entwicklung übereinstimmt.

Die anschließende Weichsel-Kaltzeit dauerte rund 100.000 Jahre und korreliert ebenfalls gut mit dem global ermittelten Klimaverlauf. Ihre Intensität reichte jedoch nicht aus, um am Standort eine Eisüberdeckung zu erzeugen. Vor ca. 11.000 Jahren begann am Standort schließlich die bis heute vorherrschende Warmzeit-Phase des Holozäns. Weitere Informationen zu den stratigraphischen Einheiten, die am Standort Gorleben in dieser Zeit zur Ablagerung kamen sind in Kapitel 3.3 enthalten und können detaillierter auch dem Standortbericht Teil 2 (/KÖT 07/) entnommen werden.

3.1.9 Ableitung der zukünftigen Klimaentwicklung am Standort Gorleben

Aus den unterschiedlichen Daten der Vergangenheit ergibt sich für die Prognose der zukünftigen Entwicklung des Klimas, dass eine exakte Vorhersage des zeitlichen Verlaufs nicht vorgenommen werden kann. Insbesondere der anthropogene Einfluss, der in der Vergangenheit so nicht vorhanden war, ist mit seinen Auswirkungen, wie in Kapitel 3.1.10 dargelegt, für die Zukunft schwer zu bewerten. Daher werden diese Aspekte für die Ableitung der weiteren Klimaentwicklung am Standort nicht berücksichtigt und die natürliche Entwicklung zugrunde gelegt. Demnach ist mit einem weiteren Wechsel von Kalt- und Warmzeiten zu rechnen, der entsprechend der Vergangenheit in Zyklen abläuft. Für die Ableitung der zukünftigen Entwicklung wird, dem Aktualitätsprinzip folgend (vgl. Kapitel 2), diesem Wechsel der seit 800.000 Jahren vorherrschende 100.000-Jahre-Zyklus zugrunde gelegt. Daraus folgt, dass im Zeitraum von einer Million Jahre mit ca. zehn weiteren Kaltzeiten und dazugehörigen Warmzeiten am Standort Gorleben zu rechnen ist. Die heutige Situation stellt die mittlere Phase einer Warmzeit dar, die nach /FOR 99/ in ca. 10.000 Jahren mit dem Beginn einer neuen Kaltzeit beendet wird. Diese wird in der zugrundeliegenden Modellierung in rund 50.000 Jahren ihr Maximum erreichen. Aussagen darüber wie intensiv eine Kalt- oder Warmzeit in der Zukunft ausfällt, sind derzeit nicht möglich. Grundsätzlich können die Temperaturmaxima und -minima der Vergangenheit wieder auftreten. Für den Standort Gorleben wäre eine Kaltzeit mit der Intensität der Elster-Kaltzeit daher wieder möglich und innerhalb einer Million Jahre sogar wahrscheinlich. Außerdem ist mehrfach sowohl mit Permafrostverhältnissen als auch mit Inlandeisüberdeckung in Gorleben zu rechnen. In warmzeitlichen Phasen kann eine Meeresüberdeckung des Standortes, ähnlich wie in der Holstein-Warmzeit, ebenfalls nicht ausgeschlossen werden (s. Kapitel 4.3.1).

3.1.10 Ungewissheiten bei der Abschätzung der Klimaentwicklung

Die Prognose des zukünftigen Klimas wird von drei Hauptungewissheiten beeinflusst:

1. das Klima beeinflussende und steuernde Komponenten,
2. Kenntnisse über Prozessabläufe und Verzahnungen von Teilprozessen,
3. Leistungsgrenzen von Klimamodellen.

Die Entwicklung des Klimas wird von vielen Komponenten und zahlreichen miteinander verzahnten Teilprozessen gesteuert. Dabei wird beobachtet, dass längst nicht alle Klimaschwankungen der Vergangenheit mit den derzeit bekannten Einflüssen korrelieren. Mögliche Gründe für diese Abweichungen sind Gegenstand aktueller Forschung und werden fachübergreifend kontrovers diskutiert. Und auch bei den wissenschaftlich akzeptierten Auslösern von Klimaänderungen können keine exakten Prognosen darüber gemacht werden, inwieweit sich einzelne Teilprozesse überlagern und dabei verstärken oder abschwächen.

Unbekannt ist z. B., was zu der Umstellung der Kalt- und Warmzeit-Zyklendauer von zuvor im Mittel 40.000 Jahren auf die bis heute wirksamen 100.000 Jahre, vor ca. 800.000 Jahren, geführt hat. Für die Prognose der Klimaentwicklung und der davon abhängigen Prozesse wird davon ausgegangen, dass die heutige Zyklendauer im Mittel so bestehen bleibt. Ungewiss ist jedoch, ob es in der Prognosezeit von einer Million Jahre in der Zukunft zu einer erneuten Änderung der Dauer kommt. Eine Verlängerung der Zyklendauer hätte zur Folge, dass auch Kaltzeiten länger andauern würden. Dadurch könnte eine Vergletscherung des Standortbereichs ebenfalls länger vorliegen. Für den umgekehrten Fall dass sich kürzere Zyklen entwickeln, würde die Dauer einer Kaltzeit eventuell nicht mehr ausreichen, um eine Vergletscherung im Standortbereich zu erzeugen.

Des Weiteren bestehen neben den Ungewissheiten bei der Prognose des genauen zeitlichen Ablaufs der Klimaentwicklung, auch Ungewissheiten in Bezug auf die sich jeweils einstellende Intensität. Ob und in welchem Zeitabschnitt, z. B. eine Kaltzeit vergleichbar mit der Elster-Kaltzeit herrscht, ist mit den heute zur Verfügung stehenden Klimamodellen nicht vorhersagbar. Daher kann die Angabe über Art und Anzahl zukünftiger Kalt- und Warmzeiten nur als Vermutung erfolgen.

Die Komplexität des Systems spiegelt sich auch in den Klimamodellen wider. Zwar ermöglichen immer leistungsfähigere Rechner die Verarbeitung von Modellen mit einer zunehmenden Anzahl von Einflussfaktoren und mit einer hohen räumlichen Auflösung, die Genauigkeit der Prognose wird jedoch auch durch die Kenntnisse der physikalischen Prozessabläufe bestimmt. So erreichen die Modelle zwar einen immer größeren Detaillierungsgrad, doch solange noch zusätzliche Einflüsse auf das Klima und gegenseitige Beeinflussungen von Prozessen erforscht werden, bleiben die Klimaprognosen über derartig lange Zeiträume insgesamt noch unsicher.

Aus den drei Hauptungewissheiten resultieren durch die prozessabhängige Verzahnung zahlreiche weitere Ungewissheiten, wie in Abb. 3.9 dargestellt. Eine Prognose des zukünftigen Klimas für eine Million Jahre ist daher nur vereinfacht möglich.

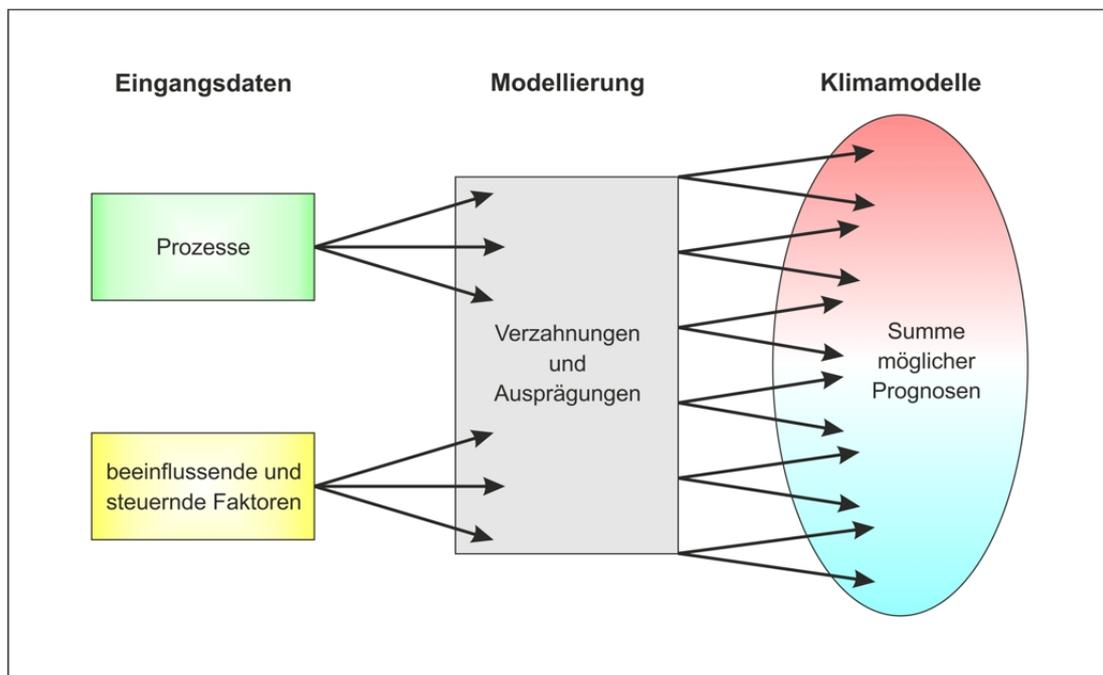


Abb. 3.9 Schema der Vervielfachung der Ungewissheiten bei der Modellierung des zukünftigen Klimas

Neben den Ungewissheiten, die über den gesamten Betrachtungszeitraum aus den natürlichen Einflüssen resultieren, müssen kurzfristig auch die aus den anthropogenen Beeinflussungen betrachtet werden. Dabei können jedoch keine Abschätzungen darüber erfolgen wie lange und in welchem Ausmaß diese stattfinden. Derzeit wird davon ausgegangen, dass es dabei zu einer Erwärmung kommt, die die derzeitige Warmzeit verlängern würde. Eine genaue Angabe über die Dauer dieses Effekts ist ebenfalls

nicht möglich. Langfristig wird aber davon ausgegangen, dass anthropogene Einflüsse endlich sind und sich die natürlichen Zyklen schließlich wieder einstellen.

Für die genauere Bewertung der Klimaentwicklung am Standort Gorleben könnte unter Verwendung eines modernen Modellierungssystems ein zukünftiger Verlauf berechnet werden, in den die Breitengradabhängigen Eingangsparameter und die lokalen Rahmenbedingungen eingehen. Auch Variationen der Entwicklung mit und ohne anthropogenen Einfluss könnten dabei simuliert werden. Die so berechneten Klimaverläufe würden eine einheitliche Datengrundlage für die Modellierung von klimaabhängigen Prozessen darstellen. Im Rahmen der weiteren Erkundung und für den Fall, dass in Zukunft ein Sicherheitsnachweis für den Standort Gorleben erstellt wird, sollte geprüft werden, ob ein lokales Klimaprognosemodell die Modellierungen von klimaabhängigen Prozessen am Standort so unterstützen würde, dass für diese Prozesse genauere Prognosen als bisher getroffen werden können.

3.2 Geomorphologie

In der Geomorphologie werden die formbildenden Prozesse und die durch sie geschaffenen Formen der Erdoberfläche beschrieben und klassifiziert. In diesem Kapitel wird nachfolgend auf die Topographie sowie die Oberflächengewässer und deren Entstehung am Standort Gorleben eingegangen.

3.2.1 Topographie

Morphologisch liegt das Untersuchungsgebiet Gorleben im Elbe-Urstromtal, das in diesem Bereich mit mehr als 20 km Ausdehnung besonders breit angelegt ist. Zu den charakteristischen Landschaftselementen zählen im Norden durch Flugsandablagerungen gebildete Dünenfelder und die erhöhten Geestgebiete weichselzeitlicher Endmoränen mit Geländehöhen von 20 bis 30 m ü. NN. Im Süden sind die Hochlagen aus saalezeitlichen End- und Grundmoränen aufgebaut. Die höchste Erhebung dieser Strukturen stellt südlich der Elbe der eistektonisch verschuppte Höhbeck mit 76 m ü. NN dar. In den Höhenlagen sind jeweils Wasserscheiden ausgebildet (s. Kapitel 3.4.1). Die Erhebungen fassen am Standort die ausgedehnten Niedriggebiete der weichselzeitlichen Talsandflächen (Sander) mit Höhen von rund 15 m ü. NN ein. Kennzeichnend für das Elbe-Urstromtal sind die ausgebildete weichselzeitliche Niederterrasse, abgelagerte holozäne Flugsande und Auelehm in den Tiefgebieten (nach /KÖT 07/) (Abb. 3.10).

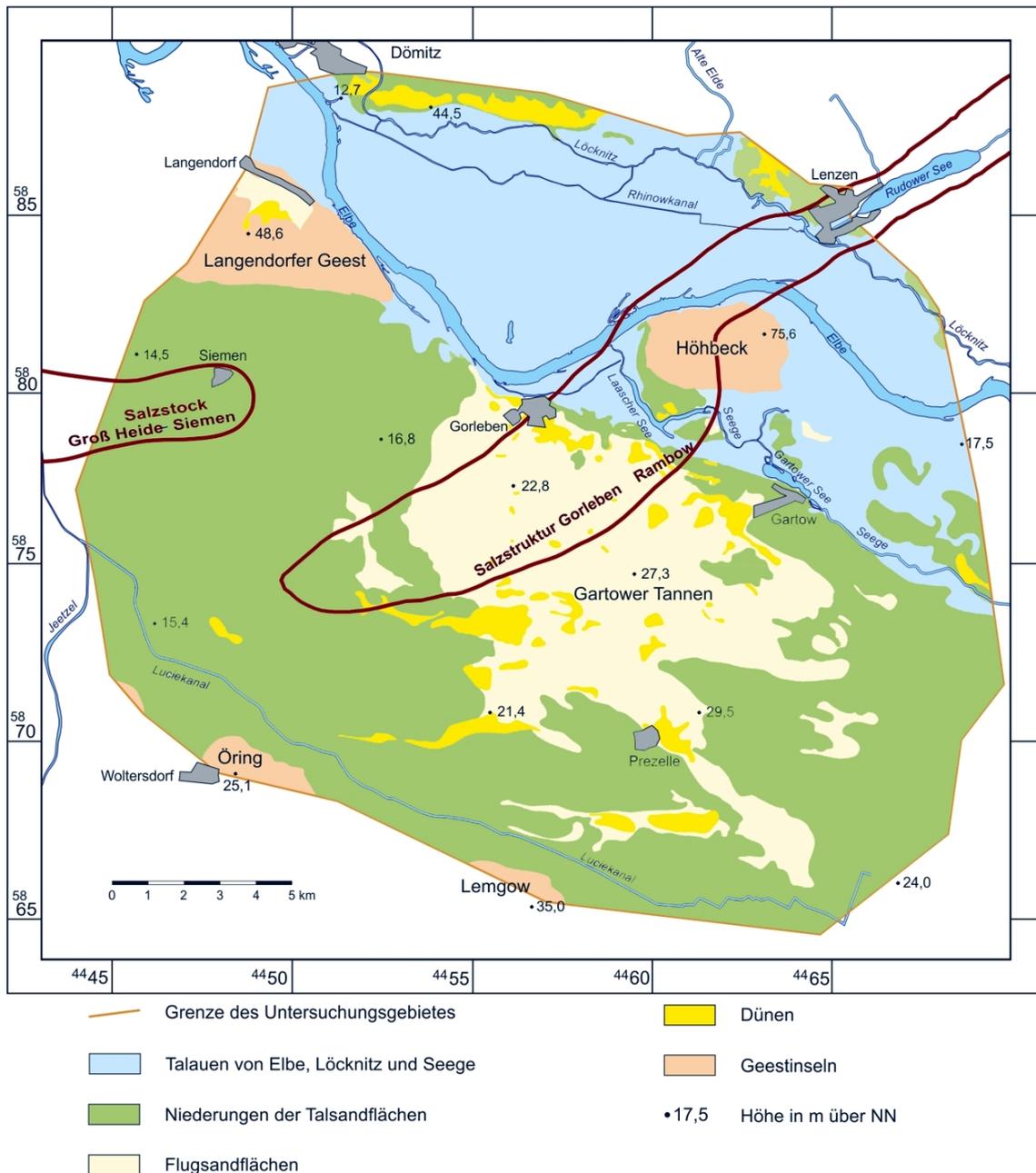


Abb. 3.10 Morphologisch-geologische Übersicht (/KÖT 07/)

Die heutige Topographie am Standort Gorleben entwickelte sich nach dem Rückzug der Gletscher unter periglazialen Bedingungen durch erosive Prozesse in der Saale- und Weichsel-Kaltzeit. Dabei wurde das alte saalezeitliche Relief geglättet und das jüngere weichselzeitliche geschaffen (Abb. 3.11). Nach /EIS 81/ erreichte die periglaziale Abtragung je Kaltzeit durchschnittliche Beträge von 5 – 10 m, wobei in der Elster- und Saale-Kaltzeit Werte von bis zu 15 – 20 m erreicht wurden. Daraus ergibt sich, dass die Landschaftsoberfläche zu Beginn der Saale-Kaltzeit um 20 – 30 m und zu Beginn der Eem-Warmzeit um ca. 5 – 10 m höher gelegen hat als heute.

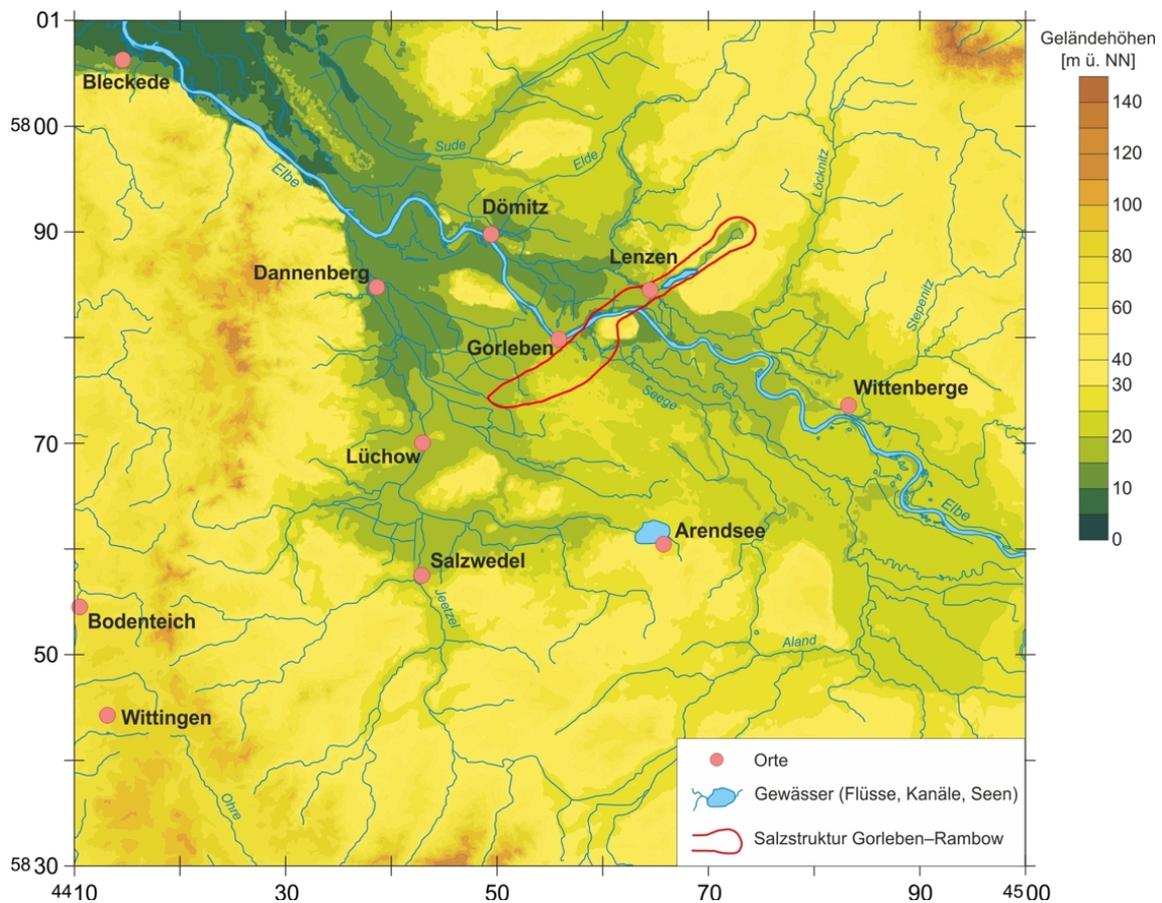


Abb. 3.11 Topographie im Umfeld des Standortes Gorleben (/LUR 01/)

Wechselnde Wasserabflussmengen führten durch intensive Umwandlungen der Oberfläche zur Ausbildung der heutigen Flusstäler. Bei gleichbleibendem Gefälle der Flüsse wurden zunächst grobkörnigere und später feinkörnigere sandige Sedimente abgelagert, welche die ca. 15 m mächtige Niederterrasse aufbauen. Im Spätglazial und Holozän wurde diese von den Flüssen erneut fast bis auf das ehemalige eemzeitliche Talniveau erodiert.

Zukünftige Entwicklung

Für die nächsten eine Million Jahre ist vor allem während Kaltzeiten mit vergleichbaren Veränderungen der Erdoberfläche, wie in der Vergangenheit, zu rechnen (s. Kapitel 4.2). Bei den allgemein langfristig ablaufenden geologischen Prozessen wie der Gebirgsbildung (Kapitel 5.1.2) oder der Epirogenese (vgl. Kapitel 4.1.1 und Kapitel 5.1.1) wird es dagegen kaum Auswirkungen auf die Topographie am Standort geben. Die an die jeweiligen Prozesse gekoppelten Umwandlungen sind in den zuvor genannten Kapiteln beschrieben. Grundsätzlich kann als Aussage für die Zukunft jedoch nur der Ablauf von Veränderungen vorhergesagt werden, die genaue Ausgestal-

tung dieser Veränderungen hingegen kann nicht prognostiziert werden, da eine Vielzahl von Prozessen wirken, die sich z. T. auch überlagern können. Aufgrund der tektonisch ruhigen Lage des Standortes und der Tatsache, dass die gleichen Prozesse wie in der Vergangenheit auf die Topographie einwirken werden, ist mit einer starken Veränderung, wie z. B. der Schaffung eines ausgeprägten Reliefs, nicht zu rechnen (s. a. Kap 3.2.3).

3.2.2 Oberflächengewässer

Das größte Oberflächengewässer im Untersuchungsgebiet Gorleben ist die Elbe, die als Hauptvorfluter für die Flüsse und Bäche der näheren Umgebung fungiert. Durch menschliche Eingriffe wird der natürliche Lauf der Fließgewässer vor allem durch Kanäle und Drainagemaßnahmen stark beeinflusst. Neben den Flüssen sind der Laascher, der Gartower und der Rudower See Teil der Oberflächengewässer des Standortes /KLI 07/. Oberflächengewässer sind Teil des Aquifersystems und beeinflussen auch die Strömungsvorgänge im Untergrund, die in Kapitel 3.4.1 beschrieben werden.

Zukünftige Entwicklung

Für die zukünftige Entwicklung des Standortes sind die heutigen Oberflächengewässer nicht weiter zu betrachten, da sie in den nächsten eine Million Jahren bei der Umgestaltung der Topographie (Kapitel 3.2.2) erheblich verändert werden. Die derzeit vorhandenen Seen werden dann vermutlich nicht mehr existieren oder durch neue an anderer Stelle ersetzt werden. Eine nachhaltige Veränderung tritt vor allem unter kaltzeitlichen Bedingungen (s. a. Kapitel 4.2) und spätestens bei einer erneuten Überfahung des Gebietes durch einen Inlandgletscher (Kapitel 4.2.7) ein.

3.2.3 Ungewissheiten bei der Prognose der zukünftigen Geomorphologie

Zahlreiche Prozesse wirken auf die Erdoberfläche unterschiedlich stark ein und können sowohl zyklisch wiederkehren, wie bei klimatisch bedingten Prozessen zu erwarten, oder ein einmaliges Ereignis darstellen. Da all diese Prozesse weder zeitlich noch in Bezug auf ihre Intensität oder ihr Zusammentreffen genau prognostiziert werden können, kann auch keine Aussage darüber getroffen werden wie sich die Geomorphologie am Standort Gorleben in einer Million Jahre entwickelt.

3.3 Deck- und Nebengebirge

3.3.1 Aufbau und Entwicklung des Deck- und Nebengebirges

Im Untersuchungsgebiet Gorleben setzt sich das Deck- und Nebengebirge aus triassischen bis quartären Gesteinsschichten zusammen (Abb. 3.12), deren Lagerungsverhältnisse durch den Salzaufstieg und kaltzeitliche Prozesse geprägt wurden. An den Flanken der Salzstruktur Gorleben-Rambow entstanden durch die Abwanderung der Zechstein-Salze bei der Salzstockbildung die nördliche und südliche Randsenke. In den Senken kamen dadurch verstärkt Sedimente der Oberkreide und des Tertiärs zur Ablagerung. Bedingt durch den fortschreitenden Salzaufstieg sind die Sedimentmächtigkeiten verglichen mit den Normalmächtigkeiten in den Senken z. T. um ein vielfaches erhöht und über dem Salzstock entsprechend ausgedünnt. Darüber hinaus sind die in den Randsenken fast vollständig ausgebildeten mesozoischen und tertiären Schichten im Bereich der Salzstockflanken teilweise aufgeschleppt. Schichtlücken über dem Salzstock sind dadurch zu erklären, dass Schichtbereiche, die über der Salzstruktur angehoben wurden, später erodiert wurden, oder dass sie aufgrund einer Hochlage der Salzstruktur erst gar nicht zur Ablagerung kamen. Weitere Erläuterungen zum Salzaufstieg und den damit verbundenen Prozessen sind im Kapitel 4.5.1 enthalten.

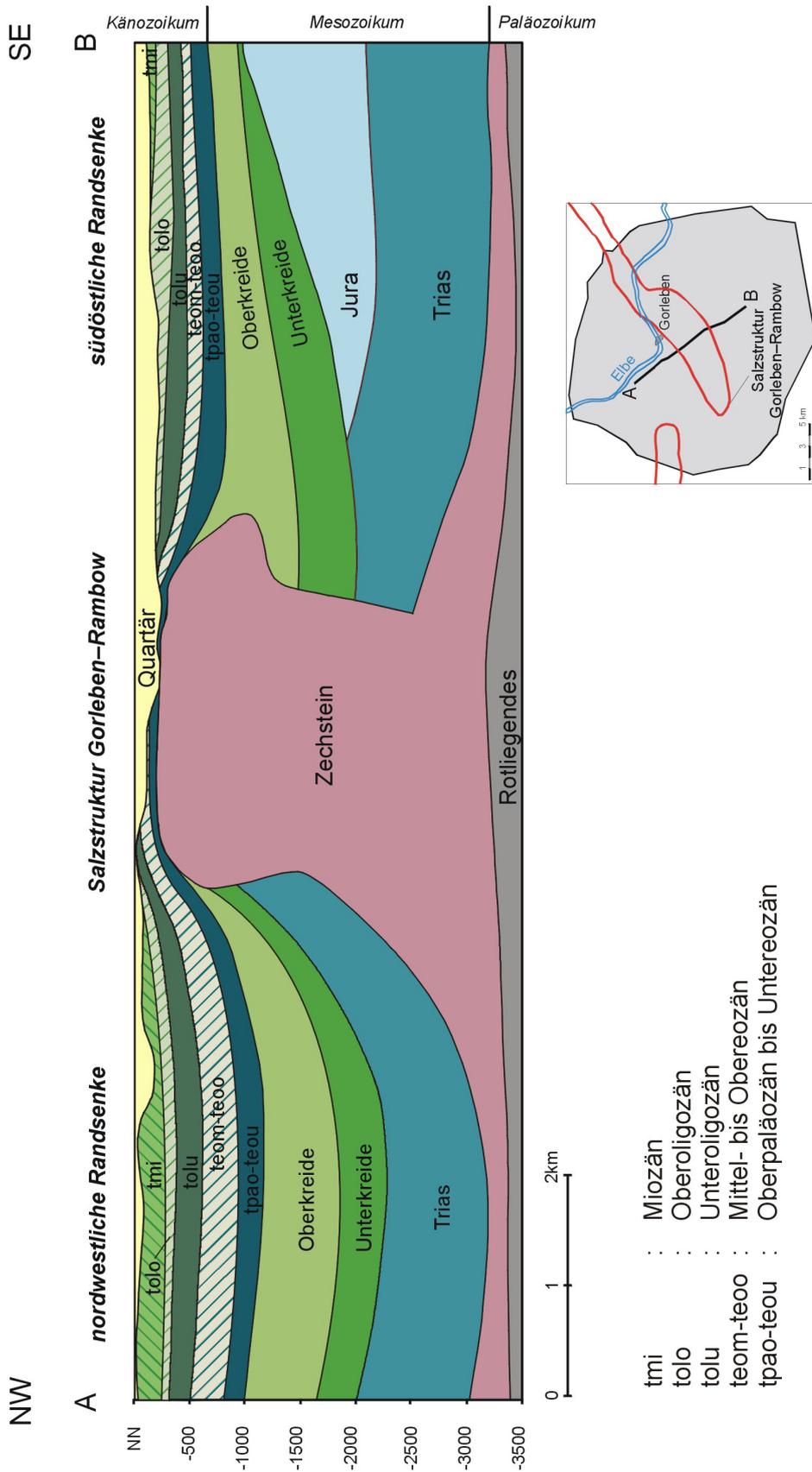


Abb. 3.12 Vereinfachter geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet (/KÖT 07/)

Nach /KÖT 07/ folgt das Quartär, beginnend mit präglazialen Sedimenten, nach einer großen Schichtlücke auf mittelmiozäne Sedimente und reicht bis ins Holozän. Weiträumig weisen die quartären Sedimente eine Mächtigkeit von ca. 50 – 100 m auf. Über dem Salzstock und innerhalb der Gorlebener Rinne erreichen sie eine höhere Mächtigkeit von 250 – 300 m.

Erzeugt und beeinflusst wurden die quartären Lagerungsverhältnisse durch verschiedene Prozesse. Während der Elster-Kaltzeit erfolgte bei der Bildung einer glazigenen Rinne eine Erosion (Kapitel 4.2.9) der anstehenden Schichten, als deren Ergebnis quartärzeitliches Material in direktem Kontakt mit dem Hutgestein und lokal auch mit dem Salzgestein am Salzspiegel steht (Abb. 3.13). Jüngere saalezeitliche Eisvorstöße verursachten eine Eistektonik, die zur Stauchung und Verschuppung der Schichten in Teilbereichen des Untersuchungsgebietes führte. Weitere Informationen zu kaltzeitlichen Prozessen stehen im Kapitel 4.2.

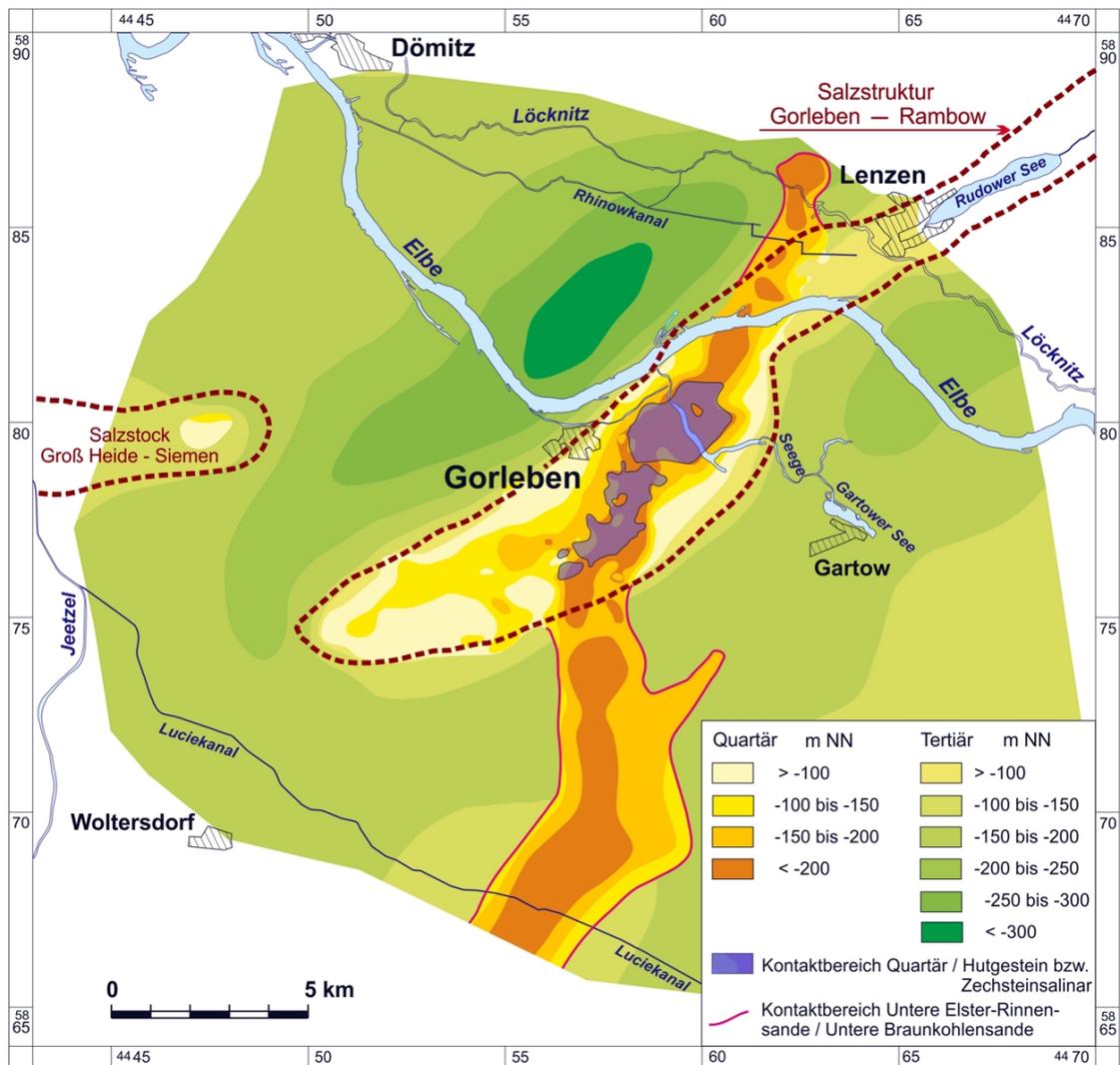


Abb. 3.13 Basis des unteren Grundwasserleiters (/KLI 07/)

Zukünftige Entwicklung

Aus der Beschreibung in Kapitel 3.3 folgt, dass eine Vielzahl von Prozessen die heutige Zusammensetzung und den strukturellen Aufbau des Deck- und Nebengebirges geschaffen haben. Für die nächsten eine Million Jahre ist anzunehmen, dass diese Prozesse weiterhin wirken und den Bereich in ähnlicher Weise, wie in der Vergangenheit, verändern werden. Als Beispiel für einen nicht auszuschließenden kaltzeitlichen Umgestaltungsprozess mit einer größeren Tiefenwirkung kann die Anlage einer neuen glazigenen Rinne aufgeführt werden (→ Kapitel 4.2.9). Grundsätzlich ist aufgrund der Entwicklung des Klimas mit ca. zehn weiteren Kalt- und Warmzeiten und den damit verbundenen Umgestaltungen im Deck- und Nebengebirge zu rechnen. Warmzeitliche Prozesse können zu einer Sedimentation mit einer entsprechenden Erhöhung der Deckgebirgsmächtigkeit führen, wenn eine Überflutung des Standortes erreicht wird.

Ein zukünftiges Deckgebirge wird demnach aus ähnlichen Sedimenten wie den derzeitigen bestehen und auch die abgelagerten oder abgetragenen Mächtigkeiten werden denen der vergangenen eine Million Jahre entsprechen. Eine detaillierte Beschreibung der Deck- und Nebengebirgsschichten wurde von /KÖT 07/ in der Standortbeschreibung Gorleben, Teil 2 vorgenommen.

3.3.2 Ungewissheiten bei der Prognose der Entwicklung des Deck- und Nebengebirges

Welche jeweiligen Auswirkungen eine Umgestaltung des Deck- und Nebengebirges in welchem Zeitraum erzeugen wird, ist über die allgemeinen Unterschiede zwischen Kalt- und Warmzeiten hinaus nicht genau prognostizierbar. Insbesondere für späte Entwicklungen innerhalb der zu betrachtenden eine Million Jahre ist nicht vorhersagbar, in welcher Intensität die Umgestaltung abläuft und welche Prozesse in welcher Reihenfolge aufeinander folgen. Aus diesen Gründen können keine Angaben über Art und Mächtigkeit zukünftig abgelagerter Schichten gemacht werden. Es kann z. B. nicht prognostiziert werden ob zu einem bestimmten Zeitpunkt Sande oder Tone zur Ablagerung kommen und ob diese Sedimente Mächtigkeiten im Meter- oder 10er-Meterbereich aufweisen werden. Ebenso ist es nicht möglich konkret anzugeben, welche später oder bereits heute vorliegenden Deck- und Nebengebirgsschichten an welcher Stelle der Oberfläche bis in welche Tiefe abgetragen werden.

3.4 Hydrogeologie

Das Kapitel Hydrogeologie umfasst die Beschreibungen der herrschenden Randbedingungen in Bezug auf die Grundwasserströmung und den -chemismus sowie deren Änderungen im Verlauf von einer Million Jahre in der Zukunft. Es folgt eine Zusammenstellung der geologischen Einflussfaktoren und schließlich eine Betrachtung der Ungewissheiten bei der Prognose der zukünftigen Entwicklung des Systems.

3.4.1 Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge

Am Standort Gorleben bilden die Lockergesteine der Deck- und Nebengebirgsschichten (s. a. Kapitel 3.3) ein bis zu 430 m mächtiges Porengrundwasserleitersystem, dessen Leiter und Geringleiter in ein oberes und ein unteres Grundwasserstockwerk ge-

gliedert sind (Abb. 3.14). Das untere Stockwerk besteht in den Randsenken aus den grundwasserleitenden miozänen Braunkohlensanden (tmiBS1) und im Bereich der Rinne über dem Salzstock aus elsterzeitlichen Sanden (qe). Das obere ist aus saale (qs) und weichselzeitlichen Sanden (qN) aufgebaut. Getrennt werden sie je nach Lage durch überwiegend tonige holsteinzeitliche Sedimente, durch den Lauenburger-Ton-Komplex (qL) und den tertiärzeitlichen Hamburg-Ton (tmiHT). Die Basis des Systems sind im Bereich der Randsenken die Rupeltone aus dem Unteroligozän und die darunter liegenden Tone aus dem Paläozän bis Eozän (tol-tpa). Im Bereich der Gorlebener Rinne stellt zum Teil der Salzstock oder das Hutgestein die Basis des Aquifers dar.

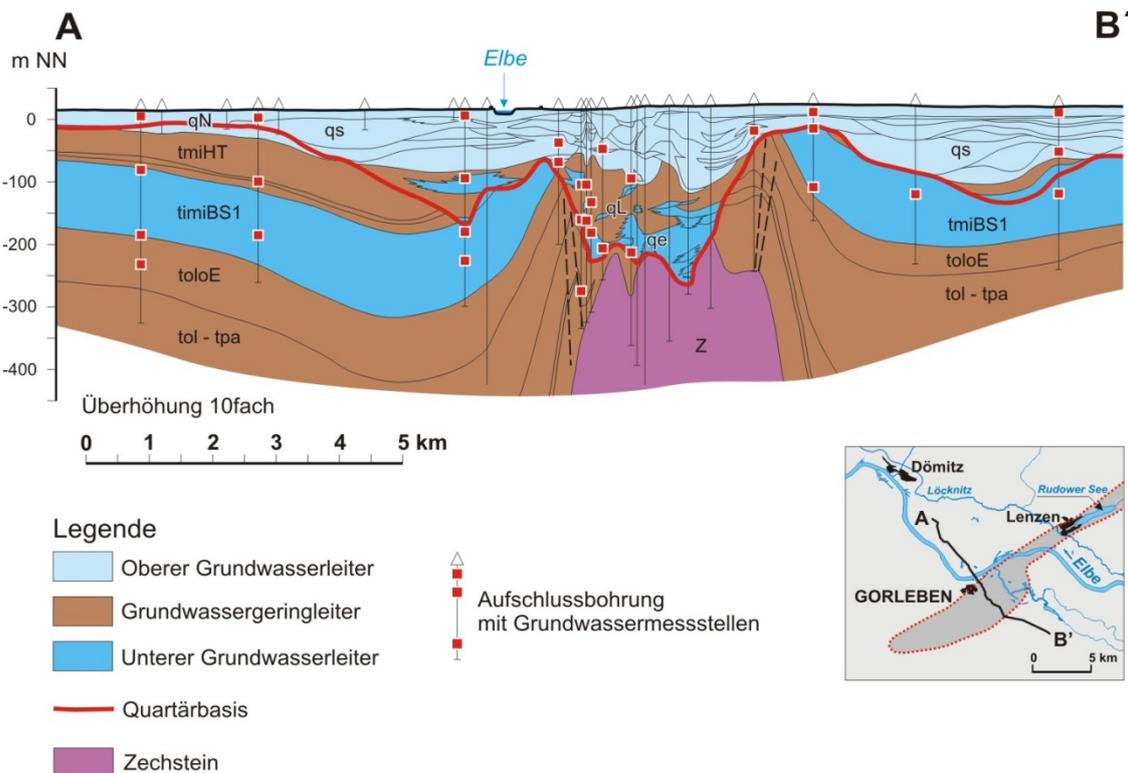


Abb. 3.14 Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben (/KLI 07/, Schnitt 10fach überhöht)

Wichtige Kennwerte für die hydrogeologische Gliederung sind die Porosität und die Permeabilität der Sedimente. Eine Grundwasserströmung ist in Lockergesteinen möglich, wenn durch eine Vernetzung der Poren mit der Schaffung von Fließwegen die effektive Porosität hoch genug ist. Die effektive Porosität kann dabei kleiner bis gleich der Gesamtporosität in der jeweiligen Schicht sein. Die Permeabilität ist das Maß für die Durchströmbarkeit der porösen Schichten. Abb. 3.15 stellt eine auf Durchlässigkeitsbeiwerten (k_f -Werte) beruhende Übersicht der Stratigraphie, Petrographie und hydrogeologischen Gliederung der Deckgebirgsschichten in Gorleben dar.

		Stratigraphie		Petrographie	Hydrogeologie
Quartär	Pleistozän	qN	Niederterrasse Weichsel-Kaltzeit	Sand, kiesig	GWL
		qs	Saale-Kaltzeit	Sand	GWL
				Schluff, tonig	GWGL
				Geschiebemergel	GWGL
		qhol	Holstein-Warmzeit z. T. Fuhne-Kaltzeit	Schluff, tonig, feinsandig	GWGL
		qL	Lauenburger-Ton- Komplex Elster-Kaltzeit	Ton, Schluff, sandig	GWGL
		qe	Elster-Kaltzeit	Sand	GWL
				Geschiebemergel	GWGL
		qpe	Bavel-Cromer- Komplex Menap-Kaltzeit	Schluff, Mudde, Feinsand	GWGL
Sand, kiesig	GWL				
Tertiär	Mittel- miozän bis Pliozän		Schichtlücke		
	Untermiozän	tmiBS ₂	Obere Braunkohlensande	Feinsand	GWL
		tmiHT	Hamburg-Ton- Komplex	Feinsand, Schluff, tonig	GWGL
				Feinsand	GWL
				Ton, Schluff	GWGL
	tmiBS ₁	Untere Braunkohlensande	Mittel- bis Feinsand	GWL	
	Oligozän	toloN	Oberoligozän Neochatt	Feinsand, Schluff	GWL
		toloE	Oberoligozän Eochatt	Schluff, feinsandig	GWGL
		tolu	Unteroligozän Rupelton	Ton, schluffig	GWGL
	Eozän bis Paläozän	teo + tpa	Eozän bis Paläozän	Ton, Schluff, feinsandig	GWGL

Abbildung 5.2.cdr

GWL Grundwasserleiter $k_f > 10^{-5} \text{ m/s}$
GWGL Grundwassergeringleiter $k_f = 10^{-7} - 10^{-5} \text{ m/s}$
GWGL Grundwassergeringleiter $k_f < 10^{-7} \text{ m/s}$

Abb. 3.15 Übersicht über die hydrostratigraphischen Baueinheiten des Deck- und Nebengebirges am Standort Gorleben (/KLI 07/)

Wie bereits im Kapitel 3.2 für die Geomorphologie beschrieben, zeigt die Geländeoberfläche im Gebiet von Gorleben keine ausgeprägten Reliefunterschiede. Dies gilt ebenso für die Höhendifferenz der Grundwasseroberfläche, die bei einer Grundwasserneubildung von 160 mm/a nur 6 m beträgt. Der Richtungstrend der Grundwasserströmung in den oberflächennahen Schichten verläuft mit geringem Gefälle von 1 bis 1,5 ‰ von der Hochlage im Süden des Salzstocks radial in die umgebenden Senken ab. In den Schichten über dem Salzstock im Bereich der Gorlebener Rinne strömt das Wasser von Südwest nach Nordost und außerhalb des Salzstocks zum Vorfluter Elbe hin. Darüber hinaus wird in den landwirtschaftlich genutzten Bereichen Wasserhaltung betrieben, wozu ein Drainagesystem an der Oberfläche und Grundwasserentnahmen zur Bewässerung gehören. Durch diese Einflüsse wird die Richtung des Grundwasserabstroms lokal beeinflusst. Außerdem kommen durch den Salzgehalt der Wässer hervorgerufene Temperatur- und Konzentrationsunterschiede hinzu, die sich lokal auf die Dichte des Wassers auswirken und dadurch als zusätzliche richtungsverändernde Komponenten fungieren. Hochversalzene Wässer haben eine ca. 20 % höhere Dichte als Süßwässer. Die dadurch ausgelöste Dichteströmung führt im Untersuchungsgebiet dazu, dass saline Wässer aus der Gorlebener Rinne in die nördliche Randsenke abfließen und sich dort im zentralen Bereich an der Aquiferbasis sammeln. Ermöglicht wird dies durch einen Fließpfad, der auf dem Kontakt der elsterzeitlichen Rinnensande mit den Braunkohlensanden des unteren Aquifers in der nördlichen Senke beruht. Eine detaillierte Beschreibung der Grundwasserströmung mit weiteren hydraulischen Kennwerten findet sich im Standortbericht von /KLI 07/. Als beeinflussendes Element kommt die Strömung des Grundwassers im Deck- und Nebengebirge vor allem bei der Subrosion (Kapitel 4.5.3) zum Tragen.

