



Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle

Synthesebericht

Judith Flügge Christine Fahrenholz Marc Johnen Dagmar Schönwiese Holger Seher

Dezember 2024

Anmerkung:

Dieser Bericht wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH im Auftrag der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) mbH im Rahmen des Vorhabens "Subrosion-ewG" unter der Bestellnr. 45208313 (STAFuE-21-11-Klei) erstellt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung der BGE übereinstimmen.

Deskriptoren Barrierefunktion, Deckgebirge, einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG), Endlager, FEP, Grundwassermodellierung, Klimaszenarien, sicherer Einschluss, StandAG, Subrosion

Kurzfassung

Die im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG 2023) durchzuführenden vergleichenden Analysen schließen die Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide im Endlagersystem über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre ein. Dabei muss für die zu erwartenden Entwicklungen sichergestellt werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) seine Barrierefunktion über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren beibehält. Prozesse, die die Barriereeigenschaften negativ beeinflussen und z. B. zu einer Schädigung des ewG oder des Deckgebirges führen können, sind unter anderem Subrosionsprozesse.

Der vorliegende Bericht stellt zunächst allgemeine Informationen über den Subrosionsprozess zusammen. Relevante Faktoren und Prozesse wurden zusammengetragen, die den Subrosionsprozess beeinflussen und die Zusammenstellung von Wirkungsabhängigkeiten erlauben.

Für die systematischen Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Gebiete sowie diesen Prozess beeinflussende Faktoren und Randbedingungen wurde eine interaktive Webanwendung mit Datenbank erstellt. In dieser sind die stratigraphischen Einheiten, in denen Subrosionsvorgänge verbreitet auftreten, nach regionalgeologischer Verbreitung zusammengestellt. Es wurden 95 Literaturstellen in die Webanwendung aufgenommen. Die dafür gesichtete und verwendete Literatur ist in einem Citavi-Projekt hinterlegt. Die Webanwendung enthält 78 Einträge zu geographischen Lagen beobachteter Subrosionserscheinungen und 270 Einträge zur Subrosion. Mit Hilfe der Webanwendung können die Einträge nach verschiedenen Kriterien gefiltert werden, z. B. nach der von der Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheit, der beobachteten Teufe der Subrosion oder nach den Angaben zur Tektonik und Genese. Auf diese Weise können die Prozesse, Faktoren und ihre Zusammenhänge sowie mögliche Einflüsse auf die im Standortauswahlverfahren festgelegten Teilgebiete identifiziert werden.

Als Vorarbeit für eine Einschätzung der Subrosionsrate über den Bewertungszeitraum wurden Klimaszenarien hergeleitet. Dafür wurden die für Nordeuropa zur Verfügung stehenden Klimaszenarien gegenübergestellt. Auf der Grundlage klimaabhängiger Prozessketten wurden im Anschluss auf rein qualitativem Wege die zukünftige Entwicklung der Subrosion und seine Folgen auf die Barrierewirksamkeit von Deckgebirge und Wirtsgestein über den Bewertungszeitraum eingeschätzt. Quantitative Aussagen zu Subrosionsraten für stratiforme und steile Salzformationen unter den zuvor erarbeiteten Klimaänderungen wurden durch Modellrechnungen ermöglicht. Mögliche Risiken auf die Barrierewirksamkeit von Deckgebirge und Wirtsgestein wurden im Anschluss diskutiert.

Es zeigte sich, dass der Subrosionsprozess im Wesentlichen von den Faktoren Grundwasserchemie und Temperatur im Kontaktbereich des Salzes abhängt. Daneben ist die Zusammensetzung des Steinsalzes entscheidend für die Ausbildung von Bereichen, die besonders anfällig für Subrosion sind. Die Geometrie der Salzformation und deren Relief führt zu einer räumlich differenzierten und unterschiedlich hohen Subrosion. Das Risiko einer Subrosion des Wirtsgesteins ist damit in hohem Maße an den Klimazustand gekoppelt, weil dieses die Grundwasserchemie in den Deckschichten vorgibt (insbesondere durch den Anfall von Schmelzwasser) und ggf. Bedingungen schafft, die zu einer Be- und anschließenden Entlastung des Deckgebirges führt und diese in ihrer Integrität beeinträchtigen kann. Je nach Ausprägung der Deckschichten, insbesondere derjenigen in direktem Kontakt zum Salzgestein, und ihrer Veränderung im Verlauf der zu erwartenden Klimata, fällt die Subrosion unterschiedlich hoch aus. Für das Deckgebirge, aber auch für das Wirtsgestein Steinsalz bestehen daher nicht nur während der subrosionsintensiven Klimazustände der Kaltzeiten Risiken in Bezug auf die Barrierewirkung, sondern auch im Anschluss an diese.

Das Ausmaß möglicher zukünftiger Subrosionsprozesse lässt sich nur mit entsprechender Standortdaten und auf der Grundlage von Annahmen für die einflussnehmenden Randbedingungen in den zu erwartenden Klimazuständen abschätzen. Daher wurden im Rahmen des Vorhabens Modellrechnungen zur Grundwasserströmung unter Betrachtung der Dichteströmung und der Auswirkungen von Klimaveränderungen für das Wirtsgestein Steinsalz durchgeführt. Es erfolgten Modellrechnungen für Salzformationen in stratiformer und steiler Lagerung. Die Subrosionsraten variieren im Modell mit stratiformer Lagerung zwischen Werten von 0,04 und 2,65 mm a⁻¹ für alle Klimazustände und Zonen. Es ergibt sich ein Einfluss der Subrosion bis in Tiefen von 123 m bis zu 588 m für verschiedene zugrunde gelegte Klimaszenarien. Im Modell mit dem Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung wurden über alle Klimazustände und Zonen stark variable Subrosionsraten errechnet. Die Ungewissheiten aufgrund von fehlenden Informationen zu Prozessen entlang der Grenzfläche zwischen Salz und anstehendem Gestein lassen den Schluss zu, dass es zu einer deutlichen Überschätzung der Subrosionsraten im Modell für Steinsalz in steiler Lagerung kommt, die in dieser Form nicht für den Bewertungszeitraum angenommen werden können. Es wurde daher von einer Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten für die Klimaszenarien für dieses Modell abgesehen.

Da es sich um generische Modelle ohne direkten Standortbezug handelt, gibt es keine Messwerte zur Permeabilität, den hydraulischen Randbedingungen und der Salzverteilung. Die Ergebnisse sind demnach nicht ohne Weiteres auf andere Gebiete übertragbar und sollten nur als erste Erkenntnisse im Bereich der numerischen Modellierung mit Bezug zur Subrosion betrachtet werden. Mit veränderten Modelleigenschaften können sich andere Subrosionsraten ergeben. Mit zukünftigen Variationsrechnungen könnten die vorhandenen Ungewissheiten reduziert werden. Die zukünftigen Klimaszenarien werden immer mit Ungewissheiten behaftet sein. Aus diesem Grund wurden in diesem Vorhaben mehrere Klimaszenarien zur Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten herangezogen.

Bei zukünftigen Arbeiten sollte der Fokus auf die kleinskaligeren Prozesse entlang der Grenzfläche von Salz und dem anstehenden Gestein und dem regionalen Strömungsfeldern um Salzstrukturen gelegt werden, da die Modellergebnisse in diesem Bereich große Ungewissheiten aufgezeigt haben.

Im Rahmen des Vorhabens wurden weitreichende Erkenntnisse in Bezug auf Subrosionsprozesse und ihre möglichen negativen Einflüsse auf die Barriereeigenschaften eines ewG und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle gewonnen. Durch die Webanwendung mit der Zusammenstellung von Subrosionserscheinungen und ihrer geographischen Verteilung in Deutschland stehen nun Informationen aus der Literatur gebündelt zur Verfügung.

Durch eine qualitative Bewertung der Subrosionsprozesse über den Bewertungszeitraum wurden die Risiken verschiedener möglicher Klimaszenarien über den Bewertungszeitraum in Deutschland analysiert. Die quantitative Bewertung mittels numerischer Grundwassermodelle unterstützt die vorangegangene qualitative Analyse mit Modellergebnissen. Während der Arbeiten wurden offene Forschungsfragen und mit Ungewissheiten behaftete Prozesse identifiziert.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich bei Susan Britz, Heike Mönig und Xuerui Wang (GRS) für die Unterstützung bei der Revision der Inhalte der Webanwendung.

Für die immer konstruktiven und wertvollen Diskussionen im Rahmen der Arbeitstreffen bedanken sich die Autorinnen und Autoren bei dem gesamten Bearbeitungsteam der BGE.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
2	Subrosion und Verkarstung	16
2.1.1	Beschreibung des Subrosionsprozesses	16
2.1.2	Subrosionsrate	21
2.1.3	Subrosionserscheinungen	22
3	Regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten in Deutschland	23
3.1	Methoden	23
3.1.1	Literaturrecherche und -auswertung	23
3.1.2	Webanwendung	24
3.1.3	Geographisches Informationssystem	24
3.2	Tabellarische regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten	25
3.2.1	Grundgebirge Sachsen	
3.2.2	Paläozoikum in Sachsen-Anhalt	29
3.2.3	Paläozoikum im Rheinischen Schiefergebirge	30
3.2.4	Permische Salzformationen in stratiformer Lagerung	31
3.2.4.1	Niedersachsen	
3.2.4.2	Sachsen-Anhalt	
3.2.4.3	Karstgebiete des Harzes und Harzvorlandes	33
3.2.4.4	Thüringen	
3.2.4.5	Bayern	35
3.2.4.6	Hessen	36
3.2.4.7	Alpines Salinar	37
3.2.5	Permische Salzformationen in steiler Lagerung	38
3.2.6	Triassische und jurassische Salinarformationen	39
3.2.7	Karstgebiete Deutschlands	40
3.3	Zusammenfassung der beobachteten Subrosionsteufen	41
3.4	Zusammenfassung der beobachteten Subrosionsraten	43
4	Mögliche Entwicklung der Subrosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre	46
4.1	Qualitative Bewertung der zukünftigen Entwicklung im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre	46

4.2	Zusammenstellung möglicher Klimaszenarien für den Betrachtungszeitraum in Deutschland	49
4.3	Abgleich der subrosionsrelevanten Faktoren mit denen der Salt FEP- Database	54
44	Quantitative Bewertung der über den Bewertungszeitraum von einer	
	Million Jahre	64
4.4.1	Methoden	64
4.4.2	Beschreibung der Modellgebiete	67
4.4.2.1	RESUS Endlagersystem S1 (Salz in stratiformer Lagerung)	67
4.4.2.2	RESUS Endlagersystem S2 (Salz steil)	69
4.4.3	Modellergebnisse S1-Modell (Salz stratiform)	70
4.4.3.1	3.1 S1-Modell mit niederdimensionaler Kluft	
4.4.3.2	S1-Modell mit äquidimensionaler Kluft	77
4.4.3.3	S1-Modell ohne Kluft	80
4.4.4	Modellergebnisse S2-Modell (Salz steil)	82
4.4.5	Diskussion der subrodierten Gesteinsmächtigkeiten für die zu Grunde gelegten Klimaentwicklungen und Salzformationen	91
4.4.5.1	Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten für die Klimaentwicklungen	92
4.4.5.2	Frischwasserzustrom und Permeabilität	94
4.4.5.3	Einfluss von Klüften (S1-Modell)	95
4.4.5.4	Hangneigungswinkel (S2-Modell)	96
4.4.5.5	Literaturvergleich	96
4.4.5.6	Klimaszenarien	97
5	Von der Subrosion ausgehende Risiken für die Barrierewirkung	100
5.1	Von der Subrosion ausgehende Risiken für das Deckgebirge	100
5.2	Von der Subrosion ausgehende Risiken für den potenziellen ewG	
	(hier: Wirtsgestein)	102
6	Ausblick	111
6.1	Ausblick	111
6.1.1	Ausblick Webanwendung	111
6.1.2	Ausblick Modellrechnungen	112
7	Literaturverzeichnis	114
Α	Anhang	121
A.1	Glossar	121

A.2	Für die Eingabe in die Webanwendung verwendete Literatur	145
A.3	Nicht ausgewertete Literatur	156

Anzahl der Blätter dieses Dokumentes

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Faktoren, die direkten Einfluss auf den Prozess der Subrosion nehmen
Abbildung 2:	Wirkungszusammenhänge subrosionsrelevanter Faktoren in steilen und stratiformen Salzformationen (Pfeilfarbe: Geomechanische Faktoren braun, hydrologische/-geologische Faktoren blau, (mikro-) biologische Faktoren grün)20
Abbildung 3:	Qualitative Einschätzung der Subrosionsrate in Abhängigkeit vom Klima49
Abbildung 4:	Gegenüberstellung der Klimaszenarien aus dieser Arbeit mit bisher veröffentlichten Klimaszenarien Mittel- und Nordeuropas 52
Abbildung 5:	Einteilung der Gesteinsbereiche für Salzformationen in steiler Lagerung in die Kategorien der Salt FEP DB55
Abbildung 6:	Stratiforme Steinsalzlagerung mit unterschiedlicher Gesteinsschichtung im Deck- und Nebengebirge56
Abbildung 7:	Zur Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten verwendete Klimaszenarien für die nächsten eine Million Jahre nach heute 66
Abbildung 8:	Profilschnitt durch ein generisches geologisches Modell einer flach lagernden Salzformation und dem Deckgebirge aus dem Projekt RESUS (Bertrams et al. 2020b)
Abbildung 9:	Meso- und känozoische Schichten des S1-Modells68
Abbildung 10:	Profilschnitt durch ein generisches geologisches Modell einer steil lagernden Salzformation und dem Deckgebirge aus dem Projekt RESUS (Bertrams et al. 2020a)
Abbildung 11:	Meso- und känozoischen Schichten des S2-Modells70
Abbildung 12:	S1-Modell mit den lithostratigraphischen Einheiten mit der Zonierung zur Auswertung der Subrosionsraten71
Abbildung 13:	Salzmasse in Kilogramm im S1-Modell über die Zeit bis zum stationären Zustand nach ca. 6.500 Jahren (doppellogarithmische Darstellung)71
Abbildung 14:	Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten im S1-Modell für den Rechenfall "gemäßigtes Klima"72

Abbildung 15:	Salzverteilung im S1-Modell im stationären Zustand für den Klimazustand "gemäßigtes Klima" nach 10.000 Jahren mit Vergrößerung im Bereich der Kluft (unten)	3
Abbildung 16:	Strömungsgeschwindigkeiten im S1-Modell 500 m vom linken Modellrand aufgetragen über die Tiefe für alle Klimazustände7	5
Abbildung 17:	Salzverteilungen im stationären Zustand für die Klimazustände "Permafrost" (6.500 Jahre Simulationszeitraum), "Vergletscherung und Permafrost" (10.000 Jahre Simulationszeitraum), "Vergletscherung" (10.000 Jahre Simulationszeitraum), "glaziale Rinnen" (10.000 Jahre Simulationszeitraum) und "Meeresspiegelanstieg" (12.000 Jahre Simulationszeitraum) des S1-Modells	6
Abbildung 18:	Subrosionsraten im stationären Zustand des S1-Modells für die jeweiligen Klimazustände in den Zonen nach Abbildung 127	7
Abbildung 19:	Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Kluft im S1-Modell mit niederdimensionaler Kluft (oben) und äquidimensionaler Kluft (unten) mit gleicher logarithmischer Geschwindigkeitsskala7	8
Abbildung 20:	Salzverteilung im Bereich der Kluft im S1-Modell mit niederdimensionaler Kluft (oben) und mit äquidimensionaler Kluft (unten)	9
Abbildung 21:	Subrosionsraten im stationären Zustand des S1-Modells für die jeweiligen Klimazustände in den Zonen nach Abbildung 12 für das Modell mit äquidimensionaler Kluft	0
Abbildung 22:	S2-Modell mit den lithostratigraphischen Einheiten mit der Zonierung zur Auswertung der Subrosionsraten	2
Abbildung 23:	Salzmasse in Kilogramm im S2-Modell über die Zeit bis zum stationären Zustand nach ca. 2.000 Jahren (doppellogarithmische Darstellung)8	4
Abbildung 24:	Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten im S2-Modell für den Rechenfall "gemäßigtes Klima"	4
Abbildung 25:	Salzverteilung im S2-Modell nach 50, 100, 400, 1.000 und nach 7.000 Jahren für den Klimazustand "gemäßigtes Klima"	6
Abbildung 26:	Strömungsgeschwindigkeiten im S2-Modell 6.000 m vom linken Modellrand entfernt aufgetragen über die Tiefe für alle Klimazustände	8

Abbildung 27:	Salzverteilungen im stationären Zustand für die Klimazustände "Permafrost" (2.800 Jahre), "Vergletscherung und Permafrost" (1.000 Jahre), "Vergletscherung" (2.000 Jahre), "Glaziale Rinnen" (1.600 Jahre) und "Meeresspiegelanstieg" (10.000 Jahre) des S2-Modells.	90
Abbildung 28:	Subrosionsmächtigkeiten für die vier Zonen des S1-Modells (niederdimensionale Kluft) für die vier Klimaszenarien (Abbildung 7)	93
Abbildung 29:	Subrosionsmächtigkeiten für die vier Zonen des S1-Modells (äquidimensionale Kluft) für die vier Klimaszenarien (Abbildung 7).	93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen im Grundgebirge Sachsens2	28
Tabelle 2:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen im Paläozoikum Sachsen-Anhalts2	29
Tabelle 3:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen im Paläozoikum des Rheinischen Schiefergebirges	30
Tabelle 4:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratiformer Lagerung in Niedersachsen	31
Tabelle 5:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratiformer Lagerung in Sachsen-Anhalt	32
Tabelle 6:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratiformer Lagerung im Harz und dem Harzvorland	33
Tabelle 7:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratiformer Lagerung in Thüringen	34
Tabelle 8:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratiformer Lagerung in Bayern	35
Tabelle 9:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratiformer Lagerung in Hessen	86
Tabelle 10:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratiformer Lagerung im alpinen Salinar	37
Tabelle 11:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in steiler Lagerung	88
Tabelle 12:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in triassischen Salzformationen	39

Tabelle 13:	Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu Subrosionserscheinungen in Karstgebieten	40
Tabelle 14:	Grobgliederung der in der ausgewerteten Literatur beschriebenen Subrosionsteufen	42
Tabelle 15:	Effekte der Klimaintervalle an der Oberfläche und im Untergrund	47
Tabelle 16:	Relevante FEP für die Subrosion in stratiform und steil lagernden Salzformationen	58
Tabelle 17:	FEP, die nicht explizit mitgeführt wurden, aber durch andere FEP in die Überlegungen eingehen (stratiforme und steile Lagerung)	60
Tabelle 18:	Subrosionsrelevante FEP – zusätzlich zur Salt FEP DB	61
Tabelle 19:	Subrosionsraten über die Zeit für das S1-Modell ohne Kluft für alle Klimazustände	82
Tabelle 20:	Auswertungszonen mit Kantenlänge und Neigung in S2-Modell	83
Tabelle 21:	Zusammenstellung genereller, von Subrosion ausgehender Risiken auf die Barrierewirkung subrosionsanfälliger (hier verkastungsanfälliger) Deckgebirgsschichten steiler und stratiform lagernder Salzgesteinsformationen	01
Tabelle 22:	Zusammenstellung genereller, von Subrosion ausgehender Risiken auf die Barrierewirkung steiler und stratiformer Salzformationen	03
Tabelle 23:	Qualitative Einschätzung der möglichen Subrosionsintensität und ihrer Bandbreiten / Unsicherheiten an Salzformationen in Abhängigkeit vom Klima	05

1 Einleitung

Das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (StandAG 2023) regelt den Ablauf des Standortauswahlverfahrens. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) als Vorhabenträgerin hat am 28.09.2020 den "Zwischenbericht Teilgebiete" veröffentlicht (BGE 2020) und damit den ersten Schritt der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens abgeschlossen. Im folgenden zweiten Schritt setzt die BGE die vergleichende Analyse auf Basis vorhandener Daten, nach Maßgabe der gesetzlich festgelegten geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien sowie der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen um. Die dabei durchzuführenden vergleichenden Analysen schließen die Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide im Endlagersystem über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre ein. Dabei muss für die zu erwartenden Entwicklungen sichergestellt werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) seine Barrierefunktion über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre beibehält. Prozesse, die die Barriereeigenschaften (z. B. Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit, Ausdehnung des ewG) negativ beeinflussen können, sind unter anderem Subrosionsprozesse, die z. B. zu einer Schädigung des ewG oder des Deckgebirges führen können.