Zukünftige Entwicklung

In der Zukunft ist damit zu rechnen, dass die Lockergesteinsschichten im Untersuchungsgebiet weiterhin als Grundwasserleiter, bzw. -geringleiter, fungieren, so dass die Grundwasserströmung als einflussnehmende Randbedingung über den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre bestehen bleibt. Geringe Änderungen z. B. des Oberflächenreliefs können sich jedoch stark auf die Ausbildung der Fließrichtungen auswirken. Ebenso stark greifen auch klimatische Änderungen ein. Unter Permafrostbedingungen kann die Grundwasserströmung vollständig zum Erliegen kommen. Für die kaltzeitlichen Prozesse sind die Änderungen in den Kapiteln Permafrost (Kapitel 4.2.1), Inlandvereisung in randlicher Lage (Kapitel 4.2.5) und Vollständige Inlandvereisung (Kapitel 4.2.7) genauer beschrieben.

3.4.2 Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

In den grundwassererfüllten Bereichen des Deckgebirges stellen sich abhängig von der Zusammensetzung der Gesteine sowie durch die Art und Menge der gelösten Stoffe im Grundwasser bestimmte hydrochemische Verhältnisse ein. Die Grundwässer und das Deckgebirge streben aufgrund von Auflösungen und Ausfällungen einen chemischen Gleichgewichtszustand an.

Das Deckgebirge am Standort Gorleben ist aus Lockergesteinen oder wenig verfestigten Sedimenten wie z. B. Tonen, Sanden, Mergeln, etc. zusammengesetzt. Untergeordnet kommen Braunkohlen oder humose Lagen vor (/KÖT 07/; /ZIR 04b/). Zudem besteht im Bereich der Gorlebener Rinne ein Kontakt von Lockergesteinen zum Hutgestein sowie lokal zum Salzgestein des Salzstocks. Daraus resultiert eine Zusammensetzung der Grundwässer, die von gesättigten Solen mit ca. 320 g/l TDS (Total Dissolved Solids) über begrenzte Vorkommen mit erhöhten Salzgehalten bis zu Süßwässern mit weniger als 1 g/l TDS vor allem in oberflächennahen Bereichen reicht (/KLI 07/). In den hauptsächlich sandigen, tonigen und kalkigen Sedimentgesteinen des Nebengebirges sind in der Regel Wässer anzutreffen, deren Salinität mit der Tiefe zunimmt /KLI 07/.

Anhand von zahlreichen Wasserproben aus verschiedenen Tiefen wurde für Gorleben ein Wassertypprofil erstellt (Abb. 3.16), welches die Hauptbestandteile der Wässer in den unterschiedlichen vertikalen Zonen wiedergibt. Zusätzlich sind in Tab. 3.1 die in /KLI 07/ näher beschriebenen Kenndaten zusammengestellt.

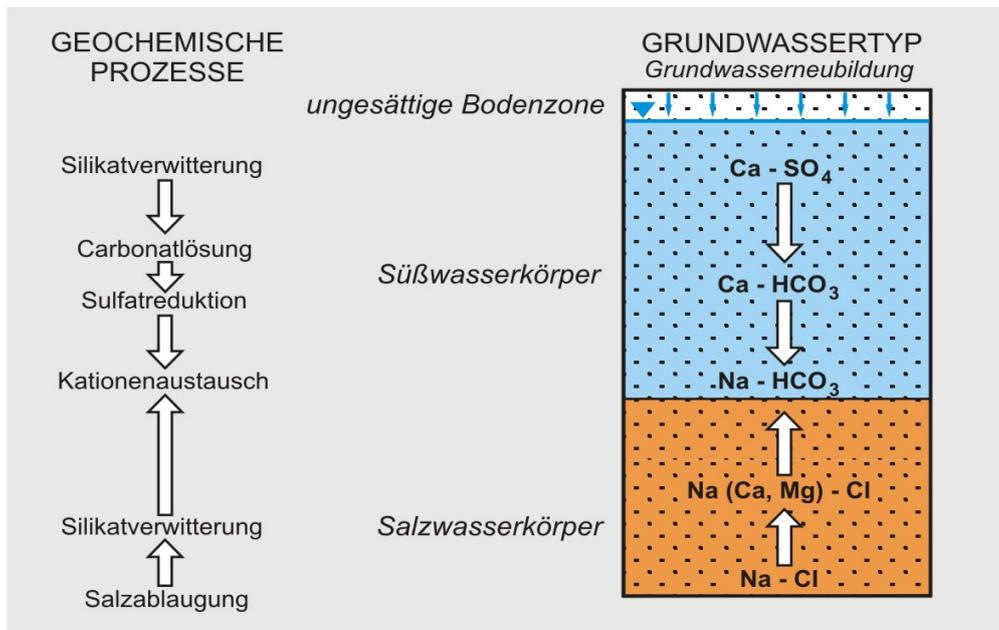


Abb. 3.16 Schema der vertikalen Zonierung der Grundwassertypen im Untersuchungsgebiet Gorleben (aus /KLI 07/)

Tab. 3.1 Grundwassertypen und Kennwerte im Untersuchungsgebiet Gorleben (nach /KLI 07/)

Typ	Tiefenzone	Gesteinsbereich	Reaktionen	mittlerer Gesamtlösungsinhalt
Ca-SO ₄	bis ca. 10 m u. GOK	kalkfreie o. entkalkte Dünensedimente	hydrolytische Zersetzung von Feldspäten	0,15 g/l
	(Geländeoberkante)	Niederterrassensedimente	Eintrag anthropogen belasteter Oberflächenwässer	0,66 g/l
Ca-HCO ₃	unter ca. 25 m u. GOK	Geestgebiete (steigender Kalkgehalt)	mikrobielle Sulfatreduktion	0,25 g/l
Na-HCO ₃	lokale Bereiche der Ca-HCO ₃ -Wässer	Aussüßen von ehemals salzwasserführenden Sedimenten	Alkalisierung (Ionenaustausch zw. Na-besetzten Tonmineralen und Ca-HCO ₃ -Wässern)	0,49 g/l
Na-Cl	Basis Gorbeneiner Rinne, Aquiferbasis nördl. Randsenke	Kontakt Salinar/Aquifer	Salzablaugung	von ca. 10 g/l bis 320 g/l (Sättigung)

Zukünftige Entwicklung

Die zukünftige Entwicklung der hydrochemischen Verhältnisse am Standort Gorleben hängt von mehreren Faktoren ab. So verändern sich im Lauf der Zeit die hydrochemischen Prozesse z. B. durch Erosion (Kapitel 4.3.3), Sedimentation (Kapitel 4.3.5) oder im Zuge einer Meeresüberflutung (Kapitel 4.3.1), wenn dadurch andere Gebirgsbereiche durchströmt werden, die aufgrund eines veränderten Stoffeintrags zur Einstellung eines anderen chemischen Gleichgewichts führen. Außerdem ist eine Kopplung an die Strömungsverhältnisse gegeben. Geänderte Grundwasserströmungen können andere Wassertypen in das Gebiet einbringen und so die Austauschvorgänge beeinflussen. Umgekehrt kann die hydrochemische Zusammensetzung auch auf die Geschwindigkeit der Grundwasserströmung einwirken, z. B. fließen hochversalzene Wässer im Vergleich zu Süßwässern langsamer. In Zukunft kann auch weiterhin davon ausgegangen werden, dass der im gesamten norddeutschen Raum verbreitete Anstieg der TDS-Werte mit zunehmender Tiefe bestehen bleibt. Auch nach tiefgreifenden Änderungen mit erhöhten Süßwassereinträgen, z. B. durch große Schmelzwassermengen am Ende einer Kaltzeit, wird sich dieser u. a. dichtebedingte Gleichgewichtszustand wieder einstellen. Insbesondere im Bereich des Hutgesteins oder bei einem auch in Zukunft vorhandenen Kontakt des Grundwassers zum Salzspiegel wird es zu einer Aufsalzung dieser Wässer kommen, in deren Folge gesättigte Lösungen entstehen deren Fließgeschwindigkeit aufgrund der höheren Viskosität herabgesetzt ist.

3.4.3 Ungewissheiten bei der Prognose der Entwicklung des hydrogeologischen Systems

Grundwasserströmung

Die Vielzahl der Einflussfaktoren, deren Eintreten zeitlich nicht genau prognostizierbar ist, bedingt, auch dass die räumliche und zeitliche Änderung der Grundwasserströmung nicht exakt vorhersagbar ist. Lediglich für Permafrostbedingungen kann das weitgehende Erliegen der Strömung angenommen werden. Wann Permafrost innerhalb der nächsten eine Million Jahre am Standort vorliegen wird und wie lange er jeweils andauert, ist bedingt durch die Ungewissheiten bei der Klimaprognose (s. Kapitel 3.1.10) jedoch nicht bestimmbar.

Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Eine genaue Prognose der zukünftigen Änderungen der hydrochemischen Verhältnisse ist ebenfalls nicht möglich, da nicht bekannt ist, welche Zusammensetzung die zukünftig zur Ablagerung kommenden Sedimente am Standort Gorleben haben werden. Austauschvorgänge mit diesen Ablagerungen werden den sich einstellenden Grundwassertyp jedoch maßgeblich beeinflussen. Aufgrund des Kontaktes des Salinars mit dem Aquifer kann für die Zukunft prognostiziert werden, dass sich außer bei entsprechenden Strömungsverhältnissen mit einem starken Süßwassereintrag, wie z. B. am Ende einer Kaltzeit, in tiefen Bereichen des Aquifers saline Grundwässer einstellen werden.

3.5 Salzstock Gorleben

Der Salzstock Gorleben weist ein SW-NE gerichtetes Streichen auf und erstreckt sich über eine Länge von 14 km mit bis zu 4 km Breite von Liepe bis nordöstlich von Gorleben (Abb. 3.17) zur Elbe. Dort wird er durch die Salzstruktur Rambow mit geringerer Breite über 16 km in nordöstlicher Richtung fortgesetzt.

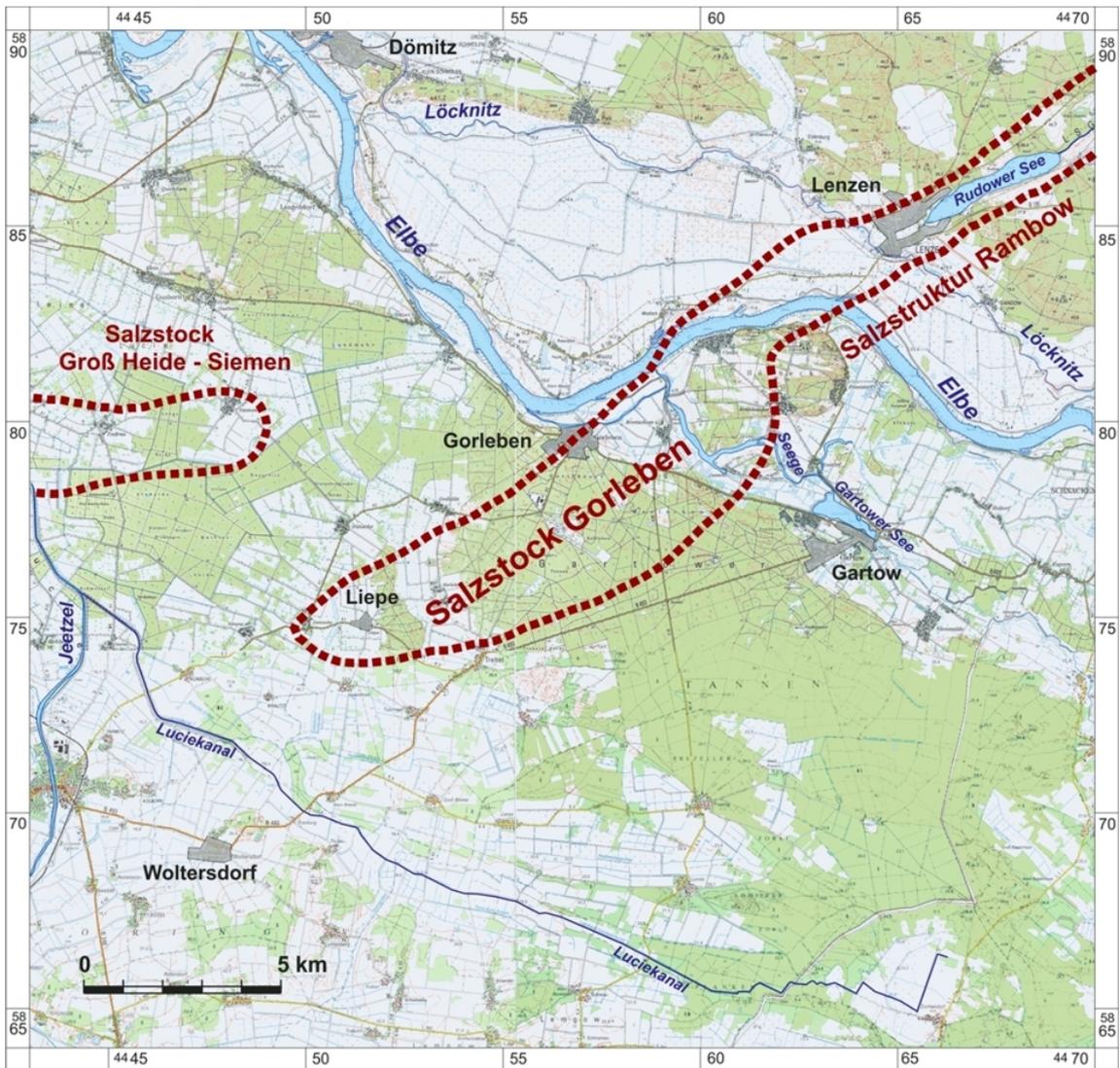


Abb. 3.17 Lage des Salzstocks Gorleben

Die äußere Form des Salzstocks Gorleben entspricht einem elliptischen Salzdiapir mit einem Überhang an der Südwestflanke, der sowohl in der 3D-Darstellung (Abb. 3.18) als auch im vereinfachten Querschnitt (Abb. 3.20) zu erkennen ist. Im Gegensatz dazu weist die Salzstruktur Rambow keinen Überhangbereich auf.

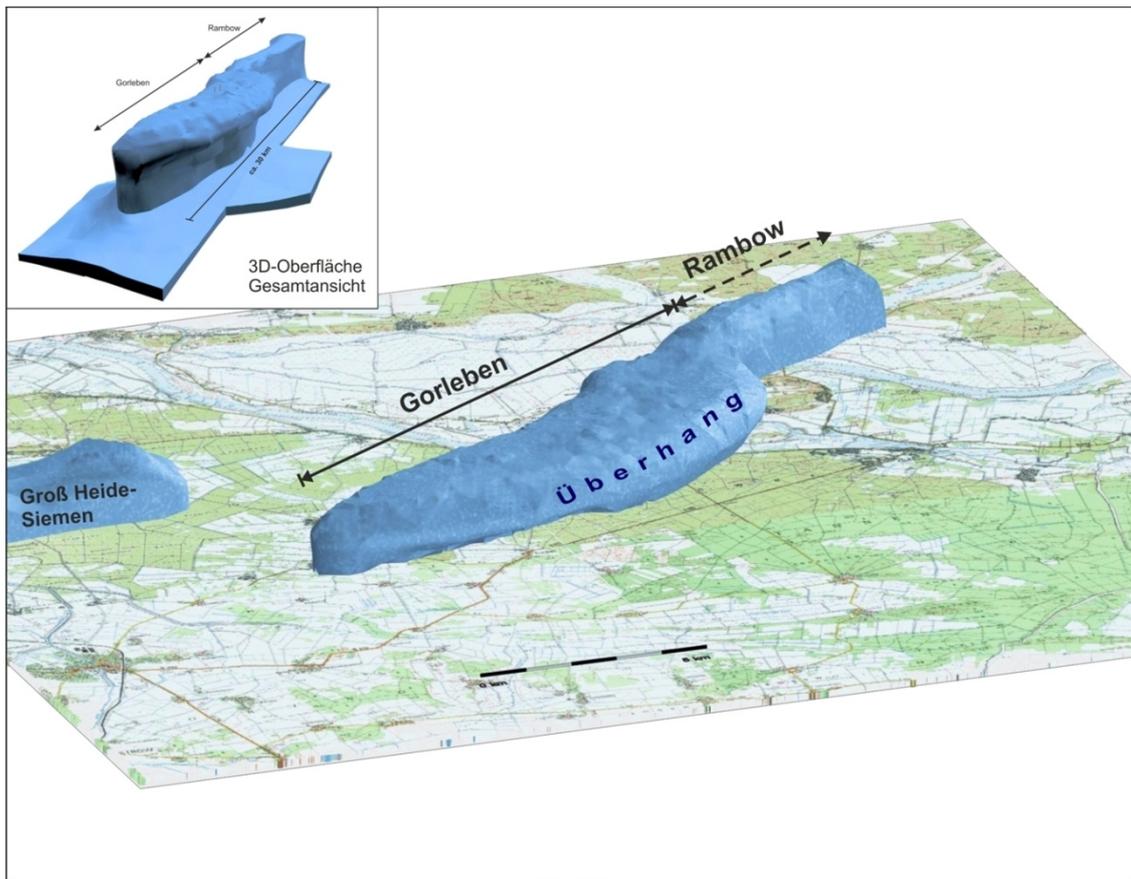


Abb. 3.18 3D-Oberfläche der Salzstruktur Gorleben-Rambow

3.5.1 Zusammensetzung und Aufbau des Salzstocks

In der geowissenschaftlichen Langzeitprognose wird der Begriff Salinar analog zum Begriff Wirtsgestein verwendet. Letzterer wird in den Berichten des VSG-Projekts im Zusammenhang mit den sicherheitsrelevanten Betrachtungen bei einem bestehenden Endlager benutzt. Der vorliegende Bericht beschreibt jedoch die Entwicklung des Standortes ohne ein Endlager, weshalb der Begriff Wirtsgestein durch den Begriff Salinar ersetzt wird. Als Salinar, bzw. Wirtsgestein, wird der gesamte Salzstock inklusive der darin vorkommenden Salinargesteine, exklusive des Hutgesteins, bezeichnet. Das Hutgestein wird zum Deckgebirge (Kapitel 3.3) gezählt, da es aufgrund seiner Durchströmbarkeit Teil des Aquifersystems ist. Nachfolgend werden der Aufbau des Salzstocks Gorleben, die Zusammensetzung der Gesteine und deren Eigenschaften kurz erläutert. Eine ausführliche Beschreibung des Salzstocks und den mit diesem in Verbindung stehenden Prozessen ist in den Standortberichten /BOR 08/, /KLI 07/ und /KÖT 07/ zu finden.

Die Schichtabfolge des Zechstein im Umfeld des Salzstocks Gorleben beginnt im Liegenden mit der Werra-Folge (z1), es folgen die Staßfurt- (z2) sowie die Leine-Folge (z3), den Abschluss bildet im Hangenden die Aller-Folge (z4). Während die Werra-Folge neben Anhydriten, Salzionen und Karbonaten im Liegenden auch noch Dolomite, Konglomerate, Sandsteine und Kupferschiefer aufweist, zeigen die Folgen z2 bis z4 jeweils eine Abfolge, die im Liegenden mit Salzionen beginnt und von Karbonaten abgelöst wird. Darüber folgen Salinargesteine, die als Anhydrit, Steinsalz und Kalisalz ausgebildet sind und vor allem im z3 in Wechselfolgen vorliegen. Ein detaillierter Überblick über die im Salzstock Gorleben angetroffenen Salinarabfolgen und deren Mächtigkeit ist in /BOR 08/ (Tab. 7) zusammengestellt.

Im Zuge des Salzstockaufstiegs wurden die zuvor söhlig lagernden Schichten mobilisiert und intensiv verfaltet. Entlang der Längsachse des Diapirs verläuft ein Hauptsattel in dessen Zentrum die älteren Salinargesteine der Staßfurt-Folge anstehen (s. a. Abb. 3.20). Zu beiden Seiten folgen vom Älteren zum Jüngeren die ebenfalls aufgestiegenen und verfalteten Schichten der Leine- und Aller-Folge. Hauptantrieb beim Diapirismus (Kapitel 4.5.1) des Salzstocks Gorleben waren die Schichten der Staßfurt-Folge. Die darunter liegende Werra-Folge ist dabei nicht mit aufgestiegen, da sie aus anhydritischen und karbonatischen Schichten aufgebaut ist, die schwer zu mobilisieren sind. Auf der Südostseite des Salzstocks haben die z2-Schichten im Zuge der Salzstockgenese die dort am Hauptsattel liegenden jüngeren z4-Schichten überfahren und dadurch den Überhangbereich (Abb. 3.18) gebildet. Dabei wurden die z4-Schichten in Form einer überkippten Mulde in das z2 eingefaltet. Dieser Großfaltenbau ist intern in zahlreiche Querfalten gegliedert. Insbesondere das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) zeigt eine ausgeprägte Isoklinalfaltung. Die intensive Faltung führte zur Ausdünnung von Schichten im Bereich der Faltschenkel und zur Verdickung im Scharnierbereich. Vor allem bei den spröderen Anhydritschichten bildeten sich dabei Boudinage-Strukturen aus (Abb. 3.19).

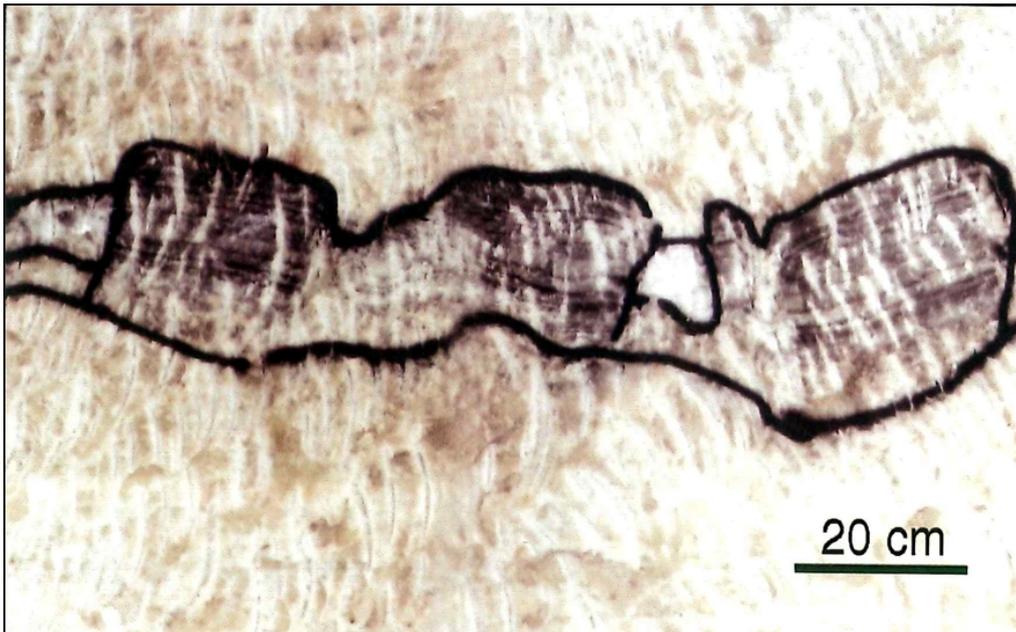


Abb. 3.19 Boudinage-Struktur einer Anhydritbank im Basissalz (Foto: Bauer, DBE, aus /BOR 08/)

Abb. 3.20 zeigt einen vereinfachten schematischen Querschnitt des Salzstocks, in dem der strukturelle Bau und die Abfolge der wichtigsten Schichten zu sehen sind. Nachfolgend wird die Zusammensetzung der Schichten im zentralen Teil kurz erläutert, ausführlichere Beschreibungen können für die weiteren Schichten auch /BOR 08/ entnommen werden.

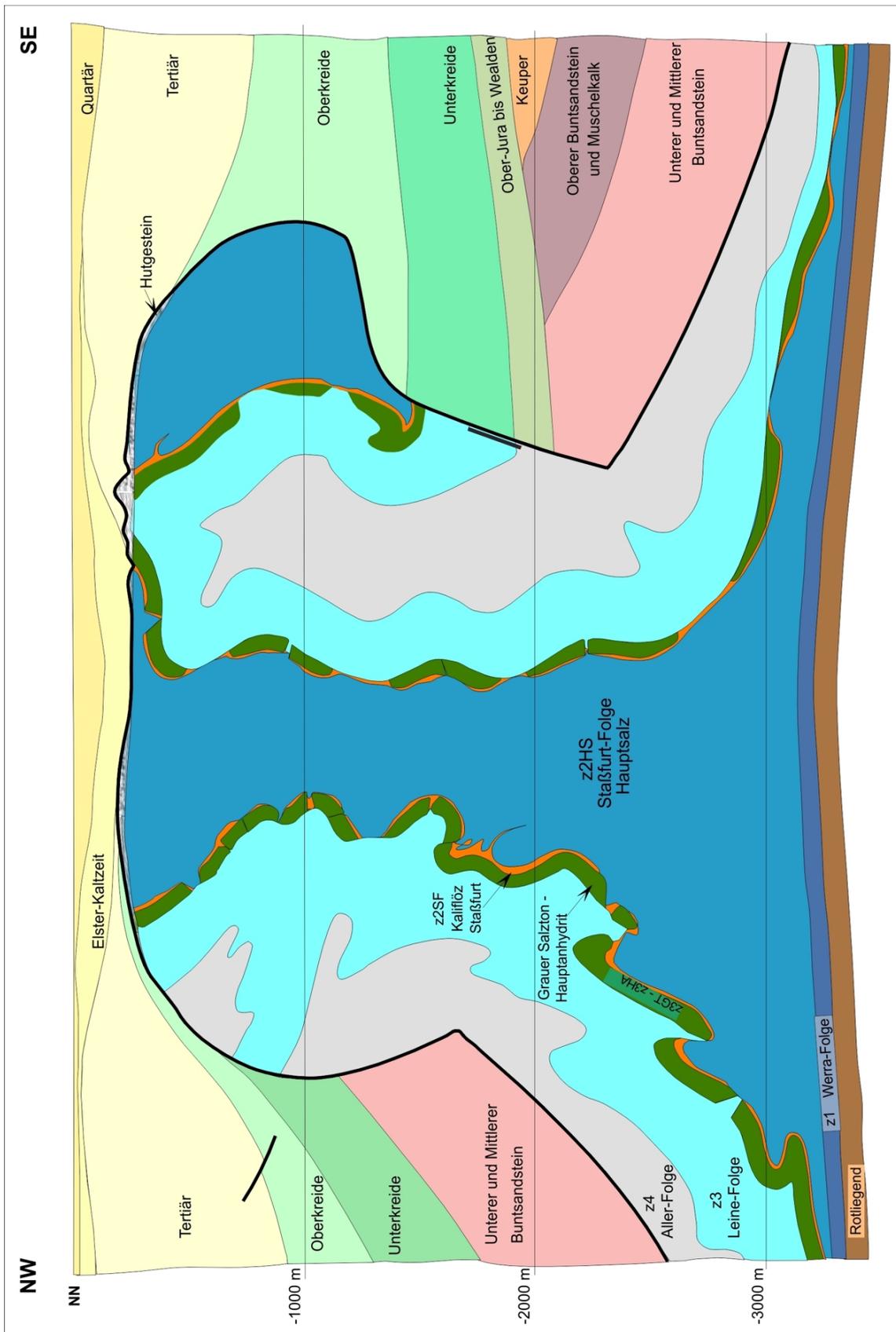


Abb. 3.20 Schematischer Querschnitt durch den Salzstock Gorleben (basierend auf /BOR 91/ geändert in /ISI 08/)

Im zentralen Teil des Sattels, der im Salzstock Gorleben ausgebildet ist, steht das Hauptsalz (z2HS) der Staßfurt-Folge an, das vom Liegenden zum Hangenden aus den Formationen Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) und Kristallbrockensalz (z2HS3) besteht. Darüber folgen das Hangendsalz (z2HG) und die Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE), die für den Standort Gorleben nicht weiter in Formationen untergliedert wurden. Bisher wurde das Basissalz (z2BS), das die älteste Schicht der Salzabfolge in der Staßfurt-Folge darstellt, im Zentralsattel nicht sicher nachgewiesen. Analysen der Salzgesteine der Staßfurt-Folge ergaben nach /BOR 08/ (S. 145), dass der Anteil der Nebengemengteile im Steinsalz vom Liegenden zum Hangenden abnimmt. Während der Anhydritgehalt im Knäuelsalz 4 bis 8 Gew.-% beträgt, liegt er in den Kieseritischen Übergangsschichten nur noch bei 2 Gew.-%. Die Verteilung des Anhydrits ist in dieser Formation inhomogen in Form von Linienresten, Knäueln und teilweise in Streifen ausgebildet. In einzelnen Teilbereichen des Knäuelsalzes können die Gehalte daher 10 bis 20 % betragen /BOR 08/ (S. 175). In den Kieseritischen Übergangsschichten setzt zudem eine Polyhalitführung ein. An diese Salinar-Abfolge schließt das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) an, das im schematischen Querschnitt als dünnes rotes Band ausgehalten wurde und im Salzstock neben anderen einen stratigraphischen Leithorizont darstellt. Gekennzeichnet ist diese Schicht leicht löslicher und thermisch instabiler Salze, die lagig und lokal in unterschiedlicher Zusammensetzung vorkommt, nach /BOR 08/ (S. 154) durch Carnallitgehalte, die z. B. im Bereich der NW-Flanke, durchschnittlich um ca. 30 – 40 Gew.-% variieren. Der Hauptbestandteil ist als Halit mit durchschnittlichen Gehalten von etwa 37 – 48 Gew.-% angegeben. Vor allem in der jüngeren Leine-Folge kommen zahlreiche Anhydritlagen vor. Die mächtigste davon ist die Hauptanhydrit-Gruppe (z3HA), in der mehrere stratigraphische Formationen ausgehalten wurden. Kennzeichnend für diese Schichten ist das Vorkommen von Klüften (s. a. Kapitel 3.5.2) und Fluiden (Kapitel 3.5.3).

Zukünftige Entwicklung

In der nächsten eine Million Jahre sind bei der Zusammensetzung des Salinars im Salzstock Gorleben keine Änderungen zu erwarten, da kein Stoffein- oder Stoffaustrag im Salinar stattfinden wird. Derartige Vorgänge können nur an der Salzspiegelfläche erfolgen, wenn diese durch Subrosion (Kapitel 4.5.3) oder Erosion, z. B. bei einer glazialen Rinnenbildung (Kapitel 4.2.9), erreicht wird. Umwandlungsprozesse hervorgerufen durch Diagenese (Kapitel 4.3.7) oder Metamorphose (Kapitel 5.2.4) sind nicht zu erwarten, da die Diagenese im Salinar bereits beendet ist und für metamorphe Vorgänge die Druck- und Temperaturvoraussetzungen innerhalb der nächsten eine Million

Jahre am Standort nicht erfüllt sein werden. Entsprechend den Beschreibungen in Kapitel 4.5.1 wird Diapirismus nur in geringem Umfang ablaufen, so dass auch der strukturelle Innenbau des Salinars in der nächsten eine Million Jahre nicht mehr grundlegend geändert wird.

3.5.2 Klüfte und Störungen im Salinar des Salzstocks Gorleben

Feine, nicht oder nur wenig geöffnete Gesteinsfugen, an denen keine wesentliche Bewegung stattgefunden hat, werden als Klüfte bezeichnet (/MUR 10/). Sie unterscheiden sich damit von Störungen, an denen immer auch ein Versatz des Gesteinsverbandes vorliegt. Im Rahmen der geologischen Langzeitprognose werden die natürlich entstandenen geogenen Klüfte und Störungen betrachtet. Der Begriff „Riss“ wird in diesem Zusammenhang nicht verwendet, da er für endlagerbedingte, also technogen hervorgerufene, Trennfugen verwendet wird, um eine Abgrenzung zu den natürlich entstandenen zu ermöglichen. Im Salzgestein können Klüfte durch Salzbewegungen/Tektonik, die Metamorphose der Salzgesteine und eventuell durch Klimaänderungen mit einer Abkühlung des Salzspiegelbereiches entstehen.

Klüfte im Salzgestein stellen mögliche Wegsamkeiten für Fluide dar und weisen im Gegensatz zu unverritztem Salz eine erhöhte Permeabilität auf. Unter andauernder kompressiver Belastung (Konvergenz) können diese Klüfte auch wieder vollständig verheilen. Ein teilweises Verschließen von Klüften im Salzgestein ist auch unter Beteiligung von Lösungen durch chemische Reaktionen möglich.

Klüfte und Störungen wurden bei der über- und untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben in mehreren Formationen angetroffen und lagen bis auf wenige Ausnahmen verheilt vor. Klüfte treten hauptsächlich im Grenzbereich von kompetenten und inkompetenten (z. B. Zechstein 2/3-Grenzbereich) bzw. in den kompetenten (z. B. Hauptanhydrit) Salzgesteinen auf. In den Tabellen 3.2 bis 3.4 ist eine Zusammenstellung der im Salzstock Gorleben angetroffenen Klüfte und Störungen wiedergegeben, die z. B. in /BOR 08/ genauer beschrieben sind.

Tab. 3.2 Zusammenstellung der in der Aller-Folge (z4) im Salzstock Gorleben angetroffenen Klüfte und Störungen

Stratigraphie	Störungen und Klüfte		
	Art	Anmerkung	Quelle
Tonbrockensalz (z4TS)	Kluft- vorkommen		/BOR 08/ (S. 183)
Pegmatitanhydrit (z4PA)	stark gestörte Schichten	räumlich eng an Hutgestein gebunden (Bohrung Go 1005)	/BOR 08/ (S. 67)
Roter Salzton (z4RT)	zahlreiche Klüfte	verheilt durch Fasersteinsalz	/BOR 08/ (S. 120)

Tab. 3.3 Zusammenstellung der in der Leine-Folge (z3) im Salzstock Gorleben angetroffenen Klüfte und Störungen

Stratigraphie	Störungen und Klüfte		
	Art	Anmerkung	Quelle
Tonmittelsalz (z3TM)	weit ver- breitete Klüfte	verheilt durch Fasersteinsalz oder Fasercarnallit	/BOR 08/ (S. 120)
Anhydritmittelsalz (z3AM)	Klüfte	verheilt durch sekundä- ren Carnallit und Halit,	/BOR 08/ (S. 44, 119)
Oberes Orangesalz (z3OSO)	Klüfte oder Kleinst- störungen	bis 10 cm breit, verheilt mit grobkristalli- nem Steinsalz, Klüfte im Steinsalz durch Carnallit verheilt (Bohrung Go 5001, Go 5002)	/BOR 08/ (S. 35)

Tab. 3.3 Fortsetzung

Stratigraphie	Störungen und Klüfte			
	Art	Anmerkung	Quelle	
Mittleres Orangesalz z3OSM	Klüfte in Umfeld übergreifend (1 – 3 m ins Liegende)	sekundäre fingerartige Strukturen, z. T. verästelt, gefüllt mit Halit und Carnallit in Zwickeln, z. T. hohl	/BOR 08/ (S. 110)	
	Gorleben Bank	Klüfte	als Reservoir fungie- rend in Gorleben-Bank, Speicher in aufblättern- den schichtparallelen Anhydritlamellen, schichtparallele Störun- gen, ermöglichen Ver- bindungen zw. Reser- voiren	/BOR 08/ (S. 173)
		Zone IV:	schichtparallele Bewegungszone, Öffnungsweiten 0,1 bis 0,34 cm verheilt mit Steinsalz u./o. Carnallit	/BOR 08/ (S. 106)
		Zone III: Scher- fläche	bei vorhandener Bewegungszone, tongefüllt z. T. mehr- schichtig	/BOR 08/ (S. 104)
		Zone II: Har- nische	auf schichtbeständiger Bewegungsfläche (Scherfläche), Ton gefüllt	/BOR 08/ (S. 104)
Unteres Orangesalz z3OSU	einzelne Klüfte und Kleinst- störungen	in Bohrung Go 1005 5 – 20 cm, verheilt mit Steinsalz	/BOR 08/ (S. 29, 174)	
Liniensalz (z3LS)	Fältelungen und Über- schiebungen	in Faltenkernen	/BOR 08/ (S. 100)	
	Kleinst- störungen	in Kristallsalzlagen, verheilt durch Steinsalz	/BOR 08/ (S. 25, 103, 174)	
Basissalz (z3BS)	teilweise Kluft- vorkommen		/BOR 08/ (S. 25, 183)	

Tab. 3.3 Fortsetzung

Stratigraphie	Störungen und Klüfte		
	Art	Anmerkung	Quelle
Hauptanhydrit (z3HA)	Nester und Röhrenchen	im Liegenden und mittleren Bereich wie Äderchen angeordnet, Carnallit gefüllt	/BOR 08/ (S. 23, 25, 27, 29, 43, 99)
	zahlreiche Klüfte	Zerschierung in Teilbereichen, gefüllt mit Carnallit, Sylvin, Steinsalz, selten Borate in GoHy 1121 vereinzelt offene Klüfte	
	größere Störungen	meist Abschiebungen (Schichtausfall im m- bis 10er m-Bereich), Überschiebung in Bohrung Go 1003 (Schichtverdoppelung von ca. 10 – 15 m), Störungszonen dm – m breit und sekundär durch Carnallit verheilt (oft mit Gasimprägnation), z. T. eingeschleppte Brocken aus anderen Schichten	
	Boudinage	Hauptanhydrite oft in Blöcke zergliedert, z. T. rotiert, führt zur Unterbrechung der Klüftverbindungen	
Grauer Salzton (z3GT)	Fiederklüfte	bereichsweise stark geklüftet, verheilt durch Faserhalit oder Fasercarnallit	/BOR 08/ (S. 92)

Tab. 3.4 Zusammenstellung der im Grenzbereich z2/z3 und in der Staßfurt-Folge (z2) im Salzstock Gorleben angetroffenen Klüfte und Störungen

Stratigraphie		Störungen und Klüfte		
		Art	Anmerkung	Quelle
Grenze (z2/z3)		Störungs- oder Kluftzonen	sekundär verheilt mit Steinsalz, mit Restzwickeln	/BOR 08/ (S. 162)
Gebänderter Deckanhydrit (z2DA)		feine Klüfte	verheilt mit Carnallit	/BOR 08/ (S. 90)
Kaliflöz Staßfurt (z2SF)		zerbrochene Lagen		/BOR 08/ (S. 88)
Hangendsalz (z2HG)		Klüfte und Kleinst- störungen	bis 5 cm breit, über doppelt gelager- tem Kaliflöz in Bohrung Go 1005 durch Steinsalz verheilt, in Go 1003 vereinzelt, vorwiegend offen, Rän- der mit idiomorphen Steinsalzkristallen aus- gekleidet	/BOR 08/ (S. 25, 29, 39, 183)
Hauptsalz (z2HS)	Kristall- brocken- salz (z2HS3)	Klüfte und Störungen	bis 5 cm breit, unter doppelt gelager- tem Kaliflöz in Go 1003 vorwiegend offen, Ränder mit idiomorphen Steinsalz- kristallen ausgekleidet	/BOR 08/ (S. 25, 183)
	Streifen- salz (z2HS2)	eventuell Scherbahnen	Reinsalzbänke evtl. mit Steinsalz verheilte Scherbahnen	/BOR 08/ (S. 86)

Im Salzspiegelbereich wurden bisher geschlossene und durch Mineralneubildungen verheilte Klüfte angetroffen. Daher ist in der Zukunft damit zu rechnen, dass dort entstehende Klüfte ebenso schnell wieder geschlossen werden, ohne dass vernetzte Wegsamkeiten für Grundwassereintritte aus den überlagernden Aquiferen entstehen.

Die im Salzstock angetroffenen Klüfte sind schichtparallel oder winkelig zur Schichtung angelegt wobei ihre jeweilige Geometrie (Verlauf, Öffnungsweite, Länge) von den Materialeigenschaften und der Beanspruchung der Salzgesteine abhängt. Bisher wurden

Kluftweiten von Millimeter- bis Metergröße und Kluftlängen im Dezimeter- bis Zehnermeter-Bereich angetroffen. Nach /BOR 08/ (S. 183) schwanken die Abstände der Klüfte unregelmäßig und eine Abhängigkeit der auftretenden Abstände z. B. von Lithologie, Bankung oder struktureller Ausbildung der Salzschieben konnte nicht festgestellt werden. Im Kernbereich des Hauptsalzes wurden offene geogene Klüfte bisher nicht nachgewiesen.

Zukünftige Entwicklung

Insgesamt ist bis in einer Million Jahre zu erwarten, dass der aktuelle Zustand mit der schichtspezifischen Verteilung und Art der Klüfte fortbesteht, da dies auch in der geologischen Vergangenheit über längere Zeiträume vorlag. Ebenso ist in Zukunft nicht zu erwarten, dass im Salinar zusammenhängende Kluftnetze entstehen, die Wegsamkeiten für Lösungen oder eindringendes Grundwasser ausbilden.

3.5.3 Fluide im Salinar des Salzstocks Gorleben

Bei den Fluidvorkommen im Salinar handelt es sich um Lösungen und Gase, die in Gorleben in bestimmten stratigraphischen Horizonten an Korngrenzen bzw. interkristallin oder in Klüften und Störungen auftreten. Die ebenfalls als Fluide vorkommenden Kohlenwasserstoffe werden gesondert in Kapitel 3.5.4 diskutiert. Eingeschlossen wurden die Fluide während der Kristallisation der Salzminerale aus eingedunstetem Meerwasser. Dieser Prozess ist abhängig von der Kristallisationsgeschwindigkeit und den Sedimentations- bzw. Diagenesebedingungen. Innerhalb eines Salinarkörpers können die Fluide im Rahmen der Diagenese und/oder des Diapirismus mobilisiert werden, wobei sich sowohl die Raumlage der Fluide als auch ihre stoffliche Zusammensetzung verändern kann.

Im Salzstock Gorleben wurden Lösungs- und Gaszutritte hauptsächlich in den anhydritischen Gesteinen der Leine-Folge (z3), und dort vor allem im Hauptanhydrit (z3HA) sowie in der Gorleben-Bank (z3OSM), angetroffen. Im Vergleich zu anderen Salzgesteinen enthalten sie häufig kluft- oder schichtgebundene Speicherräume. Außerdem wurden auch im Übergangsbereich zwischen der Staßfurt- und der Leine-Folge (z2/z3) Fluidvorkommen nachgewiesen. Nach /BOR 08/ und /SCM 09/ sind im Hauptsalz der Staßfurt-Folge vergleichsweise nur sehr geringe Fluidmengen enthalten. Die im Salzstock Gorleben angetroffenen Lösungen stehen unter petrostatischem Druck, was eine Verbindung zu den über dem Salzstock befindlichen Aquiferen ausschließt (/NOW 02/).

Tab. 3.5 zeigt eine Zusammenstellung der fluidführenden Schichten mit Angaben der Mineralsättigungen, die Art der Fluidvorkommen und das als Reservoir zur Verfügung stehende Poren- und Kluftvolumen. Bei den angegebenen Mineralsättigungen handelt es sich um die im Jänecke-Diagramm ermittelten Hauptkomponenten, die neben der stets vorliegenden Halitsättigung vorkommen. Ist in der Tabelle keine Sättigung angegeben, liegt eine Halitlösung vor.

Die für die Analysen verwendete Datenbasis gibt den Erkundungsstand aus dem Jahr 2000 wieder. Die Angaben zu den Reservoirgrößen und den Gesamtzutritten gelten nur für die jeweils beprobten Bereiche und Zeitabschnitte. Eine Übertragung der Ergebnisse auf den gesamten Salzstock oder eine generelle Charakterisierung der stratigraphischen Einheiten im Salinar kann anhand der derzeit vorliegenden Ergebnisse nicht erfolgen. Detailliertere Informationen zu den Ausgangsdaten und den bei der Analyse der Lösungen im Salzstock Gorleben angewendeten Methoden sind vor allem in /SCM 09/ zu finden.