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Arbeiten zielten darauf ab, einen wesentlichen Beitrag zu einer fundierten Grundlage für die im Rahmen der vergleichenden Analysen der Teilgebiete durchzuführende Bewertung des sicheren Einschlusses von Radionukliden im Endlagersystem zu leisten, in dem zunächst eine systematische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Gebiete in Deutschland sowie diesen Prozess beeinflussende Faktoren vorgenommen und eine qualitative Bewertung über die zukünftige Entwicklung getroffen wurde. Weiterhin wurde eine systematische Zusammenstellung von an Salzstöcken ermittelten Subrosionsraten in Deutschland vorgenommen und zukünftige Subrosionsraten an ausgewählten Standorten anhand von hydrogeologischen Modellen abgeleitet.

Für die systematische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Gebiete sowie diesen Prozess beeinflussende Faktoren und Randbedingungen wurden zunächst die stratigraphischen Einheiten nach regionalgeologischer Verbreitung zusammengestellt, in denen Subrosionsvorgänge verbreitet auftreten. Dazu wurde in einem ersten Schritt eine Literaturrecherche durchgeführt und die relevante Literatur in eine Literaturverwaltungsprogramm aufgenommen. Die systematische Aufnahme von Gebieten, die von Subrosion betroffen sind, sowie die Beschreibung der in ihnen auftretenden Subrosionserscheinungen erfolgte im zweiten Schritt in einer extra hierfür konzipierten interaktiven Webanwendung mit Datenbank.

Die Vorgehensweise zur Literaturrecherche und die Struktur und Benutzung der Webanwendung sind im Zwischenbericht zur Literaturauswertung, Entwicklung und Verwendung der Webanwendung (Seher et al. 2024) zusammengefasst. Er gibt einen Überblick über das Vorgehen und die Methodik zur Literaturauswertung sowie der Dateneingabe und beinhaltet eine genaue Beschreibung der Webanwendung und ihrer Nutzungsmöglichkeiten, z. B. Mustererkennungen durch Abfragen.

Darauf aufbauend wurden diejenigen Faktoren, die den Prozess der Subrosion beeinflussen, identifiziert und die Wirkungszusammenhänge zwischen ihnen beschrieben. Im Anschluss erfolgte eine qualitative Bewertung ihrer zukünftigen Entwicklung unter Berücksichtigung verschiedener Klimaintervalle. Die Ergebnisse der Arbeiten zu diesem Themenkomplex sind in einem Zwischenbericht (Fahrenholz et al. 2024) zusammengefasst.

Auf der Basis des erarbeiteten Prozessverständnisses wurden nachfolgend zukünftige Subrosionsraten für ausgewählte Standorte anhand von Modellen abgeleitet. Es wurden Modellrechnungen für generische Modelle für eine Salzformation in steiler Lagerung und zusätzlich für das Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung durchgeführt. Basierend auf den Modellrechnungen für gemäßigtes Klima wurden auch die Umsetzungen der betrachteten Klimazustände Permafrost, Vergletscherung, das Vorhandensein glazialer Rinnen und ein potenzieller Meeresspiegelanstieg beschrieben und modelliert. Der Zwischenbericht zur Bewertung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum anhand hydrogeologischer Modelle (Johnen, Flügge & Fahrenholz 2024) enthält eine Beschreibung der zwei Referenzgebiete für die Modellierung, inkl. der verwendeten Parameter und Randbedingungen sowie der Ergebnisse dieser Modellierungen.

Die Ergebnisse der qualitativen (Fahrenholz et al. 2024) und quantitativen (Johnen, Flügge & Fahrenholz 2024) Analysen wurden abschließend zusammengeführt, um Bandbreiten und Ungewissheiten zu diskutieren und festzustellen, inwieweit eine Beurteilung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum möglich ist.

Der vorliegende Synthesebericht enthält eine Zusammenfassung aller Ergebnisse aus dem Vorhaben. In Kapitel 2 werden Subrosion und Verkarstung definiert und die zugrundeliegenden Prozesse und Methoden zur Bestimmung von Subrosionsraten beschrieben. Kapitel 3 fasst die Arbeiten zur Literaturrecherche und -auswertung, inkl. der Erstellung und Nutzung der Webanwendung zusammen und gibt eine Übersicht über die regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Stratigraphischen Einheiten. Die mögliche Entwicklung der Subrosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre ist in Kapitel 4 zusammengefasst, wobei Kapitel 4.1 sich auf die qualitative Bewertung der zukünftigen Entwicklung im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre bezieht und Kapitel 4.4 auf die quantitative Bewertung. Kapitel 5 beschreibt die von der Subrosion ausgehenden Risiken für die Barrierewirkung und Kapitel 6 gibt einen Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten. Im Kapitel 7 befindet sich das Literaturverzeichnis. Im Anhang A.1 befindet sich ein Glossar zu den in der Literatur

beschriebenen Subrosionserscheinungen. Anhang A.2 beinhaltet eine Liste der ausgewerteten und für die Eingabe in die Webanwendung verwendeten Literatur, Anhang A.3 eine Liste der nicht ausgewerteten Literatur, die aber potenziell für die Verwendung in der Webanwendung relevant sein könnte.

2 Subrosion und Verkarstung

Subrosion / Verkarstung bezeichnet die Lösung leicht löslicher Gesteine. Der Prozess ist nicht auf Chloride (z. B. Steinsalz in steiler oder flacher Lagerung) beschränkt, sondern tritt ebenfalls an Sulfaten und Karbonaten auf (Jeannin et al. 2015). In der Reihenfolge ihrer Löslichkeit betrifft sie chloridische Salze, Sulfat- (Anhydrit, Gips) und Karbonatgesteine (Kalksteine, Dolomite). Manche Autoren definieren die Subrosion als unterirdischen Prozess. Eine Ablaugung kann aber auch an der Erdoberfläche auftreten, z. B. bei der oberflächennahen Ablaugung von Kalksteinen (Verkarstung).

Für die Endlagersicherheit kann der Subrosionsprozess je nach Randbedingungen nicht nur das Steinsalz als potenzielles Wirtsgestein oder einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) beeinflussen, sondern durch Hohlräume und Verbruch auch auf angrenzende/ über- oder unterlagernde Schichten wirken und somit die physikalischen und chemischen Eigenschaften der geologischen Barriere oder das Barrieregestein negativ beeinflussen. Aus diesem Grund sind Subrosionserscheinungen nicht nur im Hinblick auf Salzformationen zu untersuchen. Sollten die aufgesättigten Lösungen den Endlagerbereich erreichen, können Komponenten aus Stahl schneller korrodieren und die physikalisch chemischen Eigenschaften der technischen Barrieren negativ beeinflussen (OECD/NEA 2019). Durch die Subrosion kann die Mächtigkeit einer Formation reduziert werden oder es können neue Hohlräume geschaffen werden, die wiederum Wegsamkeiten für den Transport von Radionukliden und/oder anderen Schadstoffen darstellen können.

2.1.1 Beschreibung des Subrosionsprozesses

Die Subrosion erfolgt durch chemische und/oder biologische Lösungsprozesse. Die chemische Lösung erfolgt insbesondere durch den Kontakt des Gesteins mit Wasser. Ihre Intensität ist abhängig vom Lösungsinhalt des Wassers (Salze, Säuren, Basen, aber auch gasförmiger Stoffe (z. B. O₂, CO₂, H₂S)).

In chloridischen Salzgesteinen und Sulfatgesteinen erfolgt dabei eine Hydratation, bei der Ionen aus dem Kristallgitter entfernt werden und dieses dadurch gelockert wird. Generell nimmt die Löslichkeit der chloridischen Salzgesteine und Sulfatgesteine zu, je höher die Temperatur und je geringer das Wasser an der Kontaktfläche zum Gestein mineralisiert ist.

Die Auflösung (und auch die Ausfällung) von Karbonaten oder karbonatischen Anteilen silikatischer Gesteine wird durch das Kalk-Kohlensäure Gleichgewicht bestimmt, siehe u.a. (Mattheß 1994). In Abhängigkeit vom CO₂-Partialdruck kann in Gesteinen wie Kalkstein (CaCO₃) oder Gips (CaSO₄ · 2 H₂O) Calcium gelöst werden. Durch die Lösung von

Kohlendioxid in Wasser entsteht Kohlensäure (H_2CO_3). Die bei der Lösung von Karbonaten gebildeten Hydrogenkarbonate (HCO_3^-) werden mit dem Wasser abtransportiert.

> $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$ $H_2CO_3 + CaCO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2 HCO_3^{-1}$

Die Löslichkeit von Karbonaten steigt mit abnehmender Wassertemperatur und zunehmendem Druck und ist abhängig vom pH-Wert.

Die Lösung durch Mikroorganismen betrifft Sulfatgesteine. Sulfatreduzierende Mikroorganismen nutzen Sulfat als Energiequelle, wobei Sulfid entsteht. "Dadurch beeinflussen sie den Grundwasserchemismus, greifen in die gesteinsbildenden Prozesse ein und können auch die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine verändern" (Mrugalla 2011).

Die Subrosion im Salzgestein führt zu einer starken Erhöhung der Grundwassersalinität im Bereich der Salzformation. Die resultierende Dichteschichtung hat Auswirkung auf die Grundwasserströmung und -richtung (OECD/NEA 2019).

Innerhalb des von der Subrosion betroffenen Gesteinsbereiches erfolgen zudem Umund Auskristallisationen (z. B. Anhydrit, Gips des Hutgesteins) sowie Neubildungen von Mineralen, die eine Volumenveränderung bewirken und ggf. auch eine Kluftbildung verursachen. "Da ein Salzstock meist aus unterschiedlichen Salzgesteinen mit jeweils spezifischen Löslichkeitseigenschaften aufgebaut ist, die am Salzspiegel ausstreichen können, läuft die Subrosion nicht gleichmäßig ab. Daraus ergibt sich das durch Höhen und Senken gekennzeichnete Relief des Salzspiegels" (Mrugalla 2011). Die Subrosion verursacht durch die Umwandlung des Salzes eine Mächtigkeitszunahme des Hutgesteins und eine Tieferlegung des Salzspiegels. Das, sich über dem Salz ausbildende, Hutgestein besitzt unterschiedliche Mächtigkeiten, je nach Zusammensetzung des Salzgesteins und seiner sich lokal unterscheidenden Aufstiegsgeschwindigkeiten. Durch den Abtransport gelöster Bestandteile entstehen Hohlräume, die eine erhöhte Wasserwegsamkeit darstellen können. Sie können jedoch durch Verbruch auch Auswirkungen auf das darüberliegende Gestein haben. Dazu zählen Instabilitäten im Hutgestein oder Subrosionssenken und Erdfälle (Mrugalla 2011).

Im Rahmen des Vorhabens wurden allgemeine Wirkungsabhängigkeiten zwischen subrosionsrelevanten Zuständen, Ereignissen und Prozesse (Features, Events, and Processes = FEP) untersucht (Fahrenholz et al. 2024). Es zeigt sich, dass nur einige wenige Faktoren einen direkten Einfluss auf den Prozess der Subrosion haben. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt.



Abbildung 1: Faktoren, die direkten Einfluss auf den Prozess der Subrosion nehmen

Diese direkt auf die Subrosion wirkenden Faktoren werden ihrerseits von einer Vielzahl anderer Faktoren beeinflusst. Sie lassen sich den Bereichen der Hydrologie/Hydrogeologie, der Geomechanik, der Hydrochemie und der Biologie/Mikrobiologie zuordnen. Unter diesen nimmt die Hydrologie/Hydrogeologie eine zentrale Position ein, weil sie maßgeblich die Grundwasserchemie im Kontaktbereich sowie die dort zur Verfügung stehenden Energiequellen und Nährstoffe beeinflusst und damit auch das Ausmaß der Subrosion an sich.

Die Wirkungszusammenhänge zwischen den einzelnen Faktoren für steil und stratiform lagernde Steinsalzformation zeigt Abbildung 2. Innerhalb der Darstellung kennzeichnen die braunen Pfeile die geomechanischen Prozesse, die blauen die hydrologischen/-geologischen und die grünen die (mikro-)biologischen. Die Einteilung des Gesteins in oberflächennahen Schichten (Biosphere (BP), hellgrün), Deckgebirge (Other Geological Units (OU), hellbraun) und ungestörtes Salzgestein (Host Rock (HR), hellblau) folgt derjenigen der Salt FEP-Database (Freeze 2020).

Die Faktoren wirken in den oberflächennahen Schichten (BP, hellgrün), dem Deckgebirge (OU, hellbraun), zu dem auch das Hutgestein gehört, und dem ungestörten Salzgestein (HR, hellblau). Die klimatischen Bedingungen im oberen Bereich des Schaubildes (blau) wirken auf direktem oder indirektem Weg durch Be-/Entlastung und Schmelzwasseranfall auf sämtliche dargestellte Faktoren. Eine Ausnahme bildet die Salz-Genese. Diese wird zwar bei Bildung des Salzes von den klimatischen Bedingungen beeinflusst, in der Folgezeit hat das Klima für die Zusammensetzung des ursprünglichen Salzes jedoch keine Relevanz. Anschließende Veränderungen in der Zusammensetzung, Oberfläche oder Geometrie des Salzkörpers werden dem Diapirismus und der Subrosion zugeschrieben. Die Subrosion findet entweder am Salzgestein oder an verkarstungsfähigem Gestein statt, wobei die Mikroorganismen lediglich bei der Verkarstung beteiligt sind. Die dünnen Pfeile zeigen Rückkopplungen, die von einer stattgefundenen Subrosion ausgehen können. Bei den blau unterlegten Faktoren handelt es sich um diejenigen, die bestimmen, ob und in welcher Intensität eine Subrosion stattfindet.

Die für steil lagernde Salzformationen zusammengestellten Faktoren gelten im Grunde auch für stratiforme Salzformationen. Unterschiede ergeben sich aus der Lösungsanfälligkeit des Karstes und/oder verkarstungsfähiger oberflächennaher Schichten (z. B. Molasse), die zu besonders schnellen Fließgeschwindigkeiten führen und die Stabilität des Deckgebirges beeinflussen können. Die sich ergebenden Unterschiede in den Fließwegen (verkarsteter Gesteinsbereich, Tongestein) lassen sich durch eine entsprechende Charakterisierung der hydraulischen Faktoren (Fließwege, Durchflussrate) abbilden.



Abbildung 2: Wirkungszusammenhänge subrosionsrelevanter Faktoren in steilen und stratiformen Salzformationen (Pfeilfarbe: Geomechanische Faktoren braun, hydrologische/-geologische Faktoren blau, (mikro-) biologische Faktoren grün)

2.1.2 Subrosionsrate

Zur Bestimmung der Subrosionsrate können verschiedene Methoden herangezogen werden. Generell lässt sich die Subrosionsrate aus der Mächtigkeitsreduktion der subrodierten Einheit über den Wirkungszeitraum bestimmen, sofern diese bekannt sind. Sie wird im Allgemeinen in mm a⁻¹ angegeben. Meist ist der Wirkungszeitraum jedoch nicht bekannt, so dass es dann nur möglich ist, die Reduktion der Mächtigkeit anzugeben. In diesem Fall kann lediglich angegeben werden, in welchem Ausmaß die Mächtigkeit der subrodierten Einheit verringert wurde (in m, m³ oder %). In der Literatur liegen oftmals lediglich Angaben zur Absenkung an der Oberfläche vor. Diese kann ebenfalls einen Aufschluss auf die unterirdisch gelösten Mächtigkeiten der subrodierten Einheiten geben.

Liegen Angaben über die Lösungszusammensetzung der Grund-, Quell- oder aus bergbaulichen Tätigkeiten stammenden Wässer (z. B. angebohrte Formationswässer) und die hydraulische Situation vor, kann die Subrosionsrate auch aus der geochemischen Zusammensetzung der Wässer und der Fließ-, Quell- oder Pumpgeschwindigkeit berechnet werden. Geochemische Modellrechnungen können dabei Aufschluss über die Lösungskinetik geben. Auch ist es möglich, mithilfe von hydrogeologischen Modellen die Subrosionsrate zu bestimmen. Zur Berechnung der Subrosionsrate wird die in das Modell eingetragene Salzmasse über den jeweiligen Rand mit dem Kontakt zu der subrodierten Einheit ermittelt. Dabei lässt sich der diffusive Massenstrom der wässrigen Lösung durch das Fick'sche Gesetz beschreiben, ggf. müssen advektive Ströme berücksichtigt werden. Sollte die subrodierte Einheit selbst im Modell abgebildet sein, kann über eine Massenbilanz die Subrosionsrate bestimmt werden.

Die Bestimmung der Subrosionsrate kann direkt oder indirekt erfolgen. Eine direkte Bestimmung ist dann möglich, wenn der Wirkungszeitraum kurz und rezent ist, z. B. bei oberflächennaher rezenter Subrosion oder der anthropogen induzierten Subrosion im Rahmen von bergbaulichen Tätigkeiten. Meist ist jedoch eine direkte Bestimmung von Subrosionsraten wegen der langen Wirkungszeiträume nicht möglich.

Die Bestimmung der Subrosionsraten ist durch die Vielzahl der zugrundeliegenden Annahmen immer mit Ungewissheiten behaftet, vor allem, wenn sie über lange Wirkungszeiträume ermittelt wird.

In der ausgewerteten Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zur Subrosionsrate. Bei detaillierten Untersuchungen, wie sie z. B. für den Standort Gorleben durchgeführt worden sind, sind genaue Angaben für unterschiedliche Zeiträume angegeben. Oft sind jedoch nur allgemeine Angaben zu finden, z. B. Absenkungsbeträge an der Oberfläche oder Anteile der subrodierten Einheit von der gesamten Einheit.

2.1.3 Subrosionserscheinungen

Die Lösung von Gestein kann das Oberflächenrelief eines Gebietes und/oder seine strukturellen Eigenschaften und Porosität verändern und damit Einfluss auf die Hydrologie bzw. Hydrogeologie und die Erosionsanfälligkeit nehmen. Die Größe, Geometrie und Tiefenwirkung der Subrosionserscheinungen sind abhängig vom Subrosionsverlauf (Intensität, Dauer), der wiederum von den klimatischen Bedingungen (Wassermenge, -chemie) und den Eigenschaften des Gesteins abhängt (Festigkeit, Subrosionsanfälligkeit). Die zeitlich und räumlich variablen Randbedingungen, die den Subrosionsprozess beeinflussen, verursachen eine Vielzahl von Subrosionserscheinungen. Einige davon treten lediglich oberflächennah auf (z. B. Karrenbildung), andere reichen in große Tiefen (z. B. Höhlensysteme), einige sind lediglich kleinräumig ausgeprägt (z. B. Erdfall), andere haben einen weiträumigen Einfluss (z. B. Höhlensysteme, Senken). Einige dieser Subrosionserscheinungen sind direkter Natur durch Subrosion der Einheit, in der die Subrosionserscheinung auftritt (z. B. Schlotten), andere entstehen indirekt durch Subrosion einer darunterliegenden Einheit (z. B. Erdfall).

Eine Übersicht über die in der ausgewerteten Literatur beschriebenen Subrosionserscheinungen mit Erläuterungen (Glossar) befindet sich im Anhang A.1.

3 Regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten in Deutschland

3.1 Methoden

Die regionalgeologische Zusammenstellung der stratigraphischen Einheiten, in denen Subrosionsvorgänge auftreten, erfolgte anhand einer Literaturrecherche. Diese zielte darauf ab, Vorkommen, Beschreibungen und Ursachen von in Deutschland vorkommenden Subrosionserscheinungen zu erfassen. Dazu wurde die Literatur zunächst in die Literaturverwaltungssoftware Citavi aufgenommen. Eine interaktive Webanwendung mit einer Datenbank wurde erstellt, in der die identifizierten stratigraphischen Einheiten nach regionalgeologischer Verbreitung erfasst wurden. Diese berücksichtigt neben den Angaben zu Verbreitung (regionale Verbreitung inkl. Teufe), Alter, Entstehungstiefe, Art der Lösungserscheinung, Ausmaß der Lösungserscheinung und deren Einfluss auf die stratigraphischen Einheiten, die seitens BGE als Teilgebiete ausgewiesen wurden, auch Angaben zur tektonischen und hydrogeologischen Situation. Der Aufbau der Webanwendung, die Eingabe von Daten und die Filterfunktionen und Abfragemöglichkeiten sind im Zwischenbericht zur Webanwendung beschrieben (Seher et al. 2024). Um eine Verbindung zwischen den in der Literatur beschriebenen Subrosionserscheinungen und den von BGE in (BGE 2020) ausgewiesenen Teilgebieten zu ermöglichen, wurde ein GIS¹-Projekt erstellt, das nur zu internen Arbeitszwecken genutzt wurde. Es ermöglichte die Zuordnung der in der Literatur beschriebenen Subrosionserscheinungen zu naturräumlichen Großeinheiten und des Naturraums dritter Ordnung von Ssymank (BfN 2017), zu geographischen Lagen und zu den ausgewiesenen Teilgebieten. Die Zusammenstellung (Flügge et al. 2024) erfolgte durch Abfragen in der in diesem Vorhaben erstellten Webanwendung. Während der Dateneingabe in die Webanwendung und der Auswertung bei der Bearbeitung des Vorhabens sind einige Aspekte aufgefallen, die die Eingabe und Auswertung erschwert haben. Diese Hinweise finden sich im Zwischenbericht zur Webanwendung (Seher et al. 2024) und im Zwischenbericht zur regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten in Deutschland (Flügge et al. 2024).

3.1.1 Literaturrecherche und -auswertung

Für die Zusammenstellung und Bearbeitung der ausgewählten Literatur wurde die Software Citavi verwendet. Hier wurden alle frei verfügbaren und erworbenen Dokumente direkt im PDF-Format eingepflegt oder es wurde im Fall von (Hardware)-Literatur auf

¹ Geographisches Informationssystem

den physischen Standort verwiesen. Bei der anschließenden Durchsicht der Literatur wurden alle wesentlichen Informationen zum Thema Subrosion in Citavi zusammengestellt und diese für den Eingang in die Webanwendung entsprechend markiert. Auch die nach Bearbeitung als nicht relevant eingestufte Literatur wurde in Citavi als solche gekennzeichnet. Die detaillierte Vorgehensweise ist im Zwischenbericht zur Webanwendung beschrieben (Seher et al. 2024).

3.1.2 Webanwendung

Die Webanwendung, die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelt wurde, ist im Zwischenbericht zur Literaturauswertung, Entwicklung und Verwendung der Webanwendung (Seher et al. 2024) beschrieben. In der dazugehörenden Datenbank wurden alle relevanten Informationen abgelegt, so dass sie über die Webanwendung einfach und schnell gefunden werden können. Die Eingaben basieren ausschließlich auf der zitierten Literatur und beinhalten keine Interpretation der Informationen. Für das Vorhaben relevante Textstellen wurden eingegeben und für jeden Eintrag das dazugehörige Literaturzitat ausgewiesen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Datenbasis aus der Literatur nicht in jedem Fall ausreichend war, um alle vorgesehenen Dateneingabefelder der Webanwendung zu füllen. Die Einträge zeigen in diesem Fall Datenlücken, die ggf. zu einem späteren Zeitpunkt bei entsprechender Datenlage vervollständigt werden können.

Der Bericht beschreibt die technische Spezifikation der Webanwendung und die Anforderungen an das Hostsystem. Die Webanwendung unterteilt sich in den Bereich "Home" und "Dateneingabe". Im ersteren können die Informationen der Webanwendung gesucht, dargestellt, gedruckt und als PDF exportiert werden. Angemeldete Nutzer haben auch Zugang zu letzterem Bereich. Dort können Informationen neu angelegt, bearbeitet oder gelöscht werden. In beiden Bereichen ist es möglich, unterschiedliche Ansichten zu erzeugen und auf die Einträge Filter- sowie Sortieroptionen anzuwenden. Die genaue Funktionsweise der Abfragen innerhalb der Webanwendung wird im Bericht erläutert. Ebenso wird auf die Qualitätssicherung der eingegebenen Daten eingegangen. Die Dateneingaben wurden in Geographische Lagen (GL) und Subrosionserscheinungen (S) unterschieden. Einer geographischen Lage können dabei mehrere Subrosionserscheinungen zugeordnet sein.

3.1.3 Geographisches Informationssystem

Zur Verortung der Subrosionsprozesse und geographischer Lagen wurden Geographische Informationssysteme (GIS) verwendet. Dazu wurde ArcGIS (ESRI 2024) und QGIS (QGIS 2024) für verschiedene Workflows verwendet. In ArcGIS wurde Kartenmaterial verschiedener Institutionen wie der BGR, den geologischen Landesämtern, LfU Bayern, LfULG Sachsen, LAGB Sachsen-Anhalt, LBEG Niedersachsen und HLNUG Hessen als Kartenlayer gesammelt. Das Kartenmaterial beinhaltete unter anderem Gefahrenkarten für Erdfälle und Senkungsmulden/Senkungsgebiete, bzw. Karten der subrosionsfähigen Gesteine und Verkarstungserscheinungen.

In QGIS und/oder ArcGIS wurden die Naturräume dritter Ordnung nach Ssymank (BfN 2017), die ermittelten Teilgebiete (BGE 2020) und die Bundesländergrenzen als Hintergrundkarten integriert, um in der Literatur genannte Lokalitäten verorten zu können. In QGIS wurden dazu Layer mit einer Deutschlandkarte (OSM über die Erweiterung QuickmapService) verwendet. Um gezielt Städte, Regionen oder Gebiete in Bezug zu den Naturräumen bringen zu können, wurden diese mittels der Erweiterung "GeoCoding" gesucht. So konnten die geographischen Lagen und Subrosionserscheinungen den Naturräumen und den Teilgebieten zugeordnet werden und dementsprechend in der Webanwendung verknüpft werden.

3.2 Tabellarische regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten

Für die systematische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen Gebiete in Deutschland und der an Salzstöcken in Deutschland ermittelten Subrosionsraten wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zu Subrosionserscheinungen und -raten durchgeführt. Es wurden 284 Literaturstellen in die Literaturverwaltungssoftware CITAVI aufgenommen, wovon 95 zur weiteren Auswertung herangezogen wurden (Anhang A.2). Weitere 40 Literaturstellen wurden als potenziell relevant für die Eingabe in die Webanwendung identifiziert, jedoch im Rahmen des Vorhabens nicht ausgewertet. Diese sind im Zwischenbericht zur Webanwendung (Seher et al. 2024) und im Anhang A.2 dieses Berichts aufgelistet. 67 geprüfte Literaturstellen, die keine für das Vorhaben relevanten Angaben zur Subrosion enthielten, wurden nicht in die Webanwendung aufgenommen. Diese sind ebenfalls im Zwischenbericht zur Webanwendung (Seher et al. 2024), nicht aber im Anhang dieses Berichtes aufgelistet.

Die Angaben zu Subrosionserscheinungen und Subrosionsraten in Deutschland aus der ausgewerteten Literatur wurden in die Webanwendung aufgenommen. Die Webanwendung enthält 78 Einträge zu geographischen Lagen beobachteter Subrosionserscheinungen und 270 Einträge zu Subrosionserscheinungen selbst. Der Zwischenbericht zur Regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten in Deutschland (Flügge et al. 2024) gibt eine tabellarische Übersicht über die regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten in Deutschland.

Subrosionserscheinungen treten in den meisten deutschen Bundesländern auf. Für 13 Bundesländer sind Einträge zur geographischen Lage in der Webanwendung vorhanden: Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg, Bremen, Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen. Lediglich für drei Bundesländer sind keine Einträge in der Webanwendung vorhanden: Berlin, Rheinland-Pfalz und das Saarland. Dementsprechend sind Subrosionserscheinungen auch in den meisten Naturräumen beobachtet worden. Die 64 Naturräume, für die Einträge vorliegen, lassen sich den folgenden naturräumlichen Großlandschaften zuordnen: Alpen, Alpenvorland, Deutsche Meeresgebiete - Nordsee, Deutsche Meeresgebiete - Ostsee, Nordostdeutsches Tiefland, Nordwestdeutsches Tiefland, Südwestdeutsches Mittelgebirge / Stufenland, Westliches Mittelgebirge und Östliches Mittelgebirge. Nur für das Westliche und das Östliche Mittelgebirge liegen nicht für alle naturräumlichen Haupteinheiten Einträge vor, für die anderen genannten Großlandschaften wurden in allen Haupteinheiten Subrosionserscheinungen beschrieben. Für neun naturräumliche Haupteinheiten des Westlichen Mittelgebirges liegen keine Einträge in der Webanwendung vor. Dies sind: Hunsrück (D42), Moseltal (D43), Mittelrheingebiet (mit Siebengebirge) (D44), Eifel und Vennvorland (D45), Gutland (Bitburger Land) (D49), Pfälzisch-Saarländisches Muschelkalkgebiet (D50), Pfälzer Wald (Haardtgebirge) (D51) und Saar-Nahe-Berg- und Hügelland (D52). Für das Östliche Mittelgebirge fehlen Einträge für die Haupteinheit Oberpfälzer und Bayerischer Wald (D63).

Die Einträge zur geographischen Lage können mehreren stratigraphischen Einheiten zugeordnet sein (allgemeine Beschreibung der dort vorkommenden Einträge), während ein Subrosionseintrag in der Webanwendung immer nur einer stratigraphischen Einheiten zugeordnet ist (in der die Subrosionserscheinung beobachtet wurde). Von den 270 Einträgen zu Subrosionserscheinungen lassen sich die betroffenen stratigraphischen Einheiten Einheiten den folgenden Ären, bzw. Perioden zuordnen²:

- Proterozoikum: 8
- Paläozoikum: 231, davon
 - Perm: 152
- Mesozoikum: 120, davon
 - o Trias: 44
 - o Jura: 19
 - o Kreide: 11

² Einträge können lediglich einer Ära zugeordnet sein (z. B. Paläozoikum), oder genauere Angaben enthalten (z. B. Paläozoikum, Perm). Daher entspricht die Summe der Einträge für die Perioden einer Ära nicht zwingend der Anzahl der Einträge für die diese Ära.

- Känozoikum: 47, davon
 - o Tertiär: 3
 - o Quartär: 2
- Ohne Zuordnung: 15
 - Großräumige Einträge: 4 (Sachsen, Karstgebiete in Deutschland, Thüringische Gipshöhlen, Gipshöhlen Südharz)
 - Ausland: 1 (Triest)
 - Stratigraphie unbekannt: 10 (meist Rückschlüsse möglich)

Die meisten Subrosionserscheinungen wurden für permische Salzformationen und mesozoische Einheiten beschrieben.

Die in der Literatur beschriebenen von der Subrosion betroffenen Einheiten lassen sich regionalgeologisch grob wie folgt unterteilen:

- Grundgebirge Sachsen
- Paläozoikum in Sachsen-Anhalt
- Paläozoikum im Rheinischen Schiefergebirge
- Permische Salzformationen in flacher Lagerung
- Permische Salzformationen in steiler Lagerung
- Triassische Salinarformationen
- Jurassische Salinarformationen
- Karstgebiete Deutschlands
- Subrosionserscheinungen ohne stratigraphische Zuordnung
- Von Subrosion betroffene Einheiten außerhalb von Deutschland

In den folgenden Kapiteln ist jeweils eine grobe tabellarische Übersicht über die beschriebenen Einheiten und Subrosionserscheinungen gegeben (Kap. 3.2.1 bis Kap. 3.2.7). Details finden sich in der Webanwendung und im Zwischenbericht zur regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten in Deutschland (Flügge et al. 2024).

3.2.1 Grundgebirge Sachsen

Tabelle 1:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen im Grundgebirge Sachsens

Regionale Verbreitung:	Sachsen		
Kurzbeschreibung:	Grundgebirge		
Stratigraphie:	Devon bis Karbon		
Allgemeine Angaben:			
Gliederung: Grundgebirge, Mola	assestockwerk, Deckgebirge, Hüllstockwerk		
Tektonik:			
Europäische Varisziden: Saxot ment	huringisches Becken in Sachsen bestimmendes Ele-		
Gebankte Karbonate, Gebirgsb	ildungsprozesse, Verschuppungen, Störungen		
Hydrogeologie:	Hydrogeologie:		
tertiäre Erosion, Freilegung der oberdevonischen Kalklinsen, Eindringen von Sicker- wässern in das vorhandene Kluftnetz, Verkarstung			
Betroffene Gesteine	Karbonate		
Subrosionszeitraum:	fossil bis fortlaufend		
Subrosionsrate:	keine Angabe		
Entstehungsteufe:	tiefliegend, von känozoischen Sedimenten bis zu 100 m überlagert, bis an die Oberfläche		
Subrosionserscheinungen:	 fossiler Karst (untergeordnet rezent), begraben (bedeckter Paläokarst), teilweise erst bergmän- nisch erschlossen auch potenzielle Verkarstung aufgeführt 		

3.2.2 Paläozoikum in Sachsen-Anhalt

Tabelle 2:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen im Paläozoikum Sachsen-Anhalts

Regionale Verbreitung:	Harz	
Kurzbeschreibung:	Grundgebirge	
Stratigraphie:	Devon	
Allgemeine Angaben:		
keine Angabe		
Tektonik:		
Einfluss des Harzes		
Hydrogeologie:		
oberflächennaher Einfluss durch Klima und Grundwasser		
Betroffene Gesteine	Karbonate	
Subrosionszeitraum:	Tertiär (tropische/subtropische Klimaverhältnisse) und	
	jünger	
Subrosionsrate:	keine Angabe	
Entstehungsteufe:	15 m bis an die Oberfläche	
Subrosionserscheinungen:	 intensive Lösungsverwitterung und Verkarstung 	

3.2.3 Paläozoikum im Rheinischen Schiefergebirge

Tabelle 3:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen im Paläozoikum des Rheinischen Schiefer-
gebirges

Regionale Verbreitung:	Sauerland (Hönnetal)	
Kurzbeschreibung:	Grundgebirge	
Stratigraphie:	Devon	
Allgemeine Angaben:		
Naturdenkmal		
Tektonik:		
keine Angabe		
Hydrogeologie:		
keine Angabe		
Betroffene Gesteine	Kalkstein	
Subrosionszeitraum:	keine Angabe	
Subrosionsrate:	keine Angabe	
Entstehungsteufe:	keine Angabe	
Subrosionserscheinungen:	Verkarstung, Höhlen, Hydrologie	

3.2.4 Permische Salzformationen in stratiformer Lagerung

3.2.4.1 Niedersachsen

Tabelle 4:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratifor-
mer Lagerung in Niedersachsen

Regionale Verbreitung:	Weserbergland, Bad Pyrmont		
Kurzbeschreibung:	Salzformationen in stratiformer Lagerung		
Stratigraphie:	Perm bis Trias		
Allgemeine Angaben:			
keine Angabe			
Tektonik:	Tektonik:		
gasdruckbegünstigter (tiefenvulkanisches CO ₂) Salzwasseraufstieg an Störungen			
Hydrogeologie:			
Tiefenwasserbewegungen durch Verwerfungen und Störungen, beeinflusst durch tie-			
Betroffene Gesteine Steinsalz			
Subrosionszeitraum:	aktiv		
Subrosionsrate:	keine Angabe		
Entstehungsteufe:	bis 800 – 1100 m u. NN durch Störungen		
Subrosionserscheinungen:	Erdfälle, Deformationen, Klüftungen		

3.2.4.2 Sachsen-Anhalt

Tabelle 5:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratifor-
mer Lagerung in Sachsen-Anhalt