Tab. 3.5 Überblick über die bis zum Jahr 2000 angetroffenen Lösungsvorkommen und Reservoirabschätzungen im Salzstock Gorleben

Stratigraphie		Lösungsvorkommen (Stand 2000)			
Abteilung	Formation	Mineralsättigung	Art	abgeschätzte Reservoirgröße	bisher erfasste Gesamtzutritte
Zechstein 4 (Aller-Folge)	Pegmatitanhydrit z4PA	k. A.	Kluft bedingt (isoliert in Boudinage-Strukturen)	k. A.	k. A.
Zechstein 3 (Leine-Folge)	Anhydritmittel z3AM1/ah, z3AM7/ah, z3AM9/ah	Kieserit	Feuchstellen durch Kluftreservoir in Boudinage-Strukturen	in Kluftbereichen wenige Liter /SCM 09/ (S. 32)	3,454 m³ /SCM 09/ (S. 99)
	Bank-/Bändersalz z3BK/BD	Carnallit			0,006 m³ (/SCM 09/ (S. 99)

Tab. 3.5 Fortsetzung

Stratigraphie		Lösungsvorkommen (Stand 2000)			
Abteilung	Formation	Mineralsättigung	Art	abgeschätzte Reservoirgröße	bisher erfasste Gesamtzutritte
Zechstein 3 (Leine-Folge)	Mittleres Orangesalz (Gorleben-Bank) z3OSM	Carnallit, z. T. Carnallit-Kieserit	lokale Feuchtstellen beobachtet ab Schichtmächtigkeit von 10 cm, /BOR 08/	m ³ - 10 m ³ Bereich /SCM 09/ (S. 33)	261 m³ /SCM 09/ (S. 101)
	Hauptanhydrit z3HA	Carnallit-Bischofit, Carnallit-Kieserit- Bischofit, Carnallit-Sylvin, Carnallit-Kieserit, Carnallit	unregelmäßig verteilte mm-breite Klüfte (vereinzelt offen), cm-große drusenartige Hohlräume, (Schollenbau mit isolierten Schollen)	Volumen abhängig von Schollengröße stark variabel 1) min. 200 bis max. 2.500 m ³ 2) min. 50 bis max. 1300 m ³ 3) min. 60 bis max. 900 m ³ /NOW 02/	249,516 m³ /SCM 09/ (S. 101)

Tab. 3.5 Fortsetzung

Stratigraphie		Lösungsvorkommen (Stand 2000)			
Abteilung	Formation	Mineralsättigung	Art	abgeschätzte Reservoirgröße	bisher erfasste Gesamtzutritte
Grenze Zechstein 2/3	z2/z3	Carnallit-Kieserit,	isolierte, fluidgefüllte Zwickel zw. Kristallen als verheilte drusen- artige Hohlräume bis zu 1 m³ groß, Störungen und Klüfte mit Restzwickeln	min. 90 bis max. 3.000 m³, min. 50 bis 5.100 m³ /NOW 02/	39,948 m³ /SCM 09/ (S. 101)
		Bischoffit, Kieserit			
Zechstein 2 (Staßfurt-Folge)	Hauptsalz (Gruppe) Z2HS		fluid inclusions (Feuchtstellen)	wenige cm³ keine Nester nachgewiesen	
	Kristallbrockensalz z2HS3				H₂O-Gehalt: 0,012 Gew.-% /BOR 08/
	Streifensalz z2HS2				H₂O-Gehalt: 0,017 Gew.-% /BOR 08/
	Knäuelsalz z2HS1		interkristallin	isolierte Nester in Bereichen bis zu mehreren m³	Zutritte nicht messbar, vereinzelte wenige Liter H₂O-Gehalt: 0,014 Gew.-% /BOR 08/
Mischlösungen (ohne Einordnung)					84,66 m³ /SCM 09/ (S. 101)

Die Lösungsvorkommen liegen in Form von Feuchtstellen ohne erkennbar frei bewegliche Lösungen, Tropfstellen mit Austritten von einzelnen Tropfen aus dem Gebirge oder Zulaufstellen mit erhöhten Zutrittsraten, die in Gorleben an den einzelnen Lösungsvorkommen zwischen 0,006 bis 80.000 ml/min liegen /SCM 09/ (S. 98). Zeitlich sind die Zutrittsraten variabel, sie können sich verringern oder vollständig versiegen. Zusammenfassend werden die Lösungen als Zutrittslösungen bezeichnet (/SCM 09/). Außerdem wurden μm bis mm große Lösungseinschlüsse (Fluid Inclusions) angetroffen, die intra- oder interkristallin auftreten. Die Durchlässigkeit von unverritztem Steinsalz ist so gering, dass das Darcy-Gesetz, entsprechend seiner Definition, die laminares Fließen in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich voraussetzt (s. a. /MÜL 99/), nicht mehr direkt anwendbar ist. Daher erfolgte in /BOR 08/ lediglich eine Abschätzung der Permeabilitäten, die für die Salzgesteine und Anhydrite bis zu 10^{-21} m^2 und in den geklüfteten Bereichen mehr als 10^{-15} m^2 beträgt. Damit soll verdeutlicht werden, dass die entsprechenden Gesteinsschichten vergleichsweise gering- bis nichtpermeabel sind.

Bei den salinaren Lösungen handelt es sich nach /BOR 08/ um natürliche (Rest-, Misch- und Metamorphoselösungen) sowie technisch bedingte (anthropogen in Erkundungsbergwerk eingebracht). Entstanden sind die natürlichen salzstockinternen Lösungen entweder durch Mischung primärer Meerwasserrestlösung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder aus der Reaktion von Kaliflözgestein mit NaCl-gesättigten Lösungen. Anhand charakteristischer geochemischer Signaturen konnte nachgewiesen werden, dass die Lösungen im Verlauf der durch die Halokinese hervorgerufenen salzstockinternen Migration zum Teil mit Schichtsilikaten und/oder Karbonaten (Grauer Salzton, Leine-Karbonat) reagierten (/SCM 09/).

Die im Salzstock Gorleben nachgewiesenen und in /BOR 08/ beschriebenen Gase (N_2 , CO_2 , O_2 , H_2 und H_2S) kommen inklusive der gasförmigen Kohlenwasserstoffe, die in Kapitel 3.5.4 genauer beschrieben werden, salzgebunden als μm - bis mm-große fluid inclusions (S. 168 ff) und als begrenzt migrierfähige sog. Headspace-Gase (S. 165) vor. Unterschieden werden sie in die zwei Gruppen stickstoffhaltig mit Sauerstoffanteil (O_2) und stickstofffrei ohne Sauerstoffanteil. Bei der Gruppe N_2/O_2 wird angenommen, dass es sich um eingeschlossene Atmosphäre aus dem Zechstein handelt. Reine N_2 -Einschlüsse treten nach /ELL 99/ (Angabe in /BOR 08/, S. 169) gehäuft im Knäuel- und Streifensalz der Hauptsalz-Gruppe (z2HS) auf, im Kristallbrockensalz überwiegen N_2 - CH_4 -Gase. Bei H_2 -haltigen Gaseinschlüssen wurde von /PRO 98/ (Angabe in /BOR 08/, S. 169) bei einem Großteil der Proben aus dem z2 ein Wasserstoffanteil von 15 Vol.-% ermittelt. In /ELL 99/ werden für z3-Schichten H_2 -Gehalte von $< 3 \text{ Vol.-%}$

angegeben (Angabe in /BOR 08/). Auch für das H₂ wird vermutet, dass es seit der Bildung der Salzgesteine in den Formationen enthalten ist.

Angetroffen wurden Gase in geringem Umfang in sog. „Knistersalzen“, die z. B. im Kali-flöz Staßfurt vorkommen. Diese Salze zeichnen sich dadurch aus, dass sie fein verteilte Gaseinschlüsse enthalten, die beim Eintauchen in Wasser oder unter Reibung knisternd frei gesetzt werden. Gasgehaltsbestimmungen wurden auch im Staßfurt-Steinsalz durchgeführt und ergaben Werte kleiner 300 ppb. Damit liegen sie in einem Bereich, der auch in anderen Hauptsalzvorkommen gefunden wurde, z. B. nach /GER 91/, der Gasgehalte von weniger als 0,03 Vol.-% ermittelte. Außerdem sind aus Salzstrukturen im Werra-Fulda-Gebiet größere CO₂-Gasmengen bekannt, die dort auf den tertiären Vulkanismus zurückzuführen sind, bei dem die Strukturen auch von basaltischen Magmen durchschlagen wurden /BOR 08/. Derartige Vorkommen sind am Standort auch in Zukunft unwahrscheinlich, da im näheren Umfeld in der nächsten eine Million Jahre keine vulkanische Aktivität zu erwarten ist (s. Kapitel 5.2.1).

Zukünftige Entwicklung

Aus den verschiedenen Analyseergebnissen folgt, dass seit der Entstehung der Salzgesteine keine Fluide, gemäß der obigen Definition, in den Salzstock eingedrungen sind. Für die zukünftige Entwicklung ist daher nicht anzunehmen, dass es zu Fluidzutritten kommt, die vom Salzgestein aufgenommen werden oder es durchwandern. Die davon abweichenden Prozesse, die im Zusammenhang mit Kohlenwasserstoffen auftreten, werden in den nachfolgenden Kapiteln behandelt. Das heutige Erscheinungsbild und die Eigenschaften der Salzgesteine mit den darin enthaltenen Lösungseinschlüssen bleiben in der nächsten eine Million Jahre erhalten. Lediglich im Bereich von lösungserfüllten Klüften in Anhydritgesteinen wäre die Ausbildung eines Strömungspfades möglich. Dieser kann aufgrund der vorhandenen Boudinage-Strukturen jedoch nicht über weite Strecken als durchgängiger Fließweg fungieren.

3.5.4 Kohlenwasserstoffe im Salinar des Salzstocks Gorleben

Kohlenwasserstoffe (KW) sind in /MÜL 99/ definiert als chemische Verbindungen, deren Moleküle nur Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) enthalten und Ketten oder Ringe in unterschiedlicher Zusammensetzung (C_mH_n) bilden. Bei den Heterocyklen-KW werden zusätzlich noch die Elemente Chlor (Cl), Schwefel (S), Stickstoff (N) usw. eingebaut.

Natürlich kommen KW in der Geosphäre vor, da sie über pflanzliches oder tierisches Material, z. B. während der Sedimentation mit in die Schichten eingebracht werden können. Aus solchen organischen Überresten können unter günstigen Druck- und Temperaturbedingungen, z. B. bei einer Absenkung in größere Tiefen, in den Sedimenten (Muttergestein) Kohle und Erdöl bzw. Erdgas gebildet werden. Letztere sind aufgrund ihrer geringen Dichte und ihrer flüssigen oder gasförmigen Konsistenz leicht im Gestein zu mobilisieren. Bei vorhandenen Auflockerungen, wie z. B. Klüfte, Störungen oder permeable Porensysteme, migrieren diese KW in hangende Gesteine. Treffen sie dabei auf eine undurchlässige Schicht können sie sich darunter insbesondere in porösen Gesteinen anreichern und Lagerstätten bilden. Diese porösen und KW-gefüllten Bereiche werden dann als Speichergesteine bezeichnet. Undurchlässige Schichten mit abdichtender Wirkung sind z. B. Salz oder Ton. In Norddeutschland wurden viele Erdöl- und Erdgaslagerstätten unter Überhängen von Salzstöcken gefunden. Und auch im Salinar sind KW-Vorkommen, z. B. in Bergwerken in dieser Region, bekannt /BOR 08/ (S. 161).

Am Standort Gorleben wurden bei der Erkundung des Salinars verschiedene flüssige und gasförmige KW-Vorkommen nachgewiesen. Eine Zusammenfassung der Erkundungsergebnisse zu den KW-Vorkommen am Standort Gorleben wurde in /BOR 08/ vorgenommen, dort sind auch weitere Literaturhinweise zu finden. Nachfolgend sind in Tab. 3.6 die stratigraphischen Horizonte, in denen KW im Salzstock Gorleben bisher angetroffen und beschrieben wurden aufgelistet.

Tab. 3.6 Zusammenstellung der stratigraphischen Einheiten im Salinar des Salzstocks Gorleben mit KW-Vorkommen

Stratigraphie		KW-Führung beobachtet	
Abteilung	Gruppe	Anmerkung	Quelle
Zechstein 3 (Leine-Folge)	Anhydritmittel-salz (z3AM)	Kluftspeicher in Anhydritmittel-Schichten	/BOR 08/ (S. 162)
	Bank- und Bändersalz (z3BK und z3BD)	Gaszutritte	/BOR 08/ (S. 161)
	Orangesalz (z3OS)	Gaszutritte (Schachterkundung)	/BOR 08/ (S. 161)
		Gorleben-Bank (z3OSM): Kluftspeicher, teilw. im Liegenden, vereinzelt Racheln	/BOR 08/ (S. 162)
	Basissalz (z3BS)	Kluftspeicher (in Anhydritbank)	
	Hauptanhydrit (z3HA)	Kluftspeicher	
	Leine-Karbonat (z3LK)	Kluftspeicher	
	Grauer Salzton (z3GT)	Kluftspeicher	
Grenze Zechstein 2/3	(z2/z3)	in mit sekundärem Steinsalz verheilten Störungs- oder Kluftzonen	/BOR 08/ (S. 162)
		bei speziellen Lagerungsverhältnissen des Kaliflöz Staßfurt in diesem Bereich	
Zechstein 2 (Staßfurt-Folge)	Gebänderter Deckanhydrit (z2DA)	Kluftspeicher	/BOR 08/ (S. 162)
	Hauptsalz (z2HS)	Knäuelsalz (z2HS1): Kondensat nestartig verteilt	/BOR 08/ (S. 163-165)
vier Vorkommen Übergang Knäuel-/Streifensalz (salztektonisch stark überprägt)			

Die Abstände der isolierten Vorkommen variieren im westlichen Erkundungsabschnitt im Meter bis 10er Meter-Bereich, teilweise liegen im östlichen Abschnitt auch Abstände im 100 Meter-Bereich vor. Ob diese räumlichen Unterschiede eine generelle Verteilungsgesetzmäßigkeit im Salzstock darstellen, wurde, ebenso wie die exakte Bestimmung der in den Schichten enthaltenen KW-Menge, noch nicht abschließend geklärt. Ebenso ist bei den im Salinar angetroffenen Gasen eine genetische Zuordnung in vielen Fällen nicht eindeutig möglich, was nach /BOR 08/ (S. 166) wahrscheinlich auf unkontrollierte, partielle Gasverluste vor und während der Probenahme zurückzuführen ist. Die in Kapitel 3.5.3 beschriebenen Knistersalze wurden in verschiedenen Steinsalzhorizonten und im Carnallit auch KW-führend beobachtet /BOR 08/ (S. 161).

Geochemische und isotopengeochemische Untersuchungen ergaben ein Spektrum unterschiedlicher KW im Salzstock Gorleben. Nach /GER 96/ ist die Hauptkomponente der gasförmigen KW-Vorkommen das Methan. Daneben kommen auch noch Ethan, Propan und andere höhere KW vor. Basierend auf den $\delta^{13}\text{C}$ - und δD -Werten werden die meisten freien Gaszutritte als autochthone Zechsteinprodukte mit thermischer Überprägung (thermogenes Gas) und einem geringen Anteil bakteriellen Ursprungs (s. a. Kapitel 4.3.11) interpretiert (/GER 91/, /GER 96/ und /SCH 83/). Analysen an flüssigen KW ergaben einen überwiegenden Anteil von niedrig siedenden C_6 bis C_{16} (meist $\leq \text{C}_{10}$), höhere Homologe kommen nur in vergleichsweise geringen Konzentrationen vor.

Mineralogisch-petrographische Untersuchungen an Dickschliffen aus dem Knäuelsalz (z2HS1) weisen auf eine inhomogene Verteilung der KW entlang von Rissen und an Korngrenzen hin (/FIS 00/, /POP 02/). Diese KW können bei Druck- und Temperaturänderungen prinzipiell mobilisiert werden. Im Gegensatz zu den sonstigen Fluiden, die im Salzstock Gorleben vorkommen (vgl. Kapitel 3.5.3), spielen intrakristalline Gas- und Kondensateinschlüsse nur eine untergeordnete Rolle.

Zukünftige Entwicklung

In der nächsten eine Million Jahre werden die unregelmäßig verteilten KW-Vorkommen im Salinar bestehen bleiben. Eine Mobilisierung der KW z. B. durch den zu erwartenden Diapirismus (Kapitel 4.5.1) mit Bewegungsraten bis zu ca. 70 m im Bereich des Hauptsalzes, in dessen Verlauf es zu Deformationen mit entsprechenden Spannungsveränderungen kommt, ist in dieser Zeit wahrscheinlich. Die Auswirkungen werden

allerdings gering sein, da der Prozess über die gesamte Zeit kontinuierlich und langsam abläuft.

3.5.5 Ungewissheiten bei der Prognose der Entwicklung des Salzstocks Gorleben

Ungewissheiten bei der Prognose der weiteren Entwicklung des Salzstocks Gorleben ergeben sich hauptsächlich aus der im Jahr 2000 durch das Moratorium unterbrochenen Erkundung. Daher sind noch nicht alle Gegebenheiten am Standort ausreichend bekannt und die Datengrundlage noch unvollständig. Nachfolgend werden die Prognoseungewissheiten der vorhergehenden Kapitel nach Themenbereichen gegliedert erläutert.

Zusammensetzung und struktureller Bau des Salinars

Änderungen der Zusammensetzung des Salinars ergeben sich in Zukunft hauptsächlich im Bereich des Salzspiegels, dessen Entwicklung und Ungewissheiten in den Kapiteln 4.2.9 (Glazigene Rinnen), 4.3.3 (Erosion) und 4.5.3 (Subrosion) beschrieben sind. Die Änderungen und Ungewissheiten der strukturellen Entwicklung sind im Kapitel 4.5.1 (Diapirismus und Halokinese) erläutert.

Klüfte und Störungen im Salinar

Die zukünftige Entwicklung oder Neuanlage von Klüften im Salinar ist von den jeweiligen Materialeigenschaften und der Beanspruchung der Einheiten im Salzstock abhängig. Diesbezügliche Ungewissheiten ergeben sich aus der Tatsache, dass die Erkundung und Bewertung dieser Faktoren noch nicht abgeschlossen sind. Im Rahmen der VSG werden in AP 9 u. a. unterschiedliche kaltzeitliche Beanspruchungen des Salinars modelliert, um zu klären, ob dadurch Klüftbildungen möglich sind.

Im Zusammenhang mit der Erläuterung der Fluidvorkommen im Salzstock Gorleben werden sowohl in /BOR 08/ als auch in /SCM 09/ Klüfte und Störungen in verschiedenen Schichten erwähnt. Für die Bewertung der zukünftigen Entwicklung der salinaren Einheiten am Standort ergeben sich daraus Ungewissheiten. Unklar ist derzeit, ob es sich bei den angesprochenen Störungen tatsächlich um Störungen im eigentlichen Sinn oder um extreme Verfaltungen oder Klüfte handelt. Auch für diese strukturellen Elemente kann durch die weitere Erkundung geklärt werden, ob sie an bestimmte

stratigraphische Einheiten gebunden sind oder ob sie abhängig von der Raumlage im Salzstock vermehrt vorkommen. Ungewiss ist auch wie und in welchem Zeitrahmen sich die Entwicklung der Klüfte und Störungen von ihrer Anlage bis zum Verheilen vollzogen hat.

Fluidvorkommen

Bei den Fluidvorkommen ergeben sich die Ungewissheiten ebenfalls durch den derzeitigen Erkundungsstand. Detaillierte und vor allem schichtcharakteristische Angaben zu den Reservoirarten und -größen sowie zu den im Salinar enthaltenen Fluidmengen sind basierend auf der vorliegenden Datenbasis nur für die bisher erkundeten Bereiche im Salzstock möglich. Weitere Ungewissheiten existieren hauptsächlich in Bezug auf die interne Mobilisierung der Fluide und die damit verbundene Wechselwirkung mit dem Gestein. Die Auswirkungen dieser internen Prozesse werden jedoch als gering erachtet, so dass die auf den Ungewissheiten beruhenden Auswirkungen ebenfalls gering sein werden.

Insbesondere im Bereich des Hauptanhydrits besteht die Ungewissheit bei der Prognose der möglichen Reservoirgrößen darin, dass sie von der Größe der einzelnen Anhydritschollen abhängen. Die Größe dieser Schollen schwankt aufgrund ihrer Zerblockung stark. Daher kann das Vorhandensein von größeren Schollen mit größeren Reservoirs, als den bisher angetroffenen, nicht ausgeschlossen werden.

Kohlenwasserstoffe

Art, Menge, Verteilung und Genese von KW in Evaporiten sind auch über den Standort hinaus Gegenstand der aktuellen Forschung. Neue Erkenntnisse können daher auch zu geänderten Bewertungen der Situation und zukünftigen Entwicklung am Standort Gorbleben führen.

4 Wahrscheinliche zukünftige geologische Entwicklungen am Standort Gorleben

In diesem Kapitel werden die geologischen Entwicklungen beschrieben, die am Standort Gorleben in der nächsten eine Million Jahre eintreten werden oder die permanent ablaufen und die rezenten Gegebenheiten verändern. Die Entwicklungen werden jeweils kurz definiert und ihre Ausprägungen in der Vergangenheit skizziert, bevor der Ausblick in die Zukunft erfolgt. Ergänzend erfolgt eine Diskussion der Ungewissheiten, mit denen die Entwicklungen am Standort behaftet sind.

4.1 Überregionale Entwicklungen mit Einwirkungen auf den Standort Gorleben

4.1.1 Senkung der Erdkruste

Unter Senkung der Erdkruste wird eine über lange geologische Zeiträume andauernde und weiträumig ausgedehnte Abwärtsbewegung in vertikaler Richtung verstanden. Sie erzeugt keine Störungen des Gesteinsgefüges in Form von spannungsabbauender Tektonik, wie z. B. Verwerfungen. Aufgrund der Weiträumigkeit kann eine Absenkung von Landmassen eine Transgression (s. a. Kapitel 4.3.1) zur Folge haben.

Am Standort Gorleben wurden nach /LUD 95/ und /LUD 01/ seit dem Oligozän (Rupel, d. h. seit etwa 30 Mio. Jahren) im Mittel Senkungsraten der Erdkruste von ca. 0,01 mm/Jahr ermittelt. Dies entspricht auf eine Million Jahre hochgerechnet einer Senkung des Gebietes von 10 m.

Zukünftige Entwicklung

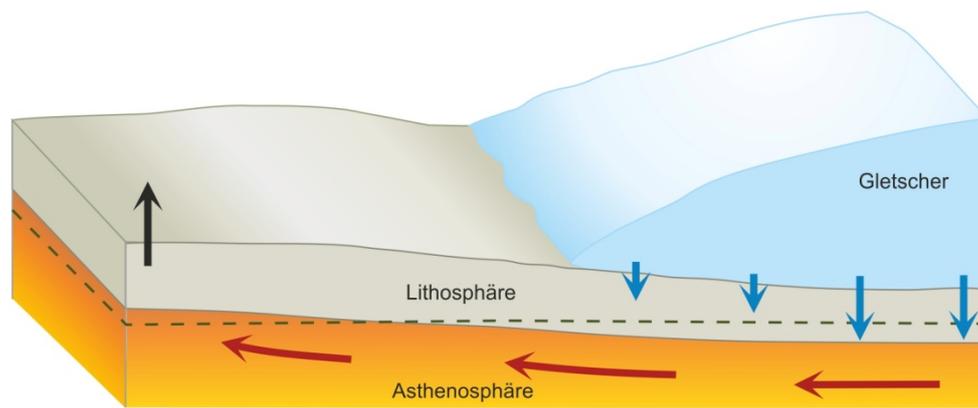
Ein Fortschreiten der Senkung der Erdkruste bei unveränderter Rate hätte in der nächsten eine Million Jahre eine Transgression zur Folge, bei der das Meer den Bereich des Salzstocks Gorleben basierend auf der heutigen Topographie jedoch nicht erreichen würde. Eine Überflutung des Standortes nur aufgrund der Senkung der Erdkruste kann ausgeschlossen werden, da die Geländehöhe im Standortgebiet selbst in den Ebenen mit im Mittel 15 m ü. NN bei einer Absenkung von 10 m nicht das Meeresniveau erreicht. Daraus resultiert, dass der Prozess alleine keine bedeutenden Umgestaltungen und Auswirkungen hervorruft.

4.1.2 Ungewissheiten bei der Prognose der Senkung der Erdkruste

Senkungen der Erdkruste werden im gesamten nordeuropäischen Raum seit Jahren erforscht und gemessen, wodurch eine verlässliche Datengrundlage existiert. Die Abschätzungen, die auf dieser Basis beruhen, belegen den Prozess für die zukünftige Entwicklung daher mit ausreichender Genauigkeit. Außerdem wird der Standortbereich von der Senkung der Erdkruste in seiner Entwicklung nur untergeordnet beeinflusst. Diese Beeinflussungen sind im Vergleich zu anderen Prozessen so gering, dass eine weitere Betrachtung der Ungewissheiten bei der Ausprägung entfallen kann.

4.1.3 Krustendeformation

Als Krustendeformation werden nicht tektonisch bedingte, kurzfristig auftretende Verformungen bezeichnet, die im Zusammenhang mit isostatischen Ausgleichsbewegungen durch die erhöhte Auflast bei einer Vergletscherung stehen. Die Auflast des Gletschers führt zu einem Abfluss von darunterliegendem Mantelmaterial in Richtung des Gletscherrandes. Dabei wird Krustenmaterial abgesenkt und im weiteren Umfeld des Gletschers kommt es durch diese Verlagerung zu Aufwärtsbewegungen (Abb. 4.1).



Legende:			
↓	Absinken durch Auflastdruck	←	Abstrom von Mantelmaterial
↑	isostatische Hebung	- -	Krustenunterkante vor Vergletscherung

Abb. 4.1 Skizze vom Prinzip der isostatischen Ausgleichsbewegungen bei Gletscherauflast

Rezent treten am Standort Gorleben keine isostatischen Ausgleichsbewegungen auf, da die letzte Kaltzeit (Weichsel) keine Gletscherüberdeckung erzeugt hat, die eine entsprechende Auflast bewirkt hätte. Ein Nachweis für Krustendeformationen während der Saale- und Elster-Kaltzeit konnte am Standort bisher nicht erbracht werden. Vermutlich reichte die Eismächtigkeit von ca. 700 bis 1.500 m (/FEL 02/, s. a. Abb. 4.11) zu diesen Zeiten ebenfalls nicht aus, um isostatische Bewegungen zu bewirken, oder sie waren so gering, dass sie sich bereits vollständig zurückgebildet haben. Allgemein bilden sich isostatisch bedingte Deformationen im Zuge des Gletscherrückzuges und der damit abnehmenden Auflast langsam wieder zurück. Dieser Prozess dauert auch nach dem vollständigen Rückzug weiter an und ist in der Dauer abhängig von der Intensität der vorher stattgefundenen Absenkung. Eine Überprägung von geringen Deformationen am Standort Gorleben, z. B. durch Sedimentation oder Erosion, zu späteren Zeiten ist jedoch auch nicht völlig auszuschließen.

Abhängig vom Krustenaufbau und dem regional herrschenden Spannungsfeld kann es im Vorfeld des Gletschers zur Bildung einer Randaufwölbung kommen. Hervorgerufen wird sie durch das mit Änderungen im horizontalen Spannungsgefüge einhergehende Vorrücken des Gletschers. Bei einer Überlagerung des regionalen Spannungsfeldes mit den Spannungsänderungen durch den Gletscher entsteht eine Extension, die eine Aufwölbung des Untergrundes nach sich zieht (Abb. 4.2). Diese Randaufwölbungen

bilden sich beim Abschmelzen der Gletscher jedoch sehr schnell zurück, da das Eis zuvor als deren Widerlager fungierte (/STE 00/).

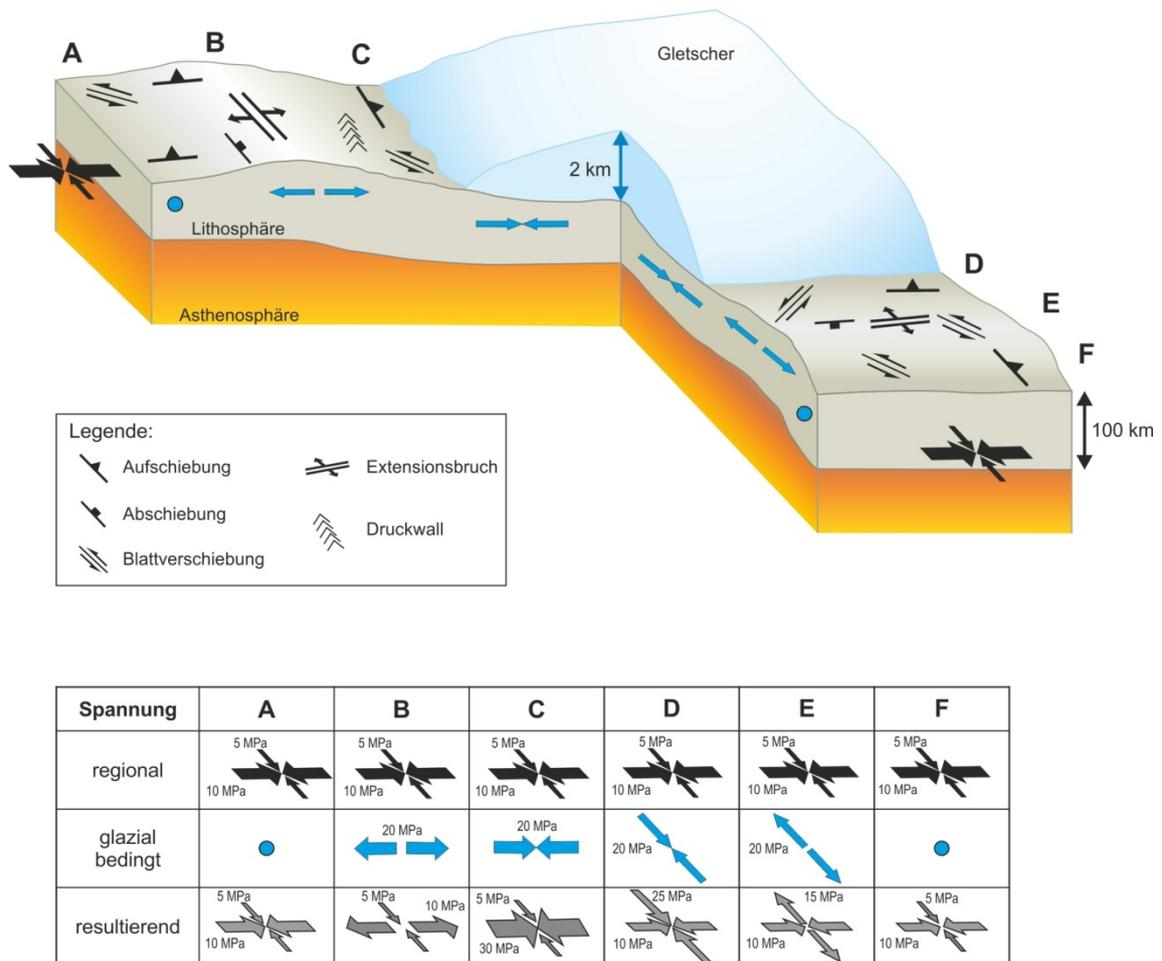


Abb. 4.2 Schema der Spannungsverteilung im Umfeld einer Gletscherauflast (geändert nach /STE 00/)

Zukünftige Entwicklung

In Zukunft wird mit ca. zehn weiteren Kaltzeiten innerhalb der nächsten eine Million Jahre gerechnet (s. a. Kapitel 3.1), von denen einige auch die Intensität der Elster- und Saale-Kaltzeit erreichen können. Treten solche Kaltzeiten auf, ist auch der Aufbau der damals erreichten Eismächtigkeiten am Standort erneut möglich. Aufgrund der Lage des Standortbereichs zu den damaligen Eisrändern (Abstand nach Süden ca. 100 km) sind jedoch auch höhere Eismächtigkeiten nicht völlig auszuschließen, diese könnten Werte von ca. 1.000 m erreichen. Solche Eismächtigkeiten in Abständen von 100 km zum Eisrand sind sowohl in Modellrechnungen als auch bei rezenten Gletschern nachgewiesen worden, so dass sie je nach Ausbreitungsrichtung und Geschwindigkeit des

Gletschers auch im Bereich Gorleben anzunehmen sind (Abschätzung z. B. in /DEL 91/). In diesem Fall könnten geringe Krustendeformationen am Standort Gorleben auftreten. Eine exakte Vorhersage der in Zukunft entstehenden Eismächtigkeiten ist nicht möglich, da insbesondere die nötigen klimatischen Rahmenbedingungen nicht genau genug modelliert werden können. Mögliche Entwicklungen könnten im Rahmen von Alternativszenarien betrachtet werden, um eventuell resultierende Konsequenzen zu bewerten.

4.1.4 Ungewissheiten bei der Prognose von Krustendeformationen

Die exakte Prognose von Eismächtigkeiten während zukünftiger Kaltzeiten ist aufgrund der großen Anzahl von einflussnehmenden Faktoren, wie z. B. Intensität der Kaltzeit und zur Verfügung stehende Niederschlagsmengen, nicht möglich. Außerdem ist nicht vorhersagbar, zu welchem Zeitpunkt eine Kaltzeit mit Eisüberdeckung am Standort Gorleben auftreten wird. Da in diesem Gebiet bisher keine Hinweise auf Krustendeformationen nachgewiesen wurden ist es wahrscheinlich, dass die zukünftigen Entwicklungen ebenso geringe oder keine messbaren Auswirkungen zeigen werden.

4.1.5 Neotektonische Vorgänge

Unter dem Begriff „Neotektonische Vorgänge“ werden alle tektonischen Prozesse zusammengefasst, die ungefähr seit dem Beginn des Neogen, vor ca. 23 Millionen Jahren, Deformationen ausgelöst haben. Auch rezent wirkende tektonische Ereignisse zählen dazu.

Am Standort Gorleben konnten, wie im mitteleuropäischen Raum weit verbreitet, extreme rezente Spannungen im Untergrund nicht nachgewiesen werden. Für das gesamte norddeutsche Tiefland wird das regionale Spannungsfeld der maximalen horizontalen Kompressionsspannung in /GRÜ 95/ mit einer NW-SE orientierten Hauptrichtung angegeben, die auch in Abb. 4.3 nach /HEI 08/ zu erkennen ist.

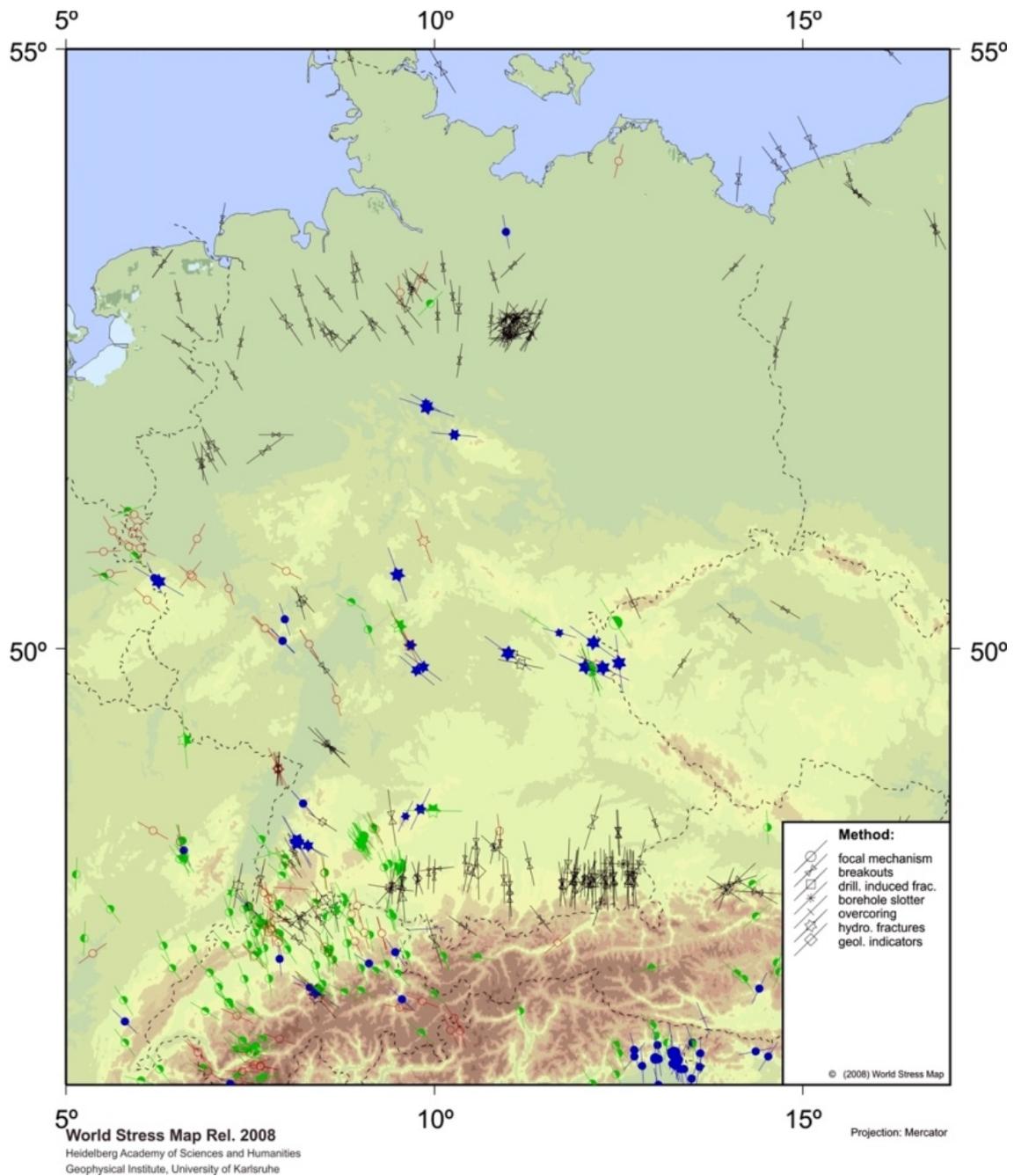


Abb. 4.3 Spannungsfeld in Deutschland (nach /HEI 08/, geändert)

Als Auslöser für die herrschenden Spannungen werden das mittelatlantische seafloor spreading und die Nordwärtsdrift der Afrikanischen Platte angegeben. Dadurch ergibt sich ein konstantes Spannungsfeld, das auf großräumigen Plattenbewegungen beruht. Die letzte tektonisch aktive Phase liegt in Norddeutschland mehr als zehn Millionen Jahre zurück und ist im Zusammenhang mit der alpidischen Gebirgsbildung zu sehen.

Zukünftige Entwicklung

Für die nächste eine Million Jahre ist auch aufgrund der plattentektonischen Lage nicht damit zu rechnen, dass eine intensive Umgestaltung stattfindet, in deren Verlauf sich das Spannungsbild ändert und die Kruste entsprechend mobilisiert wird. Daher ist mit neotektonischen Prozessen und daraus resultierenden Deformationen am Standort Gorleben im Prognosezeitraum nicht zu rechnen.

4.1.6 Ungewissheiten bei der Prognose der Neotektonik

Die Ungewissheiten im Zusammenhang mit der Entwicklung der Neotektonik am Standort Gorleben sind sehr gering einzuschätzen, da das Spannungsfeld im gesamten westeuropäischen Raum nur wenig variiert und stabil ist. Außerdem sind Änderungen der Lage des Standortes in Bezug auf den Abstand zur Plattengrenze auf der europäischen Platte innerhalb einer Million Jahre nicht zu erwarten.

4.1.7 Erdbeben

Erdbeben entstehen durch die plötzliche Freisetzung von Deformationsenergie, die sich in begrenzten Bereichen der Lithosphäre aufgebaut hat. Als Folge einer Entladung breiten sich seismische Impulse oder Wellen aus, die kurzzeitige Erschütterungen auslösen. Sie treten zu etwa 95 % an den Rändern der Kontinentalplatten auf. Ursachen für Erdbeben sind tektonisch und vulkanisch bedingt oder werden anthropogen, z. B. durch Explosionen, induziert. Darüber hinaus können Erdbeben auch während einer Kaltzeit im Zusammenhang mit Eisstauseen ausgelöst werden, wenn sich große Eisstauseen über Gebieten mit hohen angestauten Deformationsenergien bilden. Erdbeben entstehen unter diesen Bedingungen vor allem, wenn sich die Spannungsverhältnisse bei einem plötzlichen Entleeren dieser Seen, z. B. durch aufreißende Spalten, in kurzer Zeit ändern.

Auch abtauende, mächtige Inlandeismassen im Bereich aktiver Störungszonen können durch folgende isostatische Ausgleichsbewegungen der Erdkruste Erdbeben erzeugen (Abb. 4.4). Nach /STE 00/ müssen im Untergrund allerdings bestimmte Bedingungen erfüllt sein, um solche Erdbeben zu erzeugen. Diese sind eine im Verhältnis zur Krustendicke hohe Eismächtigkeit und das Vorliegen einer kompressiven Spannungsverteilung im Untergrund, auf welche die Gletscherauflast einwirkt.

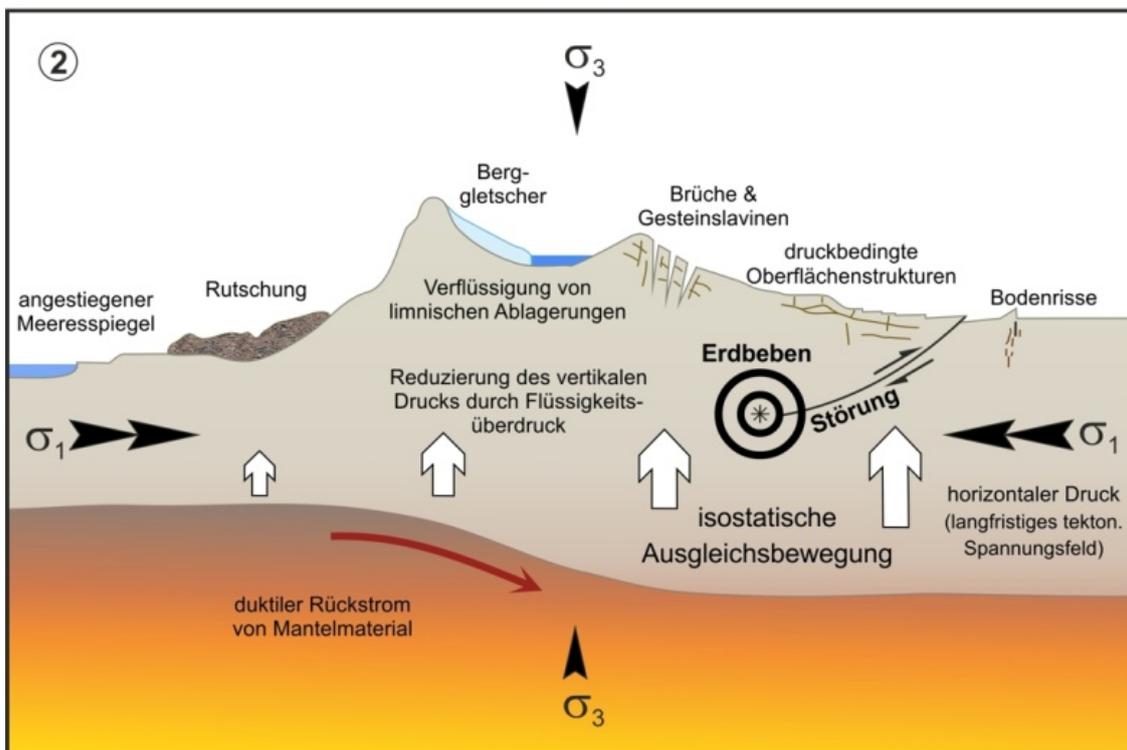
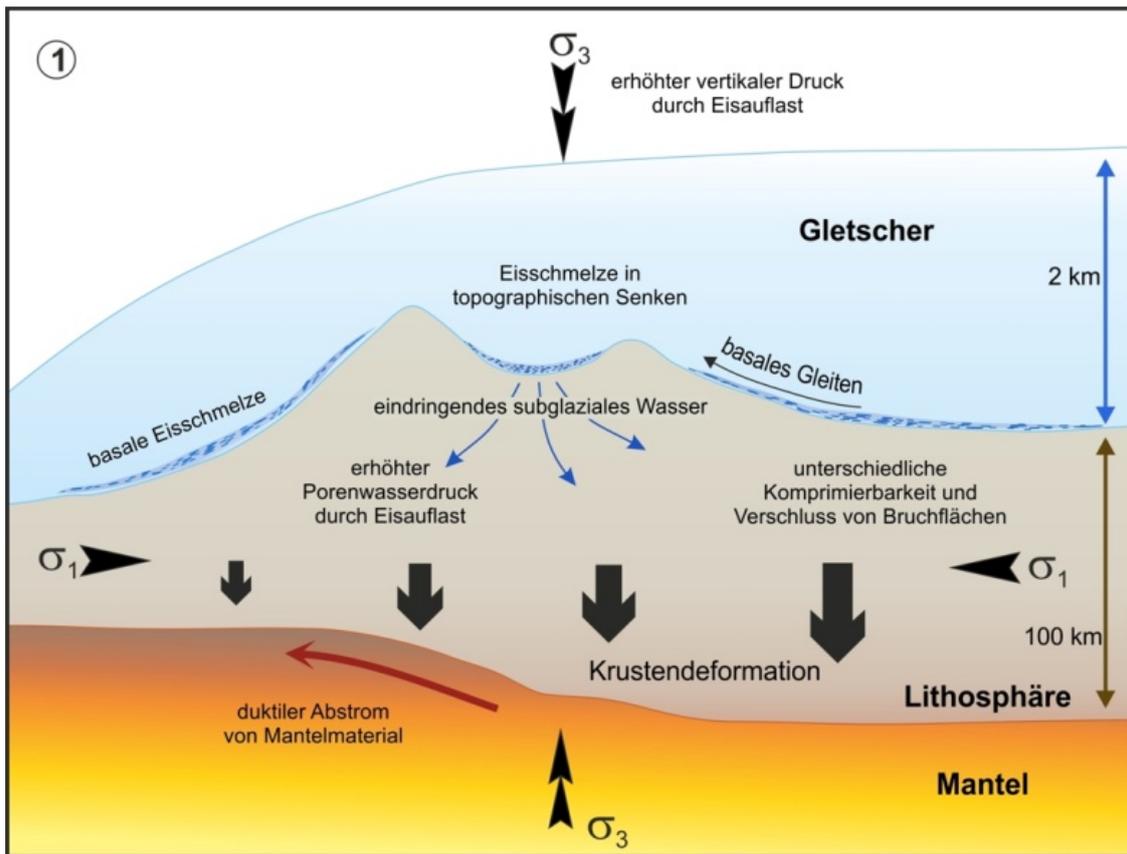


Abb. 4.4 Komponenten eistektonisch induzierter Erdbeben (geändert nach /STE 00/)

(1) Zustand unter Eisauflast und (2) Reaktionen nach dem Rückzug des Gletschers in einem Gebiet mit einem natürlich vorhandenen kompressiven Spannungsfeld

In seismisch aktiven Bereichen treten Erdbeben gehäuft auf und sind darüber hinaus nicht gleichmäßig verteilt. Abb. 4.5 zeigt die Verteilung und Intensität der Erdbeben in Deutschland für den Zeitraum vom Jahr 800 bis zum Jahr 2010.

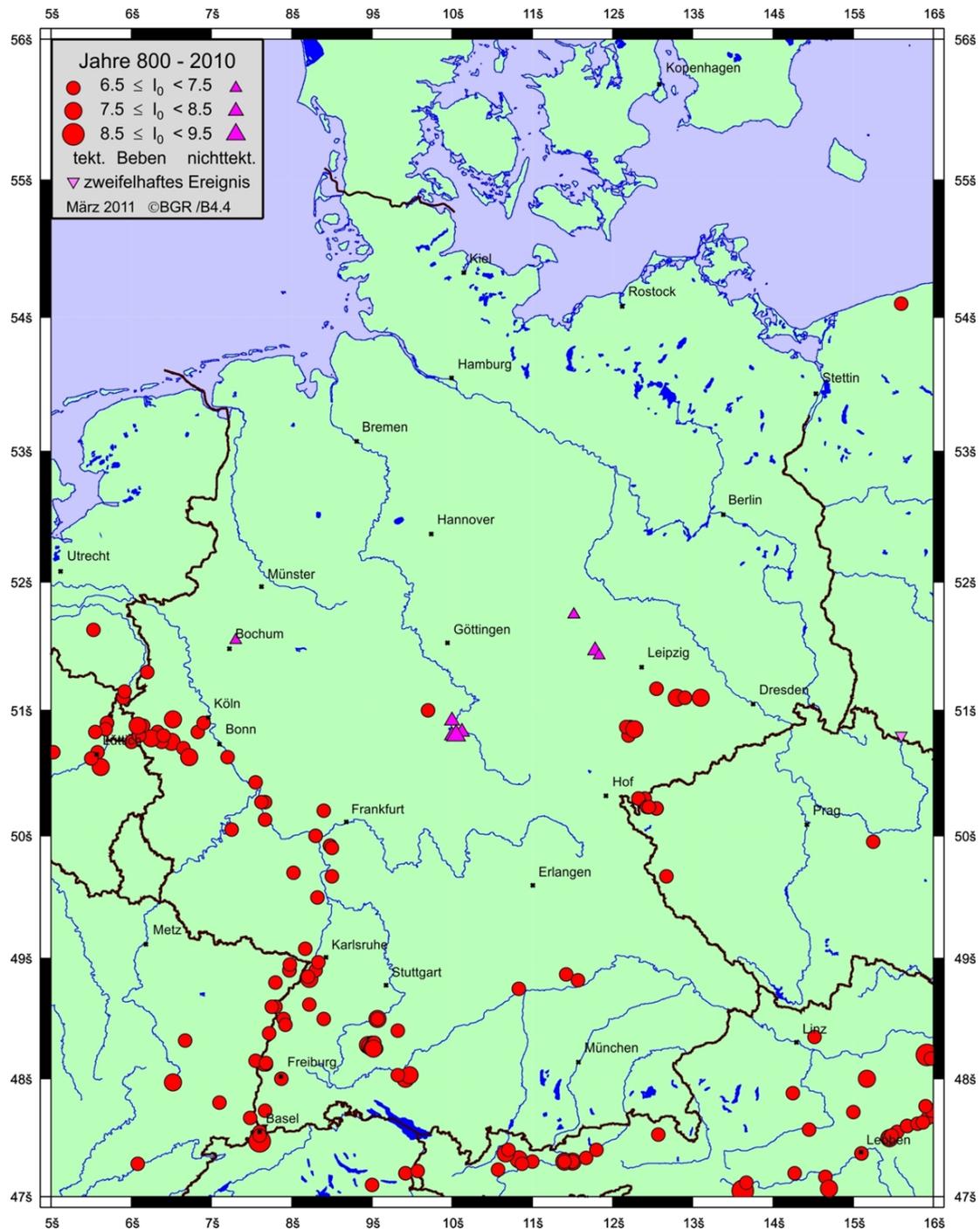


Abb. 4.5 Karte der Epizentren der Schadenbeben in der Bundesrepublik Deutschland und angrenzenden Gebieten der Jahre 800 bis 2010 /BGR 10/ Dargestellt ist die Intensität im Epizentrum, abgekürzt mit I_0 .

Für die Bundesrepublik Deutschland wurde eine erdbebengeographische Einteilung vorgenommen, in der die aktiven Gebiete nach Intensität des stärksten Bebens und Tiefe des Erdbebenherdes sortiert ausgewiesen sind (/LEY 02/; /LEY 98/). Im Deckgebirge können stärkere Beben zur Ausbildung von räumlich begrenzten Auflockerungs- und Störungszonen im Meterbereich führen, in denen die hydraulische Leitfähigkeit erhöht ist.

Welche Auswirkungen Erdbeben auf Salzgesteine haben können wurde von /MIN 10/ an Gebirgsschlägen im Kalibergbau als „Naturalogon“ untersucht. Diese Untersuchungen wurden in der Grube Teutschenthal anhand von direkten Messungen in dem durch den Gebirgsschlag beanspruchten hangenden Steinsalz und mit geomechanischen Modellrechnungen durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass das Salzgestein durch dieses Ereignis aufgrund seiner plastischen Eigenschaften nicht verletzt wurde. Selbst im Bereich auffahrungsbedingter Hohlräume im untersuchten Bergwerk konnten keine Schädigungen festgestellt werden. Im Vergleich zu den Gebirgsbeanspruchungen, die in Deutschland durch natürliche seismische Ereignisse ausgelöst werden könnten, liegen die durch Gebirgsschlag erzeugten um ein vielfaches höher. Daraus folgt, dass eine beeinträchtigende Auswirkung von natürlichen seismischen Ereignissen im Salinar eines Salzstocks nicht zu erwarten ist.

Zukünftige Entwicklung

Aus historischer Zeit sind im direkten Umfeld von Gorleben keine tektonisch bedingten Erdbeben bekannt geworden /AHO 89/, /LEY 02/. Auch Mikrobeben, die als Hinweis auf aktive tektonische Bewegungen innerhalb der Erdkruste gewertet werden, konnten am Standort durch seismische Aufzeichnungen nicht nachgewiesen werden. Auf Basis der KTA 2201 von 1975 wurde in /AHO 89/, anhand einer Auswertung von historischen Erdbeben im Bereich des Norddeutschen Beckens (im Umkreis von 200 km um den Standort Gorleben), u. a. eine Berechnung des Bemessungserdbebens mit Standortintensitäten in MSK-Skalenwerten vorgenommen. Eine Neuberechnung anhand der 1990 geänderten oder der aktuellen KTA (Fassung von 2011) erfolgte für das Umfeld des Standortes Gorleben noch nicht.

Aufgrund der geringen tektonischen Aktivität im Bereich des Standorts und der damit einhergehenden begrenzten Datengrundlage zur Einschätzung der Erdbebenhäufigkeit wird auf die Angabe einer Überschreitungswahrscheinlichkeit entsprechend den Ausführungen in STE/96 verzichtet. Als Prognose wird für den Nachweiszeitraum am

Standort ein deterministisch ermitteltes Bemessungserdbeben zugrunde gelegt, dass nach den Arbeiten von /AHO 89/, /STE 96/ und /LEY 08/ eine Intensität von 7,3 (MSK) aufweist.

Untersuchungen zur Strukturgeologie und Modellrechnungen zur Klärung horizontaler Hauptspannungsrichtungen in Norddeutschland wurden von /BRÜ 02/ und /CON 03/ durchgeführt. Beide belegen, dass eine Wiederbelebung oder Schaffung von Sockelstörungen und damit einhergehende Erdbeben weitestgehend ausgeschlossen werden können. Weitere Angaben zur Vorgehensweise bei den Analysen und zur verwendeten Datenbasis können den jeweiligen Veröffentlichungen entnommen werden. Übertragen auf den Standortbereich Gorleben, in dem keine Sockelstörungen gefunden wurden, bedeuten diese Ergebnisse der Untersuchungen, dass auch in Zukunft nicht mit der Anlage von neuen Sockelstörungen durch Erdbeben zu rechnen ist. Zusätzliche Erläuterungen zu Erdbeben im norddeutschen Raum finden sich auch im FEP Erbeben im FEP-Katalog, der Teil des VSG ist (Arbeitspaket 7). Aus dem Fehlen aktiver Störungszonen und den am Standort in Zukunft zu erwartenden Eismächtigkeiten (Kapitel 4.2.7), die geringer ausfallen werden als die nach Abb. 4.4 nötigen, folgt, dass mit eistektonisch erzeugten Erdbeben am Standort Gorleben nicht zu rechnen ist. Ebenso sind vulkanische Beben am Standort Gorleben aufgrund der fehlenden Voraussetzungen nicht zu erwarten (s. a. Kapitel 5.2.1). Da die Eintrittswahrscheinlichkeit von stärkeren Erdbeben am Standort gering ist, sind auch die Auswirkungen von Erdbeben auf die Grundwasserströmung als gering anzusehen. Sollte es im Standortgebiet von Gorleben trotzdem zu Lageverschiebungen im Aquifersystem kommen, kann davon ausgegangen werden, dass diese lokal begrenzt sind und das Fließsystem nicht grundlegend ändern werden.

4.1.8 Ungewissheiten bei der Prognose von Erdbeben

Eine Prognose von Erdbeben ist nicht möglich, da ein Spannungsaufbau im Untergrund zwar messbar ist, sich seine bevorstehende Entladung aber nicht messbar ankündigt. Auch eine genaue Prognose der Stärke der Beben ist über statistische Abschätzungen hinaus nicht möglich. Da diese Statistiken auf historischen Beobachtungen beruhen kann deren Extrapolation auf eine Million Jahre in die Zukunft nur als Näherung verstanden werden.

4.2 Kaltzeitliche Entwicklungen

Im Kapitel „Kaltzeitliche Entwicklungen“ werden die drei Zustände Permafrost, Inlandvereisung in randlicher Lage, vollständige Inlandvereisung sowie die mögliche Bildung von kryogenen Klüften und glazigenen Rinnen erläutert. Bei einer intensiven Kaltzeit am Standort Gorleben treten diese drei Zustände aufeinanderfolgend ein. Der Übergang in eine Kaltzeit erfolgte, wie in den Klimakurven für die Vergangenheit (s. a. Kapitel 3.1.6) nachvollziehbar, schrittweise über längere Zeiträume. Auf den Standort Gorleben bezogen käme es demnach zunächst zur Ausbildung von Permafrostverhältnissen, gefolgt von einer Eisrandlage, bis schließlich eine vollständige Vereisung vorläge. Der anschließende Übergang in eine Warmzeit erfolgt plötzlich und läuft in kurzer Zeit ab. Dabei entwickeln sich auch die drei Zustände rückläufig bis letztlich der Permafrost vollständig zurückgebildet ist. Fällt die Kaltzeit weniger intensiv aus, so wird nur das Stadium mit Eisrandlage oder eventuell nur der Permafrost erreicht. Abb. 4.6 zeigt die Gletscherrandlagen der letzten drei Kaltzeiten in Norddeutschland, auf die in den folgenden Kapiteln Bezug genommen wird.



Abb. 4.6 Ausbreitungsgrenzen der Vergletscherung in den letzten Kaltzeiten (Eisrandlagen nach /STA 01/)

Aus /SKU 03/ (72ff.) ist für den Bereich Nordost-Westfalen und angrenzende Gebiete in Niedersachsen zu entnehmen, dass nach Berechnungen der Fließgeschwindigkeiten in Eisschilden für den zentralen Teil einer fließenden Eismasse Werte von 15 bis 40 m pro Jahr, für die Randbereiche Geschwindigkeiten von über 100 bis 600 m pro Jahr anzunehmen sind. Für das Inlandeis der letzten Kaltzeit (Weichsel-Zeit) werden im norddeutschen Vereisungsgebiet Fließgeschwindigkeiten zwischen 75 m und 150 m pro Jahr angegeben. Die Randbereiche des Inlandeises der Saale-Kaltzeit weisen die mittlere Vorstoßgeschwindigkeit von etwa 200 m pro Jahr auf. Diese höhere Geschwindigkeit lässt sich aus der im Vergleich zum Weichsel-Eis größeren Mächtigkeit der saalezeitlichen Eisdecke ableiten.

Mit der Annäherung des Eises an die Mittelgebirge bildeten sich zwischen dem Eisrand und den Höhenzügen ausgedehnte Stauseen (vgl. /THO 98/). Auch nördlich des Wie-

hengebirges wird ein derartiger Stausee vermutet, in dem sich das Schmelzwasser des Inlandeises und die Wassermengen der von Süden kommenden Flüsse sammelten. Beim Überfahren dieser Stauseen hat die Fließgeschwindigkeit des Eises sehr wahrscheinlich stark zugenommen. Vergleichbare Verhältnisse lagen im Bereich südlich des Wiehen- und Wesergebirges vor, in dem sich der so genannte Rintelner Eisstausee gebildet hatte. Dort dürfte die Fließgeschwindigkeit wegen des Auftriebs der Eismasse und des Aufschwimmens der randlichen Zonen des Eises maximale Werte von 500 - 600 m pro Jahr erreicht haben. Der an der Basis der Eismasse entstehende Schmelzwasserfilm entkoppelt diese vom Untergrund und wirkt als Gleitfilm. Er setzt die Reibungs- und Scherwiderstände herab und führt damit zu einer deutlich schnelleren Bewegung des Eises. Bei einer Fließgeschwindigkeit von 500 m pro Jahr hätte der Porta-Gletscher auf seinem Vorstoß nach Osten - das Wesertal aufwärts bis in die Gegend von Hameln - etwa 60 Jahre benötigt. Dieser Wert stimmt in der Größenordnung gut mit der vermuteten Dauer der ersten Phase des Rintelner Eisstausees überein.

Während der Elster-Kaltzeit erreichte der maximale aus dem Norden kommende Gletschervorstoß die deutschen Mittelgebirge und erstreckte sich in Mittel- und Ostdeutschland bis in die Regionen um Erfurt und Dresden. Im westlichen Teil Norddeutschlands lagen die äußersten Eisrandlagen im Düsseldorfer und Dortmunder Raum. Eine ähnliche Ausdehnung hatte das Inlandeis der Saale-Kaltzeit. Dagegen bedeckte die maximale Ausdehnung der letzten Kaltzeit (Weichsel) mit ihrer südlichsten Eisrandlage nur die Gebiete nördlich der Elbe (Abb. 4.6).

4.2.1 Permafrost

Permafrost liegt im Untergrund, z. B. nach /ELI 07/, dann vor, wenn im dortigen Boden oder Gestein mindestens zwei Jahre lang Temperaturen unter 0 °C herrschen. Abhängig von der Tiefenlage und den Druckverhältnissen ist er dabei gefroren oder enthält Wasser, das die gleichen tiefen Temperaturen aufweist. Die Permafrostmächtigkeit kann von einigen Zentimetern bis Kilometern reichen und an der Oberfläche einen Bereich aufweisen, der jahreszeitlich bedingt frostfrei ist. Die Bildung von Eis im Boden oder Gestein hat größere Auswirkungen auf die dort ablaufenden Prozesse, so dass nachfolgend auf den tatsächlich gefrorenen Anteil des Permafrostes eingegangen wird.

Seine Mächtigkeit wird außer durch die klimatischen Verhältnisse, wie der zeitlichen Dauer niedriger Temperaturen, der Zugehörigkeit zu ozeanischem oder kontinentalem

Klima, vom Salzgehalt des Grundwassers, dem geothermischen Wärmefluss, dem Vorhandensein von Oberflächengewässern sowie von der Art der Vegetation und der Sedimente bestimmt.

Aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungen von Permafrost erfolgt eine Untergliederung in kontinuierlichen, diskontinuierlichen und sporadischen Permafrost. In Abb. 4.7 sind die drei Typen mit einigen charakteristischen Merkmalen dargestellt.

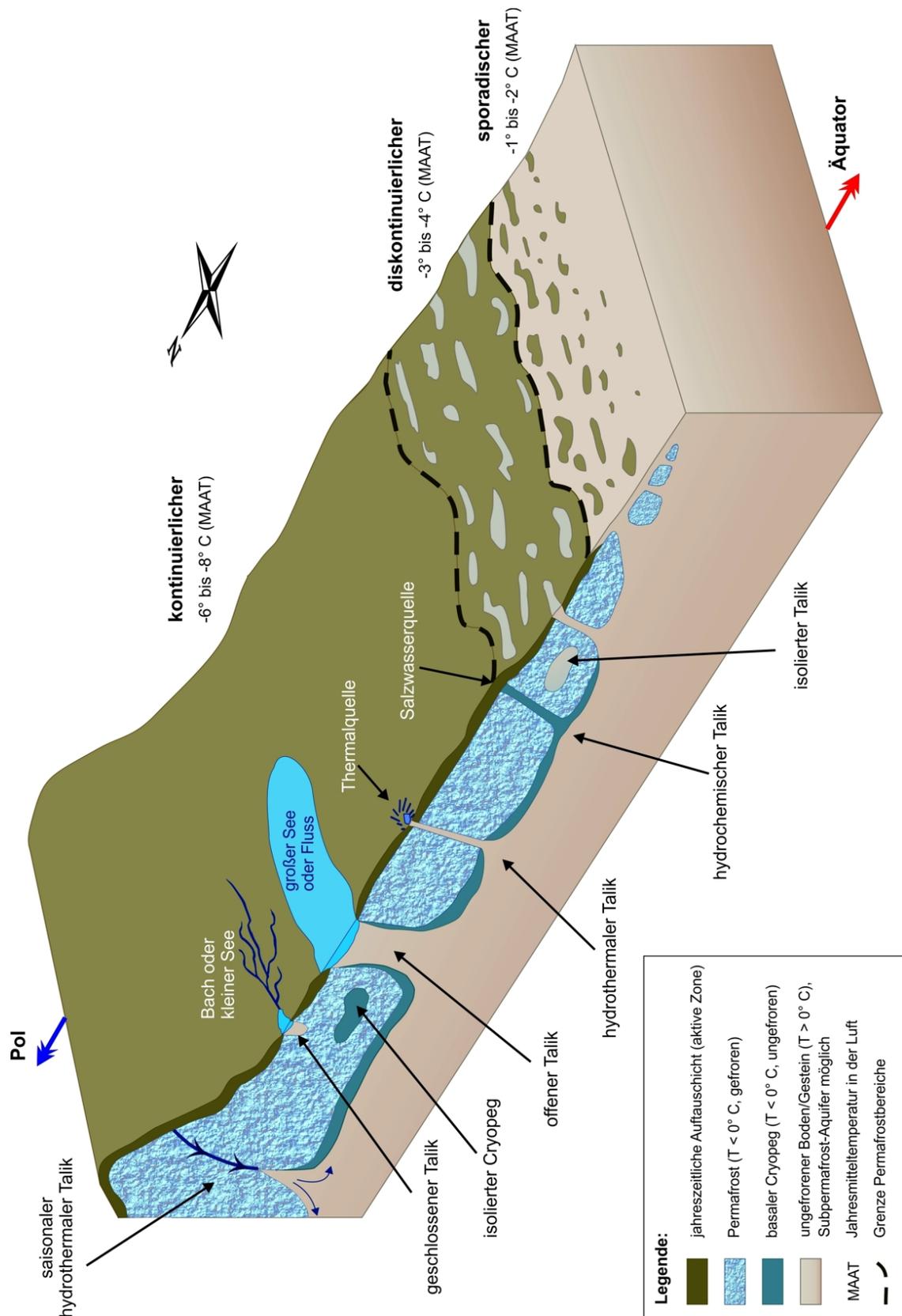


Abb. 4.7 Schema verschiedener Permafrost- und Talik-Ausbildungen (geändert nach /GAS 00/ und /KAR 79/)

Kontinuierlicher Permafrost ist durchgehend bis in große Tiefen gefroren und bildet sich während einer Kaltzeit innerhalb von etwa 40.000 bis 60.000 Jahren, wobei ein Abbau während Warmzeiten zu diskontinuierlichem und sporadischem Permafrost möglich ist (vgl. /KEL 98/, Abb. 3; /FRE 08/). Unter Gewässern kann kontinuierlicher Permafrost jedoch aufgetaute Bereiche aufweisen, die als Taliki (Abb. 4.7) bezeichnet werden. An den kontinuierlichen Permafrost schließt sich mit abnehmender geographischer Breite und mit steigenden Jahresmitteltemperaturen übergangslos die diskontinuierliche Permafrostzone an, in der die gefrorenen Bereiche isoliert vorliegen und der Anteil des ungefrorenen Bodens steigt. Mit weiter abnehmender geographischer Breite und steigenden Jahresmitteltemperaturen erfolgt der Übergang zur sporadischen Permafrostzone, in der gefrorene Bereiche nur lokal und saisonal bedingt vorliegen. Der Oberboden ist dort bereits im Frühsommer eisfrei, während der Unterboden erst im Hoch- und Spätsommer auftaut. In allen Zonen kann sich oberflächennah durch die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen über dem permanent gefrorenen Boden eine Auftauschicht ausbilden, die bis zu einigen Metern mächtig sein kann.

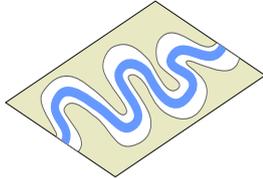
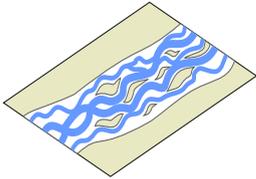
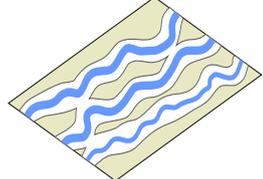
Am Standort Gorleben entwickelten sich z. B. in der Weichsel-Kaltzeit entsprechend der Abfolge zunächst ein sporadischer und dann ein diskontinuierlicher Permafrost, wobei sandige Schichten schneller gefroren als tonige. Im Hochglazial zwischen etwa 30.000 bis 15.000 Jahren BP (BP: vor heute) lag schließlich ein kontinuierlicher Permafrost von mehreren Zehner Metern bis weniger als 200 m Mächtigkeit vor, der z. B. unterhalb des Elbe-Urstromtales einen Taliki-Bereich aufwies. Während der unterschiedlichen Weichsel-Stadiale kann nach /KEL 98/ ein kontinuierlicher Permafrost von geringerer Mächtigkeit und kürzerer Dauer auch schon vorher vorhanden gewesen sein. Modellierungen in /DEL 98/ geben abhängig von der Art der Sedimente eine Dauer von ca. 5.000 Jahren für das Gefrieren und eine von ca. 1.000 Jahren für das Auftauen an. In /DEL 07/ wurden für den norddeutschen Raum Permafrostmächtigkeiten der letzten ein bis zwei Millionen Jahre berechnet. Aus diesen Berechnungen lässt sich, dem Aktualitätsprinzip folgend, ableiten, dass am Standort Gorleben in zukünftigen Kaltzeiten erneut Permafrostmächtigkeiten von rund 150 m bis 200 m auftreten können.

Mit der Ausbildung von Permafrost werden am Standort Gorleben zahlreiche Prozesse beeinflusst. Intensiv wirkt der Permafrost z. B. auf die hydrogeologischen Verhältnisse (s. a. Kapitel 3.4) ein. Abhängig von den lokal herrschenden Grundwasserdruckverhältnissen kann auch bei kontinuierlichem Permafrost eine Grundwasserneubildung oder ein -austritt in bzw. aus tieferen Bereichen erfolgen, wenn es zur Ausbildung von

Taliki kommt. Am Standort Gorleben ist dies unterhalb der Elbe möglich. Außerdem wäre auch das Fließen des Grundwassers nur innerhalb der oberflächennahen sommerlichen Auftauschicht und unterhalb der gefrorenen Zone des Permafrostes möglich. Dadurch könnte der Grundwasserfluss im Aquifersystem des Deckgebirges fast vollständig zum Erliegen kommen. Der Chemismus der Wässer wird bei Permafrostbedingungen auch dadurch beeinflusst, dass sich durch das Gefrieren die im Grundwasser enthaltenen Mineralien in bestimmten Zonen des Permafrostes (Cryopegs) anreichern. Bei Cryopegs handelt es sich um Grundwasservorkommen, die aufgrund der hohen Mineralisation - oder des hohen Umgebungsdruckes - auch bei Temperaturen unter 0 °C nicht gefrieren. An vorhandenen Taliki können dann im Standortgebiet auch hochsalinare Wässer in Form von Salzwasser-Quellen zu Tage treten (chemische Taliki; vgl. /GAS 00/). Die eingeschränkte Grundwasserströmung und die Zunahme der Salzkonzentration verlangsamt außerdem die Subrosion am Salzspiegel des Salzstocks Gorleben, worauf in Kapitel 4.5.3 näher eingegangen wird. Außerdem wird das weitere Vordringen des Permafrostes in die Tiefe durch den hohen Salzgehalt des Grundwassers verlangsamt, der den Gefrierpunkt des Wassers herabsetzt. Dadurch könnten die ungefrorenen Bereiche unter dem Permafrost eventuell während einer gesamten Kaltzeit bestehen bleiben und seine Mächtigkeitzunahme in die Tiefe beenden.

Ob sich in Zukunft am Standort Gorleben Taliki im Permafrost ausbilden hängt auch mit der Entwicklung der Fließgewässer am Standort zusammen, die durch die klimatischen Verhältnisse beeinflusst wird. In Permafrostgebieten werden rezent abhängig vom herrschenden Permafrosttyp, von der Fließenergie und dem damit verbundenen Sedimenttransport sowie von der Vegetation (/KAS 03/; /VAN 03/) Flussgrundrisse mit den Eigenschaften mäandrierend, braided river und anastomosierend beobachtet. Mäandrierende Flusstypen entstehen vor allem in permafrostfreien Phasen, wohingegen in Gebieten mit andauerndem Permafrost braided river und anastomosierende Typen dominieren. Am Standort Gorleben bildete sich vor dem Weichsel-Hochglazial der anastomosierende Flussgrundrisstyp aus, der im Hochglazial in den Typ braided river überging. Unterscheidungsmerkmale der drei genannten Flusstypen sind nachfolgend in Tab. 4.1 zusammengestellt.

Tab. 4.1 Unterscheidungsmerkmale der Flusstypen mäandrierend, braided river und anastomosierend (nach /BRI 08/, /MIA 77/ und /VAN 03/)

Merkmal	Flusstyp		
	mäandrierend	braided river	anastomosierend
Verlaufsskizze			
Flusslauf	ein Flusslauf	mehrere Flussläufe, unsystematisch verlagernd	mehrere Flussläufe
Flussbett	ein Flussbett	ein Flussbett	mehrere Flussbetten, untereinander verbunden
Gefälle	mittel bis gering	unterschiedlich, überwiegend hoch	gering
Wasserführung	ganzjährig, jahreszeitlich schwankend, Uferwälle bei Hochwasser überflutet	auf Schneeschmelze konzentriert, dann mit starkem Hochwasser, stark schwankend	ganzjährig
Erosion	Seitenerosion überwiegt Tiefenerosion am Prallhang	schwach, Sedimentation überwiegt	schwach, Sedimentation überwiegt
Sediment	Kies und Sand	Sand und Kies	Sande und Schluffe
Sedimentation	am Gleithang, wenige Sedimentbänke im Flussbett	im Flussbett bei Niedrigwasser, oft Sedimentbänke	starke Akkumulation im Uferwall- und Auenbereich, z. T. Sumpfe und Moore bildend
Schichtung	Schrägschichtung am Gleithang	horizontal	horizontal
Sortierung der Sedimente	nach oben hin abnehmende Korngröße (Hangbereich)	unsortiert	unsortiert
Uferbereich	Uferwälle	flächige Schotterterrassenbildung	ausgeprägte Uferwälle und Auen

Über die Bildung der unterschiedlichen Flusstypen zu verschiedenen Stadien der Kaltzeit wirkt sich der Permafrost auch indirekt auf die hydrogeologischen Verhältnisse aus. Abhängig von der Breite, der Tiefe und der Andauer der Wasserführung bilden sich unter den Flüssen offene Talke, über die Oberflächenwasser in das Aquifersystem zutritt oder Grundwasser aus diesem austritt. Neben den hydrogeologischen Verhältnissen wird auch die Morphologie in Permafrostzeiten auf typische Weise, z. B. durch Solifluktion, beeinflusst. Die Schichtabfolge des Deckgebirges wird durch den Permafrost nur geringfügig verändert, da es in dem flachen Gebiet bei großräumig geringer Erosionsleistung kaum zur Abtragung und Ablagerung von Sedimenten am Standort Gorbleben kommt. Lediglich die oberflächennahen Schichten werden umgestaltet, indem Erhebungen, wie z. B. der Hühbeck, abgetragen und deren Erosionsmassen in den Tälern abgelagert werden. Lokal sind auch stärkere Veränderungen durch Bildung periglazialer Formen, wie Pingos, etc. möglich, die nach einer Kaltzeit jedoch zurückgebildet werden. Grundlegende Veränderungen der Morphologie durch Permafrostverhältnisse sind am Standort nicht zu erwarten, da die heutige Situation in der Vergangenheit durch die gleichen Prozesse geschaffen wurde. Bis zu einer erneuten Überfahung durch einen Inlandgletscher kann daher davon ausgegangen werden, dass die Gliederung von Höhen- und Tallagen sowie der oberflächliche Wasserabfluss in gleicher Weise bestehen bleiben. Das Elbetal wird demnach als tiefstes morphologisches Element des Standortgebietes weiterhin als Vorfluter der Oberflächenwässer dienen und diese zur Nordsee abführen. Auch die Oberflächenwasserscheiden bleiben mit ihren heutigen Lagen im Wesentlichen erhalten.

Veränderungen des Deckgebirges werden neben der erosiven Abtragung von Sedimenten durch die abkühlungsbedingte Kontraktion des Gebirges hervorgerufen. Diese Kontraktion entsteht neben der kältebedingten Volumenabnahme hauptsächlich dadurch, dass den Lockersedimenten unter diesen klimatischen Bedingungen Wasser entzogen wird. Als Folge bilden sich Risse im Untergrund, die bei jahreszeitlich auftretendem oberflächlich eindringendem Schmelzwasser in Form von Eiskeilen weiter aufgeweitet und vertieft werden (Abb. 4.8).



Abb. 4.8 Angeschnittener Eiskeil in rezentem Permafrost auf Bunge Land, Neusibirische Inseln (Foto: S. Mrugalla)

Dabei kommt es durch den Wechsel von Tauen und Frieren in der aktiven Zone des Permafrosts zu einer Größensortierung der Lockersedimente. An der Oberfläche treten dann Steinringe oder -netze auf, wie sie in Abb. 4.9 rezent auf Spitzbergen zu sehen sind. Eine starke Abkühlung kann auch tiefere Gebirgsbereiche erreichen und dort Auswirkungen haben.



Abb. 4.9 Steinringe im rezenten Permafrost auf Spitzbergen (Foto: S. Mrugalla)

Abgebaut wird der Permafrost nach einer Kaltzeit, wenn eine erneute Warmzeit beginnt, die mit steigenden Temperaturen zu einer langsamen Erwärmung des Untergrundes führt. Dies geschieht auch nach einer intensiven Kaltzeit mit einer vollständigen Vereisung des Standorts. Unter dem Gletscher wird der Permafrost zwar weitgehend zurückgebildet (s. Kapitel 4.2.7), er entsteht bei dessen Rückzug unter weiterhin kalten klimatischen Bedingungen jedoch erneut. Aufgrund der schnell voranschreitenden Erwärmung beim Übergang in eine Warmzeit (s. a. Kapitel 3.1.6), besteht dieser Permafrost nur vorübergehend. Im Fall einer plötzlichen und starken Erwärmung wäre eine beschleunigte Rückbildung des Permafrostes möglich, wenn der steigende Meeresspiegel (s. Kapitel 4.3.1) zu einer Überflutung des Standortes führt. Dabei wären die überfluteten Gebiete schneller frei von Permafrost als die sie umgebenden Festlandsgebiete, auch wenn sich noch keine stabilen warmzeitlichen Verhältnisse eingestellt haben. Innerhalb einer Kaltzeit führt auch eine Überdeckung mit Gletschereis zu einem temporären Abbau des Permafrostes. Die isolierende Wirkung des Gletschereises und der erhöhte Auflastdruck bewirken das Abschmelzen des Permafrostes im Untergrund.

Zukünftige Entwicklung

Am Standort Gorleben können entsprechend des z. B. in /FOR 99/ prognostizierten Klimaverlaufs (vgl. Kapitel 3.1.7) ab ca. 10.000 Jahren nach heute kaltzeitliche Verhältnisse vom Ausmaß der letzten Weichsel-Kaltzeit herrschen, die mit der Bildung von Permafrost einhergehen. Unter diesen Bedingungen könnte ein kontinuierlicher Permafrost am Standort Gorleben ab ca. 50.000 Jahren nach heute bis zum Maximum dieser Kaltzeit entwickelt sein. Wird der klimatischen Entwicklung ein anthropogener Einfluss durch höhere CO₂-Konzentrationen zu Grunde gelegt, stellen sich diese Verhältnisse entsprechend Kapitel 3.1.7 später ein. Darüber hinaus ist in jeder zukünftigen Kaltzeit Permafrost am Standort möglich, da dieser wie zuvor beschrieben auch vor und nach einer vollständigen Inlandvereisung aufgebaut wird.

4.2.2 Ungewissheiten bei der Prognose der Permafrostentwicklung

Ungewissheiten bei der Prognose der Permafrostentwicklung treten vor allem im Zusammenhang mit der klimatischen Entwicklung auf (s. Kapitel 3.1.10). Die Prognose einer Kaltzeit in ca. 10.000 Jahren in /FOR 99/ ist eine Annahme mit einer hohen Wahrscheinlichkeit. Für spätere Kaltzeiten kann jedoch keine genaue Prognose gestellt werden. Selbst für die nächste Kaltzeit kann nicht vorhergesagt werden, wann der Permafrost am Standort Gorleben eine bestimmte Mächtigkeit erreichen wird. Erschwert wird die Vorhersage zusätzlich dadurch, dass der Permafrost bei einer Gletscherrandlage in Phasen einer zwischenzeitlichen Überfahung unter dem Eis abgebaut wird. Daher kann lediglich prognostiziert werden, dass Permafrost im Zusammenhang mit den Kaltzeiten ausgebildet wird und dass die damit verbundenen Änderungen des geologischen Systems ablaufen werden. Genaue Angaben zu Quantität und Qualität dieser Prozesse zu bestimmten Zeiten, vor allem für spätere Kaltzeiten, sind jedoch nicht möglich.

4.2.3 Kryogene Klüfte im Salinar

Im Umfeld von Hannover wurden in den Salzstöcken Benthe, Bokeloh und Lehrte-Sehnde vom Salzspiegel ausgehende Klüfte beschrieben, deren Entstehung nach einer Hypothese in /BAU 91/ möglicherweise kryogen ist. Der Hypothese folgend werden kryogene Klüfte im Salzgestein auf die Abkühlung und die damit verbundene Kontraktion des Untergrundes während einer Kaltzeit zurückgeführt. Die von /BAU 91/ beobach-

teten Klüfte gehen vom Salzspiegel aus bis ca. 600 m u. GOK (Geländeoberkante) und weisen mit zunehmender Teufe eine Häufigkeitsabnahme auf. In den Kluffüllungen wurden vorwiegend toniges Material, neugebildete Kluffminerale oder wässrige Lösungen nachgewiesen. Modellrechnungen und Ergebnisse von Isotopenuntersuchungen an wässrigen Lösungen in Kluffüllungen des Salzstocks Bokeloh von /DEL 96/ geben Hinweise auf eine glazigene Genese der Klüfte, die die Hypothese von /BAU 91/ untermauern. Als Randbedingung dieser Modellierung wurde jedoch eine weichselzeitliche Eisüberdeckung im Bereich des Salzstockes Bokeloh vorausgesetzt, die zu dieser Zeit jedoch nicht vorhanden war. Vor allem aus diesem Grund ist die Modellierung lediglich als Hinweis für die Möglichkeit einer solchen Genese zu werten, jedoch nicht als Beweis für diese Theorie. Weitere Deutungsmöglichkeiten zur Genese der zuvor beschriebenen Klüfte werden im Zusammenhang mit dem Salzstockaufstieg und den damit verbundenen Spannungsänderungen gesehen /BAU 91/.

Am Standort Gorleben wurde die abkühlungsbedingte Kluffbildung im Zusammenhang mit dem angewendeten Gefrierverfahren beim Abteufen der Schächte im Topbereich des Salzstockes (Topfrisszone) beobachtet. Zusätzlich zu diesen, auf den Gefrierprozess zurückzuführenden Klüften wurde mit dem Auffahren des Schachts 2 eine vertikale SE-NW streichende ca. 59 m lange Kluff angetroffen, die von der üblichen SW-NE Streichrichtung abweicht /BOR 95/; vgl. a. /BUR 82/. Für die Genese dieser Kluff werden zwei Möglichkeiten angegeben:

- Kryogene Kluffbildung, elsterzeitliche Bildung nach /BAU 91/, mit zusätzlicher Überprägung durch einen Kontraktionsriss im Gefolge des Gefrierteufens
- Kontraktionsriss, der ausschließlich auf das beim Schachtabteufen angewandte Gefrierbohrverfahren zurückgeführt wird.

Bei der übertägigen Erkundung des Salzstockes Gorleben mit Tiefbohrungen, den zwei Schächten und 44 Salzspiegelbohrungen, die den obersten Teil des Salzstockes erschlossen haben, wurden keine weiteren Klüfte angetroffen, die eine glazigene Entstehung vermuten lassen. Das Gleiche gilt für den Bereich der Erkundungssohle, die im Salzstock Gorleben in einer Tiefe von 840 m liegt.

Zukünftige Entwicklung

Voraussetzung für die zukünftige Bildung kryogener Klüfte im Salzgestein ist, dass der Bereich einer deutlichen Abkühlung ausgesetzt ist. Zu erwarten ist dies sowohl wäh-

rend schwächerer Kaltzeiten, in denen sich ausschließlich Permafrost am Standort ausbildet, als auch während stärkerer Kaltzeiten im Vorfeld einer Eisüberdeckung. Die im Kapitel 4.2.1 beschriebenen Permafrostmächtigkeiten der Vergangenheit betragen 150 bis 200 m und sind innerhalb zukünftiger Kaltzeiten erneut möglich. Im Vergleich dazu liegt der Salzspiegel des Salzstocks Gorleben, wie in Abb. 4.18 dargestellt, im südwestlichen Bereich ungefähr zwischen 150 und 250 m u. NN und im nordöstlichen Teil zwischen 250 und 350 m u. NN. Demnach wären nur die oberen Bereiche im Südwesten direkt vom Permafrost betroffen. Auch unterhalb der gefrorenen Zone ist eine Abkühlung bis ins Salinar hinein möglich. Im Vergleich zum Salzstock Bokeloh ist in Gorleben die Entstehung kryogener Klüfte mit Tiefen von 600 m u. GOK unwahrscheinlich. Ein Grund dafür ist die Raumlage des Salzspiegels, der in Bokeloh nach /HOL 08/ mit 90 bis 140 m u. NN höher liegt als der des Salzstocks Gorleben. Deshalb war das Salinar in Bokeloh bis in eine größere Tiefe einer deutlichen Abkühlung ausgesetzt.

4.2.4 Ungewissheiten bei der Prognose der Entstehung von kryogenen Klüften

Ein Nachweis, dass es sich bei den beschriebenen Klüften tatsächlich um kryogene handelt wurde noch nicht erbracht und auch der Prozess, der zur Entstehung solcher Klüfte führen könnte, ist noch nicht ausreichend erforscht, um realistische Abschätzungen der Entwicklung für die Zukunft vorzunehmen. Die zuvor beschriebenen Untersuchungen liefern lediglich eine Bildungshypothese für solche Klüfte. Vor allem fehlen vergleichbare Beobachtungen, z. B. als Analoga in anderen Festgesteinen. Hinzu kommt, dass für die Zukunft nicht exakt prognostiziert werden kann, wann und wie oft sich klimatische Bedingungen einstellen, die eine tiefreichende Abkühlung am Standort Gorleben bewirken werden. Ungewiss ist auch welchen quantitativen Einfluss die Tiefenlage des Salzspiegels hat, oder ob die Zusammensetzung des Deckgebirges und/oder des Salinars eine Rolle spielen. Ebenso ist bei den von Bauer (/BAU 91/) beschriebenen Klüften nicht geklärt, ob spannungsverändernde Bewegungen z. B. an Sockelstörungen oder im regionalen geologischen Umfeld die Klüftbildung initiiert haben. Im Rahmen der Modellierungen, die für die VSG im Arbeitspaket 9a durchgeführt wurden, konnte die Entstehung solcher Klüfte unter kaltzeitlichen Bedingungen nicht nachgewiesen werden, s. a. /BRU 11/.

Aufgrund der vorliegenden Kluffbeschreibungen und der noch unzureichenden Kenntnis ihrer Genese kann für die zukünftige geologische Entwicklung die Möglichkeit einer Kluffbildung mit ähnlichen Ausprägungen allerdings nicht ausgeschlossen werden.

4.2.5 Inlandvereisung in randlicher Lage

Inlandvereisung in randlicher Lage bedeutet für den Standort Gorleben, dass eine Kaltzeit herrscht, bei der eine von Skandinavien ausgehende Vergletscherung das norddeutsche Tiefland erreicht, ohne den Standort zu überfahren. Angenommen wird dabei ein Zustand, bei dem sich der Gletscherrand in unmittelbarer Nähe befindet und der Salzstock Gorleben ohne Eisüberdeckung weiterhin in der vorgelagerten Permafrostzone liegt. Das natürliche Oszillieren des Gletscherrandes führt unter diesen Bedingungen zu zwischenzeitlichen Überfahrungen des Standortes. Eine Eisüberdeckung kann dann teilweise oder kurzfristig auch ganz erfolgen.

In der Vergangenheit lag eine Inlandvereisung in randlicher Lage in Norddeutschland z. B. in der Weichsel-Kaltzeit vor. Typische Vorgänge im Randbereich eines solchen Flachlandgletschers sind die Bildung von Endmoränenwällen und der Ausgleich eines vorhandenen Reliefs entweder durch Einebnung von Hochlagen bei einem zwischenzeitlichen Gletschervorrücken (Exaration) oder durch die Zuschüttung von Depressionen durch Gletscherschuttmassen (s. a. Abb. 4.10).

Der Standort Gorleben lag während der Weichsel-Kaltzeit ca. 55 km vom Gletscherrand entfernt in der vorgelagerten Permafrostzone (s. a. Kapitel 4.2.1). Da in dieser Zeit keine kurzfristigen Überfahrungen des Standortes durch den Gletscher stattgefunden haben, können die Prozesse und Auswirkungen aus dieser Zeit nicht exakt auf die zukünftige Situation mit einer Inlandvereisung in randlicher Lage übertragen werden. Aufgrund der Daten und Kenntnisse aus Gebieten im Bereich des damaligen Gletscherrandes kann die Entwicklung für den Standort Gorleben jedoch trotzdem abgeschätzt werden.

Zukünftige Entwicklung

Am Standort Gorleben kann für die Zukunft, wie in der Vergangenheit, angenommen werden, dass ein Gletschervorstoß aus Norden oder Nordost von einem skandinavischen Eisschild her erfolgt. In /SKU 03/ und /FEL 02/ wurden die Eismächtigkeiten für verschiedene Randlagen einer solchen Vereisung zusammengestellt. Demnach betrug

in der Saale-Kaltzeit die Eismächtigkeit in randnahen Lagen bei Halle und Leipzig 200 m, bei Hamburg 350 m und bei Bremerhaven 450 m. Für die Bereiche Hannover und Braunschweig werden ebenfalls 200 m angesetzt und für Wolfsburg und Celle Werte um 330 bzw. 340 m. Ergänzend wird für die Rehburger Phase eine Randmächtigkeit von ca. 300 – 350 m angegeben. Im Bereich der Westfälischen Bucht werden Eismächtigkeiten von 130 – 170 m und für den Oberweserraum von etwa 200 m angegeben. Eine Inlandvereisung in randlicher Lage könnte am Standort Gorleben in Zukunft zu ähnlichen Eismächtigkeiten führen und bis zu ca. 300 m betragen.

Eine Gletscherrandlage hätte am Standort Gorleben zur Folge, dass sich Grundwasserneubildungsgebiete und Wasserscheiden entsprechend der Umgestaltung der Morphologie verlagern würden (s. a. Kapitel 3.2). Grundwasserneubildungsgebiete sind dann im Gletschervorfeld in der jahreszeitlich bedingten Auftauzone des Permafrostes ausgebildet (s. Kapitel 4.2.1). Diese Verlagerung überträgt sich auch auf den hydraulischen Gradienten und die Grundwasserfließrichtung (Kapitel 3.4.1) am Standort, die von dort aus auf die Elbe gerichtet sein wird. Außerdem fließen im Vorfeld des Gletschers die Schmelzwässer ab, die im Elbetal, je nach Sedimentfracht, zu einer erhöhten Sedimentation oder zu einer verstärkten Erosion führen können. Ebenso ist die Bildung von Schmelzwasserseen über dem undurchlässigen Permafrost sehr wahrscheinlich. Diese können zur Entstehung von Taliki im Bereich des Elbetals führen. Modellstudien zur Grundwasserbewegung unter solchen Bedingungen und der Berücksichtigung von Seen im Gletschervorfeld finden sich z. B. in /KÖS 00/ oder /BOU 01/. Abb. 4.10 gibt einen Überblick über mögliche Landschaftsformen und Veränderungen im direkten Vorfeld eines Flachlandgletschers. Dargestellt sind die Zustände in Gletscherrandlage (1), beim Rückzug des Gletschers (2) und die Landschaftsformen nach dem endgültigen Abschmelzen der Eismassen (3).