Regionale Verbreitung:	Calvörde-Scholle, Staßfurt, Halle-Leipziger Plat- tenland, Mansfelder Mulde
Kurzbeschreibung:	Salzformationen in stratiformer Lagerung
Stratigraphie:	Perm
Allgemeine Angaben:	
keine Angabe	
Tektonik:	
Verfaltungen, Antiklinalstrukturen, Sättel und Mulden, Lagerungsstörungen im Salinar	
Hydrogeologie:	
hydraulische Kontakte des Salinars mit Aquiferen, Bergbau, Verwerfungsspalten	
Betroffene Gesteine	Beckenfazies des salinaren Zechstein
Subrosionszeitraum:	seit Aufstieg des Salinars bis zu bergbaulichen Aktivi- täten
Subrosionsrate:	bis 20 mm/a, Senkungsbeträge zwischen 22-28 mm/a
Entstehungsteufe:	bis 600 m u GOK
Subrosionserscheinungen:	flächenhafte Subrosion, verkarstetes Hutgestein, Sub- rosion durch Bergbau, Wassereinbrüche, Tagesbrü- che, Auslaugungssenken

3.2.4.3 Karstgebiete des Harzes und Harzvorlandes

Tabelle 6:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratifor-
mer Lagerung im Harz und dem Harzvorland

Regionale Verbreitung:	Harz und Harzvorland
Kurzbeschreibung:	Salzformationen in stratiformer Lagerung
Stratigraphie:	Perm (vereinzelt Trias im Nordwestharz/Südharz)
Allgemeine Angaben:	
Hauptsächlich Gipskarstlandschaft des Südharzes	
Bestimmt durch Glazial/Interglazial-Zyklen und tektonische Situation, die die lokale Hydrologie und Geomorphologie bestimmt	
Tektonik:	
Beeinflussung durch Harz (Hebungen, Verwerfungen, etc.), Störungen/Verwerfungen, Schichtfugen/Klüfte, halokinetische Vorgänge	
nördl. Harzvorland: landschaftsgliedernde Sättel, südl. Harzvorland: Stufen- und Hü- gelland	
Hydrogeologie:	
Oberflächennahe Gewässer und Grundwasser, Schichtfallen im Zechstein, Schwan- kungsbereich des Grundwassers, Kluft-/Störungszonen	
Betroffene Gesteine	Gipskarst (Sulfat- und Salzgestein), Karbonate (auch siliziklastisch)
Subrosionszeitraum:	fossil bis rezent
Subrosionsrate:	wenige Angaben, bis zu 30 mm/a im Südharz
Entstehungsteufe:	Oberfläche bis ca. 458 m u GOK
Subrosionserscheinungen:	flächenhafte Subrosion, charakteristische Karstland- schaft mit vielen Subrosionsformen, Dolinen, etc., Re- liefbildung
3.2.4.4 Thüringen

Tabelle 7:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratifor-
mer Lagerung in Thüringen

Regionale Verbreitung:	Thüringer Becken, Thüringer Wald, Schmalkalden			
Kurzbeschreibung:	Salzformationen in stratiformer Lagerung			
Stratigraphie:	Perm (Trias)			
Allgemeine Angaben:				
60 % der Landesfläche werden	durch subrodierbare Gesteine unterlagert.			
Tektonik:				
Plattenland, Landschaft glazial birge	geprägt, subrosiv geprägte Talauen; Bruchschollenge-			
Hydrogeologie:				
Hydrologie, durch Klüfte eindrin	gende Tageswässer			
Betroffene Gesteine	Salzgesteine (Karbonate)			
Subrosionszeitraum:	ab Oberkreide bis rezent			
Subrosionsrate:	2 mm/a (Thüringer Wald)			
Entstehungsteufe:	oberflächennah und tiefer			
Subrosionserscheinungen:	Gipskarstlandschaften, Erdfälle, Niederungsgebiete, kleinräumig, weniger flächenhaft			
	 nackter und wenig bedeckter Gipskarst (Sulfat- karst) im Zechsteinausstrich des Harzsüdrandes und der Kyffhäuserumrandung bedeckter Gips- und/oder Salzkarst im Zech- steinsalinar unter mächtiger Buntsandsteinbede- ckung nackter und wenig bedeckter Kalkkarst im Mu- schelkalk des Thüringer Beckens 			

3.2.4.5 Bayern

Tabelle 8:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratifor-
mer Lagerung in Bayern

Regionale Verbreitung: Fränkisches Becken, Rhön			
Kurzbeschreibung: Salzformationen in stratiformer Lagerung			
Stratigraphie:	Perm (auch Jura und Kreide)		
Allgemeine Angaben:			
keine Angabe			
Tektonik:			
kleinräumiges salinares Teilbecken, alpidischer Einfluss, Verwerfungen			
Hydrogeologie:			
keine Angabe			
Betroffene Gesteine	keine Angabe		
Subrosionszeitraum:	keine Angabe		
Subrosionsrate:	keine Angabe		
Entstehungsteufe:	keine Angabe		
Subrosionserscheinungen:	flächenhafte Subrosion, Frickenhäuser See		

3.2.4.6 Hessen

Tabelle 9:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratifor-
mer Lagerung in Hessen

Regionale Verbreitung:	Hessische Senke, karstgefährdete Gebiete	
Kurzbeschreibung:	Salzformationen in stratiformer Lagerung	
Stratigraphie:	Perm	
Allgemeine Angaben:		
keine Angabe		
Tektonik:		
Beckenstruktur mit Subsenken und Schwellen, teilw. halokinetische Bewegungen		
Hydrogeologie:		
zirkulierende Grundwässer an tektonischen Verwerfungen		
Betroffene Gesteine	Salzgestein, Karbonate	
Subrosionszeitraum:	seit der großräumigen Hebung Mitteleuropas im älte-	
	ren Tertiär und der nachfolgenden Erosion bis rezent	
Subrosionsrate:	keine Angabe	
Entstehungsteufe:	bis 700 m u GOK (400 m u NN)	
Subrosionserscheinungen:	Salinar: Subrosionsbrekzien, flächenhafte Subro- sion, Depressionen, Dolinen, etc.	
	Karbonate: nackter und seichter Karst	

3.2.4.7 Alpines Salinar

Tabelle 10:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in stratifor-
mer Lagerung im alpinen Salinar

Regionale Verbreitung:	Salzberge, Bad Reichenhall			
Kurzbeschreibung: Salzformationen in stratiformer Lagerung				
Stratigraphie:	hauptsächlich Perm			
Allgemeine Angaben:				
keine Angabe				
Tektonik:				
keine Angabe				
Hydrogeologie:				
Subrosion durch natürliches Gr	undwasser, Residualgesteine schützen tieferliegendes			
Steinsalz, bergmännischer Einf	luss			
Betroffene Gesteine	Haselgebirge, Salzgesteine			
Subrosionszeitraum:	keine Angabe			
Subrosionsrate:	keine Angabe			
Entstehungsteufe:	bis 500 m u GOK			
Subrosionserscheinungen:	Ablaugung, Hutgesteinsbildung			

3.2.5 Permische Salzformationen in steiler Lagerung

Tabelle 11:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in permischen Salzformationen in steiler La-
gerung

Regionale Verbreitung:	Nord- und Mitteldeutschland			
Kurzbeschreibung:	Salzformationen in steiler Lagerung			
Stratigraphie:	Perm			
Allgemeine Angaben:				
Salzstöcke und verwandte Salz	strukturen (Gorleben und Morsleben gut untersucht)			
Tektonik:				
Halokinese, Scheitelstörungen,	Verwerfungen, Überlagerung			
Hydrogeologie:				
Kontakt zum Grundwasser, tekt	onische Bruchzonen, glaziale Rinnen, klimatischer Ein-			
fluss				
Betroffene Gesteine	Salzgesteine			
Subrosionszeitraum:	frühestens seit Mitteljura (Gorleben) bis rezent			
Subrosionsrate:	stärkste Subrosion im Diapirstadium, bis 5 mm/a			
	(Morsleben)			
Entstehungsteufe:	oberflächennah bis 450 m u GOK (Delmenhorst/Oster-			
	holz)			
Subrosionserscheinungen:	flächenhafte Subrosion, Hutgesteinsbildungen, Ver-			
	stürze/Umstapelungen, Erdfälle, etc.			

3.2.6 Triassische und jurassische Salinarformationen

Tabelle 12:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in triassischen Salzformationen

Regionale Verbreitung:	Norddeutschland, Weserbergland, Brandenburg Sachsen-Anhalt, Thüringen				
Kurzbeschreibung:	Salinarformationen				
Stratigraphie:	Röt/Keuper (bis Jura) in Verbindung mit Perm				
Allgemeine Angaben:					
keine Angabe					
Tektonik:					
Salinarstrukturen, Gipsablaugu	ng				
Hydrogeologie:					
Halokinese, Diapirismus, Störu	ngen				
Betroffene Gesteine	Salzgesteine				
Subrosionszeitraum: keine Angabe					
Subrosionsrate:	keine Angabe				
Entstehungsteufe:	bis 300 m u GOK (Brandenburg/Calvörde)				
Subrosionserscheinungen: flächenhafte Subrosion, Dolinen					

3.2.7 Karstgebiete Deutschlands

Tabelle 13:Zusammenfassung der in der Literatur beschriebenen Angaben zu
Subrosionserscheinungen in Karstgebieten

Regionale Verbreitung:	Norddeutschland, Weserbergland, Brandenburg,
	Sachsen-Anhalt, Thuringen
Kurzbeschreibung:	Karstgebiete Deutschlands
Stratigraphie:	Sachsen: Paläozoikum (Molasse), Jura bis Perm
	Schleswig-Holstein: Kreide
	Niedersachsen: Jura
	Weserbergland: Jura, Kreide
	Münsterland: Trias, Jura, Kreide
	Mitteldeutschland: Trias, Jura
	Nordwestharz: Kreide
	Thüringen: Trias
	Hessen: Trias, Tertiär
	Baden-Württemberg: Trias, Jura, Tertiär
	Fränkische und schwäbische Alb: Jura
	Alpen: Trias, Känozoikum

Allgemeine Angaben:

"Die Karstgebiete Deutschlands lassen sich unter geologischen Gesichtspunkten in sieben regionale Einheiten untergliedern:" /Kempe 2005, S.45/

- Weserbergland und Umrahmung des Münsterländer Beckens (Kreide- und Jurakalke)
- Rheinisches Schiefergebirge und Harz (Devonische Kalke)
- Randbereiche der variskischen Gebirgsrümpfe (Kalke, Dolomite und Anhydrit- bzw. Gipsgesteine des Zechsteins)
- Gebiet zwischen Hannover, Halle und Basel (Muschelkalk und Keuperkalke)
- Fränkische Alb (malmzeitliche Kalke und Dolomite)
- Schwäbische Alb (malmzeitliche Kalke und Dolomite)
- Bayrische Alpen (triassische und kreidezeitliche Kalke)

Tektonik:

meist sedimentäre Formationen mit gebirgsbildender Überprägung (Faltungen/Verwerfungen), Schichtstufenlandschaften, Alpen/Molasse

Hydrogeologie:

Beginn der Subrosion durch Grundwasserzirkulation an Störungen/Klüften oder oberflächennah, klimatischer Einfluss (warme Phasen begünstigt)

Betroffene Gesteine	Karbonate, Sulfatgesteine			
Subrosionszeitraum:	fossil (meist ab Kreide/Tertiär (z. B. Hessen, Münster- land)) bis rezent			
Subrosionsrate:	meist nur in % oder m angegeben ohne Zeitraum			
Entstehungsteufe:	oberflächennah bis 400 m u GOK (Sachsen), oft nur Mächtigkeit der Schichten angegeben			
Subrosionserscheinungen:	 Karbonatkarst (Sulfatkarst) Seichter und tiefer Karst mit allen charakteristischen Subrosionserscheinungen 			

3.3 Zusammenfassung der beobachteten Subrosionsteufen

Für die Teufen der beobachteten Subrosionserscheinungen wurden 161 Einträge in die Webanwendung aufgenommen. Diese lassen sich grob nach Tabelle 14 gliedern. Oberflächennahe Subrosionserscheinungen wurden an proterozoischen Gesteinen des Grundgebirges Sachsens beschrieben. In paläozoischen Gesteinen in stratiformer Lagerung treten Subrosionserscheinungen vor allem in Mitteldeutschland in der Nähe der Oberfläche bis in mehrere hundert Meter Teufe auf. Meist sind diese an tektonische Störungen oder Verwerfungen gebunden, an denen Grundwasser zirkulieren und damit die Lösung der Gesteine verursachen kann. In steil lagernden paläozoischen Formationen (Salzstöcke) tritt Subrosion in Abhängigkeit von der Teufe der Salinarformation oberflächennah bis in 450 m Teufe auf. Subrosionsprozesse wirken hier entweder flächenhaft oder lokal begrenzt an Scheitelstörungen. In Karstgebieten wurden Subrosionserscheinungen meist oberflächennah oder in Teufen von wenigen hundert Metern Teufe, in mesozoischen Salinarformationen bis in Teufen von wenigen hundert Metern beobachtet. Känozoische Subrosionserscheinungen wurden oberflächennah in der alpinen Molasse beschrieben.

Tabelle 14:Grobgliederung der in der ausgewerteten Literatur beschriebenen Sub-
rosionsteufen

(NN = Normalnull, GOK = Geländeoberkante,	* keine weitere Einheitsangab	e (z. B.
bezogen auf NN oder GOK)		

Stratigraphie	Kurzbeschreibung	Geographische Lage	Subrosionsteufe
Proterozoikum	Grundgebirge Sachsen	Sachsen	oberflächennah
Paläozoikuml	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Thüringer Wald, Ilmenau/Elgersburg	480 – 400 m NN
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Karstgebiet Harz, Beiersteinsenke	0 – 30 m*
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Karstgebiet Harz, Eisle- ben	175 bis 235 m u. GOK
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Karstgebiet Südharz	> 100 m u. GOK bis oberflächennah
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Nördliches und östliches Harzvorland	200 m u. GOK bis oberflächennah
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Nordöstliches Harzvor- land, Edderitzer Mulde	Bis -300 m u. NN (ca. 400 m u. GOK)
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Niedersachsen, Bad Pyrmont	bis -700 m NN
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Mitteldeutschland	bis 600 m u. GOK bis oberflächennah
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Hessische Senke	bis 700 m u. GOK
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Deckgebirge Sachsen	440 m u. GOK bis oberflächennah
Paläozoikum	Salinarformationen in stratiformer Lagerung	Alpines Salinar und Ha- selgebirge	Bis 500 m u. GOK
Paläozoikum	Salinarformationen in steiler Lagerung	Norddeutschland	bis 450 m u. GOK, Salzspiegel teil- weise bis an die Geländeoberfläche
Paläozoikum	Salinarformationen in steiler Lagerung	Gorleben	140 – 360 m u. NN

Tabelle 14 (Forts.):Grobgliederung der in der ausgewerteten Literatur beschriebenen Subrosionsteufen

Stratigraphie	Kurzbeschreibung	Geographische Lage	Subrosionsteufe
Paläozoikum	Salinarformationen in steiler Lagerung	Morsleben	Bis 300 m u GOK
Paläozoikum	Salinarformationen in steiler Lagerung	Bad Segeberg	Bis 148 m u. GOK
Paläozoikum	Karstgebiete	Hessen	30-50 m u. GOK
Mesozoikum	Karstgebiete	Schleswig-Holstein	oberflächennah
Mesozoikum	Karstgebiete	Harz	Bis 150 m u. GOK bis oberflächennah
Mesozoikum	Karstgebiete	Baden-Württemberg, Hasel	435 – 320 m NN
Mesozoikum	Karstgebiete	Regierungsbezirk Stutt- gart	260 – 120 m NN bis oberflächennah
Mesozoikum	Karstgebiete	Alpen	oberflächennah
Mesozoikum	Salinarformationen	Niedersachsen, Wiehen- gebirge	0 – 30 m*
Mesozoikum	Salinarformationen	Schleswig-Holstein	oberflächennah
Mesozoikum	Salinarformationen	Sachsen-Anhalt	bis 300 m u. GOK
Mesozoikum	Salinarformationen	Thüringen, Süd-Bran- denburg	bis 300 m u. GOK
Mesozoikum	Salinarformationen	Deckgebirge Sachsen	bis oberflächennah
Känozoikum	Molasse	Alpen und Alpenvorland	oberflächennah

(NN = Normalnull, GOK = Geländeoberkante,	* keine	e weitere	Einheitsanga	abe (z.
B. bezogen auf NN oder GOK)				

3.4 Zusammenfassung der beobachteten Subrosionsraten

Konkrete Subrosionsraten sind nur in wenigen Fällen in der ausgewerteten Literatur beschrieben (s. a. Kapitel 2.1.2). Lediglich 42 Einträge zu den Subrosionserscheinungen enthalten Angaben zu Subrosionsraten, davon enthalten nur 7 Einträge Angaben von konkreten Werten zu Subrosionsraten im mm a⁻¹. In der Webanwendung ist es möglich, neben den Angaben zu konkreten Werten auch einen Freitext aufzunehmen. Hier wurden Angaben zu Senkungsbeträgen/-raten, ursprünglichen Mächtigkeiten oder Prozentangaben zum subrodierten Teil der Einheit aufgenommen, sofern diese vorlagen. Lokalitäten, zu denen Angaben zu Subrosionsraten vorliegen, befinden sich in Hamburg, Bremen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Nordrhein-Westfalen und Hessen. Die meisten der vorliegenden Angaben zu Subrosionsraten wurden an Salzstrukturen (Diapiren) in Norddeutschland bestimmt. Allein 11 der Einträge mit konkreten Angaben zu Subrosionsraten betreffen den Salzstock Gorleben. Auch an Senkungsmulden und in Karstgebieten wurden Abschätzungen vorgenommen. Konkrete Angaben zu Subrosionsraten liegen vor für permische Einheiten (meist Zechstein, davon 7 Einträge für mesozoische Einheiten, 1 Eintrag für Känozoikum) und andere Salz- und Sulfatgesteine, weniger für Kalksteine und Mergel.

Allgemeine Angaben für Wertebereiche der Subrosionsraten, die in die Webanwendung übernommen wurden, sind z. B.:

- 7 70 % absolute Subrosion
- 50 250 m absolute Subrosion
- $0 ca. 120 \text{ mm } a^{-1} \text{ Subrosionsrate.}$

Teilweise liegen allgemeine Angaben für größere Gebiete vor, z. B. eine Subrosionsrate von 0,1 mm a⁻¹ für Mitteleuropa. Für Hessen ist angegeben, dass ca. 7 – 70 % der Gesteine verkarstet sind.

Beispielhafte Angaben für Subrosionsraten, bzw. -beträge an Steinsalz in stratiformer Lagerung (und Karst) sind:

- Rezente Subrosion in Bad Frankenhausen: bis ca. 30 mm a⁻¹
- Harz: 0,44 1,5 mm a⁻¹ (bis 6 mm a⁻¹ im Südharz)
- Thüringer Wald: 2 mm a⁻¹
- Münsterland: 60 70 m
- Bad Pyrmont: 250 m

Beispielhafte Angaben für Subrosionsraten, bzw. -beträge an Steinsalz in steiler Lagerung sind:

- Norddeutschland allgemein: 0,01 1,9 mm a⁻¹
- Wesenberg: 54 %
- Staßfurth: 20 mm a⁻¹
- Gorleben: 0,01 0,96 mm a⁻¹
- Morsleben: 0,008 5 mm a⁻¹ (bis zu 160 m)

• Bremen: 0,2 – 50 mm a⁻¹ (bis zu 70 m)

Für einige Lokalitäten wurden die Subrosionsraten nach Zeitraum, bzw. klimatischen Bedingungen differenziert, z. B.:

- Subrosion während Kaltzeiten:
 - Salzstöcke in Norddeutschland: 0,06 1,9 mm a⁻¹
 - Gorleben: 0,1 1,9 mm a⁻¹
 - Morsleben: 35 m (Elster-Kaltzeit)
- Subrosion während Warmzeiten:
 - Gorleben: 0,22 0,42 mm a⁻¹ (Holstein-Warmzeit)
- Rezente Subrosion:
 - Bremen: 50 mm a⁻¹
 - Bad Frankenhausen: bis einige cm a-1

Konkrete Angaben zu den beschriebenen Subrosionsraten und -beträgen sind in der Webanwendung und in Flügge et al. 2024 zusammengefasst.

4 Mögliche Entwicklung der Subrosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre

Eine Einschätzung der künftigen Subrosionsraten für verschiedene Klimaintervalle erfolgte zunächst rein qualitativ durch Auswertung der Wirkungszusammenhänge. Im Anschluss wurden diese durch Modellrechnungen quantifiziert.

4.1 Qualitative Bewertung der zukünftigen Entwicklung im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre

Bewertungsgrundlage für eine qualitative Aussage künftiger Subrosionsraten ist das Potenzial, das die verschiedenen Klimata durch die von ihnen vorgegebenen Randbedingungen auf die subrosionsrelevanten FEP ausüben. Jedes Klimaintervall wirkt über die oberflächennahen Randbedingungen auf die in Kapitel 2.1.1 dargestellten Wirkungszusammenhänge. Diese können weiterhin stattfinden oder auch zum Erliegen kommen. Die Zusammenstellung der subrosionsrelevanten FEP und ihrer Wirkungszusammenhänge erlauben daher eine beschreibende qualitative Einschätzung, inwieweit das Gestein während der verschiedenen Klimata von einer Subrosion beeinflusst werden kann.

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die zu betrachtenden klimatischen Effekte während der unterschiedlichen Klimaintervalle und deren mögliche Auswirkung in den oberflächennahen Schichten und im tieferen Untergrund. Diese bestimmen maßgeblich, in Abhängigkeit von äußeren Randbedingungen (z. B. Tiefenlage des subrodierbaren Gesteins, Topografie/Vorfluter, Hydrogeologie) und damit räumlich differenziert, das mögliche Ausmaß der Subrosion an der Salzoberfläche. Unabhängig von den klimatischen Verhältnissen gibt die Salzgenese über die Zusammensetzung der Salzformation vor, an welchen Stellen eine bevorzugte Subrosion stattfinden kann. Eine Subrosion des Wirtsgesteins ist grundsätzlich nur dann möglich, wenn das Deckgebirge dies durch hydraulischen Kontakt zu einer lösungsführenden Schicht zulässt. Ansonsten ist keine Subrosion zu erwarten.

Diejenigen Faktoren, die direkt auf die Subrosion einwirken (Abbildung 1), werden je nach Tiefenlage des Salzes und der Tiefenwirkung des Grundwassers unterschiedlich schnell und stark beeinflusst, so dass die Subrosion in der Regel erst zeitverzögert zur Veränderung der klimatischen Bedingungen eintritt. Ein Beispiel hierfür ist die während des Klimaübergangs (Glazial – Warmzeit) beginnende Subrosion während der Gletscherschmelze, die zeitlich in die daran anschließende Warmzeit hineinreichen kann.

Klimatische Veränderung		Resultierende Effekte an der Oberfläche	Resultierende Effekte im Untergrund	
	Erwärmung	Meeresspiegelanstieg: - Küstenfern/-nah - Meerwasserüberflu- tung	Zunehmende GW-Versalzung Auflast Abnehmendes GW-Potential (Strömung)	
	Abkühlung	Regression: - Küstennah/-fern	Zunehmende GW-Aussüßung Entlastung	
		Zunehmend trockene- res Klima, außerhalb des Einflussbereiches des Gletschers: - Gletscherfern - Begrenzte Menge Oberflächenwasser	Zunehmender Permafrost (Fläche, Tiefe (sporadisch/diskontinuierlich/kontinuier- lich) Veränderung - der Fließwege (Taliki, Permafrost) - der GW-Strömung (Geschwindigkeit, Volumen) - der GW-Chemie (Schmelzwasser, Aus süßung) - des Spannungsfeldes - der Grundwasserneubildung (begrenzt abhängig von Taliki)	
		Gebiet gelangt unter Gletschereinfluss: Gletschernah	Abnehmender Permafrost (Fläche, Tiefe) (diskontinuierlich/ sporadisch) Veränderung - der Fließwege (Taliki, Permafrost) - der GW-Strömung (Geschw., Volumen) - der GW-Chemie (Schmelzwasser, Aus- süßung) - des Spannungsfeldes - der Grundwasserneubildung (erhöht)	
		Gletscherüberdeckung	Auflast, kaum/kein Permafrost (Fläche, Tiefe) Veränderung - der Fließwege (Taliki, Permafrost, Rin- nenbildung) - der GW-Strömung (Geschwindigkeit, Volumen) - der GW-Chemie (Schmelzwasser, Aus- süßung) - des Spannungsfeldes - der Grundwasserneubildung (begrenzt, abhängig von Rinnen, Schmelzwasser)	

Tabelle 15: Effekte der Klimaintervalle an der Oberfläche und im Untergrund

Klimatische Veränderung	Resultierende Effekte an der Oberfläche	Resultierende Effekte im Untergrund
Erwärmung	Gebiet gelangt in Glet- schernähe, den Be- reich der Urstromtäler	Hoher Schmelzwasseranfall, GW- Neubildung (Permafrost) Veränderung - des Spannungsfeldes - Glaziale Rinnen - hohe Erosion - Entlastung (Fließwege) - Wasserchemie, -volumen - Oberflächenwasser (Vorfluter, Volu- men) - GW-Potential - Transgression - Auftauen Permafrost - Hydrogeologie / Deckschichten - Subrosionssenken (Bildung, Deposition)

Tabelle 15 (Forts.): Effekte der Klimaintervalle an der Oberfläche und im Untergrund

Es wird erwartet, dass durch eine Gletscherüberdeckung und die sich anschließende Erwärmung die höchsten Subrosionsraten zu erwarten sind. Der Grund dafür ist das Eindringen gering mineralisierter Grundwässer durch Schmelzwasseranfall in Zusammenhang mit einer hohen Tiefenwirkung aufgrund von Erosion (Abrasion, Rinnenbildung) und Kluftbildung (Entlastungsklüfte), die auch eine hohe Fließgeschwindigkeit erwarten lassen (Abbildung 3).

Auch während der Ausbildung eines kontinuierlichen Permafrostbodens könnten hohe Subrosionsraten erreicht werden. Voraussetzung ist ein seitlicher Einstrom, der wiederum die Grundwasserströmung (insbesondere aufgrund des verringerten Strömungsquerschnittes) erhöht und tiefenwirksamer erfolgen kann. Möglich wäre jedoch auch, dass kein seitlicher Einstrom stattfindet und die Grundwasserneubildung zum Erliegen kommt, so dass sich die Grundwasserströmung im Deckgebirge verringert und damit auch die Subrosionsintensität.

	Erwärmung			Abkühlung		Erwärmung		
Subrosion	küstenfern	küstennah	Meeresüberdeckung	küstennah	küstenfern	gletscherfern	Gletscherüberdeckung	gletschernah
sehr hoch								
hoch						Kontinuierlicher Permafrost mit	Erosion /Rinnenbildung, Kluftbildung Schmelzwasser	Erosion, Kluftbildung Schmelzwasser
mäßig						seitlichem GW-Einstrom		
gering				Kontinuierlicher				
	Heutiger	┣───				Permafrost		
sehr gering	Zustand	Zunehme	ende Versalzung des Gru	ndwassers	Trockener			
Verkarstung Deckgebirge	0	/+	0	c	o /+	o/+++	+++	+++
Subrosion Wirtsgestein	0	/+	0	c	» /+	o /+++	o/+++	o/+++
Effekt GWN bei defektem Hut - /Tongestein	0	/+	0	c	» /+	o/+++	+++	+++

Abbildung 3: Qualitative Einschätzung der Subrosionsrate in Abhängigkeit vom Klima

- o Subrosion gilt als unwahrscheinlich / sehr gering
- + geringe Subrosion
- +++ hohe bis sehr hohe Subrosion

Angaben mit Schrägstrich bedeuten eine mögliche Bandbreite von / bis

4.2 Zusammenstellung möglicher Klimaszenarien für den Betrachtungszeitraum in Deutschland

Auf der Basis nationaler und internationaler Literatur wurden mögliche zukünftige Klimaänderungen für Deutschland zusammengestellt und ihre Auswirkungen auf die Randbedingungen und Einflussfaktoren der Subrosion abgeleitet. Diese wurden genutzt, um subrosionsbedingte Risiken für die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und des Deckgebirges potenzieller Endlager im Steinsalz oder Tongestein qualitativ zu bewerten.

Da davon ausgegangen wird, dass sich auch in Zukunft Kalt- und Warmzeiten abwechseln werden, ihre Abfolge, Dauer und Ausprägung jedoch Ungewissheiten unterliegt, wurden Daten aus vergangenen Klimazyklen bei der Festlegung von zu betrachtenden Klimaszenarien verwendet. Diese wurden insbesondere mit den für Schweden und Finnland bereits ausgearbeiteten Szenarien "global warming", "extendend global warming", "severe permafrost", "extendend ice sheet" sowie dem "reference glacial cycle" verglichen und diskutiert (Näslund et al. 2020; SKB 2011; SKB 2020; SKB 2006; Chapman et al. 1995; Cedercreutz 2004; Forsström 1999; Mrugalla 2014; Mrugalla 2011).

Alle bisher für die Zukunft Nordeuropas erstellten Klimaszenarien gehen von einem unterschiedlich langen Bestehen der jetzigen Warmzeit und einem darauffolgenden Wiedereinsetzen der in der Vergangenheit nachweisbaren kaltzeitlichen Klimazyklen aus. Aufgrund der zurzeit verfügbaren Informationen (Paläoklimatologie, Klimamodellrechnungen) und der Ähnlichkeit der Abfolge und Dauer der Klimaintervalle werden für Nord- und Süddeutschland zwei gemeinsame Klimaszenarien verfolgt. Diese sind in Abbildung 4 "Szenario 1: AP1.2" und "Szenario 2: AP1.2" aufgeführt. Es wird angenommen, dass sich die jetzige Warmzeit fortsetzt, um dann von Klimazyklen (Kaltzeit-Warmzeit) unterschiedlicher Intensität abgelöst zu werden. Diese sind an diejenigen der letzten Kaltzeiten angelehnt (Elster, Saale, Weichsel (norddeutsche Bezeichnungen) bzw. Hoßkirch/Haslach-Mindel, Riss und Würm (süddeutsche Bezeichnungen).

Um der großen Ungewissheit im Hinblick auf den Eintrittszeitpunkt der nächsten Kaltzeit Rechnung zu tragen, werden zwei Klimaszenarien angenommen. Die beiden Klimaszenarien sind in vereinfachter Form belassen und zeigen lediglich den Wechsel und die Dauer von Warm- und Kaltzeiten sowie die Übergänge zwischen diesen (Warmzeit-Übergang-Glazial-Periglazial). Dies hat den Vorteil, dass sie für verschiedene Regionen und Modellrechnungen als Basisfall verwendet werden können und eine Variation und Spezifizierung der einzelnen Klimaphasen im Anschluss erfolgen kann. Die Annahmen im Hinblick auf die Dauer und Ausprägung der einzelnen Klimaphasen erfolgt im Wesentlichen auf der Grundlage der in Mrugalla 2011; Mrugalla 2014; und Stark 2014 dargestellten rekonstruierten Klimaverläufe. Der Zwischenbericht zur Bewertung der zukünftigen Entwicklung der Subrosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre (Fahrenholz et al. 2024) bietet eine ausführlichere Beschreibung.

Abschließend wurden die Annahmen für die Klimaszenarien solchen aus Nord- und Mitteleuropa gegenübergestellt. Zu diesen gehören diejenigen aus Schweden (Chapman et al. 1995; SKB 2006; SKB 2011; SKB 2020) und Finnland (Cedercreutz 2004; Forsström 1999). Für die Gegenüberstellung und den Vergleich der verschiedenen Klimaszenarien wurden ihre Legenden vereinheitlicht. Es verblieben vier Klimaintervalle: die Warmzeit, die Kaltzeit in Form von Glazial- und Periglazial-Bedingungen und eine Zeit des Klimaübergangs. Während der Warmzeit kann ein Gebiet maritime (küstennahe) oder kontinentale (küstenferne) Verhältnisse aufweisen oder vom Meer überdeckt sein. Während der Kaltzeit gibt es das Glazial, in dem das Gebiet entweder kurz davorsteht, vom Gletscher überfahren zu werden, oder von diesem bereits überdeckt ist, und das Periglazial, in dem gletscherferne und gletschernahe Bedingungen herrschen und die Entfernung zum Eisrand sowie der Permafrostboden daher unterschiedlich stark (Fläche, Tiefe) ausgeprägt sein kann. Die entsprechenden Abbildungen finden sich im Zwischenbericht zur Bewertung der zukünftigen Entwicklung der Subrosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre (Fahrenholz et al. 2024).

Die Klimata, bei denen von einer extremen Verlängerung der momentanen Warmzeit ausgegangen wird, werden nicht als separates Szenario aufgenommen. Hintergrund ist, dass durch bereits erfolgte Studien wie z. B. Noseck et al. 2008 deutlich wurde, dass während solch langer Warmzeiten das zu erwartende Infiltrationsvolumen gering mineralisierter Wässer abnimmt und damit auch die Subrosionsrate. An dieser Stelle erfolgt damit bereits eine Fokussierung auf solche Klimaszenarien, für die ein größerer Einfluss der Subrosion auf das Wirtsgestein zu erwarten ist. Die übrigen Klimaszenarien werden abgebildet, wobei davon ausgegangen wird, dass die Kaltzeiten in Deutschland erst später auftreten und nicht so stark ausgeprägt sein werden wie in Skandinavien.

Das "Szenario 1: AP 1.2" deckt sich gut mit denjenigen von "Noseck_Szenario 2" (Noseck et al. 2012), "Severe Permafrost (Schweden)" (SKB 2020), "Imbrie & Imbrie" (Mrugalla 2014), "ACLIN" (Mrugalla 2014). Unter der Einschränkung, dass Skandinavien häufiger und früher von Vergletscherungen betroffen sein wird, sind auch die Klimaszenarien "reference glacial cycle (Schweden)" (SKB 2020), das "Szenario A (Finnland)" und "Szenario B (Finnland)" (Cedercreutz 2004) mit dem "Szenario 1: AP 1.2" vergleichbar.

Das "Szenario 2: AP 1.2" ähnelt demjenigen von "LLN 2D" (Mrugalla 2014). Die Szenarien "Global warming (Schweden)" (SKB 2020) und "Noseck_Szenario 1" bilden den Übergang zu den extrem warmzeitlich geprägten Szenarien der Studie BIOCLIM (1, 2, 3) (Mrugalla 2014), von Schweden ("extended global warming") (SKB 2020) und Finnland ("Szenario C, D, E") (Cedercreutz 2004).

Das "extended ice-sheet duration (Schweden)" Szenario (SKB 2020) nimmt eine Übergangsstellung zwischen den Szenarien 1 und 2 von AP 1.2 ein. Wenn der Übergang zur Kaltzeit als eher warm interpretiert wird und davon ausgegangen wird, dass die für Skandinavien angenommene Vergletscherung in Deutschland als Periglazialzeit ausgeprägt sein wird, ist es gut mit dem "Szenario 2: AP 1.2" vergleichbar.



Abbildung 4: Gegenüberstellung der Klimaszenarien aus dieser Arbeit mit bisher veröffentlichten Klimaszenarien Mittel- und Nordeuropas

Gegenüberstellung der Klimaszenarien AP 1.2 mit bisher veröffentlichten Klimaszenarien Mittel- und Nordeuropas

Im aktuellen Vorhaben BGE-finanzierten Vorhaben REDUKLIM werden mittels CLIMBER-X (Earth System Model of Intermediate Complexity (EMIC)) Berechnungen zu möglichen Klimaszenarien für bis zu einer Million Jahre durchgeführt. Dabei spielen, wie auch in den hier beschrieben Modellen, die verwendeten Annahmen eine große Rolle. Im Fokus sind dabei beispielsweise Prozesse wie die Silikatverwitterung (Verringerung der atmosphärischen Lebensdauer von CO₂) oder die vulkanischen Emissionen, die großen Einfluss auf den Zeitpunkt der nächsten möglichen Kaltzeiten haben können. Dadurch steht für die Modellierung eine Bandbreite möglicher Anfangszeitpunkte zur Verfügung. Je nach anthropogenen CO₂-Emissionsszenarien wird die Schwelle zu einer möglichen Kaltzeit in den Modellrechnungen nach 50.000 bis 170.000 Jahren erreicht. Diese Ergebnisse stützen die Ergebnisse älterer Modelle.

4.3 Abgleich der subrosionsrelevanten Faktoren mit denen der Salt FEP-Database

In Projekten mit Endlagerbezug ist es international ein etabliertes Vorgehen, die wissenschaftliche Beschreibung des Anfangszustandes und das Verständnis der Faktoren, die die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems beeinflussen, u. a. durch eine Zusammenstellung von Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (nach Andersson et al. 1989 als Features, Events and Processes, kurz FEP bezeichnet) zu dokumentieren (Keller et al. 2010).

Im Folgenden wurden diejenigen Faktoren und Prozesse zusammengetragen, die Auswirkungen auf die Subrosion an Salzgesteinen in stratiformer oder steiler Lagerung haben können. Zur Auflistung der subrosionsrelevanten FEP wurde die Salt FEP-Database (Salt FEP DB) verwendet. Diese wurde im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes von der GRS und SANDIA erstellt (Freeze 2020). Sie findet u. a. im Salt Club der OECD/NEA Verwendung. Die auf diese Art zusammengestellten FEP wurden im Anschluss auf Vollständigkeit geprüft.

Die Salt FEP DB wurde vor dem Hintergrund der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen Salzformationen erstellt. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus dagegen auf natürlichen geogenen FEP, die die Subrosion der Wirtsgesteine beeinflussen können. Daher war eine entsprechende Anpassung vorzunehmen. Diese betraf zunächst den Ausschluss von Endlagerkompartimenten. Im Anschluss erfolgte durch definierte Ausschlusskriterien eine Eingrenzung auf weiterzuführende FEP.