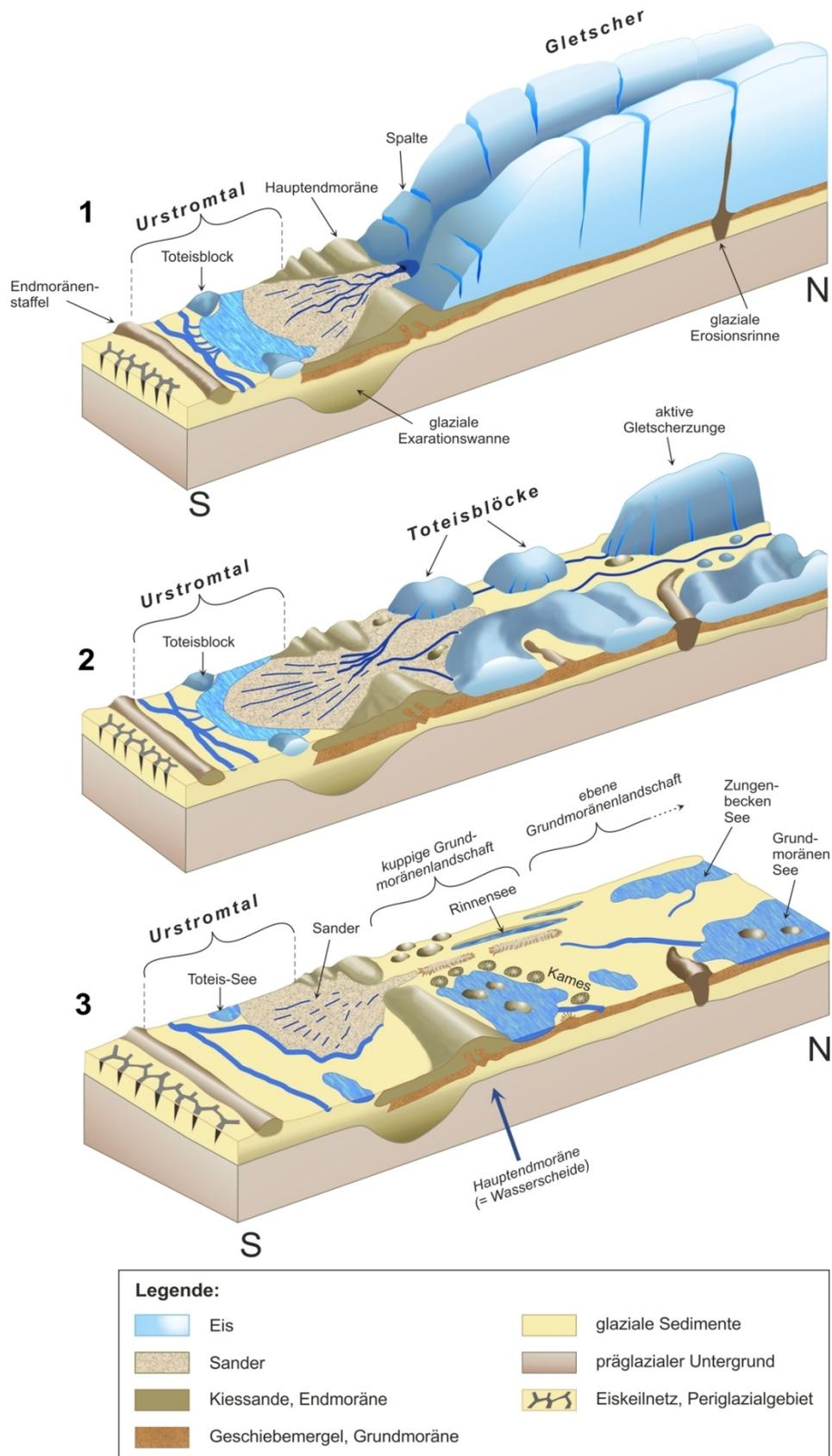


Abb. 4.10 Typische Landschaftselemente bei bestimmten Eisrandlagen im Vorfeld eines Flachlandgletschers (geändert nach /KOP 09/)

Mit dem erneuten Übergang in eine Warmzeit, der abrupt einsetzt und schnell abläuft, erfolgen ein Rückzug des Gletschers und ein Abbau des Permafrostes. Am Standort Gorleben würde als Folge davon eine veränderte Geomorphologie vorliegen. Diese wäre der heutigen zwar ähnlich, es kann allerdings nicht vorhergesagt werden, inwieweit die Lage der Oberflächengewässer und der geänderten Abflusssysteme an der Oberfläche davon abweicht. Das gleiche gilt auch für die hydrogeologischen Verhältnisse. In den abgetauten Lockersedimenten würden sich entsprechend der hydraulischen Eigenschaften der Schichten wieder Aquifere ausbilden und der Grundwasserchemismus, der zunächst durch die Zusammensetzung der Schmelzwässer geprägt wäre, würde wieder in einen Gleichgewichtszustand mit den Sedimenten übergehen.

4.2.6 Ungewissheiten bei der Prognose einer Inlandvereisung in randlicher Lage

Die zuvor beschriebenen Auswirkungen bei einer angenommenen Inlandvereisung in randlicher Lage gelten für eine zu erwartende Kaltzeit, die auf die heutigen Gegebenheiten am Standort trifft. Für spätere Gletscherrandlagen können am Standort keine genauen Aussagen getroffen werden, da bis zu diesem Zeitpunkt sowohl die Geomorphologie als auch das Deckgebirge andere Rahmenbedingungen aufweisen werden. Darüber hinaus ist die Situation während einer Gletscherrandlage nicht als konstant anzusehen, da es im klimatischen Verlauf einer Kaltzeit zu Intensitätsschwankungen kommt. Dies kann zur Folge haben, dass der Gletscher den Standort zwischenzeitlich überfährt, oder dass sich über längere Zeit ausschließlich Permafrost einstellt und der Gletscherrand in größerer Entfernung liegt. Eine weitere Ungewissheit resultiert auch daraus, dass trotz intensiver Erkundung der Auswirkungen der vergangenen Kaltzeiten keine Hinweise gefunden wurden, die eine Inlandvereisung in randlicher Lage am Standort Gorleben dokumentieren. Es gibt daher lokal auch keine auswertbaren Daten zu den unter diesen Bedingungen ablaufenden Prozessen. Zur Bewertung dadurch verursachter Auswirkungen können lediglich Vergleiche mit ähnlich aufgebauten Bereichen herangezogen werden, die z. B. während der Weichsel-Kaltzeit einer Eisrandlage ausgesetzt waren.

4.2.7 Vollständige Inlandvereisung

Fällt eine Kaltzeit so intensiv aus, dass das Gletschereis weit ins Norddeutsche Tiefland vordringt, liegt eine „Vollständige Inlandvereisung“ vor, bei der der Standort Gor-

leben ebenfalls eisüberdeckt ist. Im Zusammenhang mit einer Gletscherüberdeckung kommt es zu typischen Auswirkungen, wie auflastbedingten Veränderungen im Untergrund, glazialtektonisch bedingten Störungen, erhöhte Erosionsleistungen z. B. in Form von Gletscherschurf und der Rückbildung des Permafrostes unter der Eisbedeckung.

Nach /KÖT 07/ kam es in der Elster-Kaltzeit zur ersten nachweisbaren Inlandvereisung mit einer Eisüberdeckung des Standortes Gorleben. Eine weitere Überföhrung, die nach /FEL 02/ eine Eismächtigkeit von über 700 m am Standort erzeugt haben könnte, erfolgte in der Saale-Kaltzeit (Abb. 4.11).

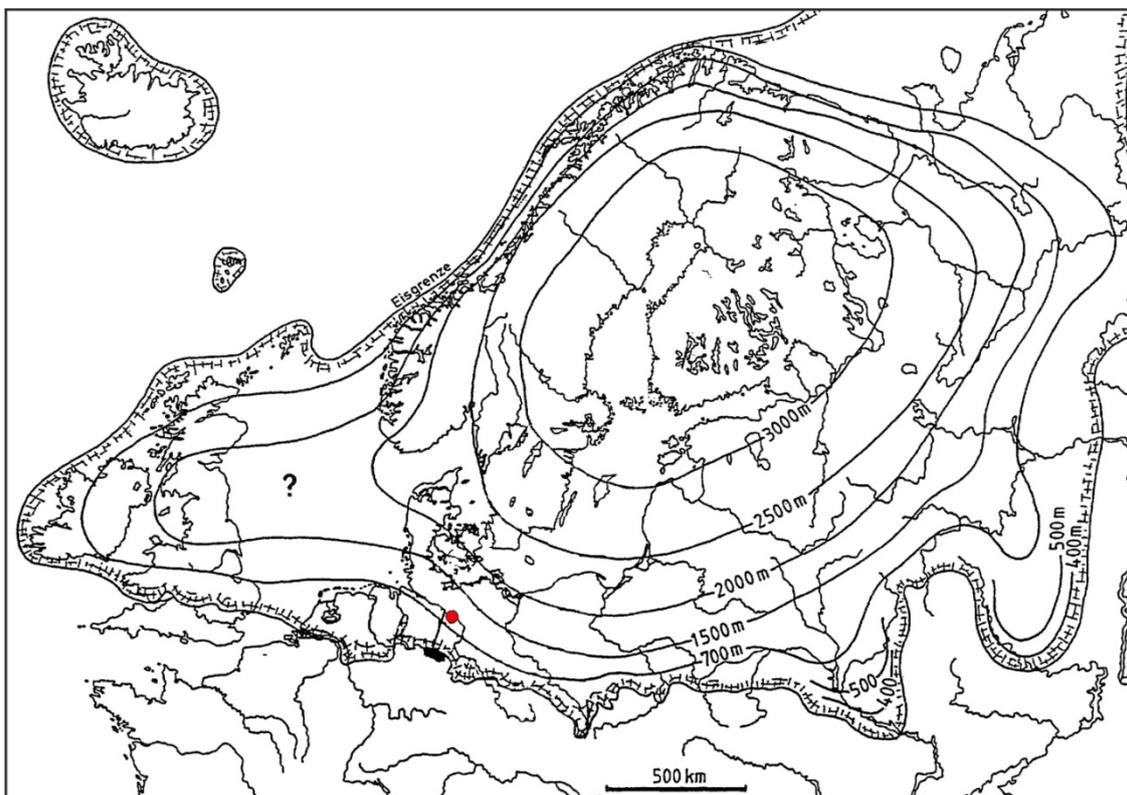


Abb. 4.11 Saalezeitliche Eisausbreitung (/FEL 02/, S. 73, geändert)

Linien: Isohypsen der Eisoberfläche mit Höhenangaben über heutigem NN, rote Markierung: ungefähre Lage des Standortgebietes Gorleben

Der skandinavische Eisschild erreichte dabei in zentralen Bereichen eine Mächtigkeit um die 3.000 m und im norddeutschen Tiefland als Randmächtigkeit während der Rehburger Phase ca. 300 – 350 m. Für die westfälische Bucht werden Mächtigkeiten von 130 – 170 m und für den Oberweserraum von etwa 200 m angegeben (/SKU 03/, /FEL 02/). Die Angaben zeigen, dass die Mächtigkeiten je nach Lage auch im Randbereich stark schwanken können. Ergänzende Informationen zu Art, Verbreitung und

Mächtigkeit der abgelagerten glazigenen Schichten am Standort Gorleben finden sich in /KÖT 07/.

Zukünftige Entwicklung

In zukünftigen Kaltzeiten ist mit der erneuten Überfahung des Standortes durch einen Gletscher zu rechnen. Laut der Prognose von /FOR 99/ wird die nächste jedoch nur die Intensität der Weichsel-Kaltzeit, und damit keine Eisüberdeckung des Standorts erreichen. Demnach wäre eine länger andauernde Gletscherüberfahung erst wieder ab der übernächsten Kaltzeit möglich. Wie für die Vergangenheit nachgewiesen, ist in Zukunft unter ähnlichen klimatischen Bedingungen erneut eine Eismächtigkeit von mehreren hundert Metern im Umfeld von Gorleben zu erwarten. Auch eine geringfügige Überschreitung der von /FEL 02/ angegebenen Eismächtigkeit kann nicht ausgeschlossen werden. Wenig wahrscheinlich ist hingegen eine deutliche Überschreitung des Mächtigkeitbereichs von 700 bis 1.500 m (s. a. Abb. 4.11), da dafür ein Inlandgletscher vorhanden sein müsste, der eine wesentlich größere Ausdehnung in der Fläche und ein ebenfalls wesentlich größeres Gesamtvolumen hätte. Ein solcher Gletscher ist unter den kaltzeitlichen Bedingungen der Vergangenheit jedoch nicht entstanden. Wie in der Klimaprognose in Kapitel 3.1.9 dargelegt wird am Standort Gorleben eine ähnliche Klimaentwicklung wie in der Vergangenheit erwartet. Daraus leitet sich dem Aktualitätsprinzip folgend ab, dass auch die Ausmaße der zukünftigen Inlandgletscher, denen der Vergangenheit gleichen werden.

Bei der Standorterkundung wurden keine Hinweise dafür gefunden, dass die vergangenen Vergletscherungen auflastbedingte Krustendeformation am Standort Gorleben erzeugt haben. Die möglichen Gründe dafür sind, dass die Eisauflast dort zu gering war, um ein Absinken der Kruste zu verursachen, oder dass die Deformationen so gering waren, dass sie vollständig zurückgebildet wurden (s. Kapitel 4.1.3).

Eine Erhöhung der Auflast durch das Gletschereis kann außer den Aspekten im Zusammenhang mit der Krustendeformation auch andere Auswirkungen auf den Untergrund haben. Oberflächennahe Sedimente z. B. würden kompaktiert und tiefer liegende diagenetisch verändert. Eine stark erhöhte Auflast, die allerdings über den erwarteten Werten liegt, kann theoretisch auch einen erneuten Salzstockaufstieg auslösen, wenn im Untergrund ausreichende Mächtigkeiten von leicht mobilisierbaren Salinalgesteinen vorhanden ist. Dagegen spricht jedoch die Tatsache, dass die Auflasterhöhung durch das Gletschereis zeitlich begrenzt ist und nicht lange genug wirkt, um

deutliche Aufstiegsraten zu erzeugen (s. a. Kapitel 4.5.1). Wäre in den vergangenen Kaltzeiten ein Salzaufstieg durch die Gletscherauflast ausgelöst worden, müssten die präelster- und elsterzeitlichen Schichten dabei verstellt worden sein. Am Standort wurden dafür jedoch keine Hinweise gefunden. Ebenso ist es grundsätzlich möglich, dass die Ab- und Aufwärtsbewegungen des Untergrundes durch die Eisauflast das Spannungsfeld lokal so beeinflussen, dass es zu Erdbeben kommt (Kapitel 4.1.7). Doch auch dafür wurden im Bereich Gorleben keine Hinweise gefunden, was vermutlich daran liegt, dass die Bewegungen und die Auflast nicht groß genug waren, um Erdbeben auszulösen. Ein weiterer Effekt, der unter anderem auf den Auflastdruck des Gletschereises zurückzuführen ist, ist der Schmelzwasserfilm an der Basis des Gletschers, der das Fließen und somit die Bewegung des Gletschers im Flachland unterstützt. Mit zunehmender Eismächtigkeit und steigendem Druck an der Basis sinkt die Gefriertemperatur des Wassers, so dass sich auch bei Minusgraden ein Schmelzwasserfilm bilden kann auf dem das Gletschereis gleitet. Die Fließrichtung des Gletschers wird lokal vom Relief bestimmt und würde bei einem dann noch existierenden Elbetal auf dieses zu gerichtet sein. Ähnlich wie der Schmelzwasserfilm wirken auch Oberflächengewässer unter dem Gletscher bewegungsfördernd.

Unterhalb des Gletschers, der auch als Isolationsschicht fungiert, kann sich der Permafrost zurückbilden, wenn der geothermische Gradient hoch genug ist oder die Gletschermächtigkeit den Druck im Untergrund ausreichend erhöht. In den eisfreien Sedimenten unter dem Gletscher kann sich ein Aquifersystem ausbilden in dem Fließrichtungen und -geschwindigkeiten vorherrschen, die von denen abweichen, die vor der Kaltzeit existierten.

Ein mögliches Resultat einer vollständigen Inlandvereisung ist die Entstehung glazialtektonisch bedingter Störungen, die am Standort bis in Tiefen von ca. 100 bis 150 m nachgewiesen wurden. In /DUP 83/ wird die Entstehung des 76 m hohen Hühbeck auf glazigen bedingte Lagerungsstörungen zurückgeführt. Auch überregional sind im glazigen beeinflussten Umfeld solche Strukturen bekannt, sie werden u. a. in /EIS 87/ und /HAN 95/ bis in Tiefen von 200 bis 300 m beschrieben.

Eine vollständige Inlandvereisung wirkt sich auch durch Glazialerosion in Form von Exaration und Detersion umgestaltend auf oberflächennahe Schichten des Deckgebirges aus. Bei der Exaration kommt es im Bereich der Gletscherstirn zu Ausschürfungen und Auffaltungen der oberflächennahen Sedimente. Und bei einer vollständigen Gletscherüberfahung wirkt unter dem Gletscher die Detersion durch Schleif-, Schramm-

und Kratzwirkung (/ZEP 08/). Eine Spezialform der kaltzeitlichen Erosion ist die Ausbildung von glazigenen Rinnen, die in Kapitel 4.2.9 näher erläutert wird.

Die Umgestaltung des Deckgebirges sowohl durch Störungen als auch durch die Glazialerosion bewirkt schließlich auch Änderungen in den hydrogeologischen Verhältnissen am Standort (s. Kapitel 3.4). Aufgrund der Tatsache, dass der Gletscher eine hohe Sedimentfracht beinhaltet, wirkt die Umgestaltung des Deckgebirges auch über die Kaltzeit hinaus. Mit dem Rückzug des Gletschers kommen diese Sedimente zur Ablagerung und verändern dadurch die Zusammensetzung und Mächtigkeit des Deckgebirges am Standort.

Im Zusammenhang mit den Vorgängen im Deckgebirge erfolgt auch ein intensiver Eingriff in die Morphologie. Im Zuge der Gletscherüberfahrung kommt es zunächst zu einem Ausgleich des Reliefs z. B. durch das Auffüllen von Tälern mit Sedimenten in der Vorschüttphase und durch die Einebnung von Hochlagen, erst durch Exaration und im weiteren Verlauf durch Detersion. Für den Bereich des Standortes hätte das zur Folge, dass das Elbetal mit seiner Funktion als Vorfluter nicht mehr existiert. Im Anschluss an die vollständige Inlandvereisung werden sich im Vergleich zur heutigen Situation geänderte Wasserscheiden und Grundwasserneubildungsgebiete ausgebildet haben.

Eine weitere Folge einer vollständigen Inlandvereisung ist ein Absinken des Meeresspiegels, da beim Aufbau eines großen Eisschildes in Nordeuropa global auch große Wassermengen gebunden werden. Abhängig von der Intensität der Vereisung können Senkungsbeträge von mehreren Zehnermetern bis über 100 m zustande kommen (s. a. Kapitel 4.3.1).

4.2.8 Ungewissheiten bei der Prognose einer vollständigen Inlandvereisung

Wie bei allen klimaabhängigen Prozessen ist die zeitliche Prognose des Eintretens einer vollständigen Inlandvereisung ungewiss, da nicht genau vorhergesagt werden kann, wann eine Kaltzeit mit ausreichender Intensität vorliegt. Auch die Prognose, dass die nächste Kaltzeit nicht stark genug ausfallen wird, beruht auf Klimamodellen, in denen Prozessungewissheiten enthalten sind. Darüber hinaus sind die möglichen Ausprägungen einer vollständigen Inlandvereisung so vielfältig, dass eine genaue Abschätzung der Auswirkungen nicht möglich ist. Letztlich bedeutet das, dass von den ca. zehn zu erwartenden Kaltzeiten mehrere das Potenzial haben könnten, eine Glet-

scherüberdeckung am Standort Gorleben hervorzurufen. Dann wären auch alle mit einer vollständigen Inlandvereisung einhergehenden Auswirkungen, die in der Vergangenheit stattfanden, erneut möglich.

4.2.9 Glazigene Rinnen

Unter dem Begriff „Glazigene Rinnen“ werden zwei verschiedene Rinnenarten zusammengefasst. Dabei handelt es sich einerseits um Erosionsformen, die durch oberflächigen Schmelzwasserabfluss entstehen und andererseits um Rinnen, die unterhalb (subglazial) des Gletschers gebildet werden. Letztere erreichten in der Vergangenheit z. T. große Tiefen und werden deshalb in diesem Kapitel detaillierter betrachtet.

In Norddeutschland sind glazigene Rinnen aus der Elster-, der Saale- und der Weichsel-Kaltzeit mit unterschiedlichen Ausmaßen bekannt. Insgesamt ist ihre Verbreitung auf die Gebiete begrenzt, die zur jeweiligen Zeit unter Eisbedeckung lagen (Abb. 4.12).

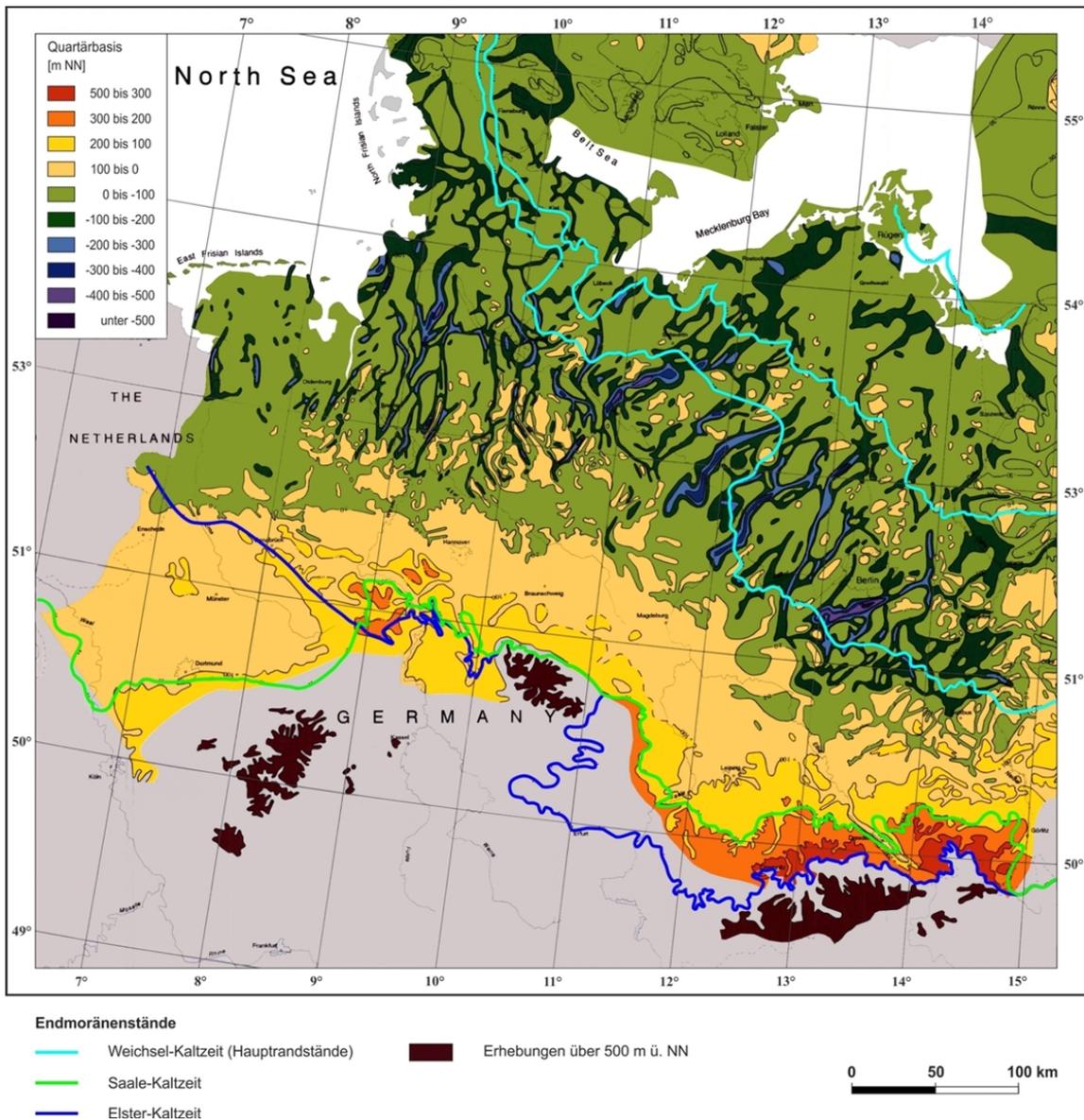


Abb. 4.12 Rinnenverteilung und Eisrandstände in Norddeutschland (geändert nach /STA 01/)

Während die saale- und weichselzeitlichen Rinnen in den norddeutschen Lockersedimenten nur Tiefen von ca. 100 – 200 m erreichten, sind die elsterzeitlichen 200 – 300 m und in Einzelfällen sogar über 500 m tief. Die elsterzeitlichen sind dabei mehrere Kilometer breit und zum Großteil über hundert Kilometer lang. Ihr Abstand beträgt einige Zehner Kilometer und ihre Ausrichtung ist auf den ehemaligen Gletscherrand hin orientiert. Abb. 4.12 zeigt außerdem, dass die Rinnen im östlichen Bereich Norddeutschlands von Nordost nach Südwest verlaufen und im westlichen Bereich eine Nord/Süd-Orientierung aufweisen. Auffällig ist, dass die elsterzeitlichen Rinnen zwar im gesamten norddeutschen Raum vorkommen, jedoch entlang einer Linie von Magdeburg über Hannover bis Osnabrück auslaufen und südlich davon nur in geringerem

Maß und mit verminderter Tiefe auftreten. Der Gletscherrand der Elstervereisung reichte hingegen über diesen Bereich hinaus bis an die Mittelgebirge (Abb. 4.12, dunkelblaue Linie), so dass sich aus den Randlagen allein kein Grund für die Grenze der Ausbreitung ablesen lässt. Eventuell bestand die Eisüberdeckung dort nicht lange genug oder die Eismächtigkeit reichte für eine intensive Rinnenbildung nicht aus. Der von /KUS 79/ vermutete Zusammenhang mit dem Vorkommen oberflächennaher oligozäner bis untermiozäner Schluffe und Tone ist nicht auf alle norddeutschen Rinnen übertragbar und gilt auch nicht für die Begrenzung der Nordseerinnen (s. a. /HUU 00/).

Ein Zusammenhang zwischen Anlage oder Tiefe der Rinnen und der Art des Untergrundes wurde bislang nicht gefunden. Ebenso ist kein Grund dafür erkennbar, dass die elsterzeitlichen Rinnen tiefer sind als die saalezeitlichen, obwohl die Saale-Gletscher eine ähnliche Verbreitung aufwiesen. Allerdings zeigten Untersuchungen in Festgesteinsgebieten im Muschelkalk bzw. in den Kreidekalken und -mergeln, wie z. B. von /SCJ 95/ an der Kreuzbrückenspalte und von /THI 70/ im Münsterländer Kiessandzug, dass die Rinnen dort nur ca. 30 m bzw. 50 m Tiefe erreichen. In einer Arbeit von /HIN 79/ konnte auch kein Zusammenhang zwischen Salzstrukturen und dem Rinnenverlauf nachgewiesen werden. Demnach werden sie bei der Rinnenbildung vermutlich nicht bevorzugt erodiert.

Wie für die zuvor beschriebene Art der Rinnenausbildung wurde auch noch keine allgemeingültige Erklärung für die Rinnengenese gefunden. Lediglich für die oberflächlich gebildete und vergleichsweise flache Rinnenart besteht mit der Entstehung durch plötzlich ablaufende erhebliche Schmelzwassermengen oder durch den Gletscherschurf eine konkrete Vorstellung über deren Genese. Die durch Gletscherschurf verursachte Exaration (an der Gletscherstirn) oder Detersion (unter dem Gletscher) bewirkt an der Oberfläche eine Erosion, die in Lockergesteinen bis zu 100 m tief reichen kann. Dadurch anfallende Materialmassen können auf Flächen von ca. 100 km² und bis etwa 200 m hoch aufgetürmt werden /ABE 07/. Die Gletschermächtigkeit, die Mobilität des Eises, Druck und Temperaturen an der Eisbasis sowie die Geländeform sind dabei wichtige steuernde Faktoren. Für die subglazial angelegten Rinnen werden derzeit mehrere Möglichkeiten diskutiert, die nachfolgend kurz mit ihren Pro- und Contra-Argumenten dargestellt werden und z. B. in /EHL 94/, /FEL 02/ und /KEL 10/ genauer beschrieben sind.

- **Fluviatile Prozesse** (Ausräumung durch große Flusssysteme)
 - **Pro:** Ähnlichkeit mit Flusssystemen
 - **Contra:** Vernetzung sowie Art und Abfolge der Rinnenfüllungen (z. B. Grundmoränenablagerungen) untypisch, inhomogene Tiefe der Rinnenbasis, Rinnenverlauf auf Gletscherrand und nicht zum Meer ausgerichtet, abruptes Ende der Rinnen, Meeresspiegel wird nicht die maximale Tiefe der Rinnen erreicht haben, so dass das Meer nicht das Vorfluterniveau dargestellt haben kann

- **Tektonik** (epirogenetische Hebung Norddeutschlands mit anschließendem starken Einschneiden der Flüsse in den Untergrund, nach /EIS 07/)
 - **Pro:** In Gebieten mit ausgeprägter Hebung zeigen fluviatile Prozesse z. T. hohe Erosionsleistungen
 - **Contra:** Hebung hätte mehr als 400 m über heutiges Niveau betragen müssen, wofür es im Gelände keine Beweise gibt

- **Halokinese** (bevorzugte Bildung in Randsenken aktiv aufsteigender Salzstöcke, nach /KUS 79/)
 - **Pro:** einige besonders tiefe Rinnen wurden in Randbereichen von aktiv aufsteigenden Salzstöcken gefunden
 - **Contra:** teilweise kreuzen Rinnen die Randsenken aktiver Salzstöcke und verlaufen somit nicht in einer durch die Senke vorgegebenen Richtung

- **Subrosion** (vorhandene Subrosionssenken werden vertieft /KUS 79/)
 - **Pro:** einige Salzstöcke weisen Rinnen auf, die bis auf das Hutgestein eingeschnitten sind
 - **Contra:** Rinnen sind nicht auffallend tief in das Salinar eingedrungen, einige sind im Umfeld des Salzstocks deutlich tiefer als darüber oder enden am Salzstock, Salinar verhält sich eher wie ein Härtling und nicht bevorzugend für die Rinnenbildung

- **Gletscherschurf (Exaration, Detersion)**
 - **Pro:** Grundmoränenmaterial wurde an Basis einiger Rinnen nachgewiesen

- **Contra:** Rinnenbreite spricht gegen subglazial ablaufende Schmelzwässer, da große Mengen nötig wären, die bei den klimatischen Rahmenbedingungen nicht zu erwarten sind, die z. T. steile Ausbildung der Rinnenflanken ist als Form untypisch für eine Gletscherschurfbildung, die meist U-Formen schafft
- **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)
 - **Pro:** Verflüssigte Sedimente können hydromechanisch leicht abgetragen werden
 - **Contra:** Sedimentstrukturen, die auf Verflüssigungsvorgängen beruhen, wurden in Rinnen nicht gefunden, Annahme erklärt Rinnen im Festgestein nicht
- **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)
 - **Pro:** erklärt keilförmig gestapelte Sedimentstrukturen in Rinnen und den Anstieg der Rinnenbasis an deren Ende
 - **Contra:** liefert keine Erklärung für den Beginn der Rinnenanlage und das „primäre“ Eintiefen
- **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)
 - **Pro:** erklärt viele Beobachtungen die bei der Erforschung von glazigenen Rinnen gemacht wurden, sporadisch wiederkehrende Dynamik des Prozesses erklärt sowohl die Tiefenwirkung als auch die Verbreiterung der Rinnen
 - **Contra:** erklärt nicht alle Formen und Füllungen (Grundmoränen), die in Rinnen gefunden wurden, Prozess hat vermutlich nicht alleine gewirkt

Bisher wurde noch keine abschließende Erklärung für alle vorkommenden Rinnen-
ausprägungen gefunden. Wahrscheinlich ist auch, dass mehrere Prozesse gleichzeitig
wirken und so, je nach Ausprägung, unterschiedliche Rinnenformen schaffen. Bei den
meisten Erklärungsansätzen spielen Schmelzwässer eine wichtige Rolle bei der Rin-
nengenese, so dass angenommen wird, dass Rinnenbildungen hauptsächlich in der
Endphase einer Kaltzeit auftreten. In dieser Zeit fallen trotz andauernder Gletscher-
überdeckung bereits erhöhte Schmelzwassermengen an, die bis zum endgültigen
Rückzug und dem Übergang zur Warmzeit zur Verfügung stehen. Die Dauer einer sol-
chen Phase wird anhand der gesammelten Klimadaten aus der Vergangenheit auf
Jahrhunderte bis wenige Jahrtausende geschätzt.

Bei der Erkundung des Deckgebirges am Standort Gorleben wurde über dem Salz-
stock die in nordost-südwestlicher Richtung verlaufende elsterzeitliche Gorlebener
Rinne nachgewiesen. Daneben verlaufen, wie in Abb. 4.13 dargestellt, in der nördli-
chen und südlichen Randsenke die Rinne von Siemen-Wootz und die Gartower Rinne,
die mit der Gorlebener Rinne verbunden sind.

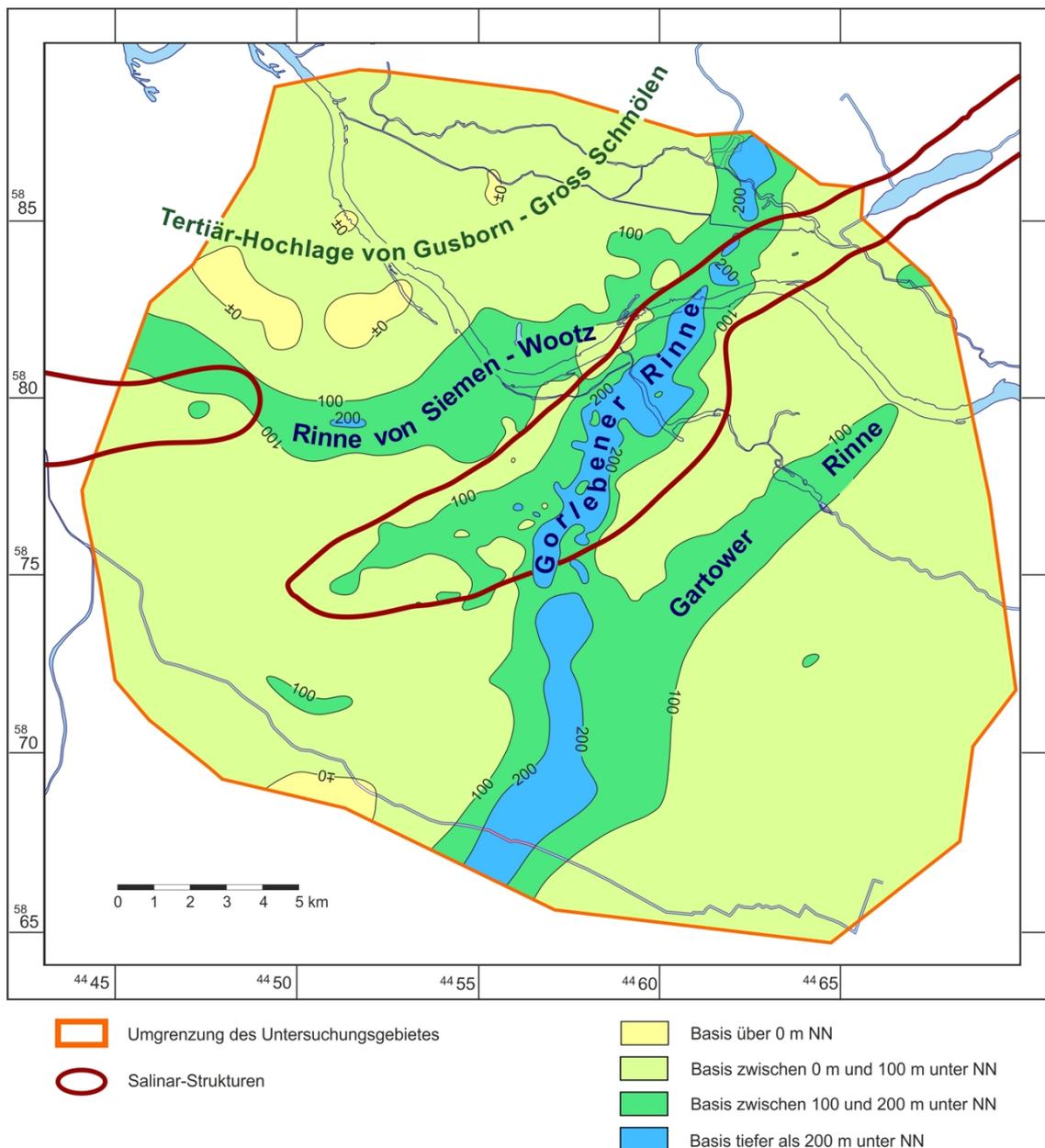


Abb. 4.13 Tiefenlage der Quartärbasis und quartäre Rinnen (geändert nach /KÖT 07/)

Über dem Salzstock ist die Gorlebener Rinne in einer Tiefe von 100 m u. NN zwischen 2 und 4 km breit und bis ca. 300 m u. NN tief. Die Abbildungen 4.14 und 4.15 zeigen einen Längs- und einen Querschnitt durch die Rinne, wobei erkennbar ist, dass die Sedimente des Deckgebirges stellenweise bis zum Salzspiegel ausgeräumt wurden. Insgesamt hat die Gorlebener Rinne auf einer Fläche von 7,5 km² Kontakt zum Hutgestein und dort lokal auch zum Salinar. In diesem Bereich erreichte gering mineralisiertes Wasser das Salinar, was zu einer zwischenzeitlichen Erhöhung der Subrosionsrate führte. Eine genaue Berechnung der Subrosionsrate zur Elster-Kaltzeit konnte nach /KÖT 07/ (S. 164) mit den vorliegenden Daten nicht durchgeführt werden. Es wird je-

doch davon ausgegangen, dass die Rate zu dieser Zeit das quartäre Maximum darstellte (Kapitel 4.5.3). Die Rinnenfüllung setzt sich aus elsterzeitlichen Schmelzwassersanden mit vereinzelt Geschiebemergeln zusammen, die von Sedimenten des Lauenburger-Ton-Komplexes überlagert werden. Darüber folgen in unterschiedlichen Mächtigkeiten abgelagerte überwiegend tonige Sedimente der Holstein-Warmzeit.

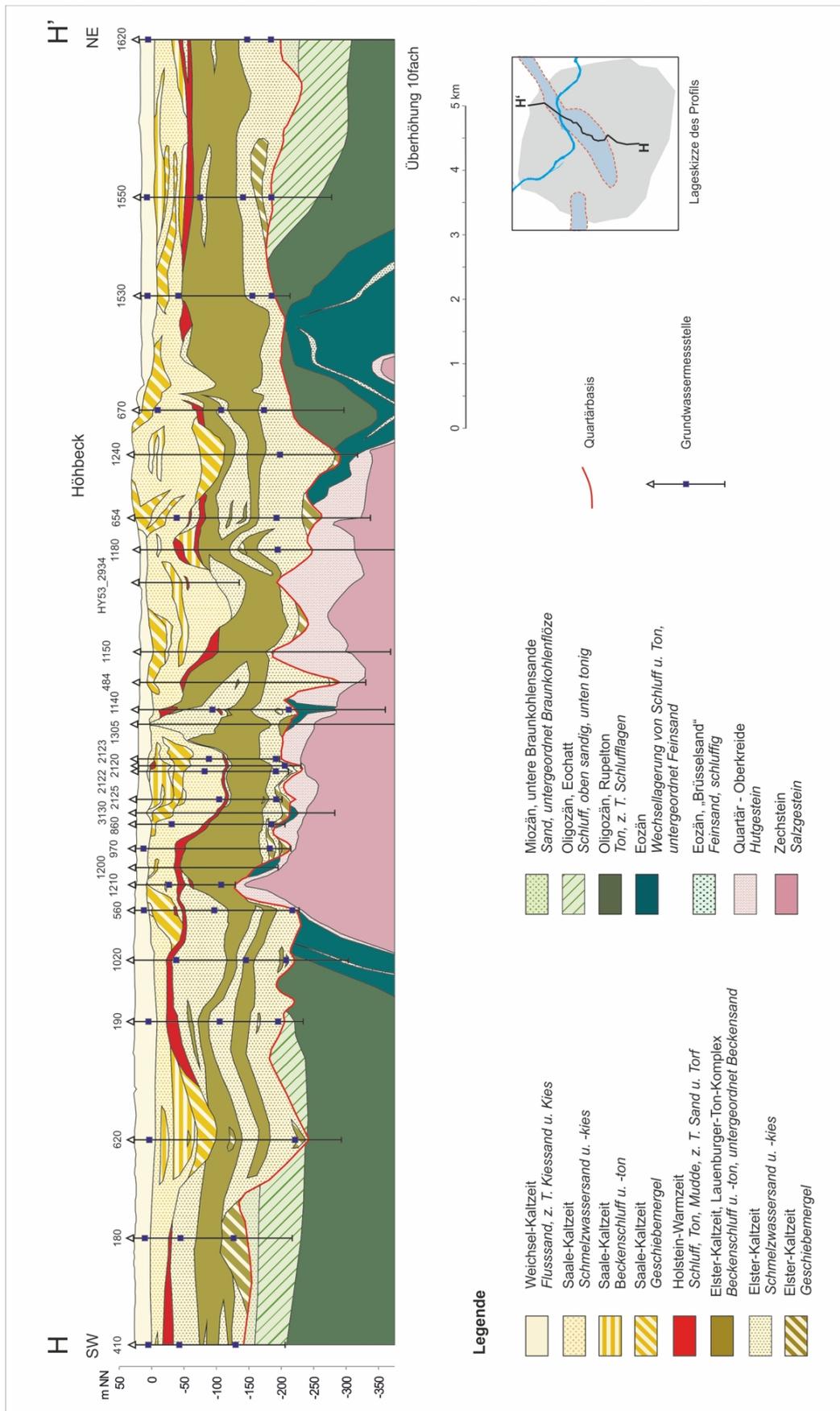


Abb. 4.14 Gorleber Rinne im 10-fach überhöhten Längsschnitt (/LUR 01)

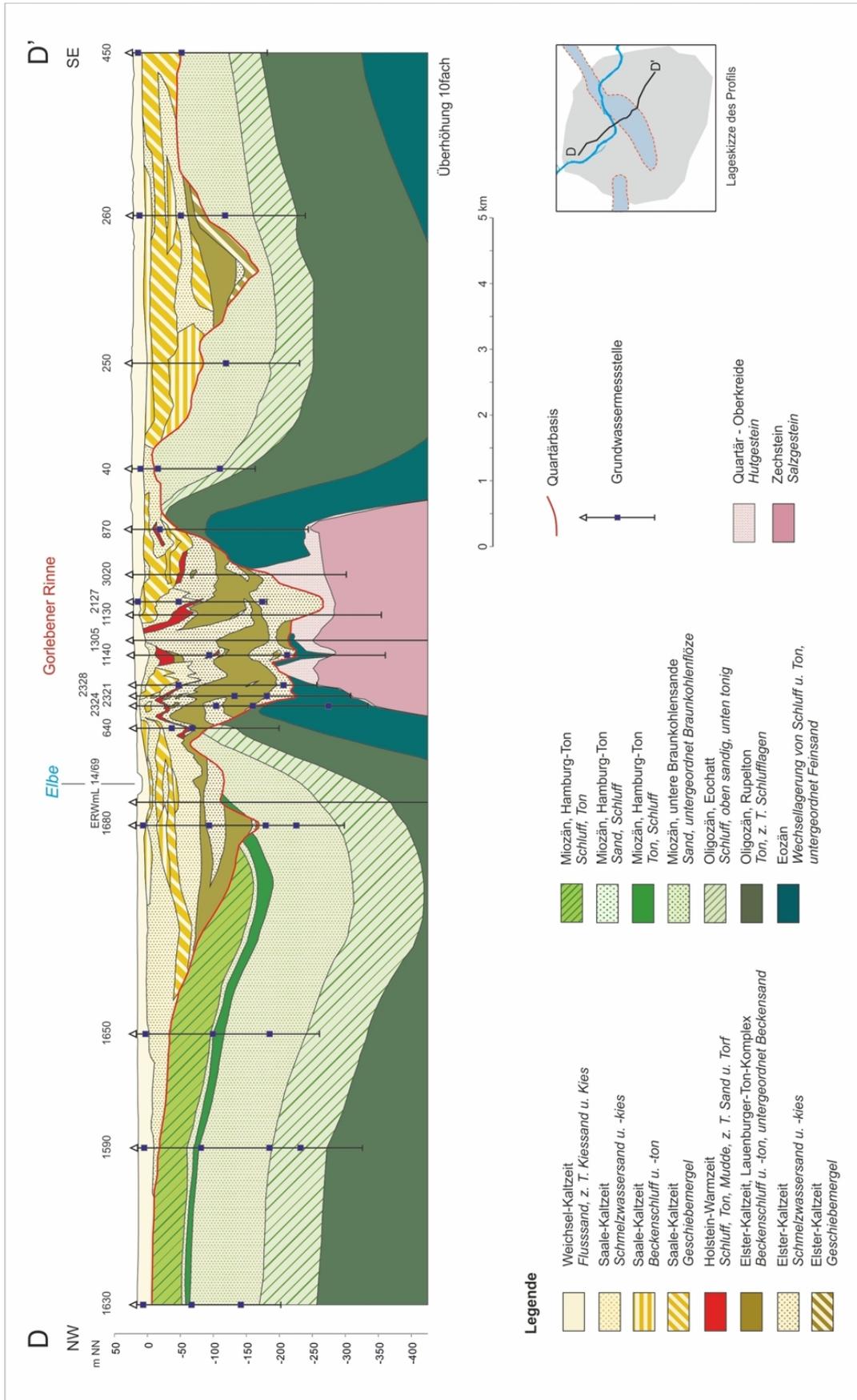


Abb. 4.15 Gorleber Rinne im 10-fach überhöhten Querschnitt (/LUR 01/)

Zukünftige Entwicklung

In zukünftigen Kaltzeiten kann es zu erneuten Rinnenbildungen kommen, die auch am Standort Gorleben nicht ausgeschlossen werden können. Nach bisherigen Erkenntnissen ist dafür am Bildungsort eine Eisüberdeckung notwendig, mit der nach /FOR 99/ jedoch erst ab der übernächsten Kaltzeit zu rechnen ist. Tritt entsprechend den Vorgängen in der Vergangenheit am Standort Gorleben eine erneute Rinnenbildung vom Ausmaß der Elster-Kaltzeit ein, kann das Deckgebirge in gleicher Weise ausgeräumt werden. Dabei würden die vorhandene Rinne oder der Salzstock jedoch keine bevorzugten Bereiche für die Rinnenbildung darstellen. Im Bereich der Gorlebener Rinne unterscheidet sich das Material der Rinnenfüllung z. B. nicht wesentlich von den Sedimenten in die sie eingeschnitten wurde. Das Salinar des Salzstocks verhält sich ähnlich wie Festgesteine und wird im Vergleich zu den Lockersedimenten langsamer abgetragen. In Festgesteinen sind, wie zuvor beschrieben, Einschnitttiefen durch Rinnen von ca. 50 m beobachtet worden, so dass ähnliche Werte auch für das Salinar angenommen werden können. Wird die Ausbildung einer extrem tiefen Rinne, wie der Hagenower Rinne mit über 500 m Tiefe, zugrunde gelegt, so bedeutet das für den Standort, dass zunächst die Sedimente des Deckgebirges von derzeit ca. 250 bis 340 m Mächtigkeit ausgeräumt werden müssen. Ab dem Erreichen des Salzspiegels läuft die Rinnenbildung, ähnlich wie im Festgestein, verlangsamt ab. Diese Verlangsamung führt dazu, dass die zur Verfügung stehende Zeit bis zum Beginn einer nachfolgenden Warmzeit wahrscheinlich nicht ausreicht, um eine Gesamttiefe der Rinne von ca. 500 m zu erzeugen. Dadurch, dass Rinnen nicht als Hohlformen zurückbleiben, sondern beim Rückzug des Gletschers mit Sedimenten verfüllt werden, addieren sich Tiefenwirkungen von Rinnenbildungen selbst am gleichen Standort nicht auf.