Ausgeschlossen wurden zunächst all diejenigen Kompartimente, die der geotechnischen Barriere angehören. Dies betraf alle Kompartimente der Kategorie "Waste and Engineered Features", "System Features", sowie die Kompartimente "Disturbed Rock Zone (EDZ)" und "Emplacement Units" der Kategorie "Geosphere Features".

Weiterhin wurden all diejenigen Kompartimente ausgeschlossen, die den Ingestionspfad betreffen und damit keine Auswirkung auf die Subrosion haben. Dies betrifft die Kompartimente "Flora and Fauna", "Humans" und "Food and Drinking Water" der Kategorie "Surface Features". Weitergeführt wurden die verbleibenden Kompartimente des Nahund Fernfeldes sowie der Biosphäre, die nicht das Endlager selbst betreffen.

Das Nahfeld umfasst den einschlusswirksamen Bereich des "Host Rock" (HR 00) sowie den ungestörten "Other Host Rock Units" des Salzgesteins insgesamt (HR 03). Diese wurden für die Betrachtung der Subrosion als ungestörtes Steinsalz interpretiert, gemäß seiner Definition in (Popp 2022). Demnach handelt es sich um eine "[...] im bergbaulichen Maßstab lithologisch homogene Salzformation, d. h. neben dem Hauptmineral Halit

(mit Anteilen zwischen \geq 88 und nahezu 100 Vol.-%) können Nebengemengeteile, wie Anhydrit und Tonverunreinigungen, auftreten".

An das Nahfeld (HR00, HR03) schließt sich das <u>Fernfeld</u> mit den "Other Geological Units" (OU 00) an, zu dem die "Overlying/Adjacent Units" (OU01) und die "Underlying Units" (OU02) gehören, in denen durchflusswirksame Wegsamkeiten durch die größere Heterogenität des Gebirges auftreten können. Hierzu ist u. a. auch das Hutgestein zu rechnen.

Die <u>Biosphäre</u> beinhaltet die "Biosphere" (BP00) mit "Surface and Near-Surface Media and Material" (BP01). Für die Betrachtung der Subrosion fungiert dieses Kompartiment als Schnittstelle zwischen Prozessen, die an der Oberfläche stattfinden (Veränderung der Topografie und des Bewuchses, Bildung von Gletschern, etc.) und zu Veränderungen innerhalb des Fernfeldes führen und somit auf die Subrosion Einfluss nehmen können (Produktion org. Materials, Auflast, etc.).

Die Einteilung der Gesteinsbereiche in die entsprechenden Kategorien des FEP-Kataloges ist für die steile Salzgesteinsformation in Abbildung 5, für stratiforme Salzgesteinsformationen in Abbildung 6 dargestellt. Für das Wirtsgestein HR wird eine ungestörte Lagerung angenommen, wohingegen die Deckschichten OU auch gestörte Verhältnisse aufweisen können. Dies betrifft insbesondere das verkarstungsfähige Hutgestein sowie Bereiche des Steinsalzes an dessen Kontaktfläche, die nicht dem ewG angehören und bei denen eine gestörte Lagerung nicht ausgeschlossen werden kann.



Schnittstelle zu subrosionsrelevanten Gegebenheiten an der Oberfläche

Abbildung 5: Einteilung der Gesteinsbereiche für Salzformationen in steiler Lagerung in die Kategorien der Salt FEP DB

Für stratiforme Salzformationen sind verschiedene Konfigurationen der stratigraphischen Schichtenfolgen möglich, welche in Abbildung 6 dargestellt sind. Diese resultieren aus den repräsentativen Profilen (BGE 2022), in denen verschiedene mögliche Gesteinsabfolgen für die Sicherheitsuntersuchung gezeigt werden. Sie unterscheiden sich in der Art, dass ein Teil des Deckgebirges als verkarstungsfähiges Gestein ausgeprägt sein kann. Zudem befindet sich über dem Steinsalz ein Tongestein. Dieses ist in den Fällen (A) und (B) dem Deckgebirge OU zugeordnet. Es kann jedoch, wie in Fall (C) dargestellt, auch als Wirtsgestein gelten. Das darunter liegende Steinsalz tritt dann als Nebengestein auf. Diese Gesteinsschichtung, kann mit der bisher erarbeiteten FEP-Liste nicht bearbeitet werden, da in dieser von Steinsalz als Wirtsgestein HR ausgegangen wird. Die Gesteinsschichtung in Fall (A) ist derjenigen die für steile Salzformation angenommenen sehr ähnlich, so dass im Folgenden Fall (B) als Grundlage für die in Kapitel 5 geführte Diskussion der Risiken für die Barrierewirkung herangezogen wird.

А	В	С	
Oberflächennahe Schichten (BP)	Oberflächennahe Schichte	n (BP) Oberflächennahe Schio	hten (BP)
Deckgebirge (OU)	Deckgebirge (OU)	Deckgebirge (OU)	Verkarstungs fähiges Gestein
Tongestein Ungestörtes Steinsalz (HR) in flacher Lagerung	Tongestein Ungestörtes Steinsalz (H in flacher Lagerung	Tongestein (HR)	zerung

Schnittstelle zu subrosionsrelevanten Gegebenheiten an der Oberfläche 🔨

Abbildung 6: Stratiforme Steinsalzlagerung mit unterschiedlicher Gesteinsschichtung im Deck- und Nebengebirge

Nach Ausschluss der nicht relevanten bzw. unter oben beschriebenen Gesichtspunkten zu vernachlässigenden FEP verbleiben all diejenigen in der Auswahl, die den Prozess der Subrosion in steil und stratiform lagernden Salzformationen innerhalb der nächsten eine Million Jahre beeinflussen können. Kriterien, die zu einem Ausschluss von FEP führten, sind diejenigen,

- die ein Endlager oder einen Eingriff in das Wirtsgestein voraussetzen,
- die auf zukünftige menschliche Aktivitäten zielen, die die Barrierewirkung beeinträchtigen könnten,
- deren Auftreten während des Bewertungszeitraum unwahrscheinlich sind,
- denen bisher kein Einfluss auf die Subrosion nachgewiesen werden konnte,
- deren Einfluss nachweislich sehr gering ist oder als nicht relevant angesehen wird, oder

- die bereits über einen anderen FEP abgedeckt werden.

Die für die steile Salzformationen angepassten FEP-Listen sind auch für stratiform gelagerte Salzformationen gültig. Zusätzlich sind für Süddeutschland die folgenden FEP zu diskutieren:

- 1. HR00LG03 "Metamorphism in Host Rock undisturbed rock salt"
- 2. HR00LG04 "Diagenese in Host Rock undisturbed rock salt" und
- 3. OU02 CL01 "Climatic effects in Underlying Units"

Die Prozesse der Metamorphose und Diagenese lassen sich für stratiform gelagerte Steinsalzformationen nicht sicher ausschließen, werden aber im Bereich für Tongesteinsformationen während der nächsten eine Million Jahre als wenig wahrscheinlich eingestuft (Stark 2014). In der weiteren Bearbeitung wurde der Prozess der Metamorphose nicht weiterverfolgt, da ein Auftreten dafür notwendiger hoher Temperaturen und Drücke als sehr unwahrscheinlich angenommen wird.

Ebenso war der Einfluss klimatischer Effekte auf unterliegende Gesteinsschichten des Steinsalzes zu betrachten. Durch ein ungünstiges Zusammenwirken regionaler Bedingungen (Topographie, Kluftsysteme, Grundwasserhydraulik, ggf. Schwellen des unterlagernden Gesteins) kann eine solche Beeinflussung nicht sicher ausgeschlossen werden (Reinhold, Hammer & Pusch 2014)).

Tabelle 16 listet die relevanten FEP der Salt FEP-Database für Subrosionsprozesse in stratiformen und steilen Salzformationen auf.

Wirtsgestein Steinsalz			
HR00 TH01	Effects of Recharge		
HR00 LG01	Tectonic Activity		
HR00 LG03	Metamorphism		
HR00 LG04	Diagenesis		
HR00 LG05	Diapirism		
HR00 LG06	Large-Scale Dissolution		
HR00 CL01	Periglacial Effects		
HR00 CL02	Glacial and Ice Sheet Effects		
Deckgebirge (Lockergestei	n), verkarstungsfähiges Gestein, Tongestein		
OU01/02 TH01	Pressure-Driven Darcy Flow (Fractures / Porous Media)		
OU01/02 TH02	Capillarity-Dominated Darcy Flow		
OU01/02 TH03	Gravity- and Density-Dominated Flow		
OU01/02 TH06	Non-Darcy Flow Through Fractures and Porous Media		
OU01/02 TH07	Thermal-Hydrological Effects on Flow		
OU01 TH08	Groundwater Discharge to Biosphere Boundary		
OU01/02 TC01	Evolution of Groundwater Chemistry		
OU01/02 TC02	Thermal-Chemical Evolution		
OU01/02 TB01	Microbial Activity		
OU01 TT06	Formation of Colloids		
OU00 LG01	Tectonic Activity		
OU00 LG02	Subsidence		
OU00 LG03	Metamorphism in Other Geologic Units		
OU00 LG04	Diagenesis in Other Geologic Units		
OU01 LG05	Diapirism		
OU00 LG06	Large-Scale Dissolution		
OU01 CL01	Periglacial Effects		
OU02 CL01	Climatic Effects on Underlying Units ³		
OU01 CL02	Glacial and Ice Sheet Effects		
OU01/02 SM01	External Stress from a Seismic Event		

Tabelle 16:Relevante FEP für die Subrosion in stratiform und steil lagernden Salzfor-
mationen

³ FEP wird aufgrund der Tiefe steiler Salzformationen als nicht relevant angesehen.

Tabelle 16 (Forts.): Relevante FEP für die Subrosion in stratiform und steil lagernden Salzformationen

Biosphäre	
BP01 TH03	Infiltration and Recharge
BP01 TC01	Chemical Evolution of Soil and Surface Water
BP01 TB01	Microbial Activity
BP00 CL01	Periglacial Effects
BP00 CL02	Glacial and Ice Sheet Effects
BP00 CL03	Climate Change (Natural and Anthropogenic)
BP00 SM01	Seismic Activity Impacts

FEP, die nicht explizit mitgeführt wurden, aber in anderen enthalten sind, zeigt Tabelle 17.

Tabelle 17:FEP, die nicht explizit mitgeführt wurden, aber durch andere FEP in die
Überlegungen eingehen (stratiforme und steile Lagerung)

Nicht explizit aufgenommene FEP	Werden über folgende FEP berücksichtigt
BP01 TH01 Precipitation	BP01 TH03 Infiltration / Recharge
BP01 TH02 Surface Runoff /Evapo- transpiration	
BP01 TM01 Processes Cause Ero- sion in the Biosphere	BP01 TH03 Infiltration and Recharge BP01 TH02 Surface Runoff BP01 TC01 Chemical Evolution of Soil and Sur- face Water
BP01 TM02 Processes Cause Depo- sition in the Biosphere	BP01 TH03 Infiltration and Recharge BP01 TH02 Surface Runoff BP01 TC01 Chemical Evolution of Soil and Sur- face Water
BP00 HP01 Human Influences on Climate (Inten- tional and Accidental) - Effects on Bi- osphere	BP00 CL03 Climate Change (Natural and An- thropogenic)
OU00 RA03 Radiological Mutation of Microbes in Other Geologic Units	OU01/02 TB01 Microbial Activity in Overlying / Underlying / Adjacent Units
OU01 TT08 Interaction of Colloids with Other Phases (Rock Matrix, Fracture Sur- faces) in Overlying / Adjacent	OU01/02 TB01 Microbial Activity in Overlying / Underlying / Adjacent Units
OU01/02 TB02 Thermal Effects on Microbial Activity in Overlying / Underlying / Adjacent Units	OU01/02 TB01 Microbial Activity in Overlying / Underlying / Ad- jacent Units OU01/02 TC02 Thermal-Chemical Evolution of Overlying / Un- derlying/ Adjacent Units
OU00 TC01 Thermal-Chemical Gas Generation in Other Geologic Units	OU01/02 TB01 Microbial Activity in Overlying / Underlying / Ad- jacent Units OU01/02 TC02 Thermal-Chemical Evolution of Overlying / Un- derlying/ Adjacent Units

Im Verlauf der Arbeiten zeigte sich, dass die Salt FEP DB nicht alle FEP abdeckt, die für die Aufstellung der subrosionsrelevanten Prozesse notwendig waren. Tabelle 18 listet diejenigen FEP auf, die für die Subrosion zusätzlich von Interesse sind. Dies sind insbesondere genauere Angaben von Klimazuständen, ihrer Ausprägung und ihre Wirkung auf das hydraulische System.

Klima				
Warmzeitliche Effekte	A Transgression, (Regression) B küstennah, küstenfern C Meerwasserüberflutung			
Klimaübergang warm zu kalt	A Warmzeit (Regression) B Warmzeit – Periglazial C Periglazial - Glazial			
Klimaübergang kalt zu warm	A Glazial – Periglazial B Periglazial – Warmzeit C Warmzeit (Transgression)			
Dauer und Verlauf des Klimas	A Zeitspanne insg. B Oszillationen (Häufigkeit) C Charakteristika (Schnelligkeit) D Stadiale – Interstadiale E Periglazial (kont./diskont./spor. Permafrost)			
Regression	A Küstennahe Prozesse (Versalzung) B Küstenferne Prozesse (Aussüßung) C Veränderung der hydraulischen Verhältnisse			
Transgression	A Küstennahe Prozesse (Versalzung) B Küstenferne Prozesse (Aussüßung) C Veränderung der hydraulischen Verhältnisse			
Klimaübergang Glazial zu Periglazial	A gletschernah mit diskont./spor. Permafrost B gletscherfern mit kont. Permafrost C Veränderung der hydraulischen Verhältnisse D Urstromtal E Veränderung der Topographie F Oberflächenwasser (Vorfluter, Menge) G Wasserchemie, -menge H Entlastung (Fließwege) I Glaziale Rinnen			
Klimaübergang Periglazial zu Warm- zeit	A Permafrosttiefe, Ausdehnung B Transgression C Veränderung der hydraulischen Verhältnisse D Oberflächenwasser (Vorfluter, Menge) E Wasserchemie, -menge F Entlastung (Fließwege) G Glaziale Rinnen			

Tabelle 18: Subrosionsrelevante FEP – zusätzlich zur Salt FEP DB

Biosphäre	
Org. Material (Entstehung / Vorhan- densein)	A Vegetation (Klima)
Mikrobielle Aktivität	A In Abhängigkeit von Biomasse, Temperatur B Vergesellschaftung
Kolloide	A Bildung B Interaktion C Transport D Nährstoff von Mikroorganismen
Siderophore	A Bildung B Interaktion C Transport D Nährstoff von Mikroorganismen
Chelate	A Bildung B Interaktion C Transport D Nährstoff von Mikroorganismen
Be-/Entlastung, Spannungsfeld	A durch externe FEP (Gletscher) B durch interne FEP (Permafrost, Subsidenz)
Topographie	A Erosion (Rinnen) B Deposition C Subsidenz, Erdfall
Fließwege, Strömung	A oberflächennahe Verkarstung B Permafrost
Regionale Gegebenheiten	A Topographie B Vorfluter, Grundwasserspiegel C Deckgebirge (Hydrogeologie)
Entwicklung GW	A Wasser-Chemie B Fließwege C Fließmenge D Aufsteigendes Grundwasser (Austausch)
Bildung Subglazialer Rinnen (BP, OU)	A Wasser-Chemie B Fließwege C Fließmenge
Auswirkung Hutgesteinsbildung (HR, OU, BP)	A Volumenvergrößerung B Volumenverkleinerung C Fließwege, Strömung

Tabelle 18 (Forts.): Subrosionsrelevante FEP – zusätzlich zur Salt FEP DB

Deckgebirge (OU)			
Kolloide	A Bildung B Interaktion C Transport D Nährstoff von Mikroorganismen (org. Mat.)		
Siderophore	A Bildung B Interaktion C Transport D Nährstoff von Mikroorganismen		
Chelate	A Bildung B Interaktion C Transport D Nährstoff von Mikroorganismen		
Entwicklung der Salz-Oberfläche	A GW-Chemie B GW-Strömung C Auslaugung D Morphologie		
Veränderung des Salzspiegels, der Salzschwebe	A Geometrie B Chemie C Austausch mit Grundwasser		
Entwicklung Grundwasser	A Menge B Austausch		

Tabelle 18 (Forts.): Subrosionsrelevante FEP - zusätzlich zur Salt FEP DB

4.4 Quantitative Bewertung der über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre

4.4.1 Methoden

Es wurden Modellrechnungen zur Grundwasserströmung unter Betrachtung der Dichteströmung und der Auswirkungen von Klimazuständen für das Wirtsgestein Steinsalz zur Bewertung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum durchgeführt. Basis für die Modellrechnungen waren generische Standorte für Steinsalz in stratiformer und steiler Lagerung nach den Arbeiten in den Vorhaben RESUS und ANSICHT mit für Deutschland repräsentativen lithostratigraphischen Einheiten. Für die Gittergenerierung wurde die Software ProMesh verwendet (Reiter 2022). Aus den generischen Modellgeometrien wurden mittels ProMesh zweidimensionale Rechengitter erstellt, die für die dichtegetriebenen Grundwasserberechnungen mit dem Code "distributed density-driven flow" (d³f++) genutzt wurden. d³f++ ist ein Finite-Volumen-Rechencode, der unter der Federführung der GRS in Kooperation mit verschiedenen Universitäten entwickelt wurde, um spezifische Fragestellungen zur Grundwasserströmung mit dem Fokus auf dichtegetriebene Strömung bearbeiten zu können. Er wird auch in der Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagern angewandt (Fein & Schneider 1999; Fein 2004; Schléder et al. 2008; Rübel & Gehrke 2022).

In den durchgeführten Modellierungen wurden mögliche Klimaentwicklungen über den Bewertungszeitraum betrachtet. Die wichtigsten identifizierten Klimazustände bildeten dabei Permafrost, Vergletscherung, glaziale Rinnen (durch Erosion) und Meeresspiegelanstieg ab. Die Klimazustände wurden durch die Anpassung und Veränderung von Randbedingungen sowie Parametern im Modell umgesetzt. Zunächst wurden die Berechnungen für das gemäßigte Klima vom ungesättigten Zustand der Salzverteilung gestartet und bis zum stationären Zustand durchgeführt. Im stationären Zustand stellt sich eine, von den Modellparametern und -randbedingungen abhängige, Salzverteilung ein. Von diesem Zeitpunkt aus wurden die weiteren Klimazustände bis zu stagnierenden Subrosionsraten berechnet.

Die für die Modellrechnungen zu Grunde gelegten Klimazustände basieren auf globalen Klimamodellen verschiedener Autoren und wurden entsprechend der Literatur auf mögliche zukünftige Entwicklungen in Deutschland angepasst. Das Resultat sind Szenarien, die als wahrscheinliche Entwicklungen für das zukünftige Klima in Deutschland gelten. Dennoch handelt es sich um mit erheblichen Ungewissheiten behafteten Szenarien, gerade in Bezug auf die ungewissen anthropogenen CO₂-Emissionen und deren Einfluss auf das Klima. Sicher ist jedoch, dass es über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren zu Veränderungen des Klimas in Deutschland kommen wird, die auch Einfluss auf den Prozess der Subrosion haben. Aus diesem Grund wurden, neben den erarbeiteten Szenarien (Kapitel 4.2) zwei weitere Klimaszenarien beispielhaft zur Berechnung möglicher Subrosionsmächtigkeiten verwendet (Abbildung 7).

Das Szenario 1 entspricht dabei dem Szenario mit einer längeren Warmzeit für die nächsten 80.000 Jahre, Szenario 2 weist eine kürzere Warmzeit von nur 50.000 Jahren auf. Die Zeiten entsprechen den Szenarien "Szenario 1: AP1.2" und "Szenario 2: AP1.2" in Abbildung 4. Die Klimazyklen der Szenarien sind dabei an die der letzten Kaltzeiten wie Elster, Saale und Weichsel (bzw. Hoßkirch/Haslach-Mindel, Riss und Würm in Süddeutschland) angelehnt. Im nachfolgenden werden die Zeitintervalle für Szenario 2 beschrieben. Die Zeiten für Szenario 1 können dementsprechend durch eine Addition von 30.000 Jahren errechnet werden. Nach 50.000 Jahren des aktuellen Holozäns kommt es zum Übergang ins Periglazial, das 30.000 Jahre andauert und im Szenario als gegenwärtiges Klima angenommen wird. Es folgen 74.000 Jahre mit kälteren Temperaturen, die durch den Klimazustand Permafrost abgebildet werden und an den Klimazyklus der Weichsel-Kaltzeit angelehnt sind. Mit den Übergängen vom Periglazial zurück zum gemäßigten Klima, der Dauer der Warmzeit und dem Übergang in die nächste Kaltzeit, die der Saale-Kaltzeit angelehnt ist, vergehen mehr als 50.000 Jahre. Die Saale-Kaltzeit (Klimazustand Permafrost) bleibt für etwa 160.000 Jahre bestehen mit einer 10.000-jährigen Phase der Gletscherüberdeckung. Anschließend kommt es zu einem schnellen Übergang in eine kurze Warmzeit mit etwa 30.000 Jahren, gefolgt von einer erneuten langen Kaltzeit von 90.000 Jahren mit Permafrostbedingungen und 20.000 Jahren Vergletscherung, die dem Klimazyklus der Elster-Kaltzeit entsprechen soll. Nach 530.000 Jahren folgt eine weitere Kaltzeit ähnlich der Saale-Kaltzeit, der Weichsel-Kaltzeit und erneut der Saale-Kaltzeit, wobei es bis nach 1 Million Jahren nicht mehr zu der Vergletscherungsphase der Saale-Kaltzeit kommt.

Szenario 3 beinhaltet beispielhaft alle betrachteten Klimazustände, die in diesem Bericht beschrieben sind, und beginnt ebenfalls mit einem Wechsel aus Warmzeit und Permafrost, wie es auch für die Szenarien 1 und 2 angenommen wird, es folgt nach etwa 250.000 Jahren eine Kaltzeit, mit langer Vergletscherung, die Bildung glazialer Rinnen durch Erosion und überflutete Verhältnisse durch Meeresspiegelanstieg, die sich nach einer längeren Warmzeit und Permafrostbedingungen mehrfach zyklisch wiederholen.

Szenario 4 bildet einen stetig wiederkehrenden Zyklus aus den vier Klimazuständen Warmzeit, Permafrost, Permafrost mit Vergletscherung und Vergletscherung in definierten Zeiträumen ab. Der zyklische Verlauf von 30.000 Jahren Warmzeit, 55.000 Jahren Permafrost, 5.000 Jahre Permafrost mit Vergletscherung, 10.000 Jahre Vergletscherung wiederholt sich stetig über eine Million Jahre und ist an das Referenzszenario der BGE (schriftliche Mitteilung am 14.04.2024) angelehnt.



Abbildung 7: Zur Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten verwendete Klimaszenarien für die nächsten eine Million Jahre nach heute

4.4.2 Beschreibung der Modellgebiete

4.4.2.1 RESUS Endlagersystem S1 (Salz in stratiformer Lagerung)

Im Rahmen des Vorhabens RESUS wurde ein Modell eines generischen Endlagerstandorts im Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung erstellt (Bertrams et al. 2020a). Dieses Modell wurde als Grundlage für die Modellrechnungen für eine typische Schichtenabfolge für flach lagernde Salzformationen in Deutschland zur quantitativen Bestimmung erwartbarer Subrosionsraten verwendet. Das generische Endlagersystem S1 besteht aus einer flach einfallenden Schichtenfolge von 18 lithostratigraphischen Einheiten (Abbildung 8) und hat eine Ausdehnung von etwa 5,3 - 2,6 km und eine Mächtigkeit von ca. 1 - 1,4 km. Zur Untersuchung der Auswirkung von Störungszonen wurde an ausgewählter Stelle eine Störung in das Modellgebiet eingefügt (blaue Linie in Abbildung 8). Aufgrund der modelltechnischen Anforderungen wurden die Salzschichten nicht als Modelleinheiten modelliert, sodass die modellierten Schichten sich auf das Quartär, Tertiär und den Mittleren und Unteren Buntsandstein beschränken.



Abbildung 8: Profilschnitt durch ein generisches geologisches Modell einer flach lagernden Salzformation und dem Deckgebirge aus dem Projekt RESUS (Bertrams et al. 2020b)

Die blau markierte Störungszone ist nicht in Bertrams et al. 2020b enthalten.

Im dichtegetriebenen Strömungsmodell kann die Salzformation aufgrund der Massenerhaltung nur als Randbedingung abgebildet werden, sodass die postpermische Schicht des Unteren Buntsandstein (su) bereits die Modellbasis bildet (Abbildung 9). Das Modellgitter reicht in dieser abstrahierten Form an der mächtigsten Stelle von 50 m NN bis etwa -600 m NN und an den geringmächtigeren Bereichen von etwa 50 m NN bis -140 m NN. Um mögliche Randeffekte durch den Frisch- und Salzwassereinstrom entsprechend den Randbedingungen im eigentlichen Modellgebiet zu verringern, wurde das S1-Modell am rechten Modellrand um 1.000 m und am linken Modellrand um 500 m erweitert. So können die Subrosionsraten später für den eigentlichen Bereich der ursprünglichen Modellregionen betrachtet werden. Die Parametrisierung der lithostratigraphischen Einheiten wurde für die Erweiterung des Modells nicht verändert. Die Parametrisierung erfolgte anhand der Angaben aus Bertrams et al. 2020b. Für die verwendeten Randbedingungen und Parameter wird auf den Zwischenbericht zur Bewertung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum anhand hydrogeologischer Modelle (Johnen, Flügge & Fahrenholz 2024) verwiesen. Nachfolgend wird das Modell mit Steinsalz in stratiformer Lagerung (RESUS S1) als S1-Modell beschrieben.



Abbildung 9: Meso- und känozoische Schichten des S1-Modells

(q = Quartär, t = Tertiär, sm = Mittlerer Buntsandstein, su = Unterer Buntsandstein).

4.4.2.2 RESUS Endlagersystem S2 (Salz steil)

Im Vorhaben RESUS wurde neben dem generischen Modell für einen Standort mit dem Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung auch ein generisches Modell für einen Standort mit dem Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung entwickelt (Bertrams et al. 2020a). Dieses Modell mit für Deutschland typischen stratigraphischen Gesteinsabfolgen wird als Grundlage für die Modellrechnungen für Steinsalz in steiler Lagerung zur quantitativen Bestimmung erwartbarer Subrosionsraten herangezogen.

Das Modell bildet auf der Basis der Kenntnisse der norddeutschen Salzdiapire eine Salzformation in steiler Lagerung ab. Insgesamt umfasst das Modell 16 Modelleinheiten und hat eine Länge von etwa 9 km und erstreckt sich bis in -5.500 m NN (Abbildung 10: Profilschnitt durch ein generisches geologisches Modell einer steil lagernden Salzformation und dem Deckgebirge aus dem Projekt RESUS (Bertrams et al. 2020a)). Der Salzdiapir ist dem Zechstein zuzuordnen und durchbricht die jüngeren geologischen Schichten der Trias, Jura und Kreide. Oberhalb des Hutgesteins und der Kreide-Schichten befinden sich Schichten des Känozoikums. Die Basis des Salzdiapirs befindet sich in etwa bei -3.150 m NN und wird von einer mächtigen Schicht des Rotliegenden unterlagert, die bis zur Basis des Modells bei -5.500 m NN reicht. An der Oberfläche des Salzdiapirs ist 55 bis 80 m mächtiges Hutgestein vorhanden. Die Mächtigkeiten der folgenden Schichten reicht von sehr geringmächtigen känozoischen Schichten bis zu 1.000 m mächtigen mesozoischen Schichten, die zum Salzdiapir jedoch auskeilen und im Bereich des Hutgesteins erodiert wurden (Abbildung 10:Profilschnitt durch ein generisches geologisches Modell einer steil lagernden Salzformation und dem Deckgebirge aus dem Projekt RESUS (Bertrams et al. 2020a)).



Abbildung 10: Profilschnitt durch ein generisches geologisches Modell einer steil lagernden Salzformation und dem Deckgebirge aus dem Projekt RESUS (Bertrams et al. 2020a)
Wie bereits für das S1-Modell beschrieben, können Salzformationen im Modell nur als Randbedingungen im Modell implementiert werden. Dadurch bildet die Oberfläche des Salinars auch in diesem Modell die Basis für das Modellgitter. Demnach ist der tiefste Punkt im Modell bei -2.815 m NN am linken Modellrand und im Bereich der Hutgesteinsbasis befindet sich die Oberkante des Salinars bei etwa -120 m NN (Abbildung 11).



Abbildung 11: Meso- und känozoischen Schichten des S2-Modells

(q = Quartär, t = Tertiär, kro = Obere Kreide, kru = Untere Kreide, jo = Oberer Jura, jm = Mittlerer Jura, ju = Unterer Jura, k = Keuper, sm = Mittlerer Buntsandstein, su = Unterer Buntsandstein)

Um mögliche Randeffekte durch den Frisch- und Salzwassereinstrom entsprechend den Randbedingungen im eigentlichen Modellgebiet zu verringern, wurde das S2-Modell am linken und rechten Modellrand um jeweils 500 m erweitert. Die Parametrisierung der lithostratigraphischen Einheiten wurde für die Erweiterung des Modells nicht verändert. Die Parameter wurden aus Bertrams et al. 2020b; Bertrams et al. 2020a; Kahnt & Wenderholm 2023 entnommen. Für die verwendeten Randbedingungen und Parameter wird auf den Zwischenbericht zur Bewertung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum anhand hydrogeologischer Modelle (Johnen, Flügge & Fahrenholz 2024) verwiesen. Nachfolgend wird das Modell mit Steinsalz in steiler Lagerung (RESUS S2) als S2-Modell beschrieben.

4.4.3 Modellergebnisse S1-Modell (Salz stratiform)

4.4.3.1 S1-Modell mit niederdimensionaler Kluft

Das S1-Modell wurde an der Salzbasis in vier Zonen gegliedert, um die Subrosionsraten in verschiedenen Bereichen des Modells auszuwerten (Abbildung 12). Die Zonen am linken und rechten Modellrand werden für die Auswertung nicht betrachtet (farblich heller dargestellt), da Randeffekte durch die Randbedingungen entstehen können und zu überoder unterschätzten Subrosionsraten führen können. Zone 1 ist die längste Zone mit Neigungen von 5° bis 10° und einer Gesamtlänge von 4.152 m. Die im Modell implementierte Kluft befindet sich in Zone 2 und liegt damit in der kürzesten Zone mit 57 m bzw. 67 m bei der äquidimensionalen Kluft. Die Zonen 3 und 4 messen 1.147 m und 500 m. Der Bereich rechts von Zone 4 wurde nicht weiter in die Betrachtung der Subrosionsraten einbezogen, wie bereits zuvor beschrieben, um mögliche Randeffekte beim Einstrom von Frischwasser auszublenden. Es ist zu beachten, dass die Subrosionsraten der Zone 4 durch den harten Übergang der Salzrandbedingungen nicht direkt mit den Zonen 1 bis 3 verglichen werden sollten. Zone 4 wurde dennoch weiter in der Auswertung betrachtet, da der Übergang zwischen Frischwasser und Salzwasser ein Extrem für die Subrosionsrate abbildet, die ähnlich einer Kluft mit Frischwasserzustrom zu anzusehen ist.



Abbildung 12: S1-Modell mit den lithostratigraphischen Einheiten mit der Zonierung zur Auswertung der Subrosionsraten

Zum Start der Modellrechnungen befindet sich nur Frischwasser im Modell. Mit den Salzrandbedingung an der Modellbasis kommt es zur Aufsättigung der wässrigen Lösung im Modellgebiet. Die Berechnungen werden mindestens so weit fortgeführt, bis sich die Salzmasse und Salzverteilung in einem stationären Zustand befindet. Dieser Zustand wird für das S2-Modell nach etwa 6.500 Jahren erreicht (Abbildung 13).



Abbildung 13: Salzmasse in Kilogramm im S1-Modell über die Zeit bis zum stationären Zustand nach ca. 6.500 Jahren (doppellogarithmische Darstellung)

Die Fließgeschwindigkeiten sind in der quartären Schicht am höchsten, in der Schicht des Unteren Buntsandsteins sind die Fließgeschwindigkeiten entsprechend der geringen Permeabilitäten am niedrigsten (Abbildung 14). Die auskeilende Schicht des Mittleren Buntsandsteins weist höhere Fließgeschwindigkeiten gegenüber dem Tertiär auf. Im rechten Modellbereich fließt das Wasser im Tertiär vorwiegend parallel zur Schichtung,

mit dem Auftreten des Mittleren Buntsandsteins verändert sich die Fließrichtung etwas in Richtung des permeableren Mittleren Buntsandsteins.



Abbildung 14: Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten im S1-Modell für den Rechenfall "gemäßigtes Klima"

Die Aufsättigung dauert mehrere tausend Jahre bis zum stationären Zustand und findet primär im Unteren Buntsandstein statt. Die höheren Fließgeschwindigkeiten im Mittleren Buntsandstein verhindern eine gleichmäßige Verteilung des Salzes im gesamten Modellgebiet (Abbildung 15). Salz, das in die Schichten des Mittleren Buntsandstein transportiert wird, wird in Strömungsrichtung aus dem Modell transportiert. So erreicht nur ein geringfügiger Anteil der Salzmasse die guartären und tertiären Schichten. Eine Salzkonzentration von mehr als 1 % wird im Tertiär nur im rechten Modellbereich mit geringer Mächtigkeit erreicht. In der Vergrößerung in Abbildung 15 ist im linken Bildbereich die Kluft zu erkennen. Entlang der Kluft kommt es im Unteren Buntsandstein zu einer geringeren Salzkonzentration gegenüber den umliegenden Schichten aufgrund des erhöhten Frischwasserzustroms durch die Grundwasserneubildung von der Modelloberfläche. Im rechten Bildbereich ist die auskeilende Schicht des Mittleren Buntsandsteins zu sehen. Ganz rechts im Bild treffen Tertiär (Permeabilität 1.10⁻¹³ m²) und Unterer Buntsandstein (Permeabilität 1.10⁻¹⁴ m²) aufeinander. Im restlichen Bildbereich trifft der Untere Buntsandstein auf den Mittleren Buntsandstein mit einer Permeabilität von 1.10⁻¹² m². Es kommt zu einem schärferen Übergang zwischen Salz- und Frischwasser durch die verschiedenen Fließgeschwindigkeiten.



Abbildung 15: Salzverteilung im S1-Modell im stationären Zustand für den Klimazustand "gemäßigtes Klima" nach 10.000 Jahren mit Vergrößerung im Bereich der Kluft (unten)

Die Salzverteilung im stationären Zustand für den Klimazustand "gemäßigtes Klima" wurde daraufhin als Anfangsbedingung für die weiteren Rechnungen für die anderen Klimazustände verwendet. Die Randbedingungen und eine ausführliche Ergebniszusammenstellung zu den Klimazuständen sind im Zwischenbericht zur Bewertung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum anhand hydrogeologischer Modelle (Johnen, Flügge & Fahrenholz 2024) zu finden. Nachfolgend werden die Ergebnisse knapp zusammengefasst.

Die Strömungsverhältnisse werden vorwiegend von den Randbedingungen geprägt und die Strömung verläuft meist parallel zur Schichtung. Bei den Klimazuständen "Permafrost" und "Meeresspiegelanstieg" kommt es zu veränderten Strömungsrichtungen. Der Permafrost führt mit den undurchlässigeren Schichten zu einer veränderten Druckverteilung. Die geschlossenen Ränder des Klimazustands "Meeresspiegelanstieg" führen zu einem dichtegetriebenen dominertem Strömungsmilieu mit variierenden Strömungsrichtungen. In Abbildung 16 sind die Strömungsgeschwindigkeiten 500 m vom linken Modellrand entfernt über ein Tiefenprofil aufgetragen.

Die Geschwindigkeiten reichen von $1 \cdot 10^{-5}$ m s⁻¹ bis $1 \cdot 10^{-16}$ m s⁻¹ im gesamten Modellgebiet. Die maximalen und minimalen Geschwindigkeiten finden sich jeweils im Quartär, einmal im Klimazustand "Vergletscherung" und im Klimazustand "Permafrost". Die hohen Geschwindigkeiten gehen auf den höheren Druckgradienten zurück, die geringen Geschwindigkeiten auf die gefrorenen bzw. undurchlässigen quartären Schichten. Die häufigsten Geschwindigkeiten liegen zwischen $1 \cdot 10^{-6}$ m s⁻¹ bis $1 \cdot 10^{-10}$ m s⁻¹, mit Ausnahme des Klimazustandes "Meeresspiegelanstieg", bei dem die Geschwindigkeiten an der Modelbasis bis etwa $2 \cdot 10^{-11}$ m s⁻¹ reichen.



Abbildung 16: Strömungsgeschwindigkeiten im S1-Modell 500 m vom linken Modellrand aufgetragen über die Tiefe für alle Klimazustände

Mit dem stationären Zustand des Klimazustandes "gemäßigtes Klima" beginnend, verändern sich die Salzverteilungen für die weiteren Klimazustände und erreichen nach un-terschiedlich langer Zeit den stationären Zustand (Abbildung 17).