4.2.10 Ungewissheiten bei der Prognose der Rinnenbildung

Eine Ungewissheit bei der Prognose der zukünftigen Rinnenbildungen ist, dass die Prozesse die zur Rinnengenese führen sowie ihr Ablauf oder Ineinandergreifen noch nicht vollständig bekannt sind. Dies erschwert insbesondere die Prognose, an welcher Stelle eine Rinne in Zukunft gebildet werden kann. Außerdem gilt auch für diesen klimaabhängigen Prozess, dass eine ausreichend genaue Klimaprognose für die nächsten eine Million Jahre nicht vorliegt. Daher kann nur aus der Vergangenheit geschlossen werden, dass eine Kaltzeit mit der Intensität der Elster-Kaltzeit und damit verbundener Rinnenbildung im Bereich Gorleben bei entsprechenden klimatischen

Verhältnissen auch in Zukunft möglich ist. Ob, wann und wie oft diese Konstellation in Zukunft eintritt, ist nicht vorhersagbar. Auch für den Fall einer erneuten Rinnenbildung am Standort ist nicht abschätzbar, wie breit oder tief sie werden wird, da außer den unzureichenden Informationen über die Rinnengenese auch die Mächtigkeit und Zusammensetzung des Deckgebirges für diesen Zeitabschnitt unbekannt sind.

4.2.11 Glazigene Deformationen im Deck- und Nebengebirge

Glazigene Deformationen sind Schichtverstellungen und Lagerungsstörungen bis hin zum Schuppenbau, die während einer Kaltzeit meist durch das direkte Einwirken eines Gletschers entstanden sind.

Am Standort Gorleben wurden im Zuge der Erkundung des Deckgebirges an mehreren Stellen glazigene Deformationen nachgewiesen, die in /KÖT 07/ detailliert erläutert sind. Zu den dort beschriebenen Strukturen gehören Schollen älterer Sedimente in quartären Schichten, Schichtwiederholungen und starke Schichtverstellungen. Diese als drenthezeitlich (Saale-Kaltzeit) datierten Deformationen wurden bis in Tiefen von ca. 120 bis 150 m u. GOK angetroffen und reichen lokal bis unter die Quartärbasis. Nördlich der Elbe wurde in Bohrkernen eine Beeinflussung des miozänen Hamburg-Tons bis in 50 m Tiefe belegt. Der Salzstock wurde von diesen Prozessen jedoch nicht erreicht. Auch in Folge der Anlage der elsterzeitlichen Rinne kam es zu glazigenen Deformationen, bei denen es sich z. B. um Rutschungen und Sedimenteinsackungen beim Abschmelzen von Toteisblöcken handelt. Daneben fanden auch gravitativ-autoplastische Prozesse statt. Außerdem wurden in flachseismischen Profilen Lagerungsstörungen im oberen Bereich des Lauenburger-Ton-Komplexes identifiziert, die bis in ca. 100 m u. GOK reichen. Die markanteste glaziale Deformationsstruktur stellt der Höhbeck dar, bei dem es sich um einen Stauchendmoränen-Komplex handelt, dessen Internbau von Stauchungen und Verschuppungen geprägt ist.

Zukünftige Entwicklung

In der Zukunft werden in Kaltzeiten, in denen am Standort eine Eisüberdeckung vorliegt, erneut glazigene Deformationen entstehen. Deren Art und die dazu führenden Prozesse sowie deren Tiefenwirkung werden mit denen der Vergangenheit vergleichbar sein, da ein zukünftiges Deckgebirge aus einem ähnlichen Sedimentinventar, wie in der Vergangenheit, bestehen wird. Über die beschriebenen Deformationen hinaus werden tiefreichende glazigene Störungen mit bruchhaften Schichtversätzen

(s. a. Kapitel 4.3.9) oder glazigen induzierte Erdbeben (Kapitel 4.1.7) in den nächsten eine Million Jahren am Standort Gorleben nicht entstehen. Grund dafür ist das Fehlen von nötigen Rahmenbedingungen, wie einem kompressiven Spannungsfeld im Untergrund und einer ausreichend mächtigen Eisüberdeckung in dieser Zeit (s. a. Abb. 4.3).

4.2.12 Ungewissheiten bei der Prognose von glazigenen Deformationen im Deck- und Nebengebirge

Ungewissheiten in der Prognose der zukünftigen glazigenen Deformationen am Standort ergeben sich vor allem aus der Koppelung an die Klimaentwicklung, bei der nicht genau vorhersagbar ist, zu welchem Zeitpunkt Kaltzeiten eintreten und wie lange sie in welcher Intensität einwirken werden. Auch die genaue Raumlage der Deformationen ist für die Zukunft nicht abschätzbar, da sie von zahlreichen Parametern beeinflusst wird. Dazu zählen z. B. die dann unbekanntenen Untergrundstrukturen, die jeweils vorliegende Geomorphologie, die Bewegungsrichtungen der Gletscher und die Intensität der Prozesse. Daher kann lediglich prognostiziert werden, dass glazigene Deformationen im Verlauf der nächsten eine Million Jahre mehrfach ablaufen werden und dass sie das Deckgebirge strukturell umgestalten werden.

4.3 Entwicklungen der Geomorphologie sowie des Deck- und Nebengebirges

4.3.1 Transgression oder Regression

Transgression bezeichnet die Verschiebung der Küstenlinie in landeinwärtige Richtung und im Gegenzug bezeichnet Regression die rückläufige Bewegung der Küstenlinie seewärts gerichtet. Trans- und Regressionen sind die Folge von regionalen tektonischen Absenkungen (Kapitel 4.1.1) und/oder Epirogenese (Kapitel 5.1.1) des Festlandes, von kalt- oder warmzeitlichen Klimaverhältnissen und von global gleichzeitig erfolgenden eustatischen Meeresspiegelschwankungen. In der Vergangenheit haben die kaltzeitliche Bindung von Wasser in Form von Eis und Schnee sowie das warmzeitlich verursachte Abschmelzen weltweit zu Schwankungen des Meeresspiegels um mehr als 100 m geführt (/MUR 10/). Das völlige Abschmelzen der heutigen globalen Eismassen würde, nach einer Zusammenstellung von /ALL 09/, einen Meeresspiegelanstieg

um rund 65 m nach sich ziehen. In Abb. 4.16 ist die Küstenlinie dargestellt, die sich dann auf Basis der heutigen Topographie in Norddeutschland ausbilden würde.

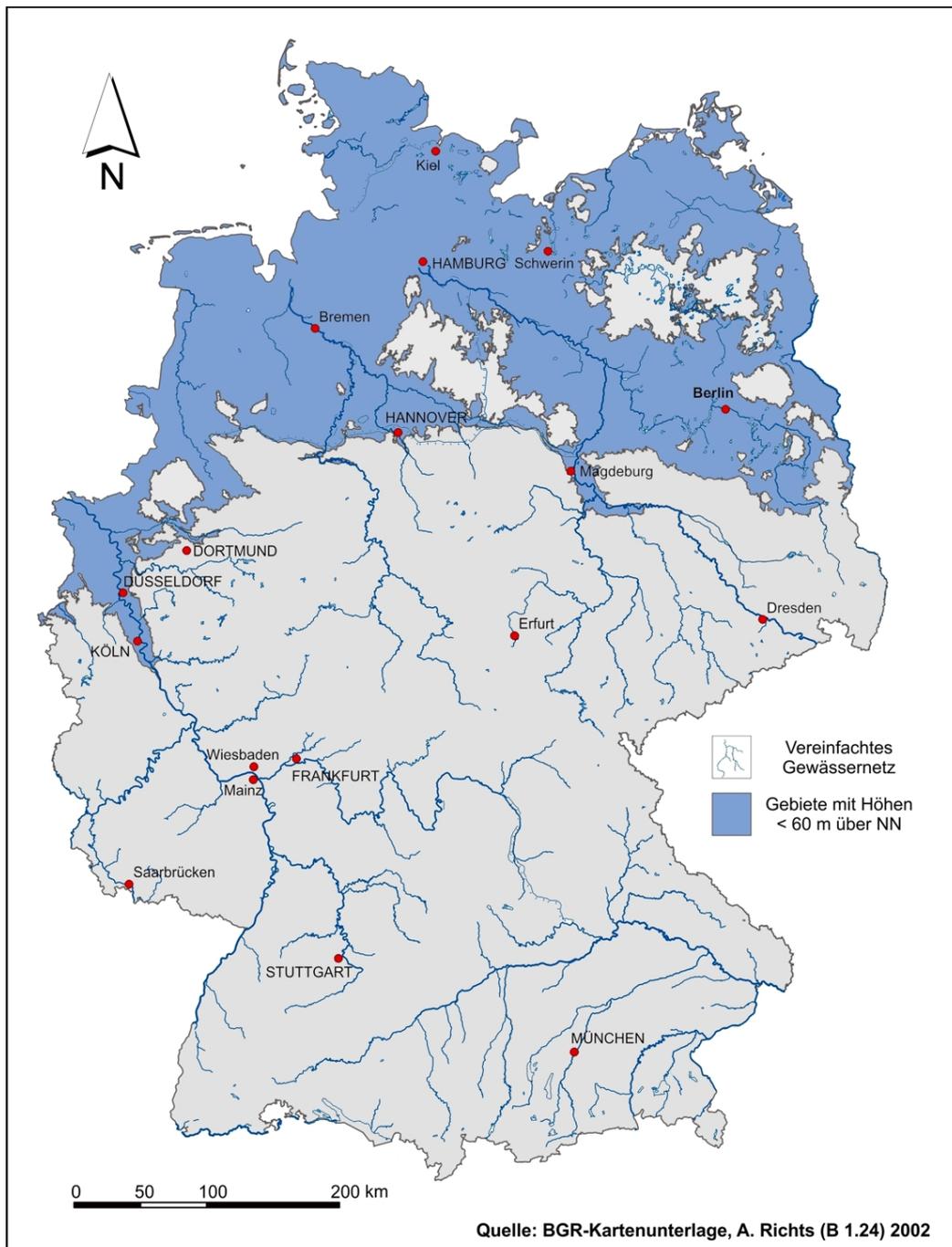


Abb. 4.16 Küstenlinie nach einem Meeresspiegelanstieg von 60 m auf Basis der rezenten Topographie (/FLÜ 09/)

Ein Meeresspiegelanstieg in diesen Dimensionen könnte auch aufgrund einer anthropogen bedingten Erwärmung der Erdatmosphäre schon innerhalb der nächsten 500 bis 1.000 Jahre erfolgen. Auch dieser Erwärmung würde entsprechend der natürlichen

Klima-Zyklen (vgl. Kapitel 3.1) erneut eine Abkühlung der Erdatmosphäre folgen, die in ca. 10.000 Jahren ohne die Annahme weiterer anthropogener Einflüsse prognostiziert wird. Diese Abkühlung würde später in einer neuen Inlandvereisung inklusive einer Regression münden (/GEJ 99/). Weitere globale eustatische Änderungen des Meeresspiegels werden nach Suess (1888, in /MUR 10/) z. B. durch Sedimentation in Meeresbecken oder durch das Einströmen von Wassermassen in eingebrochene Meeresbecken verursacht. Als Folge einer Transgression kommt es, dem Küstenvorstoß folgend, zu flachmarinen Sedimentationen, die die ehemaligen Küstengesteine überlagern.

Zukünftige Entwicklung

Derzeit liegt der Standort Gorleben mit Entfernungen zwischen ca. 100 und 200 km in einem küstenfernen Flachlandbereich. Wie in Kapitel 4.1.1 (Senkung der Erdkruste) beschrieben, kommt es dort in der nächsten eine Million Jahre vermutlich zu einer epirogenetisch bedingten Absenkung von ca. 10 m. Die allein dadurch verursachte Transgression würde die Küstenlinie im Elbtal landeinwärts verschieben, ohne den Standort Gorleben zu erreichen. Auch das ausgeglichene Relief am Standort bis hin zum ebenfalls flachen Nordseegrund sprechen nicht für eine starke Eintiefung der Elbe bei einem Rückgang des Meeresspiegels (/KEL 01/). Für den Fall, dass es innerhalb der zu erwartenden ca. zehn zukünftigen Warmzeiten zu einem völligen Abschmelzen der Polkappen kommt, wäre die Transgression, die mit rund 65 m angesetzt werden kann /ALL 09/, ausreichend, um den Standort Gorleben zu überfluten. Dort kämen dann flachmarine Sedimente zur Ablagerung, die die Mächtigkeit des Deckgebirges erhöhen würden. Welcher Art die Sedimente sind und in welcher Mächtigkeit sie zur Ablagerung kommen, ist nicht prognostizierbar. Ebenso ist nicht vorhersagbar, wie oft der Standort Gorleben während zukünftiger Warmzeiten überflutet wird. Die Ablagerung neuer Sedimente und die Wassersäule, die je nach Meeresspiegel am Standort existiert, ändern die Spannungsverhältnisse im Untergrund und verursachen z. B. die Diagenese unverfestigter Sedimente. Neben der Ablagerung neuer Sedimente hätte eine Überflutung des Standortes auch Einfluss auf die hydrogeologischen Verhältnisse im Untergrund. Einerseits läge dann kein hydraulisches Potential vor und die Fließvorgänge im Untergrund kämen zum Erliegen. Andererseits käme es aufgrund der Überlagerung mit Salzwasser zu einem Aufsalzen der Süßwässer im Porenraum des Untergrundes. Als Folge dieser Vorgänge würde die Subrosion an der Salzstockoberfläche stark verlangsamt werden.

Die zu erwartenden Regressionen werden vor allem in Kaltzeiten auftreten und sind in Anzahl (ca. zehn s. Kapitel 4.2) und Intensität ebenso wie die Transgressionen nicht exakt zu prognostizieren. Die Änderungen, denen der Standort Gorleben dann unterworfen sein wird, werden in den jeweiligen Kaltzeit-Prozessen erläutert (Kapitel 4.2.5 Inlandvereisung in randlicher Lage und Kapitel 4.2.7 Vollständige Inlandvereisung).

4.3.2 Ungewissheiten bei der Prognose der Transgression und Regression

In Norddeutschland werden Transgressionen und Regressionen weiterhin im Wechsel auftreten, eine Ungewissheit besteht allerdings in der Vorhersage, ob oder wann der Standort Gorleben davon betroffen sein wird. Diese Möglichkeit ist nur gegeben, wenn mehrere Faktoren ineinandergreifen. Es müsste im Standortbereich eine Vertiefung in der Topographie vorhanden sein, die z. B. durch Anlage einer neuen Rinne in einer Kaltzeit entstanden ist. Zudem dürfte diese beim Rückzug des Gletschers nicht vollständig zusedimentiert worden sein. Zusätzlich erforderlich wäre ein schnelles Abtauen des Eisschildes mit entsprechender Erhöhung des Meeresspiegels, so dass auch ein schnelles Vordringen des Meeres in Geländedepressionen möglich ist, bevor Erosions- und Sedimentationsprozesse diese ausgeglichen haben. Jeder dieser Einzelprozesse ist in Bezug auf sein Eintreten und seine Ausprägung mit Ungewissheiten behaftet, die erforderliche Kombination dieser Prozesse erhöht die Ungewissheit des Eintretens. Ob und wann die klimatischen Bedingungen dafür günstig sein werden und ob dieser Zustand dann mit den geologischen Prozessen (z. B. Rinnenbildung) zusammentrifft, ist nicht prognostizierbar und muss auch nicht zwingend eintreffen.

4.3.3 Erosion

Unter dem Sammelbegriff „Erosion“ werden Vorgänge zusammengefasst, die die Geomorphologie durch lineare und flächenhafte Abtragung verändern. Die lineare Abtragung wird hauptsächlich durch fluviale Prozesse hervorgerufen, sie kann jedoch, wie z. B. bei der Trogtalbildung, auch glazial entstehen. Flächenhafte Abtragung, die auch als Denudation bezeichnet wird, entsteht durch Windabtragung (äolisch) oder marin im küstennahen Bereich, sowie durch Frost-/Tauwechsel.

In Kaltzeiten herrschen besondere Bedingungen, an die typische Erosionsvorgänge gekoppelt sind. Im Permafrostbereich wirkt die Erosion in der aktiven Zone, die jahreszeitlich bedingt taut und wieder friert. Dabei kommt es bei einer reliefarmen Morpholo-

gie, wie auch in Kapitel 3.2 beschrieben, zu Sediment- und Gesteinsumlagerungen, die an der Oberfläche als Steinkreise oder -netze (s. a. Abb. 4.9) zu erkennen sind. Zusätzlich wirkt verstärkt die äolische Erosion, da die Permafrostebenen meist nur einen spärlichen Bewuchs aufweisen und Lockermaterial schnell vom Wind abgetragen werden kann. Bereits bei einer geringen Geländeneigung kann es auch zu Gleit- und Fließbewegungen (Solifluktion) der aufgetauten Bodenschicht kommen, wodurch partiellweise der Untergrund freigelegt wird. An diesen Stellen kann dann wiederum die äolische Erosion stärker einwirken. Rückt ein Gletscher mit fortschreitender Kaltzeit näher, kommen im Eisrandbereich noch die erosiven Einwirkungen der Schmelzwässer hinzu (s. Kapitel 4.2.5). Diese können sowohl an der Gletscherbasis als auch an dessen Oberfläche ablaufen. Häufig kommt es dabei zu einem raschen Wechsel von Sedimentation und erneuter Erosion. Bleibt die Gletscherrandlage über einen längeren Zeitraum stabil, bildet sich unter den gegebenen norddeutschen Verhältnissen in einiger Entfernung ein gletscherrandparalleles Entwässerungsnetz (Urstromtal) aus, in dem große Mengen von Schmelzwässern abfließen und eine lineare Erosion bewirken.

Ein weiterer Erosionsprozess, der bei einer Gletscherrandlage auf die Morphologie einwirkt, ist die Exaration, die im Bereich der Gletscherstirn eine Ausschürfung der Sedimente erzeugt. Ermöglichen die klimatischen Verhältnisse eine vollständige Eisüberdeckung laufen die Erosionsprozesse unter dem Gletscher ab. Die einwirkenden Hauptkomponenten sind dann die Detersion und das Abfließen von druckbedingt gebildeten Schmelzwässern. Unter dem Gletscher werden z. T. hohe Erosionsleistungen erreicht, die auch zur Rinnenbildung führen können (s. a. Kapitel 4.2.9).

Die Erosionsraten dieser dauerhaft ablaufenden Prozesse sind abhängig vom Relief, der Vegetation, dem herrschenden Klima sowie von der Art und Zusammensetzung des Gesteinsuntergrundes. Insbesondere in tektonisch aktiven Regionen, in denen ein ausgeprägtes Relief entsteht, wirkt die Erosion stärker. Das Norddeutsche Tiefland, inklusive des Standortes Gorleben, ist ein tektonisch ruhiges Gebiet mit einem weitgehend ausgeglichenen Relief, das von Erosionsvorgängen wenig betroffen ist. In einer tektonisch aktiveren Phase vom Oberen Miozän bis zum Altquartär (vor ca. 10 Millionen Jahren) wurden nach /KÄB 01/ für das Gebiet des Standortes Morsleben Erosionstiefen von 100 bis 200 m ermittelt. Im Harzvorland, in dem ein ausgeprägteres Relief vorlag, lief die flächenhafte Erosion seit dem Cromer-Komplex nach /FEL 02/ mit 100 bis 200 m pro eine Million Jahre mit einer zehnmal höheren Erosionsrate ab.

Am Standort Gorleben sind bis auf den H6hbeck keine gro6en Reliefunterschiede ausgebildet, die einen Abtrag durch fl6chenhafte Erosion beg6nstigen w6rden und auch die Elbe hat zu keiner ausgepr6gten linearen Erosion gef6hrt. Lediglich w6hrend der Kaltzeiten, in denen eine Gletscher6berdeckung vorlag, fand eine glazigen bedingte Erosion statt, die unter anderem zur Ausbildung der Gorlebener Rinne f6hrte (Kapitel 4.2.9).

Zuk6nftige Entwicklung

F6r die n6chsten eine Million Jahre wird am Standort keine tektonisch aktive Phase erwartet, so dass mit einer darauf beruhenden Erh6hung der Erosionsrate ebenfalls nicht zu rechnen ist. Insgesamt wird die Erosionsrate daher unter den von /K6B 01/ ermittelten Werten liegen, die auf eine tektonisch aktive Phase in Morsleben bezogen sind. Bei einer zuk6nftigen fl6chenhaften Erosion kann es zu einem Reliefausgleich kommen, bei dem eine Erhebung wie der H6hbeck eingeebnet w6rde. Eine Erh6hung der linearen Erosionsrate durch die Elbe ist ebenfalls nicht zu erwarten, da bei andauerndem Senkungstrend des Norddeutschen Tieflandes (vgl. Kapitel 4.1.1) f6r die Elbe keine Ausgangssituation geschaffen wird, die ein st6rkeres Einschneiden in den Untergrund beg6nstigt. Auch in zuk6nftigen Kaltzeiten ist am Standort nicht mit einer erneuten Abtragung des Deckgebirges zu rechnen, da die glazigene Erosion durch die Sedimentation beim R6ckzug der Gletscher weitgehend ausgeglichen wird. Auch wenn die Erosion nicht zu einer Verringerung der Deckgebirgsm6chtigkeit f6hrt, werden die Morphologie und die Zusammensetzung der Sedimente st6ndig ver6ndert. Dadurch greift die Erosion beeinflussend auch in die hydrogeologischen Rahmenbedingungen ein (s. a. Kapitel 3.4).

4.3.4 Ungewissheiten bei der Prognose der Erosion

Ungewissheiten bei der Prognose der Erosion bestehen vor allem aufgrund der schwer vorhersagbaren klimatischen Entwicklung. Daher ist nicht exakt prognostizierbar, in welchem Ma6 und/oder zu welcher Zeit ein bestimmter Erosionsprozess wirkt. Eine 6berschreitung des in der Vergangenheit festgestellten Ausma6es ist jedoch nicht zu erwarten, da die Prozesse in gleicher Weise ablaufen werden.

4.3.5 Sedimentation

Sedimentation bezeichnet nach /MUR 10/ den Vorgang des Absetzens oder des chemischen sowie biochemischen Ausscheidens von Feststoffen, die zuvor in einem Fluid transportiert wurden oder gelöst waren. Als mögliche Fluide mit unterschiedlicher „Tragkraft“ kommen Luft, Wasser und Gletschereis in Frage. Neben der Tragkraft des Transportmediums spielen bei dieser Art der Sedimentation auch die Eigenschaften der Feststoffe, wie spezifisches Gewicht, Größe, Gestalt usw., eine Rolle. Die chemische Sedimentation wird z. B. durch den Sättigungsgrad, die Temperatur oder das Vorhandensein von Lösungspartnern und Gasen beeinflusst. Im Fall der biochemischen Sedimentation, entweder in Form von Abscheidungen von Stoffwechselprodukten durch Organismen, oder durch Ablagerung von abgestorbener Biomasse, müssen vor allem geeignete Lebensräume und -bedingungen vorhanden sein.

Bei der äolischen Sedimentation (Feststofftransport in der Luft) kommt es zu einer Auffüllung von morphologischen Hohlformen oder auch zur Bildung von Dünen. Aufgrund der begrenzten Tragkraft der Luft wird bei dieser Form der Sedimentation hauptsächlich feinkörniges und leichtes Material, wie z. B. Löss, abgelagert. Stellt Wasser das Transportmedium dar, kann eine fluviatile (in Flüssen), eine fluvioglaziale (Schmelzwasser), eine limnische (in Seen) oder eine marine (im Meer) Sedimentation erfolgen. Als chemischer Prozess ist im Wasser auch das Ausfällen von Sedimenten im Meer, entsprechend dem Ausfällungszyklus von Kalk bis Salz, oder das Ausfällen in Quellen z. B. in Form von Sintern, Kalktuffen u. ä. möglich. In Kaltzeiten mit Gletscherüberdeckung findet, durch im Eis gebundene Feststoffe, eine glaziäre Sedimentation statt. Dabei werden unter anderem Moränen, Drumlins, Oser und Sander gebildet. Außerdem erfolgt eine Sedimentation auch durch Bodenbewegungen z. B. in Form von Steinschlag, Muren oder Solifluktion. Für den Standort Gorleben kann eine nennenswerte vulkanogene Sedimentation, z. B. in Form von Ascheregen, in den nächsten eine Million Jahren ausgeschlossen werden, da in dieser Zeit mit vulkanischer Tätigkeit in der Region nicht zu rechnen ist (s. a. Kapitel 5.2.1). Neben den zuvor genannten Prozessen kann eine Sedimentation auch durch Bodenbewegungen, wie Steinschlag, Muren oder Solifluktion, verursacht werden.

Zukünftige Entwicklung

Für den Bereich Gorleben wurden, wie in Kapitel 4.1.1 (Senkung der Erdkruste) beschrieben, sehr geringe Senkungsraten ermittelt, die innerhalb von einer Million Jahre

zu einer Absenkung des Bereichs von ca. 10 m führen würden. Diese Absenkung allein reicht nicht aus, um die Ablagerung größerer Sedimentmächtigkeiten zu erzeugen, zumal der Standort dann noch nicht unter Meeresbedeckung liegen würde (s. Kapitel 4.3.1). Lediglich in späten Entwicklungszeiten ist eine marine Sedimentation möglich, wenn bereits eine Absenkung des Bereichs um mehrere Meter stattgefunden hat und eine einsetzende Warmzeit zusätzlich zu einem raschen Meeresspiegelanstieg führt. Unter diesen Bedingungen wäre eine geringmächtige flachmarine Sedimentation denkbar, die jedoch zeitlich nicht ausreichen würde, um eine chemische Sedimentation z. B. mit der Bildung von Kalksteinen zu erzeugen. In der jüngeren geologischen Vergangenheit wurden die mächtigsten Sedimente in Kaltzeiten mit Gletscherüberdeckung abgelagert, ein Vorgang, der auch in Zukunft zu erwarten ist. Da die glazigene Sedimentation zumindest im Vorfeld, beim Vorrücken des Gletschers, mit erheblicher Erosion verbunden ist, führt die Sedimentation nicht zu einer ausschließlichen Erhöhung der Deckgebirgsmächtigkeit. Der mächtigkeitsverringende Anteil der Erosion ist deshalb abzuziehen. Ein Teil des Deckgebirges wird in seiner Zusammensetzung also nur umgestaltet und durch zusätzliche Sedimente ergänzt. Dies hat auch eine Umgestaltung der Oberflächenmorphologie (Kapitel 3.2), wie Reliefausgleich, und des hydrogeologischen Systems (Kapitel 3.4), z. B. mit geänderten Grundwasserfließwegen oder geändertem -chemismus, zur Folge. Außerdem bewirkt eine zusätzliche Auflast die Diagenese tiefer liegender und derzeit noch unverfestigter Sedimente am Standort, damit verbunden ist auch eine Änderung der Spannungsverteilung im Untergrund. Neben den bereits erläuterten Erosionsvorgängen ist auch eine kaltzeitliche Ablagerung fluvialer und limnischer Sedimente im Bereich von Abflusssystemen im Vorfeld eines Gletschers oder in einer Permafrostzone möglich. Eine geänderte Morphologie kann auch in Warmzeiten zur Ausbildung von Flusssystemen und Oberflächengewässern führen, die den heutigen ähneln und lokal zu Sedimentation führen.

4.3.6 Ungewissheiten bei der Prognose der Sedimentation

Die größte Ungewissheit bei der Prognose der zukünftigen Entwicklung der Sedimentation am Standort Gorleben ist die Abschätzung der zur Ablagerung kommenden Mächtigkeit. Vor allem die Tatsache, dass die Sedimentation in ihrem zeitlichen Ablauf während Kaltzeiten eng an Erosionsprozesse gekoppelt ist, macht eine quantitative Abschätzung der Mächtigkeiten unmöglich. Außerdem kann aufgrund der unzureichenden Kenntnisse zur klimatischen Entwicklung auch nicht angegeben werden, zu welchem Zeitpunkt welche Art der Sedimentation zu erwarten ist. Ebenso kann nicht

vorhergesagt werden, wo sich in späteren Zeiten Flüsse und Seen befinden, die lokal zu fluviatilen und limnischen Sedimenten führen. Generell werden die zukünftig zur Ablagerung kommenden Sedimente ähnliche Mächtigkeiten aufweisen wie die Sedimente der letzten eine Million Jahre, da auch die auslösenden Prozesse in einem ähnlichen Rahmen ablaufen werden.

4.3.7 Diagenese

Diagenese ist die, z. B. durch Druck- und Temperaturänderungen, chemische Lösung sowie Ausfällung, lang- oder kurzfristig ablaufende Umbildung lockerer Sedimente zu festen Sedimentgesteinen (nach /MUR 10/). Bei dieser Umbildung ändern sich abhängig vom Sedimenttyp und der Intensität auch Eigenschaften, wie Permeabilität, Porosität, Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Eine einsetzende Diagenese könnte demnach die hydraulischen Eigenschaften eines Aquifers verändern. Diagenetische Vorgänge laufen ebenfalls in Evaporiten ab, wo sie eine Entwässerung und Umkristallisation bewirken.

Zukünftige Entwicklung

Am Standort Gorleben haben das Salinar und die tieferen Schichten des Deckgebirges bereits in der Vergangenheit die Diagenese durchlaufen. Lediglich die darüber liegenden unverfestigten Schichten des Deckgebirges können in Zukunft diagenetisch überprägt werden. Das gleiche ist auch für zukünftige Ablagerungen am Standort Gorleben zu erwarten, die sowohl glazial oder durch Sedimentation (Kapitel 4.3.5) bedingt zur Ablagerung kommen.

4.3.8 Ungewissheiten bei der Prognose der Diagenese

Bei der Prognose der Diagenese für die nächsten eine Million Jahre ist nicht bekannt, welche Sedimente in welcher Mächtigkeit zur Ablagerung kommen werden. Es kann daher lediglich angenommen werden, dass die heute oberflächennah vorhandenen Lockersedimente bei einem Auflastdruck durch zukünftig abgelagerte Sedimente von diesem und durch die zunehmende Tiefe in Bezug auf die Geländeoberfläche die Diagenese durchlaufen werden. Welche der zukünftigen Sedimente innerhalb der nächsten eine Million Jahre davon betroffen sein werden, lässt sich nicht abschätzen, da ungewiss ist, welche Sedimente mit welcher Mächtigkeit zur Ablagerung kommen.

4.3.9 Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Trennfugen im Gebirge, an denen Verstellungen der angrenzenden Schollen im Zentimeter- bis Kilometerbereich stattgefunden haben, werden als Störungen bezeichnet /MUR 10/. Bei einem lokal gehäuften Auftreten von Störungen, die bei gleicher Ausrichtung auch auf die gleichen Spannungszustände im Gebirge zurückzuführen sind, wird der Begriff Störungzone verwendet. Störungen entstehen im Gebirge, wenn sich der Spannungszustand in Form von Kompressionen oder Extensionen ändert und eine bruchhafte Deformation mit einer Versatzbewegung entlang der Bruchfläche entsteht. Auslöser solcher Spannungsänderungen können z. B. überregionale tektonische Prozesse, Diapirismus, Subrosion und Karstbildungen mit Einsturz der hangenden Schichten in die entstandenen Hohlräume sein.

Am Standort Gorleben wurden umfangreiche geologische und geophysikalische Untersuchungen vorgenommen, um die Existenz, Raumlage und Entwicklungsgeschichte von Störungen zu klären. Ergänzt wurden diese Daten durch Ergebnisse von Explorationsuntersuchungen der Erdölindustrie im weiteren Umfeld des Standortes, die zusätzliche Informationen über den Bau des tieferen Untergrundes liefern. Dabei wurde festgestellt, dass es im Präzechstein-Untergrund Sockelstörungen gibt, die in aktiven Bewegungsphasen bei einigen Salzstöcken den Diapirismus ausgelöst haben. Auf den Salzstock Gorleben trifft dies nicht zu, da sich in seinem unmittelbaren Untergrund keine Sockelstörungen befinden. Nach /KÖT 07/ konnte auch eine Neuanlage von Störungen im Tertiär nicht nachgewiesen werden. Detaillierte Erläuterungen zum strukturellen Bau und zur tektonischen Entwicklung des tieferen Untergrundes im Umfeld des Standortes finden sich u. a. im Standortbericht von /KÖT 07/.

Die Erkundung des Deckgebirges am Standort ergab, dass entsprechend des generellen Trends im Norddeutschen Becken während des Känozoikums eine abnehmende tektonische Aktivität vorlag. Störungen in tertiären und quartären Schichten wurden vor allem in Form von Scheitelgräben in den Deckschichten über Salzstöcken gefunden, und sind genetisch an den Diapirismus gebunden, der zu einer Extension in den überlagernden Schichten führte. In diesen Bereichen können auch Störungen auftreten, die mit der Subrosion (Kapitel 4.5.3) zusammenhängen, wenn Deckschichten bruchhaft in entstandene Hohlformen einsinken. Über dem Salzstock Gorleben und an dessen Flanken führte der Salzaufstieg vor allem im Zeitraum Oberjura bis Mitteloligozän (vor 150 bis ca. 30 Millionen Jahren) auch in Kombination mit Subrosionsvorgängen zur Bildung solcher Scheitelgräben, an denen zeitweise intensive Bewegungen stattfanden.

den. Detaillierte Beschreibungen von der Art und dem zeitlichem Ablauf dieser Vorgänge können den Berichten /BOR 08/, /ZIR 91a/, /ZIR 91b/, /ZIR 96/, /ZIR 04a/) und /ZIR 04b/ entnommen werden. Flachseismische Untersuchungen zeigten im Randbereich des Salzstocks Scheitelgrabenstörungen in tertiären Schichten mit geringen Versatzbeträgen. Die tertiären Schichten im zentralen Bereich über dem Salzstock sind stark gestört und waren aufgrund der Kleinteiligkeit der einzelnen Strukturen mit flachseismischen Methoden nicht klar aufzulösen. Bohrungsbefunde ergaben in diesen Bereichen eine unruhige und relativ flache Lagerung der Schichten /KÖT 07/ (S. 131). In welchem Ausmaß die ursprünglichen Störungen angelegt wurden und welche Versatzbeträge an ihnen erreicht wurden, ist nicht mehr messbar, da ein Großteil dieser Strukturen im Zuge der glazigenen Umgestaltung, vor allem während der Elster-Kaltzeit, abgetragen wurden. Im Übergangsbereich der Salzstrukturen Gorleben und Rambow blieb das Scheitelgrabensystem der tertiären Schichten erhalten, da dieser Bereich nur oberflächennah von der quartärzeitlichen Erosion erreicht wurde. Im Gegensatz zum Salzstock Gorleben blieben im Deckgebirge über dem Salzstock Rambow auch Erdfälle und eine Subrosionssenke erhalten, die z. T. mit jüngeren kaltzeitlichen Sedimenten gefüllt sind.

Die Scheitelgrabenstörungen über dem Salzstock Gorleben konnten in den quartären Schichten nicht nachgewiesen werden, dort liegt stattdessen ein starker Einfluss glazigener Deformationen (Kapitel 4.2.11) mit Verstellungen und Schuppenbau vor. Im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben wurden nur lokal oder geringmächtig kalkhaltige Ablagerungen aus der Kreidezeit angetroffen, so dass auch keine Störungen auftreten, die auf Karstbildungen in diesen Schichten zurückzuführen sind.

Störungen im Deckgebirge können Einfluss auf die hydrogeologischen Strömungsverhältnisse haben, wenn sie, wie in Abb. 4.17 dargestellt, selbst Wegsamkeiten darstellen (1), vorher getrennte Aquiferbereiche miteinander verbinden (2), lokale Aufhebung der Stockwerksgliederung) oder verbundene trennen (3). Aufgrund der zuvor genannten Umgestaltung des Deckgebirges über dem Salzstock, vor allem in der Elster-Kaltzeit, wurden derartige Einflüsse auf das Aquifersystem am Standort Gorleben nicht nachgewiesen.

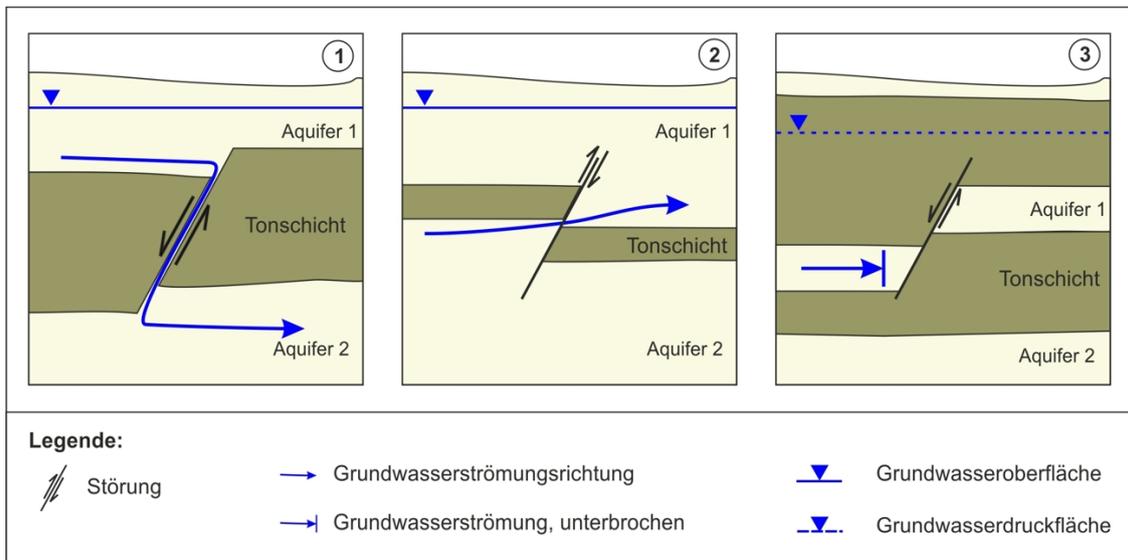


Abb. 4.17 Schema unterschiedlicher Einflüsse von Störungen auf die Grundwasserströmung

Zukünftige Entwicklung

In der nächsten eine Million Jahre ist nicht damit zu rechnen, dass ein Salzaufstieg (s. Kapitel 4.5.1) stattfindet, der ausreichen würde, um extensionsbedingte Störungen in Form von neuen Scheitelgräben im Deckgebirge zu erzeugen. Auch ein Übergang in eine tektonisch aktivere Phase wird für das Norddeutsche Becken in diesem Zeitraum ausgeschlossen. Da die Subrosion ähnlich wie in der Vergangenheit nicht gleichmäßig abläuft, ist es möglich, dass in Zeiten mit kurzfristig hohen Subrosionsraten erneut Hohlräume im Bereich des Hutgesteins entstehen, bei deren Einbrechen Störungen in den nachrutschenden Schichtpaketen gebildet werden. Diese Störungen werden entsprechend der insgesamt geringen zu erwartenden Subrosionsraten jedoch nur kleinräumig ausgebildet sein. Eine Beeinflussung anderer Prozesse ist durch diese minimalen Störungen nicht zu erwarten. Ebenso ist nicht zu erwarten, dass in Zukunft Störungen durch Karstbildungen entstehen, da die geologischen Entwicklungen in der nächsten eine Million Jahre eine Ablagerung von mächtigen Kalksteinen im Deckgebirge nicht ermöglichen.

4.3.10 Ungewissheiten bei der Prognose von Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge

Ungewissheiten bestehen bei der Prognose von Störungen, die durch Subrosion ausgelöst werden. Für diese ist nicht absehbar, ob in Zukunft Rahmenbedingungen herr-

schen, die kurzzeitig eine so hohe Subrosion möglich machen, dass es zur Ausbildung von Hohlräumen und einsturzbedingten Bruchstrukturen kommt. Betroffen wären dann die Schichten direkt über dem Salzstock. Ausgehend von den rezenten Deckschichten wären die Auswirkungen solcher Prozesse jedoch gering, da auch die umgebenden Schichten ähnliche Eigenschaften aufweisen, so dass z. B. Änderungen der hydraulischen Verhältnisse nur lokal begrenzt wären. Außerdem ist damit zu rechnen, dass zukünftige Kaltzeiten eine erneute Umgestaltung des Deckgebirges bewirken, bei der diese Strukturen, wie bereits in der Vergangenheit, ausgeräumt würden. Daher ist zwar mit einer Neuanlage von Störungen im Deckgebirge zu rechnen, ihr Einfluss auf die weitere Entwicklung des Standortes wäre aber gering.

4.3.11 Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge

In der gesamten Geosphäre kommen unterschiedliche Mikroorganismen vor, die dort z. T. auch in chemische Prozesse von Stoffkreisläufen eingreifen. Beispiele für Stoffkreisläufe, in denen Mikroorganismen eingebunden sind, sind der Kohlenstoff-, der Stickstoff-, der Phosphor- und der Schwefel-Kreislauf. Im Rahmen dieser Einbindung kann es zu Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine, von gesteinsbildenden Prozessen (vgl. Kapitel 4.3.5) und des Grundwasserchemismus (Kapitel 3.4.2) kommen.

Die von Mikroorganismen (nachfolgend hauptsächlich Bakterien) besiedelten Habitate zeigen bei den Lebensraumparametern große Bandbreiten. Sie decken ein breites Temperaturspektrum ab und können in aerober bis anaerober Umgebung leben. Hohe Salz- oder andere Mineralkonzentrationen und längere Trockenheit schließen das Überleben von Mikroorganismen nicht aus. Das Temperaturmaximum bis zu dem die meisten Bakterien dauerhaft lebensfähig sind, liegt bei ca. 60 °C. Über dieser Temperatur denaturieren Proteine und der Organismus wird als Folge davon zerstört. Eine Besiedelung mit Bakterien ist aber auch unter extremen Bedingungen, wie in der Antarktis mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt des Wassers, oder im hochtemperierten und -mineralisierten Umfeld von hydrothermalen Exhalationen in Tiefseebereichen (black smoker) möglich. Daraus ergibt sich eine Temperaturspanne von -15 °C bis 115 °C, in der mikrobielle Prozesse stattfinden können. In der Geosphäre reicht der für Bakterien optimale Temperaturbereich (bis 60 °C) bei einem ungestörten geothermischen Gradienten von 3 °C pro 100 m bis in eine Tiefe von 2.000 m. Die Beschreibungen in diesem Kapitel beschäftigen sich hauptsächlich mit den Prozessen im Deck-

und Nebengebirge, da über die dortigen Aspekte hinaus bei Untersuchungen für ein Endlager im Salzgestein in New Mexiko auch Bakterien im Salzgestein gefunden wurden, werden die Inhalte hier ebenfalls aufgenommen. Einige Mikroorganismen zeigen auch Anpassungen an hohe Salzkonzentrationen. Halotolerante Organismen sind darauf eingestellt, eine kurzzeitige Erhöhung von Salzkonzentrationen in ihrem Habitat zu überleben und halophile Formen sind sogar dauerhaft darauf angewiesen. Bei den Untersuchungen in New Mexiko (/VRE 00/) wurden in Salzkristallen mit Lösungseinschlüssen lebensfähige Bakterien gefunden, deren Alter dem der Salzformation entspricht und ca. 250 Millionen Jahre beträgt. In europäischen Salzformationen wurden solche Lebensformen z. B. in /BIB 83/ in der Lagerstätte Neuhof bei Fulda nachgewiesen und beschrieben.

Durch bakterielle Abbauprozesse kann die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine im Deck- und Nebengebirge beeinflusst werden. Diese Änderungen treten z. B. in Form von Konkretionsbildungen oder Schwefelbildungen im Hutgestein auf. Diese Schwefelbildungen wurden im Hutgestein des Salzstocks Weenzen anhand isotope-geochemischer Untersuchungen bereits in /SCA 65/ als bakterielle Umwandlungsprodukte beschrieben. Auch gesteinsbildende Prozesse, wie z. B. die Bildung von Eisenerkonkretionen vom Typ Minette, werden von Bakterien hervorgerufen. Auch bei der Bildung von Wattenschlick im Gezeitenbereich von Flachmeeren spielen sie eine wichtige Rolle.

Im Deckgebirge am Standort Gorleben wurden im Hutgestein bislang keine bakteriell gebildeten Schwefelverbindungen nachgewiesen. Aufgrund des natürlichen Temperaturfeldes, in dem das Deck- und Nebengebirge liegt, ist eine Besiedelung der Schichten mit Bakterien sehr wahrscheinlich. In Bezug auf die Sedimente und Festgesteine können die dadurch verursachten Umwandlungen jedoch als unbedeutend eingeschätzt werden.

Zukünftige Entwicklung

Für die zukünftige Entwicklung des Standortes Gorleben kann prognostiziert werden, dass zu jeder Zeit mikrobielles Leben möglich sein wird. In Kaltzeiten werden allerdings an niedrige Temperaturen angepasste kryophile Formen überwiegen. Wie in der Vergangenheit ist jedoch nicht damit zu rechnen, dass die durch diese Bakterien verursachten Umwandlungsprozesse die Gesteinszusammensetzung maßgeblich verändern. Dies gilt auch für zukünftig zur Ablagerung kommende Sedimente am Standort.

Einen größeren Einfluss auf den Chemismus haben mikrobielle Prozesse im Grundwasser, die in Kapitel 4.4.1 beschrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass das Grundwasser in Kontakt mit den Deck- und Nebengebirgsschichten steht und auch darüber Austauschvorgänge stattfinden. Ein sekundärer Einfluss mikrobieller Prozesse auf die Sedimente ist über diesen Weg gegeben.

4.3.12 Ungewissheiten bei der Prognose der mikrobiellen Prozesse im Deck- und Nebengebirge

Insgesamt konnten keine maßgeblichen Auswirkungen des Prozesses auf das Deck- und Nebengebirge am Standort Gorleben festgestellt werden, so dass auch die damit verbundenen Ungewissheiten vernachlässigbar sind. Bakterienbesiedelungen von Salzgesteinen sind derzeit noch Gegenstand der Forschung und es existiert noch keine umfassende Datengrundlage. Sollten in diesem Zusammenhang Veränderungen im Salinar festgestellt werden, sind die Ergebnisse bei der weiteren Standorterkundung zu berücksichtigen.

4.4 Zukünftige Entwicklungen des hydrogeologischen Systems am Standort Gorleben

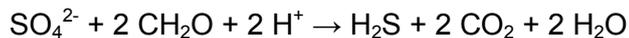
4.4.1 Einflüsse mikrobieller Prozesse auf die Hydrogeologie

Im Grundwasser laufen, wie im Deck- und Nebengebirge, mikrobielle Prozesse ab, die Teil von Stoffkreisläufen sind. Insbesondere der Stickstoff- und Schwefelkreislauf sind darin eingebunden. Sowohl die bakteriell bedingte Nitrat- als auch die Sulfatreduktion laufen im anaeroben Bereich ab.

Bei der Nitratreduktion (Denitrifizierung), als Teilprozess des Stickstoffkreislaufs, wird Nitrat (NO_3^-) von Bakterien letztlich zu elementarem Stickstoff abgebaut, der dann in die Atmosphäre freigesetzt wird (/MÜL 99/). In Grundwasserleitern mit einem entsprechenden Stoffeintrag, der oft durch landwirtschaftliche Düngung verstärkt wird, findet sich eine Tiefenstufung, bei der dieser Prozess mit dem Erreichen von anaeroben Verhältnissen in der entsprechenden Tiefe im Grundwasser abläuft. Während beim Prozess der Nitratreduktion ein wesentlicher Anteil auf anthropogenem Eintrag beruht, wird die Sulfatreduktion im Schwefelkreislauf stärker vom geologischen Hintergrund

beeinflusst. Unter Beteiligung von sulfatreduzierenden Bakterien erfolgt unter anaeroben Bedingungen ein Sulfatabbau (SO_4^{2-}) zu Schwefelwasserstoff (H_2S) als Endprodukt (/MÜL 99/).

Am Standort Gorleben ist die mikrobielle Sulfatreduktion Hauptbestandteil der biologischen Prozesse mit Einfluss auf die hydrochemischen Verhältnisse im Grundwasser (Kapitel 3.4.2). In der Zusammenstellung von /KLI 07/ werden die Sulfat- und Hydrogencarbonatgehalte der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt (TDS) betrachtet. Besonders niedrige Sulfatgehalte, die genetisch nicht auf eine Mischungsverdünnung, sondern auf mikrobiellen Abbau zurückzuführen sind, wurden bei Wässern mit TDS-Gehalten von 0,1 bis 10 g/l gemessen. Der mikrobielle Sulfatabbau, bei dem organischer Kohlenstoff oxidiert wird, läuft in diesen Wässern unter anaeroben Verhältnissen entsprechend der nachfolgenden Gleichung ab.



In karbonathaltigen Grundwasserleitern wird das nach der obigen Gleichung freigesetzte CO_2 unter Beteiligung von Calcit zu Hydrogencarbonat umgewandelt, was in den Grundwässern am Standort Gorleben im TDS-Bereich zwischen 0,5 bis 10 g/l nachweisbar ist. Ein Ergebnis der in /KLI 07/ beschriebenen Grundwasseranalysen ist, dass die mikrobielle Sulfatreduktion am Standort bis zu einem TDS-Gehalt der Wässer von ca. 200 g/l abläuft. Darüber hinaus wird auch eine Abhängigkeit der Sulfatgehalte von der Tiefe beschrieben. In den tertiären und quartären Sedimenten des Deckgebirges ist organisches Material, dass für mikrobielle Prozesse nötig ist, weitverbreitet in Form von Braunkohlepartikeln enthalten, so dass sich für diese anaeroben Prozesse eine tiefenbezogene Abhängigkeit vom Sauerstoffangebot ergibt. Ein deutlicher Rückgang der Sulfatgehalte, der mit dem Beginn der mikrobiellen Sulfatreduktion gleichzusetzen ist, wird in einer Tiefe von 20 bis 30 m u. GOK beobachtet.

Zukünftige Entwicklung

Solange die Rahmenbedingungen am Standort optimale Lebensbereiche für sulfatreduzierende Bakterien zulassen, werden diese Prozesse in den nächsten eine Million Jahren in gleicher Weise wie bisher ablaufen. Änderungen in der Zusammensetzung des Deckgebirges z. B. durch Sedimentation, Erosion oder klimatische Einflüsse, wie Permafrost, können jedoch dazu führen, dass der optimale Lebensraum räumlich verlagert wird oder dass er zeitweise nicht existiert. Doch selbst für den letzteren Fall kann

davon ausgegangen werden, dass die Mikroorganismen die Lebensräume wieder besiedeln, sobald sich erneut günstige Bedingungen einstellen.

4.4.2 Ungewissheiten bei der Prognose der mikrobiellen Einflüsse auf die Hydrogeologie

Die stärksten Einflüsse auf den Chemismus der Grundwässer hat am Standort Gorleben der mikrobielle Sulfatabbau. Dieser zeigt Abhängigkeiten von den Gesamtsalzgehalten und dem Sauerstoffgehalt des Grundwassers. Ungewissheiten bei der zukünftigen Entwicklung bestehen im Hinblick auf die räumliche Verteilung des für diese Bakterien optimalen Lebensraumes. Zu welchem Zeitpunkt eine Verlagerung oder eine Aufhebung des Lebensraumes eintritt, wie lange sie jeweils andauert und in welcher Intensität sie abläuft ist nicht prognostizierbar. Es ist jedoch nicht damit zu rechnen, dass diese Prozesse in Zukunft völlig zum Erliegen kommen, da selbst nach einer zwischenzeitlichen Zerstörung der Lebensbedingungen eine Neubesiedelung mit entsprechenden Mikroorganismen einsetzt, sobald sich wieder günstige Bedingungen dafür eingestellt haben.

4.5 Zukünftige salinarspezifische Entwicklungen des Salzstocks Gorleben

4.5.1 Diapirismus und Halokinese

Unter Diapirismus wird das Aufdringen von Salzgesteinen aus tiefen Bereichen über das ehemalige Hangendniveau hinaus verstanden. Voraussetzungen für diesen Vorgang sind eine ausreichende Mächtigkeit von primär abgelagertem, mobilisierbarem Salz, ein ausreichender Überlagerungsdruck, der von jüngeren Gesteinen mit höherer Dichte erzeugt wird und das Vorhandensein von Schwächezonen im Deckgebirge. In vielen Fällen wurden auch Störungen im präsalinaren Sockel nachgewiesen, deren Bewegungen den Salzaufstieg auslösten. Die Abgrenzung zur Halokinese nach /TRU 57/ besteht darin, dass es sich dabei um autonome ausschließlich schwerkraftbedingte Salzbewegungen handelt, durch die z. B. Salzkissen ausgebildet werden. Derartige Bewegungen können bei einer Überlagerung mit klastischen Sedimenten ab einer Mächtigkeit von wenigen hundert Metern einsetzen und bei karbonatischen oder sulfatischen schon ab ca. 100 m.

Der Begriff Halokinese wird häufig auch als Sammelbegriff für alle Formen des Salzaufstiegs verwendet, in diesem Fall ist der Diapirismus darüber abgedeckt. Am Standort Gorleben ist mit dem Durchbrechen des Deckgebirges in der Kreide das Diapirstadium erreicht worden. Ab dem Tertiär fand eine Abschwächung des Salzaufstiegs statt, wodurch sich der Salzstock in der sogenannten Nachschubphase befindet (/KÖT 07/ (Tab. 15 und 16). Eine Rekonstruktion der Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben wurde in (/ZIR 04b/) anhand der Schichtabfolge des Deck- und Nebengebirges vorgenommen. Demnach betrug die Ausgangsmächtigkeit der Salzsichten im Untersuchungsgebiet ungefähr 1.400 m, wobei zur Ausbildung der Randsenken allerdings eine Mindestmächtigkeit von 1.150 m vorgelegen haben muss. Nach (/KÖT 07/ (S. 169ff) sind im Einzugsgebiet 64 % des primär vorhandenen Zechsteins in den Salzstock eingewandert, so dass im unmittelbaren Umfeld des Salzstocks nur noch Restmächtigkeiten des Zechstein von 100 – 500 m verblieben. Es ist davon auszugehen, dass diese Restmächtigkeit aus unterschiedlichen salinaren Schichten aufgebaut ist, die sich auch in ihren Kriechfähigkeiten unterscheiden. Der Anteil von schwer kriechfähigen Schichten bei den verbleibenden 36 % des Zechsteins ist aufgrund des bereits durchlaufenen Diapirismus des Salzstocks Gorleben als hoch einzuschätzen. Daraus folgt, dass bei einem weiterhin ablaufenden Diapirismus nur noch ein kleiner Teil des Restvolumens in den Salzstock einwandern kann. Ausführliche Angaben z. B. zu den bewegten Volumen und zur Randsenkenanalyse sind vor allem in /ZIR 91a/ enthalten.

Für den Ablauf des Diapirismus wurden im Hauptsalz (z2HS) in einer Tiefe von rund 900 m Fließgeschwindigkeiten von max. 0,34 mm/Jahr während der Oberkreide und bis 0,07 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär abgeschätzt. Im Bereich des Salzspiegels kamen dadurch Hebungsraten von 0,08 mm/Jahr in der Oberkreide und ca. 0,02 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär zustande. Dies zeigt, dass der Diapirismus seit einem Maximum in der Oberkreide bis ins Quartär hinein abgeschwächt wurde. Aufgrund der unterschiedlichen Kriechfähigkeiten der verschiedenen lithologischen Einheiten und deren Kompetenzunterschieden, kam es im Zuge des Diapirismus zur Ausbildung von z. T. komplexen salzstockinternen Fließfalten. Auch die Entstehung sowie das Verschließen von Klüften im Salinar (s. a. Kapitel 3.5.2) kann auf diesen Prozess zurückgeführt werden.

Zukünftige Entwicklung

Für die nächsten eine Million Jahre kann am Standort Gorleben davon ausgegangen werden, dass sich der Abschwächungstrend des Diapirismus fortsetzt, da in dem tektonisch ruhigen Bereich nicht mit einem Aufbau hoher kompressiver Spannungen im Untergrund zu rechnen ist. Ebenso ist nicht damit zu rechnen, dass in diesem Zeitraum zusätzliche Sedimentmächtigkeiten von mehreren 100 Metern zur Ablagerung kommen, die über die Erhöhung des Auflastdrucks zu deutlich gesteigerten Aufstiegsraten führen würden. Auch der geringe Anteil gut kriechfähiger Schichten in den Restmächtigkeiten der Randsenken spricht für eine Abnahme des Diapirismus. Bei Zugrundelegung der Aufstiegsrate des Salzspiegels für den Zeitraum Miozän bis Quartär ergibt sich in einer Million Jahre dessen Hebung um einen Betrag von 20 m. Dieser Betrag stellt jedoch keinen Absolutwert dar, da sowohl die zu erwartende Verlangsamung als auch die zur gleichen Zeit gegenläufigen Prozesse wie die Subrosion (Kapitel 4.5.3) oder Erosion (Kapitel 4.3.3) auf den Salzstock einwirken. Darüber hinaus kann die Bewegungsrate der Hauptsalzgruppe in größeren Tiefen (ca. 800 – 900 m) des Zentralsattels, wie in der Vergangenheit, höhere Werte aufweisen, die sich jedoch nicht vollständig auf den Salzspiegel übertragen. Ausgehend von der für die Vergangenheit (Miozän bis Quartär) abgeschätzten Rate von 0,07 mm/Jahr wäre dort eine Salzbewegung von 70 m in einer Million Jahre möglich. Dadurch wäre auch die Neuanlage oder die Fortführung von Verfaltungen im Salinar gegeben.

Die angegebenen Aufstiegs- und Fließraten geben die Summe für den genannten Zeitabschnitt von ca. 23 Millionen Jahren wieder, daher sind kurzfristig wirksame geringfügige Schwankungen dieser Werte in einer Million Jahre möglich. Als Auslöser für eine Erhöhung dieser Rate ist z. B. eine lang andauernde Kaltzeit mit einer mächtigen Eisüberdeckung des Standortes nicht völlig auszuschließen. Dabei würde die zusätzliche Eisauflast vor allem bei Randlage wirksam werden und die Spannungsverhältnisse im Untergrund ändern.

Insgesamt ist ein solcher Prozess im Umfeld des Standortes aufgrund der großen Entfernung zu einem potentiellen skandinavischen Vereisungszentrum mit hohen Eismächtigkeiten und der beobachteten Klimaentwicklungen, zeitlich auf den Bereich von wenigen 10.000 Jahren begrenzt. Die kurze Dauer dieses Effekts und die zukünftig am Standort möglichen Eismächtigkeiten, die 1000 m nicht deutlich überschreiten werden (vgl. Kapitel 4.2.7), würden im Ergebnis, wenn überhaupt, nicht zu einer länger anhaltenden Steigerung des Diapirismus führen. Insbesondere bei einer Randlage wären die

Eismächtigkeiten am Standort so gering, dass dadurch in Kombination mit den zuvor diskutierten geologischen Randbedingungen keine Einwirkungen auf den Diapirismus zu erwarten sind.

4.5.2 Ungewissheiten bei der Prognose des Diapirismus

Eine Ungewissheit bei der Prognose des Diapirismus besteht im Hinblick auf die Entwicklung der Aufstiegsrate. Für die Vergangenheit wurde festgestellt, dass der Diapirismus einen Trend zur Abschwächung zeigt. Davon ausgehend, dass sich dieser Trend fortsetzt, wären die zuvor angebenen aus der Vergangenheit extrapolierten Raten zu hoch angesetzt. Ein Grund für diese Annahme ist, dass bereits ein Großteil des primär vorhandenen Zechsteins in den Salzstock eingewandert ist. Im Umfeld des Salzstockes nimmt das in Zukunft zur Verfügung stehende Salzvolumen daher weiter ab. Zur Abpressung des Restvolumens wäre ein immer höherer Auflastdruck nötig, der innerhalb einer Million Jahre nicht zu erwarten ist. Auch eine gesteigerte Salzaufstiegsrate durch eine Zunahme der Kompression und damit verbundener Einengung des horizontalen Salzstockquerschnitts im Umfeld des Salzstocks ist aufgrund der Lage in einer tektonisch ruhigen Region nicht zu erwarten. Es ist allerdings auch nicht vorhersehbar, ob oder wann es zu einem deutlichen Rückgang der ermittelten Aufstiegsraten kommt. Ebenso ist nicht exakt prognostizierbar, ob der Diapirismus innerhalb der nächsten eine Million Jahre vollständig zum Erliegen kommt.

4.5.3 Subrosion

Die durch den Kontakt mit Grundwässern hervorgerufene Ablaugung von wasserlöslichen Evaporiten wird als Subrosion bezeichnet. Abhängig ist dieser Prozess von der Temperatur, der Verfügbarkeit von Wasser und löslichem Gestein, dem Typ des Reaktionssystems (offener Durchfluss oder geschlossenes System), der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins und der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers, das mit diesem in Kontakt tritt. Durch die Subrosion erfolgt an der Salzstockoberfläche eine Reduzierung des Salinars, die zu einer Verringerung der Gesamtmächtigkeit eines Salzstocks führen kann.

Läuft an der Salzstockoberfläche eine Subrosion ab, so bleiben als Folge des Ablaugungsprozesses die schwerlöslichen Komponenten des Salzgesteins zurück. Werden diese angereichert, baut sich das Hutgestein auf. Die Oberfläche des Salzgesteins – im

Fall eines ausgebildeten Hutgesteins an dessen Basis – wird als Salzspiegel bezeichnet. Da ein Salzstock meist aus unterschiedlichen Salzgesteinen mit jeweils spezifischen Löslichkeitseigenschaften aufgebaut ist, die am Salzspiegel austreten können, läuft auch die Subrosion nicht gleichmäßig ab. Daraus ergibt sich das durch Höhen und Senken gekennzeichnete Relief des Salzspiegels (s. a. Abb. 4.18).

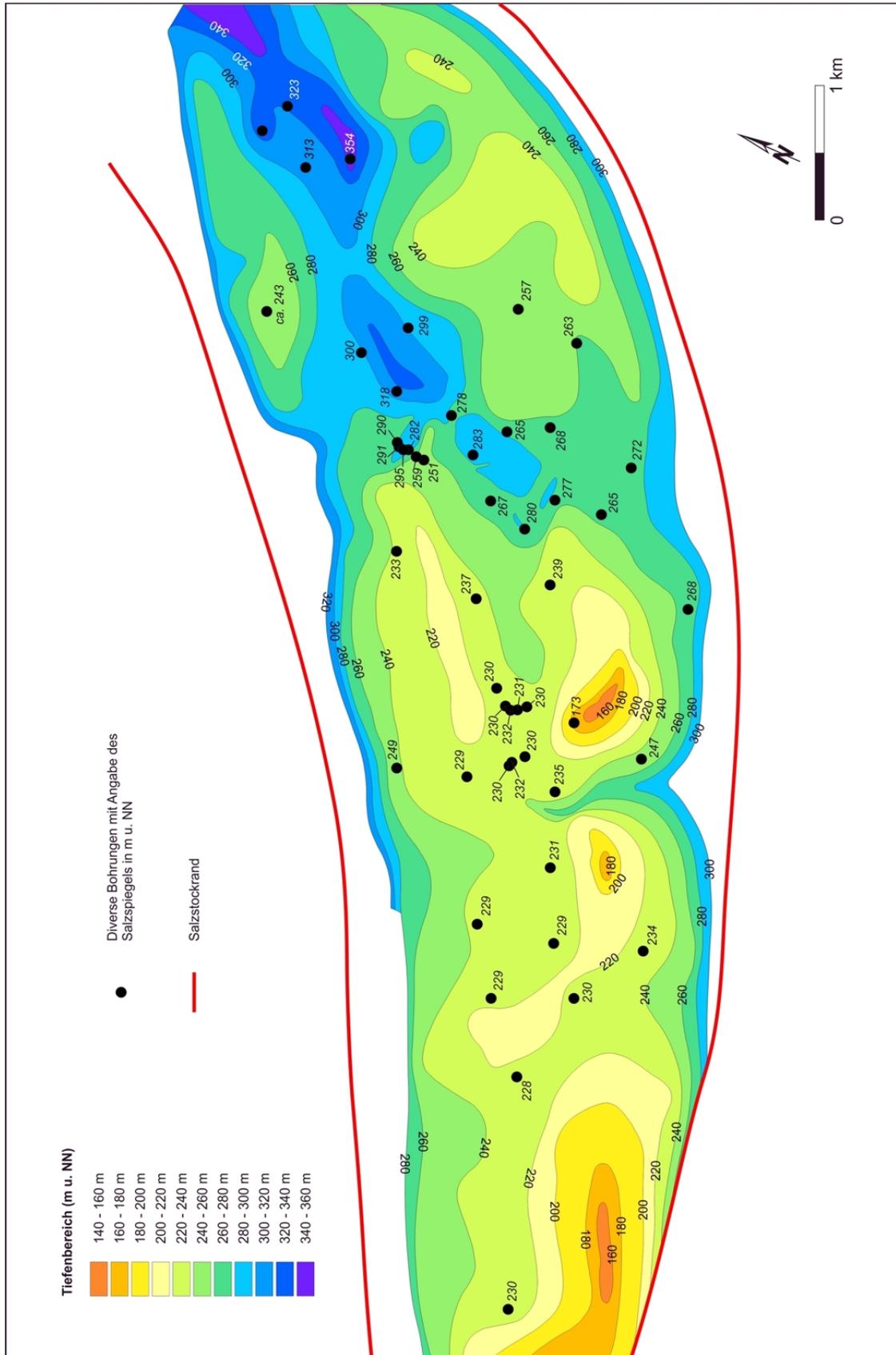


Abb. 4.18 Tiefenlinienplan des Salzspiegels am Standort Gorleben (geändert nach /BOR 08/)

Insbesondere in den durch schneller ablaufende Subrosion an leichtlöslichen Schichten entstandenen Senken können sich aufgrund der höheren Dichte hochsalinare Wässer sammeln, wodurch die Subrosion dann verlangsamt wird. Stagnieren diese Lösungen für längere Zeit in den Senken, kann es dort auch zur Ausfällung von Gips kommen. Neben den allgemeinen Voraussetzungen, die eine Subrosion ermöglichen, wirken auch mehrere Faktoren auf die Geschwindigkeit ein, mit der eine Subrosion abläuft. Diese sind die Teufenlage des Salzstocks, dessen Aufstiegsrate, der interne Bau des Salzstocks sowie die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge bzw. am Salzspiegel. In Norddeutschland wurden Subrosionsvorgänge im Mittel bis in Tiefen von ungefähr 400 m u. NN nachgewiesen. Nach /KEL 90/ müssen ab einer Tiefe von 180 m besondere begünstigende Randbedingungen für den Ablauf der Subrosion vorliegen. Ab einer Tiefe von 420 m wurden an norddeutschen Salzstöcken keine Subrosionserscheinungen festgestellt.

Für die Ermittlung der aus allen wirkenden Prozessen resultierenden Subrosionsrate wurden von verschiedenen Bearbeitern unterschiedliche Methoden angewendet, die z. B. in /BOR 08/ und /KÖT 07/ erläutert werden. Durch eine schnell ablaufende Subrosion kann es durch rasche Auflösung von noch vorhandenen leichtlöslichen Salzen zur Entstehung von Instabilitäten im Hutgestein kommen. Zusätzlich kann auch das Salinar am Salzspiegel schnell gelöst werden, ohne dass sich ein stabiles Hutgestein ausbildet. In diesem Fall kann es zu einem Einbrechen der überlagernden Schichten und damit verbundenen Differenzialbewegungen kommen, die bis zur Geländeoberfläche reichende Subrosionssenken und Erdfälle schaffen.

Am Standort Gorleben lief die Subrosion in der Vergangenheit abhängig von den Randbedingungen unterschiedlich schnell ab. In der nachfolgenden Tab. 4.2 sind die von verschiedenen Autoren ermittelten Subrosionsraten zusammengestellt.

Tab. 4.2 Zusammenstellung der für den Salzstock Gorleben ermittelten Subrosionsraten

Stratigraphie	Fazies	Subrosionsrate [mm/a]	Angenommene Dauer	Kommentar
Eem-Warmzeit bis rezent		0,01 – 0,05 /BOR 08/ ¹	128.000 Jahre	in /KÖT 07/, nicht exakt nachweisbar, da sehr gering
Elster-Kaltzeit bis rezent		0,1 – 0,2 /BOR 08/ (S. 71)		in /KÖT 07/, abgeleitet aus Hutgesteinsmächtigkeit
		0,2 – 0,4 (ohne Subrosion in jüngster Weichsel-Kaltzeit)		in /BOR 08/, (S. 71)
Eem-Warmzeit		nicht nachweisbar		über Salzstock nicht erbohrt
Saale-Kaltzeit	glaziär	0,22 – max. 0,43	ca. 110.000 Jahre	in /KÖT 07/, dabei gingen korrigierte Bohrungsbefunde ein
		0,3 - 0,5 /APP 98/	ca. 100.000 Jahre	in /BOR 08/, (S. 74)
		1,9 /DUP 83/		in /KÖT 07/, nur Drenthe Stadium
Holstein-Warmzeit	limnisch-fluviatil, brackisch-marine	nicht nachgewiesen		
Elster-Kaltzeit	glaziär	nicht nachweisbar		Subrosion sehr hoch (quartäres Maximum)
Menap-Kaltzeit		0,2		in /KÖT 07/
Bavel-Komplex		0,06		in /KÖT 07/

¹ Im Bericht /KÖT 07/ wird /BOR 08/ mit der Jahreszahl 2007 zitiert. In diesem Bericht wird durchgängig die endgültige Jahreszahl 2008 verwendet.

Stratigraphie	Fazies	Subsionsrate [mm/a]	Angenommene Dauer	Kommentar
Menap-Kaltzeit bis Ende Cromer-Komplex	fluviatil, limnisch-fluviatil	0,1 – 0,13	ca. 700.000 Jahre	in /KÖT 07/
		0,2 /MÜL 86/		in /KÖT 07/
		0,4 – 0,5 /DUP 83/		in /KÖT 07/, dort als zu hoch bewertet
Tertiär gesamt		0,005 – 0,015		in /KÖT 07/

Nach /KÖT 07/ erfolgte die stärkste Subrosion während des Diapirstadiums (Ende Malm bis Oberkreide), als der Salzstock die Geländeoberfläche erreichte. Mit fortschreitender Sedimentation und der damit verbundenen Erhöhung der Deckgebirgsmächtigkeit im Tertiär nahm die Subsionsrate dann deutlich ab. Für den Abschnitt der Elster-Kaltzeit ist sie nicht nachweisbar, da sie von der stärker wirkenden glaziären Erosion überlagert wurde. In dieser Zeit fand eine Tiefenerosion mit der Bildung der Gorlebener Rinne statt, bei der das Hutgestein und lokal begrenzt sogar das Salzgestein freigelegt wurden. Daher wird angenommen, dass die Subrosion im Vorfeld der Erosion entsprechend hoch war und vermutlich das quartäre Maximum erreichte. Nach /BOR 08/ (S. 73 f) sind unterhalb der Rinne nur äußerst geringe Subsionsraten feststellbar. Demnach haben die hohen Subsionsraten in dieser Zeit flächenhaft gewirkt, ohne dass es durch die Rinnenbildung zu einer lokalen Erhöhung kam.

Am Standort Gorleben konnte nachgewiesen werden, dass die Subrosion abhängig von der Löslichkeit der am Salzspiegel austreichenden Salzgesteine unterschiedlich schnell ablief. Dafür spricht auch das Relief des Salzspiegels (vgl. Abb. 4.18), das mit Schwankungen zwischen ungefähr 140 bis 360 m u. NN Höhen und Tiefen aufweist.

Bei der Erkundung des Salzspiegels wurden in mehreren Bohrungen, die das Kaliflöz durchteuft haben, Hinweise auf ausgeprägtere Eintiefungen durch Subrosion gefunden. In den Bohrungen GoHy 1302 bis 1305 wurden nach Mingerzahn 1987 (in /BOR 08/, S. 41) kalium- und magnesiumhaltige Minerale des Kaliflözes bis in Tiefen zwischen ungefähr 90 bis 130 m unterhalb des Salzspiegels vollständig vertaubt. Darüber hinaus wurden in den Bohrungen GoHy 1304 und 1305 Einwirkungen von eingedrungenem Grundwasser bis in Tiefen von 140 bis 170 m unter dem Salzspiegel nachgewiesen. Diese Einwirkungen hatten jedoch keine vollständige Ablaugung zur Folge. Die genannten Bohrungsbefunde geben nach bisherigem Stand der Erkundung im Jahr 2000

die tiefsten Einwirkungen der Subrosion im Bereich der Kaliflöze wieder. In /BOR 08/ (S. 40, Tab. 2) sind weitere Werte von angetroffenen Subrosionsauswirkungen zusammengestellt. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Tiefenwirkung der Subrosion stark schwankt und dass auch in unmittelbarer Nähe zu den großen Tiefenwirkungen geringere im Bereich von z. B. 20 bis 30 m nachgewiesen wurden. Nach /BOR 08/ (S. 80) treten die tiefen Einwirkungen vor allem in Bereichen auf, in denen das Kaliflöz Staßfurt in überkippter Lagerung am Salzspiegel ausstreicht. In den von der tiefreichenden Subrosion betroffenen Bereichen kam es durch anschließende Halitaukristallisation allerdings zu einem erneuten Verschließen der abgelaugten Bereiche, so dass dieser Bereich im rezenten Salzspiegel keine Vertiefungen aufweist, die dem von der Subrosion erreichten Niveau entsprechen.

Neben den speziellen Voraussetzungen für eine tiefreichende Subrosion, die durch die Lagerungsverhältnisse des Kaliflözes Staßfurt gegeben sind, wird wie bei den elsterzeitlichen Subrosionsraten auch für diesen Prozess eine Überlagerung durch eine glaziäre Erosion angenommen. Ein Teil der Tiefenwirkung ist daher auf eine hydro-mechanische Abtragung zurückzuführen. Wie groß dieser Anteil ist, konnte anhand der Bohrungsbefunde bisher nicht nachgewiesen werden. Hätte dieser Bereich nicht an der Erosionsoberfläche gelegen, so dass nur die Subrosion gewirkt hätte, wäre diese Tiefenwirkung vermutlich nicht erreicht worden.

Zukünftige Entwicklung

Für die zukünftige Entwicklung der Subrosion am Standort Gorleben wird die in Kapitel 3.1.9 beschriebene Klimaentwicklung zugrunde gelegt. Demnach ist in Zukunft mit Kaltzeiten von der Intensität des Spektrums Elster- bis Weichsel-Kaltzeit mit dazwischen liegenden Warmzeiten zu rechnen. Diese Entwicklung spiegelt sich am ehesten im Zeitraum Elster bis rezent wider, für den von /BOR 08/ in /KÖT 07/ (S. 166) eine Subrosionsrate von 0,1 bis 0,2 mm pro Jahr angegeben wurde (Tab. 4.2). Hochgerechnet auf eine Million Jahre, und ohne überlagernde Prozesse, wie z. B. eine erneute Rinnenbildung, zu betrachten, wäre demnach eine Abtragung von 100 bis 200 m Salzmächtigkeit möglich.

Unter Berücksichtigung der tiefen Lage des rezenten Salzspiegels wird in /KÖT 07/ (S. 167) basierend auf den Berichten /KEL 01/² und /KEL 90/, in denen Daten von mehreren norddeutschen Salzstöcken zusammengetragen und statistisch ausgewertet wurden, für die Zukunft eine Subrosionsrate von 0,01 bis 0,05 mm pro Jahr abgeschätzt, bei der es in einer Million Jahre nur zu einer Abtragung von 10 bis 50 m Salzmächtigkeit käme. Da nicht damit gerechnet wird, dass es in der Zukunft zu einem verstärkten Diapirismus kommt (s. Kapitel 4.5.1), ist eine deutliche Erhöhung der Subrosionsraten durch diesen Prozess nicht zu erwarten.

Bei Zugrundelegung der Annahme, dass der Salzspiegel erst zu späten Zeiten innerhalb der einen Million Jahre in Tiefen liegt, in denen er nicht mehr durch die Subrosion erreicht wird, kann davon ausgegangen werden, dass in davor wirkenden Kaltzeiten auch wieder Subrosionsraten erreicht werden, die im Bereich von 0,1 bis 0,2 mm pro Jahr liegen. In diesem Fall ist ein Überschreiten der genannten 50 m für die Gesamtprognose möglich. Daher wird als Näherung für die zukünftige Entwicklung eine Abtragung zwischen 50 und 100 m angenommen, entsprechend einer Rate von 0,05 bis 0,1 mm pro Jahr, worin sowohl die kaltzeitlichen Einwirkungen als auch die Auswirkungen der Tiefenlage des Salzspiegels enthalten sind.

4.5.4 Ungewissheiten bei der Prognose der Subrosion

Die Subrosion ist in ihrem Ergebnis ein klimaabhängiger Prozess, in den für die zukünftige Abschätzung auch die Ungewissheit der klimatischen Entwicklung entsprechend eingeht. Vor allem die Ableitungen der Subrosionsraten sind methodisch mit Ungewissheiten behaftet. Wird die Subrosion anhand der Mächtigkeit und Höhendifferenz der Schichtgrenzen rekonstruiert besteht die Ungewissheit in der Datengrundlage. Die Informationen werden im Wesentlichen durch Bohrungen gewonnen, die die Schichtgrenzen und -mächtigkeiten nur punktuell wiedergeben. Insbesondere bei der Mächtigkeit der Schichten ist nicht immer zu erkennen, ob größere Abtragungen und Verstellungen stattgefunden haben, oder in welchem Umfang eine Kompaktion ablief. Hinzu kommt, dass die stratigraphische Einstufung der Schichten ebenfalls mit Ungewisshei-

² In /KÖT 07/ ist dort BORNEMANN et al. (2007) zitiert. Der korrekte Verweis auf /KEL 01/ stammt aus dem BGR-Bericht KÖTHE et al. (2003), der dem Jahrbuch als Vorlage diente.

ten behaftet ist. Aus einer geänderten Zuordnung der Schichten resultieren letztlich andere Mächtigkeiten und daraus abgeleitet auch andere Subrosionsraten.

Die Abschätzung der Subrosion anhand der Hutgesteinsmächtigkeit beinhaltet eine Ungewissheit in Bezug auf den tatsächlichen Ausgangsgehalt an schwerlöslichen Mineralen im Salzgestein bevor die Subrosion wirkte. Außerdem können auch dabei Kompaktionen die ursprüngliche allein auf der Subrosion beruhende Mächtigkeit geändert haben. Darüber hinaus konnte die Subrosion innerhalb des Zeitabschnitts der Elster-Kaltzeit anhand der Untersuchungsergebnisse und der starken Überlagerung durch die Erosion nicht rekonstruiert werden, so dass die Raten für das dort vermutete quartäre Maximum nicht bekannt sind. Daher kann auch für die Zukunft keine Abschätzung eines zeitlich begrenzt wirkenden Maximalwerts unter ähnlichen Bedingungen angegeben werden. Vergleichbare Maximalwerte können in Zukunft jedoch nur erreicht werden, wenn der Salzspiegel, wie zuvor beschrieben, noch in einem Höhenniveau liegt, in dem er gut von der Subrosion erreicht werden kann. Dies trifft nur auf die nächsten zu erwartenden Kaltzeiten zu, nicht auf spät eintretende. Und auch dann ist dieser Prozess entsprechend der Dauer von solchen Kaltzeiten auf wenige 10.000 Jahre begrenzt.

5 Erläuterung von wenig wahrscheinlichen oder auszuschließenden Entwicklungen des Standortes Gorleben

In diesem Kapitel werden kurz die Prozesse erläutert, die z. B. in ähnlichen Regionen wie dem Standort Gorleben ablaufen oder die geologisch allgemein von Bedeutung sind, im Standortgebiet aber nicht erwartet werden. Für den letzten Fall wird zusätzlich dargestellt, warum sie für den Standort Gorleben nicht relevant sind.

5.1 Überregionale Entwicklungen ohne nachweisbare Einwirkungen auf den Standort Gorleben

5.1.1 Hebung der Erdkruste

Die Hebung der Erdkruste ist ein Teilprozess, der wie die Senkung der Erdkruste (Kapitel 4.1.1) auch zu den weiträumig und langfristig ablaufenden Prozessen der Epirogenese zählt. Es handelt sich dabei jedoch um vertikale Aufwärtsbewegungen, bei denen analog zu den betrachteten Senkungen ebenfalls keine Bruchstrukturen entstehen.

Zukünftige Entwicklung

Für den Standort Gorleben wurde für die letzten 30 Millionen Jahre ein genereller Trend der Abwärtsbewegung von 0,01 mm/a nachgewiesen, der auch in der Zukunft weiter anhalten wird. Daher ist nicht damit zu rechnen, dass die Hebung der Erdkruste in den nächsten eine Million Jahren von Bedeutung sein wird. Außerdem treten die Auswirkungen der Epirogenese im Vergleich zu anderen auf das Deckgebirge einwirkenden Prozessen insgesamt in den Hintergrund, so dass dieser Prozess für die geologische Entwicklung dieses Bereichs unbedeutend ist.

5.1.2 Orogenese

Definiert ist die Orogenese in /MÜL 99/ als Gebirgsbildung, die gegensätzlich zur Epirogenese, infolge kurzfristiger und lokal begrenzter tektonischer Vorgänge abläuft. Sie führt zur Bildung eines Orogens, bei dem es sich um Falten- und Deckgebirge handelt, die häufig eine deutliche Gliederung in eine Innen- und Außenseite aufweisen. Auslöser dieser Gebirgsbildungen ist die plattentektonisch bedingte Kollision der Kontinen-

talplatten im Bereich der Subduktionszonen. In Mitteleuropa zeigte die kaledonische (Ordovizium – Unter Devon), die variszische (Mittel Devon – Perm) und die alpidische (Ober Trias – rezent) Orogenese Auswirkungen. In Norddeutschland sind Teile des kaledonischen Orogens im tieferen Untergrund nachweisbar und südlich davon gehören z. B. der Harz und das Rheinische Schiefergebirge zum variszischen Orogen. Die Bildung der Alpen gehört schließlich zur jüngsten und noch andauernden Orogenese, die durch die Kollision der europäischen und afrikanischen Krustenplatte ausgelöst wurde. Die aktivste Phase, mit der stärksten Hebung der Alpen im Miozän, dauerte von etwa 20 bis 5 Millionen Jahre vor heute. Aktuelle Hebungsraten fallen jedoch deutlich geringer aus. Aus den in Mitteleuropa abgelaufenen Orogenesen wird ersichtlich, dass es sich dabei insgesamt um einen langsam ablaufenden Prozess handelt, der sich über viele Millionen Jahre erstreckt.

Zukünftige Entwicklung

Der gesamte norddeutsche Bereich befindet sich rezent in einer tektonisch ruhigen Phase und liegt nicht am Rand einer Kontinentalplatte und somit auch nicht in der Nähe einer Subduktionszone. Daher ist eine Orogenese am Standort Gorleben in der nächsten eine Million Jahren nicht zu erwarten.

5.1.3 Überregionale Grabenzonenbildung

Die Grabenbildung (Taphrogenese) ist wie die Orogenese auf die Plattentektonik zurückzuführen. Während die Orogenese auf Kompression im Bereich von Subduktionszonen beruht, wirkt bei der Grabenbildung Extension, die durch aufsteigende und zirkulierende Magma im Erdmantel erzeugt wird. Dabei kommt es zu einer Aufwölbung des Erdmantels, die mit einer Verdünnung der unteren Erdkruste und einer spröden Deformation in der oberen Erdkruste einhergeht. Dieser Vorgang führt zum Einbruch von Gräben über den Mantelaufwölbungen. Erstreckt sich die Grabenbildung entlang auseinanderdriftender Plattengrenzen weiträumig, werden die dort gebildeten Gräben zusammenfassend auch als Grabenzone bezeichnet. Durch entsprechende Mantelzirkulationen, die mit einer Aufwölbung des Mantels einhergehen, werden Extensionsspannungen in der Kruste aufgebaut, durch die Grabensysteme auch neu angelegt werden können. Dabei kommt es zu einem relativen Absinken der zentralen Grabenteile bei gleichzeitiger Heraushebung der Randbereiche, wie in Abb. 5.1 schematisch dargestellt. Im marinen Bereich wird die Grabenbildung auch von Sedimentation mäch-

tiger grob- und feinklastischer Abtragungsprodukte, z. T. aber auch von Evaporitbildungen begleitet.

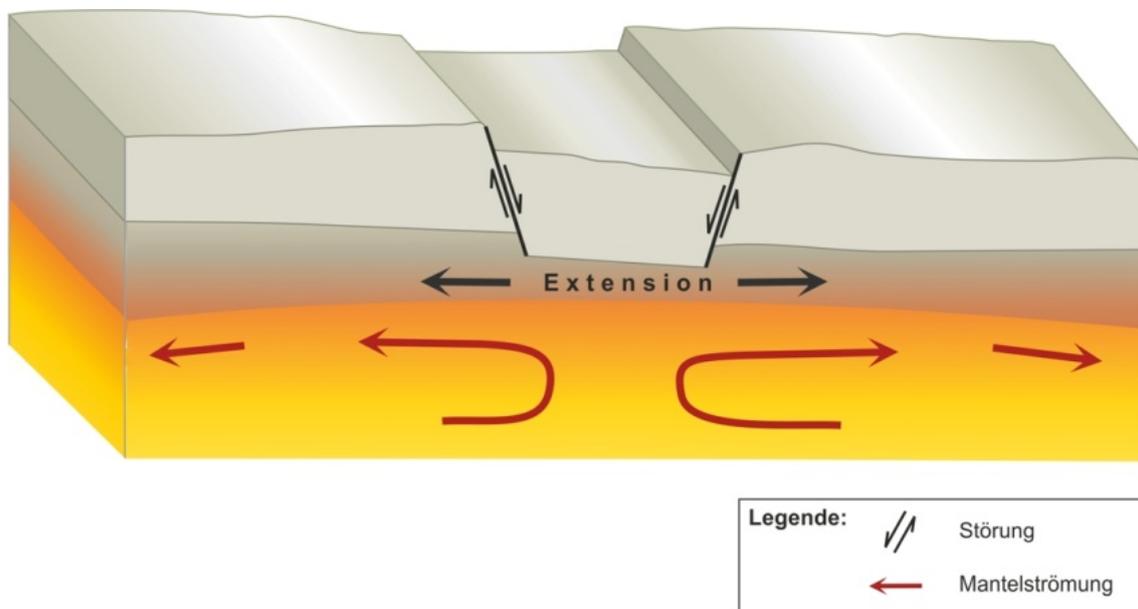


Abb. 5.1 Schema der Grabenbildung durch Konvektionsströmungen im Mantel

Halten diese Rahmenbedingungen im Mantel über längere Zeit an, kann es dabei auch zu einer Aufspaltung von Kontinentalplatten kommen. Im Zusammenhang mit tief reichenden Störungen, die bei der Grabenbildung angelegt werden, ist das Auslösen von Vulkanismus möglich. Im Bereich kontinentaler Gräben wird z. B. häufig basaltischer Vulkanismus beobachtet. Der Aufstieg dieser basaltischen Magmen erfolgt aus dem Erdmantel entlang von Schwächezonen und orientiert sich in der oberen Erdkruste an der dort herrschenden Hauptspannungsrichtung. Weitere Auswirkungen zeigen sich bei der Morphologie sowie bei den Fließrichtungen der Oberflächen- und Grundwässer.

In Deutschland sind Grabenstrukturen z. B. aus dem Rheintal, der Hessischen Senke und dem Leinetal bekannt. Diese Strukturen gehören zu einer Grabenzone, die vom Mittelmeer bis Norwegen reicht. Seismische Aktivitäten, die im Zusammenhang mit diesen Gräben stehen, sind fast ausschließlich aus dem Rheintalgraben und einem seitlichen Grabensystem, dem Egergraben bekannt. Die Einsenkung des oberen Rheintalgrabens begann vor ca. 45 Millionen Jahren im Mittel Eozän.

Zukünftige Entwicklung

Untersuchungen am Standort Gorleben lieferten keine Hinweise auf derartige Strukturen im tieferen Untergrund (/ZIR 04b/). Außerdem herrschen seit Ende Miozän Spannungszustände in Norddeutschland, die der Entstehung eines Grabensystems entgegenstehen (z. B. /ZAN 10/). Eine Grabenbildung wird daher am Standort innerhalb der nächsten eine Million Jahre nicht erwartet.

5.2 Regionale Entwicklungen ohne nachweisbare Einwirkungen auf den Standort Gorleben

5.2.1 Magmatismus

Magmatismus ist ein Sammelbegriff für alle Vorgänge und Bildungen, die im Zusammenhang mit aus dem Mantel oder tieferen Bereichen der Erdkruste aufsteigenden Magma (Gesteinsschmelze) stehen. Neben der flüssigen Komponente können auch Gase und Dämpfe aufsteigen. Außerdem ist mit dem Magmaaufstieg ein Wärmefluss verbunden, der das natürliche Temperaturfeld ändert und geothermische Prozesse in Gang setzen kann. Dazu gehören z. B. die wärmebedingte Änderung von Gesteinseigenschaften (Kontaktmetamorphose) und von Grundwasserfließrichtungen.

Unterschieden werden beim Magmatismus intrusive und extrusive Vorgänge, bei denen es sich um in der Tiefe erstarrte oder bis an die Oberfläche vorgedrungene Magmaaufstiege handelt. Intrusive Bildungen werden als Plutonite und die damit verbundenen Vorgänge als Plutonismus bezeichnet, extrusive als Vulkanite und Vulkanismus. Magmatismus wird entlang von Plattengrenzen z. B. bei der Orogenese oder der Grabenbildung beobachtet. Außerdem können auch tief reichende seismisch aktive Schwächezonen das Auftreten von Magmatismus begünstigen.

In der jüngeren geologischen Vergangenheit trat Vulkanismus in Deutschland im Tertiär im Zusammenhang mit der Grabenbildung (Kapitel 5.1.3) und der alpidischen Orogenese (Kapitel 5.1.2) auf. Letzte größere Ausbrüche sind noch aus dem Übergang zum Holozän in der Eifel bekannt (Laacher See vor ca. 13.000 und Ulmener Maar vor ca. 11.000 Jahren). Für Norddeutschland können eiszeitliche Auslöser für Magmatismus weitgehend ausgeschlossen werden, da durch die zu erwartende Eisauflast (s. a.

Kapitel 4.2.7) weder tiefgreifende Störungen noch erhebliche Krustenbewegungen entstehen, die zu tektonisch aktiven Schwächezonen führen.

Am Standort Gorleben liegt die Kristallin-Oberfläche, wie in /KÖT 07/ (S. 110) dargestellt, in einer Tiefe von ca. 12 km. In den Schichten, die seit dem Zechstein im Standortgebiet zur Ablagerung kamen sind keine Plutonite oder Vulkanite enthalten. Die nächstgelegenen jüngeren Vulkanit-Vorkommen sind aus Südniedersachsen und Hessen bekannt. In Niedersachsen wurde für den Basalt von Rolfsbüttel-Wendeburg ein Alter von 65 - 55 Millionen Jahren (Paleozän) ermittelt und die hessischen Basaltvorkommen (z. B. Vogelsberg, Röhn) wurden auf ein Alter von etwa 14 Millionen Jahren im Miozän datiert (/STO 87/). Auch für das aus seismischen Untersuchungen und Schwereanomalien (/HOF 96/ und /RAB 95/) abgeleitete herzynisch verlaufende, paläozoische Elbe-Lineament wurde im Umfeld des Standortes keine nachweisbare Beeinflussung jüngerer mesozoischer oder känozoischer Schichten festgestellt (/KÖT 07/), die Magmatismus nach sich ziehen könnten.

Zukünftige Entwicklung

Für die Zukunft von einer Million Jahre ist am Standort Gorleben aufgrund der Rahmenbedingungen nicht mit magmatischen Vorgängen und den damit verbundenen geothermischen Prozessen zu rechnen. Das gilt sowohl für die Bildung von Plutoniten und Vulkaniten, als auch für Gasaustritte oder Thermalquellen, die häufig an Spätphasen magmatischer Ereignisse gebunden sind. Lediglich in der Eifel und im Vogtland ist mit einer Reaktivierung vulkanischer Tätigkeit zu rechnen. Diese Gebiete liegen jedoch in einer Entfernung zum Standort, die eine direkte Beeinflussung ausschließt. Bei den tektonischen Bedingungen im Untergrund des Standortes ist nicht zu erwarten, dass eine aktive alpidische Orogenese in einer Million Jahre eine Störung neu anlegt, die den Aufstieg von Magma in Gorleben möglich macht.

5.2.2 Hydrothermale Aktivität

Unter hydrothermaler Aktivität werden durch hochtemperierte Lösungen im Umfeld von Magmakörpern ausgelöste Vorgänge verstanden. Handelt es sich dabei um wässrige Lösungen, kann nach /MÜL 99/ eine Maximaltemperatur von 374,1 °C (kritische Temperatur) und ein maximaler Druck von $2 \cdot 10^7$ Pa (kritischer Druck) erreicht werden. Bei den hydrothermalen Lösungen handelt es sich meist um Restlösungen aus der Schmelze nach erfolgter Kristallisation oder um im Nebengestein vorhandene Lösun-

gen, die durch den Wärmefluss im Umfeld des Magmakörpers erhitzt wurden. Verbleiben diese Lösungen im Untergrund, können sich im Zuge der Abkühlung z. B. hydrothermale Erzlagerstätten bilden, die oft in Form von Gängen in Klüften vorkommen. Dringt der Wärmefluss mit hohen Temperaturen bis dicht an die Oberfläche vor, treten sie auch in Form von heißen Quellen oder Geysiren zu Tage. Beispiele dafür finden sich vor allem auf Island und in Deutschland im Bereich der Eifel. Aufgrund des hohen Mineralgehalts dieser Wässer greifen sie verändernd sowohl in das geochemische als auch in das hydrochemische Milieu ein.

Zukünftige Entwicklung

Die wesentliche Voraussetzung für das Auftreten von hydrothermalen Lösungen ist ein aktiver Magmatismus, der am Standort Gorleben, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, nicht zu erwarten ist. Daher ist auch nicht mit dem Ablaufen von hydrothermalen Aktivitäten innerhalb der nächsten eine Million Jahre zu rechnen.

5.2.3 Gesteinsmetamorphose

Die Gesteinsmetamorphose ist nach /MUR 10/ ein temperatur- und druckabhängiger Umwandlungsprozess, bei dem Gesteine unter Beibehaltung des festen Zustands im Untergrund verändert werden. Abgegrenzt wird die Metamorphose von Verwitterungsvorgängen und von der völligen Aufschmelzung dadurch, dass das Gestein bei diesen Prozessen den festen Zustand nicht beibehält. Über den Temperatur- und Druckbereich erfolgt auch eine Abgrenzung zur Diagenese (Kapitel 4.3.7), die allerdings fließend ist. Ebenfalls anhand der Temperatur- und Druckbedingungen aber auch auf Basis des jeweiligen Prozessablaufs oder -auslösers werden in /MUR 10/ zahlreiche Arten der Metamorphose unterschieden.

Am Standort Gorleben treten im mesozoischen Deck- und Nebengebirge keine metamorph veränderten Gesteine auf. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Metamorphose seit der Ablagerung dieser Schichten nicht abgelaufen ist.

Zukünftige Entwicklung

In der Zukunft von einer Million Jahre werden sich keine Bedingungen einstellen, die eine Metamorphose auslösen können. Die Senkung der Erdkruste z. B. ist, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, nicht stark genug um eine entsprechende Druck- und Tempera-

turerhöhung zu bewirken. Auch der Ablauf einer Kontaktmetamorphose am Standort ist aufgrund des dort fehlenden Magmatismus (Kapitel 5.2.1) unwahrscheinlich. Ebenso ist nicht davon auszugehen, dass die Deckgebirgsmächtigkeit durch Sedimentation soweit erhöht wird, dass ein ausreichend hoher Druckanstieg in der Tiefe entsteht. Die Metamorphose wird daher in den nächsten eine Million Jahren am Standort Gorleben nicht ablaufen.

5.2.4 Meteoriteneinschlag

Neben den terrestrischen wirken sich auch extraterrestrische Einflüsse, wie ein Meteoriteneinschlag, auf die geologischen Verhältnisse aus. Meteoriten sind in /MUR 10/ definiert als kosmische Körper, die in den Anziehungsbereich der Erde gelangen und auf die Erdoberfläche aufschlagen. Unterschieden werden sie nach ihrer Zusammensetzung in Steinmeteorite, in Eisen-Meteorite und in Eisen-Stein-Meteorite. Darüber hinaus zählen zu den kosmischen Körpern auch Asteroiden (kleine Planeten mit Umlaufbahn um die Sonne) und Kometen (aus verschiedenen Gasen in fester Phase mit Staub- und Mineralanteilen). Da all diese Körper beim Auftreffen auf die Erde (Impakt) ähnliche Auswirkungen zeigen, wird nachfolgend nicht zwischen ihnen unterschieden, sondern nur von Meteoriten gesprochen.

Bei einem Impakt kommt es lokal zu einer extremen Druck- und Temperaturerhöhung, die zu einer Umwandlung der Gesteine bis hin zu deren Aufschmelzung führen kann. In /MUR 10/ wird dieser Vorgang auch als Stoßwellenmetamorphose bezeichnet. Dabei entstehen aus den Ausgangsgesteinen Brekzien mit glasiger Matrix oder reine Glasbildungen, die als Tektite oder allgemeiner als Impaktite bezeichnet werden. An der Oberfläche entstehen durch einen Meteoriteneinschlag konzentrische oder radiale Impaktkrater, die abhängig von der Größe des Meteoriten Durchmesser von mehreren Kilometern haben können. Meteorite mit einem Durchmesser von > 1 km verursachen Krater mit Durchmessern von >10 km und einigen hundert Metern Tiefe. Die Zerrüttung der Erdkruste geht dabei noch wesentlich tiefer (z. B. /KOE 96/; /KOE 05/). Vor ca. 65 Millionen Jahren schlug ein Meteorit auf der Erde im Bereich der mittelamerikanischen Halbinsel Yucatan ein, der einen Krater von 180 km Durchmesser erzeugte und nach /FRA 05/ eine Sprengkraft von ungefähr 10^8 Megatonnen TNT-Äquivalent besaß. Dieser Einschlag und die damit verbundenen kurz- und langfristigen Auswirkungen, z. B. auf das Klima, werden als Ursache für das Aussterben vieler Spezies an der Grenze zwischen Kreide und Tertiär gesehen. Zum Vergleich: das weltweite Atomwaffenarse-

nal beträgt etwas mehr als 10^4 Megatonnen TNT-Äquivalent (aus /FRA 05/). Ein Beispiel für einen Impaktkrater in Deutschland ist das Nördlinger Ries mit einer Ausdehnung von ca. 22×24 km und einer Kratertiefe, die rezent etwa 100 m beträgt. Zum Zeitpunkt des Impakts, hat der Meteorit das aus mesozoischen Sedimenten bestehende Deckgebirge jedoch bis in ungefähr 600 m Tiefe beeinflusst. Das Alter des Einschlags wird mit ungefähr 14,6 Millionen Jahren angegeben.

Nach /FRA 05/ treten Impakte mit einer tief reichenden Wirkung nur selten auf. Allgemein nimmt die Einschlagswahrscheinlichkeit mit zunehmender Größe der Meteorite ab, da diese deutlich seltener vorkommen als kleine. In /FRA 05/ wird das Auftreten von Meteoriten mit einer Einschlagskraft von ca. 10^2 Megatonnen TNT-Äquivalent auf der Erde etwa alle 1.000 Jahre erwartet. Der Einschlag eines mehrere Kilometer großen Meteoriten, wie er am Übergang der Kreide zum Tertiär stattfand, wird nur alle 100 Millionen Jahre erwartet. Sehr kleine Meteoriten (< kg) treffen hingegen täglich auf die Erdoberfläche, meist ohne dabei Auswirkungen zu zeigen.

Am Standort Gorleben gibt es keine Hinweise auf Impaktkrater oder den Einschlag von größeren Meteoriten. Der nächstgelegene Einschlag eines Meteoriten, bei dem ein Fragment mit einem Gewicht von 43 g gefunden wurde, wurde 1985 im Raum Braunschweig registriert (/MEY 86/). Tab. 5.1 zeigt eine Zusammenstellung von historisch belegten und vermuteten Meteoritenfällen, die im Meteoritical Bulletin der Meteoritical Society u. a. im Internet veröffentlicht werden. Ausgewählt wurden die Fälle, die in einem Umkreis von ca. 200 km um Gorleben aufgezeichnet wurden.

Tab. 5.1 Zusammenstellung von Meteoritenfällen im Umkreis von Gorleben

Ort	Jahr	Gewicht	Bundesland	Fallen beobachtet	Status
Umkreis bis ca. 100 km um Gorleben					
Salzwedel	1985	0,043 kg	Sachsen-Anhalt	Ja	offiziell
Erxleben	1812	2,25 kg	Sachsen-Anhalt	Ja	offiziell
Magdeburg	998		Sachsen-Anhalt	Ja	vermutet
Umkreis bis ca. 200 km um Gorleben					
Obernkirchen	1863	41 kg	Niedersachsen		offiziell
Benthullen	1951 o. 1948	17 kg	Niedersachsen		offiziell
Oldenburg (1930)	1930	16,57 kg	Niedersachsen	Ja	offiziell
Hainholz	1856	16,5 kg	Nordrhein-Westfalen		offiziell
Menow	1862	10,5 kg	Brandenburg	Ja	offiziell
Bremervörde	1855	7,25 kg	Niedersachsen	Ja	offiziell
Klein-Wenden	1843	3,25 kg	Thuringen	Ja	offiziell
Linum	1854	1,862 kg	Brandenburg	Ja	offiziell
Trebbin	1988	1,25 kg	Brandenburg	Ja	offiziell
Kiel	1962	0,738 kg	Schleswig-Holstein	Ja	offiziell
Nieder Finow	1950	0,287 kg	Brandenburg		offiziell
Peckelsheim	1953	0,118 kg	Nordrhein-Westfalen	Ja	offiziell
Wernigerode	1970	0,024 kg	Sachsen-Anhalt		offiziell
Barntrup	1886	0,017 kg	Nordrhein-Westfalen	Ja	offiziell
Stolzenau	1647		Niedersachsen	Ja	offiziell
Oldisleben	1135		Thüringen	Ja	vermutet
Quedlinburg	1249		Sachsen-Anhalt	Ja	vermutet
Oldenburg (1368)	1368		Niedersachsen	Ja	vermutet
Minden	1379		Nordrhein-Westfalen	Ja	vermutet
Naunhof	1540		Sachsen	Ja	vermutet
Torgau	1561	0,157 kg	Sachsen	Ja	vermutet
Nörten	1580		Niedersachsen	Ja	vermutet

Zukünftige Entwicklung

Ein direkter Impakt mit einer großen Sprengkraft am Standort Gorleben könnte das Deckgebirge und je nach Tiefenwirkung auch Teile des Salzstocks zerstören. Weiter entfernte Einschläge hätten am Standort Auswirkungen, wenn sie z. B. im Meer stattfänden und eine Flutwelle erzeugen. Diese könnte den Standort erreichen und zeitweise überfluten, und aufgrund des Tsunami-Charakters der Überflutung, auch erosiv wirken. Abschätzungen zur Ausbreitung einer solchen Welle wurden für Nordeuropa z. B. von /PEB 98/ (S. 25) vorgenommen. Insgesamt ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein großer Meteorit den Standort Gorleben innerhalb der nächsten eine Million Jahre direkt trifft so gering, dass dieses Ereignis und seine Auswirkungen bei der Standortentwicklung vernachlässigt werden können.

Literaturverzeichnis

- /ABE 07/ Aber, J.S., Ber, A. (Editoren): Glaciotectonism. Developments in Quaternary Sciences, Vol. 6, 256 Seiten, ISBN 0444529438, Elsevier: Amsterdam, 2007.
- /AHO 89/ Ahorner, L.: Seismologisches Gutachten Gorleben. 178 Seiten, Geologisches Institut der Universität zu Köln. Im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig: Köln, 1989.
- /ALL 09/ Allison, I., Alley, R.B., Fricker, H.A., Thomas, R.H., Warner, R.C.: Ice sheet mass balance and sea level. Antarctic Science, Vol. 21, S. 413-426, DOI 10.1017/S0954102009990137, 2009.
- /APP 98/ Appel, D., Habler, W.: Quantifizierung postholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben durch statistische Auswertung von Bohrerergebnissen. Mitt. Geol. Inst. Univ. Hannover, Vol. 38, S. 7-30, 1998.
- /BAU 91/ Bauer, G.: Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren? Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Vol. I, No. 4, S. 1247-1261, 1991.
- /BGR 10/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Karte der Epizentren der Schadenbeben (ab Intensität VI-VII) in der Bundesrepublik Deutschland Jahre 800 bis 2010: Hannover, 14.03.2011.
- /BIB 83/ Bibo, F.-J., Söngen, R., Fresenius, R.E.: Vermehrungsfähige Mikroorganismen in Steinsalz aus primären Lagerstätten. Kali u. Steinsalz, Vol. 8, No. 11, S. 367-373, 1983.
- /BOR 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 95/ Bornemann, O., Mingerzahn, G.: Geologie und Hydrogeologie im Bereich der Schachtstandorte: Geologie im Hutgestein und Salinar der Schächte Gorleben. In: Gefrierschächte Gorleben, Jessberger, H.L. (Editor), S. 21-36, ISBN 9054105259, Aa Balkema: Rotterdam, 1995.

- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BOU 01/ Boulton, G.S., Gustafson, G., Schelkes, K., Casanova, L., Moren, L.: Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (Pagepa). Final report EUR 19784 EN, 147 Seiten, Office for Official Publications of the European Communities, Nuclear Science and Technology: Luxemburg, 2001.
- /BRI 08/ Bridge, J.S., Demicco, R.V.: Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits. 815 Seiten, ISBN 0521857805, Cambridge University Press: Cambridge/U.K., 1. Mai 2008.
- /BRU 11/ Bruns, J., Boetticher, L., Doose, H., Cottrell, M., Wolff, P., Günther, R.-M., Naumann, D., Popp, T., Salzer, K.: Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers. Abschlussbericht, 292 Seiten, Golder Associates GmbH in Kooperation mit IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH: Celle, 2011.
- /BRÜ 02/ Brückner-Röhling, S., Espig, M., Fischer, M., Fleig, S., Forsbach, H., Kockel, F., Krull, P., Stiewe, H., Wirth, H.: Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung -Teil 1: Strukturgeologie. BGR-Bericht, 253 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.
- /BUR 82/ Burghardt, G.-A., Link, H., Scharf, V., Stoß, K.: Temperaturbedingte Rißbildungen beim Abteufen von Gefrierschächten im Salzgebirge. Kali und Steinsalz, Vol. 8, No. 9, S. 294-315, 1982.
- /CED 04/ Cedercreutz, J.: Future Climate Scenarios for Olkiluoto with Emphasis on Permafrost. 71 Seiten, Report 2004-06, Posiva Oy: Olkiluoto/Finnland, Dezember 2004.

- /CON 03/ Connolly, P., Gölke, M., Bäßler, H., Fleckenstein, P., Hettel, S., Lindenfeld, M., Schindler, A., Theune, U., Wenzel, F.: Finite Elemente Modellrechnungen zur Erklärung der Auffächerung der größeren horizontalen Hauptspannungsrichtung in Norddeutschland. 163 Seiten, Universität Karlsruhe, Institut für Geophysik: Karlsruhe, 2003.
- /DEL 91/ Delisle, G.: Causes and consequences of the advance of a continental ice sheet from Scandinavia to Northern Germany. In: Geologisches Jahrbuch, Vol. A 127, S. 507-517, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1991.
- /DEL 96/ Delisle, G., Dumke, I.: Geochemische und geothermische Untersuchungen zur Frage der Existenz von kryogenen Klüften in norddeutschen Salzstöcken. Zeitschrift für Angewandte Geologie, Vol. 42, No. 2, S. 149-154, 1996.
- /DEL 98/ Delisle, G.: Numerical simulation of permafrost growth and decay. Journal of Quaternary Science, Vol. 13, No. 4, S. 325-333, 1998.
- /DEL 07/ Delisle, G., Grassmann, S., Cramer, B., Messner, J., Winsemann, J.: Estimating episodic permafrost development in northern Germany during the Pleistocene. In: Glacial Sedimentary Processes and Products, Special Publication, Vol. 39, Hambrey, M.J., Christoffersen, P., Glasser, N.F., Hubbard, B. (Editoren), S. 109-119, International Association of Sedimentologists (IAS), Special Publication, 2007.
- /DUP 83/ Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U., Schröder, P.: Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben, Abschluss-Bericht. PTB-Bestell-Nr. 73760, BGR-Archiv-Nr. 103 714, 265 Seiten, Universität Kiel: Kiel, 1983.
- /EHL 94/ Ehlers, J.: Allgemeine und historische Quartärgeologie. 1. Edition, 358 Seiten, ISBN 3432259115, Ferdinand Enke Verlag: Stuttgart, 1994.

- /ELL 99/ Ellendorf, B.: Geochemische Untersuchungen an einzelnen Fluid Inclusions in Zechsteinevaporiten mittels Laser-Ramanspektrometrie, Ionenchromatographie und Laser-Ablation-ICP-Massenspektrometrie. (Zitat in: Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.). Dissertation, 93 Seiten, Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, 1999.
- /EIS 81/ Eissmann, L.: Periglaziäre Prozesse und Permafroststrukturen aus sechs Kaltzeiten des Quartärs. Ein Beitrag zur Periglazialgeologie aus der Sicht des Saale-Elbe-Gebietes. Altenburger naturwissenschaftliche Forschungen, Vol. 1, S. 1-171, 1981.
- /EIS 87/ Eissmann, L.: Lagerungsstörungen im Lockergebirge. Exogene und endogene Tektonik im Lockergebirge des nördlichen Mitteleuropa. Geophysik und Geologie, Vol. 3, No. 4, 1987.
- /EIS 07/ Eissmann, L.: Alter und Genese der quartären Tiefrinnen im Norddeutschen Tiefland am Beispiel der Region Mitteldeutschland/Niederlausitz und Hamburg. Eine Casehistory des Älteren quartären Destruktionsstockwerkes im Skandinavischen Vereisungsgebiet. S. 27-38, Geologisches Landesamt Hamburg, Tagungsband und Exkursionsführer, 74. Tagung der Arbeitsgemeinschaft norddeutscher Geologen: Hamburg, 2007.
- /ELI 07/ Elias, S.A. (Editor): Encyclopedia of Quaternary Science, Vol. 1-4, 1. Edition, 3365 Seiten, Elsevier: Amsterdam, 2007.
- /FEL 02/ Feldmann, L.: Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. Clausthaler Geowissenschaften, Vol. 1, No. X, 2002.

- /FIS 00/ Fischer, M.: Gefügekundliche Untersuchung von Steinsalz im Hinblick auf die Verteilung und Bindungsform von Kohlenwasserstoffen und die Bestimmung des Volumenanteils der Kohlenwasserstoff-Einschlüsse. Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften: Kiel, 2000. (unveröffentlicht)
- /FLÜ 09/ Flügge, J., Rübel, A.: Grundsatzfragen Hydrogeologie. Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE Braunschweig, 5. – 6. November 2009. 257 Seiten, GRS-264, ISBN 978-3-939355-39-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Dezember 2010.
- /FOR 99/ Forsström, L.: Future glaciation in Fennoscandia. POSIVA 99-30, 31 Seiten, Posiva OY: Helsinki, September 1999.
- /FRA 05/ Frater, H.: Landschaftsformen. Unsere Erde im Wandel - den gestaltenden Kräften auf der Spur. Vol. 1, 247 Seiten, ISBN 3-540-21958-7, Springer: Berlin, 2005.
- /FRE 08/ French, H.: Recent contributions to the study of past permafrost. Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 19, No. 2, S. 179-194, DOI 10.1002/ppp.614, 2008.
- /GAS 00/ Gascoyne, M.: A review of published literature on the effects of permafrost on the hydrogeochemistry of bedrock. SKB Report R-01-56, 49 Seiten, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB): Stockholm, 2000.
- /GEJ 99/ Gerardi, J., Wildenborg, A.B.F.: Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben. BGR-Bericht, 144 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1999.
- /GER 91/ Gerling, P., Beer, W., Bornemann, O.: Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. Kali und Steinsalz, Vol. 10, No. 11, S. 377-383, 1991.

- /GER 96/ Gerling, P., Faber, E., Bornemann, O.: Gasproben aus den Schächten Gorleben 1 und 2 sowie EB 1. Zwischenbericht, 7 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1996.
- /GRO 10/ Grotzinger, J., Jordan, T.: Understanding Earth. 6. Edition, 654 Seiten, ISBN 1429240032, W. H. Freeman and Company: New York/USA, März 2010.
- /GRÜ 95/ Grünthal, G., Stromeyer, D.: Rezentes Spannungsfeld und Seismizität des baltischen Raumes und angrenzender Gebiete - ein Ausdruck aktueller geodynamischer Prozesse. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Vol. 2, No. 2, S. 69-76, 1995.
- /HAN 95/ Hannemann, M.: Intensität und Verbreitung glazigener Lagerungsstörungen im tieferen Quartär und Tertiär. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Vol. 2, S. 51-59, 1995.
- /HEI 08/ Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B.: The World Stress Map database release 2008. DOI 10.1594/GFZ.WSM.Rel2008, Web-service des GFZ Potsdam unter www.world-stress-map.org, 2008.
- /HIN 79/ Hinsch, W.: Rinnen an der Basis des glaziären Pleistozäns in Schleswig-Holstein. Eiszeitalter u. Gegenwart, Vol. 29, S. 173-178, 1979.
- /HOF 96/ Hoffmann, N., Stieve, H., Pasternak, G.: Struktur und Genese der Mohorovicic-Diskontinuität (Moho) im Norddeutschen Becken - ein Ergebnis langzeitregistrierter Steilwinkelseismik. Zeitschrift für Angewandte Geologie, Vol. 42, No. 2, S. 138-148, 1996.
- /HOL 08/ Holländer, R.: Exkursion A4: Geologische Kurzbeschreibung des Kaliwerks Sigmundshall der K+S Kali GmbH, Wunstorf Bokeloh. In: Tagungsband, Exkursionsführer; 75. Tagung der Arbeitsgemeinschaft Norddeutscher Geologen 2008, 13.-16. Mai 2008, Hannover S. 90-95, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG): Hannover, 2008.

- /HUU 00/ Huuse, M., Lykke-Andersen, H.: Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 19, No. 12, S. 1233-1253, DOI 10.1016/s0277-3791(99)00103-1, 2000.
- /IPC 01/ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editoren: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 892 Seiten: Cambridge, 12. Juli 2001.
- /IPC 07/ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Editoren: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L.: Cambridge, 10. September 2007.
- /ISI 08/ Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Filbert, W., Heusermann, S., Keller, S., Kreienmeyer, M., Krone, J., Mönig, J., Tholen, M., Weber, J.R., Wolf, J.W.: *Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Zusammenfassender Abschlussbericht*. TEC-09-2008-AB, 95 Seiten, DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Peine, Braunschweig, Hannover, April 2008.
- /KÄB 01/ Käbel, H.: *ERA Morsleben. Geowissenschaftliche Kennzeichnung des Endlagerstandortes unter Verwendung der "Internationalen FEP-Liste" der NEA-Datenbank*. BGR-Bericht, 89 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Berlin, 2001.
- /KAP 09/ Kappas, M.: *Klimatologie. Klimaforschung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften*. ISBN 3827418275, Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg, 2009.

- /KAR 79/ Karte, J.: Räumliche Abgrenzung und regionale Differenzierung des Periglaziärs. Bochumer geographische Arbeiten, Vol. 35, 211 Seiten, Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, 1979.
- /KAS 03/ Kasse, C., Vandenberghe, J., Van Huissteden, J., Bohncke, S.J.P., Bos, J.A.A.: Sensitivity of Weichselian fluvial systems to climate change (Nochten mine, eastern Germany). Quaternary Science Reviews, Vol. 22, No. 20, S. 2141-2156, DOI 10.1016/S0277-3791(03)00146-X, 2003.
- /KEL 90/ Keller, S.: Das Ablaugungsverhalten der Salzstöcke in NW-Deutschland (Abschluß-Bericht des BMFT-Förderungsvorhabens KWA 5801 9 "Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock", Teilprojekt III). BGR-Bericht, 87 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1990.
- /KEL 98/ Keller, S.: Permafrost in der Weichsel-Kaltzeit und Langzeitprognose der hydrogeologischen Entwicklung in der Umgebung von Gorleben/NW-Deutschland. Zeitschrift für Angewandte Geologie, Vol. 44, No. 2, S. 111-119, 1998.
- /KEL 01/ Keller, S.: Projekt Gorleben, Zusammenstellung von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (ZEP) als Basis für die Ermittlung von Szenarien (Standort Gorleben). BGR-Bericht, 148 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2001.
- /KEL 10/ Keller, S.: Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland. In: Grundsatzfragen Hydrogeologie. Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE Braunschweig, 5. – 6. November 2009, GRS-264, S. 145-173, ISBN 978-3-939355-39-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2010.

- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 71, 147 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KOE 96/ Koeberl, C., Anderson, R.R. (Editoren): The Manson Impact Structure, Iowa. Anatomy of an Impact Crater, 468 Seiten, ISBN 0813723027, Geological Society of America: Boulder, 1996.
- /KOE 05/ Koeberl, C., Henkel, H.: Impact Tectonics. 552 Seiten, ISBN 3540241817, Springer: Berlin, 1. März 2005.
- /KOP 09/ Koppe, W.: Geographie Infothek. Klett Verlag, erreichbar unter: www.klett.de.
- /KÖS 00/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K.: 2D-Modellierung der paläohydrogeologischen Entwicklung des Grundwassersystems im Elberaum zwischen Burg und Boitzenburg. BGR-Bericht, 97 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2000.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KUS 79/ Kuster, H., Meyer, K.-D.: Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen. Eiszeitalter u. Gegenwart, Vol. 29, S. 135-156, 1979.
- /LEY 98/ Leydecker, G., Aichele, H.: The Seismogeographical Regionalisation of Germany: The Prime Example for Third-Level Regionalisation. In: Geologisches Jahrbuch, Vol. E 55, S. 85-98, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1998.

- /LEY 02/ Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800-2001. BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.
- /LEY 08/ Leydecker, G., Schmitt, T., Busche, H., Schaefer, T.: Seismo-engineering parameters for sites of interim storages for spent nuclear fuel at German nuclear power plants. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, No. 9, S. 754-762, DOI 10.1016/j.soildyn.2007.10.007, 2008.
- /LIT 07/ Litt, T., Behre, K.-E., Meyer, K.-D., Stephan, H.-J., Wansa, S.: Stratigraphische Begriffe für das Quartär des norddeutschen Vereisungsgebietes. *Eiszeitalter und Gegenwart*, Vol. 56, No. 1/2, S. 7-65, DOI 10.3285/eg.56.1-2.02, 2007.
- /LUD 95/ Ludwig, A.O., Schwab, G.: Neogeodynamica Baltica - ein internationales Kartenprojekt (IGCP-Projekt Nr. 346). Deutsche Beiträge zur Charakterisierung der vertikalen Bewegungen seit Beginn des Rupelian (Unteroligozän) bzw. seit Ende der Holstein-Zeit. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, Vol. 2, No. 2, S. 47-57, 1995.
- /LUD 01/ Ludwig, A.O.: Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). *Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, Vol. 8, No. 1, S. 5-12, 2001.
- /LUR 01/ Ludwig, R.: Hydrogeologische Untersuchungen Gorleben. Hydrogeologische Grundlagen für Modellrechnungen - Kenntnisstand 2000. 210 Seiten, BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2001.
- /LÜT 08/ Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., Stocker, T.F.: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, Vol. 453, S. 379 - 382, DOI 10.1038/nature06949, 2008.

- /MEY 86/ Meyer, K.-D., Steinwachs, M.: Die Feuerkugel vom 14. November 1985 über Niedersachsen und der DDR; Beobachtung, seismologische Registrierung und Auffindung eines Teiles des Meteoriten. Braunschweiger naturkundliche Schriften, Vol. 2, No. 3, S. 585-594, 1986.
- /MIA 77/ Miall, A.D.: A review of the braided-river depositional environment. Earth-Science Reviews, Vol. 13, No. 1, S. 1-62, DOI 10.1016/0012-8252(77)90055-1, 1977.
- /MIN 10/ Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J.: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. 214 Seiten, BMBF-Projekt FKZ 02C1264, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 2010.
- /MÜL 86/ Müller, H.: Altquartäre Sedimente im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Vol. 137, S. 85-95, 1986.
- /MÜL 99/ Müller, T.: Wörterbuch und Lexikon der Hydrogeologie. Deutsch-Englisch. 1. Edition, 367 Seiten, ISBN 3540656421, Springer: Berlin, 15. April 1999.
- /MUR 10/ Murawski, H., Meyer, W.: Geologisches Wörterbuch. 12. Edition, ISBN 3827418100, Spektrum Akademischer Verlag: Heidelberg, 26. März 2010.
- /NAS 99/ National Aeronautics and Space Administration (NASA): Clouds and the Energy Cycle. In: The Earth Science Enterprise Series, NASA Facts NF-207: Maryland, USA, 1999.
- /NOW 02/ Nowak, T., Weber, J.R., Bornemann, O.: Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben. 71 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.

- /PEB 98/ Peiser, B.J., Palmer, T., Bailey, M.E. (Editoren): Natural catastrophes during Bronze Age civilisations, archaeological, geological, astronomical and cultural perspectives. British Archaeological Reports (BAR) International, 252 Seiten, ISBN 0 86054 916 X, Archaeopress: Oxford/U.K., 1998.
- /POP 02/ Popp, T., Fischer, M., Kern, H.: Gefügekundliche Untersuchungen zur Verteilung von Kohlenwasserstoffen (KW) im Steinsalz. Meyniana, Vol. 54, S. 131-154, 2002.
- /PRO 98/ Prohl, H.: Raman-spektroskopische Untersuchungen zur Zusammensetzung gasförmiger Einschlüsse in Gesteinen des Salzstocks Gorleben. (Zitat in: Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.). Dissertation, 62 Seiten, Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, 1998.
- /RAB 95/ Rabbel, W., Förster, K., Schulze, A., Bittner, R., Röhl, J., Reichert, J.C.: A high-velocity layer in the lower crust of the North German Basin. Terra Nova, Vol. 7, No. 3, S. 327-337, 1995.
- /SCA 65/ Schneider, A., Nielsen, H.: Zur Genese des elementaren Schwefels im Gips von Weenzen (Hils). Beiträge zur Mineralogie und Petrographie, Vol. 11, No. 7, S. 705-718, DOI 10.1007/BF01128710, 1965.
- /SCH 83/ Schoell, M.: Geochemische Untersuchungen an Erdgasen und Kondensaten aus Bohrungen des Salzstocks Gorleben. 29 Seiten, BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1983.
- /SCJ 95/ Schroeder, J.H.: Die Kreuzbrückenspalte von Rüdersdorf - subglaziale Erosion im Wellenkalk. Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen, Vol. A, No. 168, S. 177-189, 1995.

- /SCK 07/ Scherer, K., Fichtner, H.: Das Klima aus dem All. Physik Journal, Vol. 6, No. 3, S. 59-63, 2007.
- /SCM 09/ Schramm, M., Kühnlenz, T., Mingerzahn, G., Hammer, J.: Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2009.
- /SHA 90/ Shackleton, N.J., Berger, A., Peltier, W.R.: An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Vol. 81, No. 04, S. 251-261, DOI 10.1017/S0263593300020782, 1990. (Online publiziert: 3. November 2011).
- /SKU 03/ Skupin, K., Speetzen, E., Zandstra, J.G.: Die Eiszeit in Nordost-Westfalen und angrenzenden Gebieten Niedersachsens. Elster- und saalezeitliche Ablagerungen und ihre kristallinen Leitgeschiebesgesellschaften., 95 Seiten, Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen: Krefeld, 2003.
- /STA 01/ Stackebrandt, W., Ludwig, A.O., Ostaficzuk, S.: Die Basis quartärer Ablagerungen der Ostseesenke und benachbarter Gebiete (Karte 2). Neodynamica Baltica IGCP-Project 346. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Vol. 8, No. 1, S. 13-19, 2001.
- /STA 04/ Stackebrandt, W., Manhenke, V.: Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1 : 1.000.000. 3. Auflage, Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB): Kleinmachnow, 2004.
- /STE 96/ Steinwachs, M.: Stellungnahme zu dem "Seismologischen Gutachten Gorleben", erstellt von der Abteilung Erdbebengeologie des Geologischen Instituts der Universität zu Köln. 31 Seiten, Bericht 113814, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung Hannover (NLfB): Hannover.

- /STE 00/ Stewart, I.S., Sauber, J., Rose, J.: Glacio-seismotectonics: ice sheets, crustal deformation and seismicity. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 19, No. 14-15, S. 1367-1389, DOI 10.1016/S0277-3791(00)00094-9, 2000.
- /STO 87/ Stork, G.-H., Gerardi, J.: Geophysikalische Messungen und Bohrungen bei Rolfsbüttel-Wendeburg. BGR-Bericht, 16 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1987.
- /THI 70/ Thiermann, A., Koch, M., Will, K.-H.: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25000. Erläuterungen zu Blatt 3711 Bevergern. 120 Seiten, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen: Krefeld, 1970.
- /THO 98/ Thome, K.N.: Einführung in das Quartär: Das Zeitalter der Gletscher. 1. Edition, ISBN 3540629327, Springer Verlag: Berlin, 30. Januar 1998.
- /TRU 57/ Trusheim, F.: Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, Vol. 109, No. 1, S. 111-151, 1957.
- /VAN 03/ Vandenberghe, J.: Climate forcing of fluvial system development: an evolution of ideas. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, No. 20, S. 2053-2060, DOI 10.1016/S0277-3791(03)00213-0, 2003.
- /VRE 00/ Vreeland, R.H., Rosenzweig, W.D., Powers, D.W.: Isolation of a 250 million-year-old halotolerant bacterium from a primary salt crystal. *Nature*, Vol. 407, S. 897, 2000.
- /ZAC 01/ Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K.: Trends, Rhythms and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, Vol. 292, S. 686-693, DOI 10.1126/science.1059412, 2001.
- /ZAN 10/ Zang, A., Stephansson, O.: Stress Field of the Earth's Crust. 1. Edition, 322 Seiten, ISBN 1402084439, Springer: Heidelberg, 24. Februar 2010.
- /ZEP 08/ Zepp, H.: Geomorphologie: Grundriß Allgemeine Geographie. 1. Edition, 385 Seiten, ISBN 3-8252-2164-4, UTB: Stuttgart, 2008.

- /ZIR 91a/ Zirngast, M.: Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben - Ergebnisse einer strukturgeologischen Bearbeitung. In: Geologisches Jahrbuch, Vol. A 132, S. 3-31, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1991a.
- /ZIR 91b/ Zirngast, M.: Strukturgeologie der Umgebung des Salzstocks Gorleben. Bericht, 109027, 57 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1991.
- /ZIR 96/ Zirngast, M.: The development of the Gorleben salt dome (northwest Germany) based on quantitative analysis of peripheral sinks. In: Salt Tectonics, Vol. 100, Alsop, G.I., Blundell, D.J., Davison, I. (Editoren), S. 203-226, Geological Society Special Publication: London, 1996.
- /ZIR 04a/ Zirngast, M.: Randsenkenanalyse des Salzstocks Rambow. BGR-Bericht, 10 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2004.
- /ZIR 04b/ Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W.: Projekt Gorleben, Schichtenfolge und Strukturbaue des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht, 570 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2004.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Komponenten der Milanković-Zyklen (geändert nach /ZAC 01/)	7
Abb. 3.2	Globale Strahlenbilanz (geändert nach /GRO 10/)	9
Abb. 3.3	Meeresströmungen „Globales Förderband“	10
Abb. 3.4	Hauptkomponenten des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs (geändert nach /IPC 01/)	12
Abb. 3.5	Gegenüberstellung von Klimaverläufen, die global an verschiedenen Stellen ermittelt wurden	15
Abb. 3.6	Entwicklung der in Klimamodelle eingehenden Komponenten seit Mitte der 1970er Jahre (geändert nach /IPC 01/, Box 3, Fig. 1)	17
Abb. 3.7	Klimaentwicklungen in den nächsten 125.000 Jahren basierend auf verschiedenen Modellen (geändert nach /CED 04/)	19
Abb. 3.8	Vergleich von mehreren Datierungen der klimatischen Entwicklung in Norddeutschland mit einem global identifizierten Klimaverlauf	21
Abb. 3.9	Schema der Vervielfachung der Ungewissheiten bei der Modellierung des zukünftigen Klimas	25
Abb. 3.10	Morphologisch-geologische Übersicht (/KÖT 07/)	27
Abb. 3.11	Topographie im Umfeld des Standortes Gorleben (/LUR 01/)	28
Abb. 3.12	Vereinfachter geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet (/KÖT 07/)	31
Abb. 3.13	Basis des unteren Grundwasserleiters (/KLI 07/)	33
Abb. 3.14	Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben (/KLI 07/, Schnitt 10fach überhöht)	35
Abb. 3.15	Übersicht über die hydrostratigraphischen Baueinheiten des Deck- und Nebengebirges am Standort Gorleben (/KLI 07/)	36

Abb. 3.16	Schema der vertikalen Zonierung der Grundwassertypen im Untersuchungsgebiet Gorleben (aus /KLI 07/)	39
Abb. 3.17	Lage des Salzstocks Gorleben	42
Abb. 3.18	3D-Oberfläche der Salzstruktur Gorleben-Rambow	43
Abb. 3.19	Boudinage-Struktur einer Anhydritbank im Basissalz (Foto: Bauer, DBE, aus /BOR 08/)	45
Abb. 3.20	Schematischer Querschnitt durch den Salzstock Gorleben (basierend auf /BOR 91/geändert in /ISI 08/)	46
Abb. 4.1	Skizze vom Prinzip der isostatischen Ausgleichsbewegungen bei Gletscherauflast	67
Abb. 4.2	Schema der Spannungsverteilung im Umfeld einer Gletscherauflast (geändert nach /STE 00/)	68
Abb. 4.3	Spannungsfeld in Deutschland (nach /HEI 08/, geändert)	70
Abb. 4.4	Komponenten eistektonisch induzierter Erdbeben (geändert nach /STE 00/)	72
Abb. 4.5	Karte der Epizentren der Schadenbeben in der Bundesrepublik Deutschland und angrenzenden Gebieten der Jahre 800 bis 2010 /BGR 10/	73
Abb. 4.6	Ausbreitungsgrenzen der Vergletscherung in den letzten Kaltzeiten (Eisrandlagen nach /STA 01/)	77
Abb. 4.7	Schema verschiedener Permafrost und TalikAusbildungen (geändert nach /GAS 00/ und /KAR 79/)	80
Abb. 4.8	Angeschnittener Eiskeil in rezentem Permafrost auf Bunge Land, Neusibirische Inseln (Foto: S. Mrugalla)	85
Abb. 4.9	Steinringe im rezenten Permafrost auf Spitzbergen (Foto: S. Mrugalla)	86
Abb. 4.10	Typische Landschaftselemente bei bestimmten Eisrandlagen im Vorfeld eines Flachlandgletschers (geändert nach /KOP 09/)	92
Abb. 4.11	Saalezeitliche Eisausbreitung (/FEL 02/, S. 73, geändert)	94

Abb. 4.12	Rinnenverteilung und Eisrandstände in Norddeutschland (geändert nach /STA 01/)	99
Abb. 4.13	Tiefenlage der Quartärbasis und quartäre Rinnen (geändert nach /KÖT 07/)	104
Abb. 4.14	Gorlebener Rinne im 10fach überhöhten Längsschnitt (/LUR 01/)	106
Abb. 4.15	Gorlebener Rinne im 10fach überhöhten Querschnitt (/LUR 01/)	107
Abb. 4.16	Küstenlinie nach einem Meeresspiegelanstieg von 60 m auf Basis der rezenten Topographie (/FLÜ 09/)	111
Abb. 4.17	Schema unterschiedlicher Einflüsse von Störungen auf die Grundwasserströmung	121
Abb. 4.18	Tiefenlinienplan des Salzspiegels am Standort Gorleben (geändert nach /BOR 08/)	131
Abb. 5.1	Schema der Grabenbildung durch Konvektionsströmungen im Mantel	141

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Grundwassertypen und Kennwerte im Untersuchungsgebiet Gorleben (nach /KLI 07/)	39
Tab. 3.2	Zusammenstellung der in der Aller-Folge (z4) im Salzstock Gorleben angetroffenen Klüfte und Störungen	49
Tab. 3.3	Zusammenstellung der in der Leine-Folge (z3) im Salzstock Gorleben angetroffenen Klüfte und Störungen	49
Tab. 3.4	Zusammenstellung der im Grenzbereich z2/z3 und in der Staßfurt-Folge (z2) im Salzstock Gorleben angetroffenen Klüfte und Störungen	52
Tab. 3.5	Überblick über die bis zum Jahr 2000 angetroffenen Lösungsvorkommen und Reservoirabschätzungen im Salzstock Gorleben	55
Tab. 3.6	Zusammenstellung der stratigraphischen Einheiten im Salinar des Salzstocks Gorleben mit KW-Vorkommen	61
Tab. 4.1	Unterscheidungsmerkmale der Flusstypen mäandrierend, braided river und anastomosierend (nach /BRI 08/, /MIA 77/ und /VAN 03/)	83
Tab. 4.2	Zusammenstellung der für den Salzstock Gorleben ermittelten Subrosionsraten	133
Tab. 5.1	Zusammenstellung von Meteoritenfällen im Umkreis von Gorleben	147

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

**Bundesanstalt für Geowissen-
schaften und Rohstoffe**
Stilleweg 2
30655 Hannover

ISBN 978-3-939355-51-9