Durch die gefrorenen oberflächennahen Schichten im Klimazustand "Permafrost" kommt es mit den gesetzten Randbedingungen zu einem Einstrom von Frischwasser in den Mittleren Buntsandstein am linken Modellrand. Das dort einströmende Grundwasser strömt im Unteren Buntsandstein aus und führt eine klarere Trennung zwischen Frischund Salzwasser herbei. Zusätzlich sind die Fließgeschwindigkeiten geringer gegenüber dem Klimazustand "gemäßigtes Klima". Die geringeren Fließgeschwindigkeiten lassen einen gleichmäßigeren Transport in oberflächennähere Schichten zu. Das gelöste Salz wird in diesem Rechenfall nicht komplett in Richtung des linken Modellrandes transportiert, sondern kann sich in Richtung der oberflächennäheren Schichten bewegen.

Mit den Randbedingungen für "Vergletscherung und Permafrost" kommt es am linken Modellrand zu einer vergleichbaren Salzverteilung wie im Modellzustand "Permafrost", am rechten Modellrand führt der höhere Druck des Gletschers zu einer klareren Grenze zwischen Frisch- und Salzwasser. Bis in den Bereich des Permafrostes ist die schärfere Grenze zwischen Frisch- und Salzwasser vorhanden, danach kann über den Mittleren Buntsandstein viel Grundwasser in Strömungsrichtung abfließen und es kommt zu einer ähnlichen Salzverteilung im linken Modellbereich wie im Klimazustand "Permafrost".

Die Salzverteilung der Modellrechnung "Vergletscherung" weist eine sichtbar geringere Versalzung im Modellgebiet auf. Grund dafür sind die höheren Fließgeschwindigkeiten in allen lithologischen Schichten. Das gelöste Salz wird gegenüber anderen Klimazuständen schneller abtransportiert. Der Übergang von Salz- zu Frischwasser ist abhängig von der Modell- und Schichtmächtigkeit und ist im Klimazustand "Vergletscherung" rela-tiv gleichmäßig verteilt.

Im Klimazustand "Glaziale Rinnen" werden in den oberflächennahen Schichten höhere Permeabilitäten angenommen. Das führt zu höheren Fließgeschwindigkeiten, vor allem in den tertiären Schichten. In diesem Zusammenhang wird der zusätzliche Frischwasserzustrom über die Kluft und der Einfluss des Auskeilens des Mittleren Buntsandsteins verringert. Die Kluft und der Schichtverlauf sind weniger deutlich aus der Verteilung des Salzes zu erkennen.

Entsprechend der hydraulisch geschlossenen rechten und linken Modellränder kommt es im Klimazustand "Meeresspiegelanstieg" zu einer gleichmäßigeren Versalzung über die Modellmächtigkeit. Die geringere Salzkonzentration des Meerwassers verhindert eine stärkere Versalzung bis hin zur vollständigen Aufsättigung bis zur Modelloberfläche. Am rechten Modelrand sind Artefakte der gesetzten Randbedingungen vorhanden.



Abbildung 17: Salzverteilungen im stationären Zustand für die Klimazustände "Permafrost" (6.500 Jahre Simulationszeitraum), "Vergletscherung und Permafrost" (10.000 Jahre Simulationszeitraum), "Vergletscherung" (10.000 Jahre Simulationszeitraum), "glaziale Rinnen" (10.000 Jahre Simulationszeitraum) und "Meeresspiegelanstieg" (12.000 Jahre Simulationszeitraum) des S1-Modells

Die stationären Strömungsverhältnisse und Salzverteilungen der Klimazustände führen zu unterschiedlichen Subrosionsraten. Die Subrosionsraten variieren für die verschiedenen Zonen und Klimazustände von 0,04 bis 2,65 mm a⁻¹. Die höchsten Subrosionsraten werden in den Klimazuständen "Vergletscherung" und "Vergletscherung mit Permafrost" in Zone 4 erreicht. Dabei ist anzumerken, dass die Subrosionsraten in Zone 4 durch den Übergang von einer Salzrandbedingung zu einer ungesättigten Randbedingung geprägt ist und nicht repräsentativ für reale Subrosionsraten sind. Dennoch zeigen die Werte in Zone 4 den deutlichen Effekt der Lösung von Salz, wenn Frischwasser auf Salzgestein trifft. In den Klimazuständen "gemäßigtes Klima", "glaziale Rinnen/Erosion" und "Meeresspiegelanstieg" liegen die Raten in Zone 4 zwischen 0,31 und 0,42 mm a⁻¹. Die

Subrosionsraten in den Zonen 1 bis 3 reichen für den Klimazustand "Vergletscherung" bis 1,72 mm a⁻¹ beziehungsweise 1,7 mm a⁻¹ für "Vergletscherung mit Permafrost" und sind damit um ein Mehrfaches höher gegenüber den anderen Klimazuständen, deren Raten unter 0,25 mm a⁻¹ liegen. Die geringsten Subrosionsraten mit unter 0,1 mm a⁻¹ sind in den Zonen 1 bis 3 für die Klimazustände "Permafrost", "glaziale Rinne" und "Meeresspiegelanstieg" zu finden.



Abbildung 18: Subrosionsraten im stationären Zustand des S1-Modells für die jeweiligen Klimazustände in den Zonen nach Abbildung 12

4.4.3.2 S1-Modell mit äquidimensionaler Kluft

Die zuvor genannten Berechnungen berücksichtigten die Kluft als niederdimensionales Element innerhalb des zweidimensionalen Modellgitters. Die Berechnungen wurden zusätzlich auch mit einer äquidimensionalen Kluft durchgeführt. Dabei wurde das Gitter an die Kluftgittergröße angepasst und weicht von dem Rechengitter mit niederdimensionaler Kluft ab. Die Permeabilität der äquidimensionalen abgebildeten Kluft wurde auf die Mächtigkeit der niederdimensionalen Kluft umgerechnet.

Die Unterschiede zwischen der niederdimensionalen Kluft (Kapitel 4.4.3.1) und der äquidimensionalen Kluft sind über das gesamte Modellgebiet betrachtet gering. Die Strömungsrichtungen- und Geschwindigkeiten ähneln sich stark, abgesehen vom Bereich der Kluft. Im niederdimensionalen Modell ist die Strömungsrichtung entlang der Kluft zur Modellbasis gerichtet und in der Umgebung der Kluft werden die Strömungsrichtungen von der Kluft nicht so stark beeinflusst, wie es im Modell mit äquidimensionaler Kluft der Fall ist (Abbildung 19). Bei der äquidimensionalen Kluft kommt es zu einer Geschwindigkeitserhöhung im Kluftbereich und der direkten Umgebung. Zusätzlich ist ein stärkerer Einstrom vom Quartär ins Tertiär zu beobachten.



Abbildung 19: Geschwindigkeitsverteilung im Bereich der Kluft im S1-Modell mit niederdimensionaler Kluft (oben) und äquidimensionaler Kluft (unten) mit gleicher logarithmischer Geschwindigkeitsskala

Die Unterschiede der Strömungsrichtungen beeinflussen auch die Salzverteilung im Modell. Die niederdimensionale Kluft zeigt keinen großräumigen Effekt auf die umliegende Salzverteilung (Abbildung 19 oben). Im niederdimensionalen Modell dagegen ist in der Salzkonzentration ein kleiner Sprung entlang der Kluft und im Abstrom der Kluft, durch den Zustrom von Frischwasser, zu erkennen.

Im Modell mit äquidimensionaler Kluft entstehen veränderte Fließrichtungen mit einer stärkeren Interaktion zwischen der Kluft und dem umliegenden Gestein. Durch die Anpassung der Permeabilität auf die numerisch abgebildete Kluftmächtigkeit ist die Permeabilität geringer als in den Schichten des Mittleren Buntsandstein, Tertiärs und Quartärs. Am Schnittpunkt zwischen Quartär, Tertiär und Kluft kommt es zu hohen Geschwindigkeiten ausgehend vom Quartär. Vom Quartär drückt Wasser in das Tertiär und in die Kluft ein, wodurch die kreisförmigen Strömungsrichtungen zustande kommen.

Am Schichtübergang zwischen Kluft, Mittlerem und Unterem Buntsandstein dringt, bereits vor der Kluft, ebenfalls Grundwasser aus dem permeableren Mittleren Buntsandstein in den Unteren Bundsandstein ein. Dabei wird Frischwasser in Richtung der Modellbasis transportiert und führt zu einer Frischwassermulde im sonst stärker aufgesättigten Unteren Buntsandstein (Abbildung 20).



Abbildung 20: Salzverteilung im Bereich der Kluft im S1-Modell mit niederdimensionaler Kluft (oben) und mit äquidimensionaler Kluft (unten)

Die Ergebnisse der Modellrechnungen mit einer äquidimensionalen Kluft weisen für die Klimazustände ein ähnliches Bild in Bezug auf die Strömungsgeschwindigkeiten und Subrosionsraten auf wie das Modell mit niederdimensionaler Kluft (Abbildung 16). Die Subrosionsraten weichen in absoluten Werten in allen Zonen geringfügig voneinander ab. Im Bereich der Kluft ist in den Strömungs- und Salzkonzentrationswerten zu erkennen, dass im Modell mit äquidimensionaler Kluft der Effekt des Salzwasserzustroms gegenüber dem Zufluss der eindimensionalen Kluft höher ist (Abbildung 18 und Abbildung 21).

Die Subrosionsraten variieren für die verschiedenen Zonen und Klimazustände zwischen 0,04 bis 2,58 mm a⁻¹. Die höchsten Subrosionsraten werden in den Klimazuständen "Vergletscherung" und "Vergletscherung mit Permafrost" in Zone 4 erreicht. Die Subrosionsrate reichen für den Klimazustand "Vergletscherung" in den Zonen 1 bis 3 bis 2,19 mm a⁻¹ beziehungsweise 1,88 mm a⁻¹ für "Vergletscherung mit Permafrost". Die Werte sind damit um ein Mehrfaches höher verglichen mit den anderen Klimazuständen, deren Raten unter 0,38 mm a⁻¹ liegen. Die geringsten Subrosionsraten mit unter 0,1 mm a⁻¹ sind in den Zonen 1 bis 3 für die Klimazustände "Permafrost", "glaziale Rinnen" und "Meeresspiegelanstieg" zu finden.



Abbildung 21: Subrosionsraten im stationären Zustand des S1-Modells für die jeweiligen Klimazustände in den Zonen nach Abbildung 12 für das Modell mit äquidimensionaler Kluft

4.4.3.3 S1-Modell ohne Kluft

Neben den vergleichenden Rechnungen mit niederdimensionaler und äquidimensionaler Kluft wurden auch Berechnungen zum S1-Modell ohne Kluft gerechnet. Als Basis wurde das Gitter des äquidimensionalen Modells verwendet. Die zuvor als Kluft parametrisierten Elemente wurden den horizontal benachbarten lithologischen Einheiten zugewiesen. Die Randbedingungen gleichen den zuvor beschriebenen Randbedingungen.

Die Subrosionsraten der Zonen 1 und 4 bleiben im stationären Zustand gegenüber der äquidimensionalen Kluft unverändert bei 0,15 und 0,36 mm a⁻¹. Zone 2 weist eine mit 0,02 mm a⁻¹ geringere und Zone 3 eine um 0,15 mm a⁻¹ geringere Rate auf. Der Einfluss der Kluft wirkt sich vor allem auf die Subrosionsraten in Zone 3 aus. Im Modell mit äquidimensionalen Kluft wurden Subrosionsraten von 0,38 mm a⁻¹ berechnet, im Modell ohne Kluft sind es nur noch 0,23 mm a⁻¹ (Tabelle 19).

Für den Klimazustand "Permafrost" ergeben sich geringe bis keine Unterschiede in den Subrosionsraten zwischen den Subrosionsraten im stationären Zustand für die verschiedenen Zonen. Der Permafrost verhindert den Zustrom von Frischwasser durch die quartären und tertiären Schichten. Dadurch sind die Subrosionsraten auch mit Kluft gering, sodass in allen Zonen bis auf eine Abweichung von 0,01 mm a⁻¹ die Werte identisch bleiben.

Gegenüber dem reinen Permafrost sind im Modell mit "Vergletscherung und Permafrost" Werteunterschiede von bis zu 0,2 mm a⁻¹ zu sehen. In Zone 3 ist die Subrosionsrate im Modell mit Kluft um 0,2 mm a⁻¹ höher. Die Subrosionsraten in den anderen Zonen bleiben gleich. Aufgrund der hohen Drücke bleiben die Subrosionsraten im Rechenfall mit "Vergletscherung" weiterhin hoch. Die fehlende Kluft führt in Zone 2 und 3 zu einer Verringerung der Subrosionsraten von 0,28 und 0,13 mm a⁻¹. Zuvor konnte über die Kluft ein höherer Frischwasserzustrom bis zur Modellbasis erreicht werden, der ohne Kluft nicht mehr so stark zur Modellbasis, sondern parallel zur Schichtung verläuft und dadurch gleichmäßigere Subrosionsraten verursacht.

Ein Einfluss im Klimazustand "Glaziale Rinnen" durch die Kluft ist anhand der Subrosionsraten nicht zu erkennen. Die gut durchlässigen Schichten erstrecken sich nun durchgehend vom Mittleren Buntsandstein bis zum Quartär. Das führt zu einer zusätzlichen Entlastung des Unteren Buntsandsteins und geringen Fließgeschwindigkeiten an der Modellbasis.

Für den Klimazustand "Meeresspiegelanstieg" sind die Subrosionsraten ohne Kluft vernachlässigbar höher gegenüber den Subrosionsraten im Modell mit äquidimensionaler Kluft. Die Geschwindigkeiten und die Salzverteilung sind dabei ebenfalls nahezu identisch, da ohne die gerichtete Strömung der Effekt der Kluft vernachlässigbar gering ist.

mazustanue				
Subrosionsrate in mm a ⁻¹ für Klimazustand	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Gemäßigtes Klima	0,15 (0,00)	0,29 (0,02)	0,23 (0,15)	0,36 (0,00)
Permafrost	0,07 (0,00)	0,10 (-0,01)	0,07 (-0,01)	0,08 (-0,01)
Vergletscherung mit Permafrost	0,43 (-0,01)	1,89 (0,00)	1,47 (0,20)	2,56 (-0,00)
Vergletscherung	0,92 (-0,01)	1,90 (0,28)	1,48 (0,13)	2,58 (0,00)
Glaziale Rinnen	0,07 (0,00)	0,10 (0,00)	0,05 (0,00)	0,21 (0,00)
Meeresspiegelanstieg	0,07 (-0,02)	0,10 (-0,03)	0,04 (-0,01)	0,24 (-0,03)

Tabelle 19:Subrosionsraten über die Zeit für das S1-Modell ohne Kluft für alle Kli-
mazustände

In Klammern ist die Differenz zu den Subrosionsraten des Modells mit äquidimensionaler Kluft abgebildet. Positive Werte bedeuten höhere Subrosionsraten im Modell mit äquidimensionaler Kluft.

Die Unterschiede in den Subrosionsraten für die Berechnungen mit und ohne Kluft sind vor allem bei höheren Drücken der Klimazustände "Vergletscherung" und "Vergletscherung und Permafrost" zu erkennen. In den Modellrechnungen mit geringeren Druckgradienten verringert sich der Einfluss der Kluft auf die Subrosion.

4.4.4 Modellergebnisse S2-Modell (Salz steil)

Das S2-Modell wurde für die Auswertung der Subrosionsraten an der Salzbasis in 13 Zonen gegliedert (Abbildung 22). Die Subrosionsraten an den erweiterten Randbereichen (farblich heller dargestellt in Abbildung 22) werden aufgrund der möglichen Randeffekte nicht weiter betrachtet. Die Zonen wurden an der Neigung und den lithostratigraphischen Schichtfolgen orientiert.



Abbildung 22: S2-Modell mit den lithostratigraphischen Einheiten mit der Zonierung zur Auswertung der Subrosionsraten

Die Modellbasis des Unteren Buntsandsteins wurde zusätzlich in einen Bereich mit geringerer $(5 - 10^{\circ})$ und größerer $(25 - 40^{\circ})$ Neigung unterteilt (Zone 1, 2139 m; Zone 2, 1211 m; Zone 12, 1198 m; Zone 13, 2355 m). Zone 3 und 11 decken den Bereich des Mittleren Buntsandsteins ab und weisen Neigungen von etwa 50° und eine Länge von 911 m auf der linken, sowie 65° und 744 m auf der rechten Flanke des Salzdiapirs auf. Die stratigraphische Einheit des Keupers spiegelt sich in Zone 4 und 10 wider (links: 65°, 417 m; rechts: 75°, 384 m). Die Zonen 5 (298 m), 6 (255 m), 8 (328 m) und 9 (268 m) stellen die Kontaktfläche zwischen Unterem und Mittlerem Jura zum Salzdiapir da und weisen alle eine Neigung von etwa 80° auf. Zone 7 bildet das Hutgestein mit einer Länge von 1229 m ab (Tabelle 20).

Zone	Lithostratigraphische Einheit	Kantenlänge [m]	Neigung [°]
1	Unterer Buntsandstein	2.139	5 – 10
2	Unterer Buntsandstein	1.211	25 – 40
3	Mittlerer Buntsandstein	911	50
4	Keuper	417	65
5	Unterer Jura	298	80
6	Mittlerer Jura	255	80
7	Hutgestein	1.229	0
8	Mittlerer Jura	328	80
9	Unterer Jura	268	80
10	Keuper	384	75
11	Mittlerer Buntsandstein	744	65
12	Unterer Buntsandstein 1.198		25 – 40
13	Unterer Buntsandstein 2.355		5 – 10

Tabelle 20: Auswertungszonen mit Kantenlänge und Neigung in S2-Modell

Zum Start der Modellrechnungen befindet sich nur Frischwasser im Modell. Mit den Salzrandbedingung an der Modellbasis kommt es zur Versalzung im Modellgebiet. Die Berechnungen wurden mindestens so weit fortgeführt, bis sich die Salzmasse in einem stationären Zustand befindet. Dieser Zustand wird für das S2-Modell nach etwa 2.000 Jahren erreicht.



Abbildung 23: Salzmasse in Kilogramm im S2-Modell über die Zeit bis zum stationären Zustand nach ca. 2.000 Jahren (doppellogarithmische Darstellung)

Das Grundwasser strömt in den oberen Schichten am rechten Modellrand ein, mit Ausnahme des Unteren Buntsandsteins und der Basis des Mittleren Buntsandsteins. Dort strömt das Grundwasser auch am rechten Modellrand aus dem Modell aus. Das meiste Wasser strömt entlang des Quartärs mit höheren Fließgeschwindigkeiten über den Salzstock. Das undurchlässigere Tertiär wird ebenfalls von rechts nach links durchströmt. Durch das Hutgestein strömt aufgrund der geringen Durchlässigkeit weniger Wasser. Die geringe Mächtigkeit der Schichten oberhalb des Salzdomes führen zu einem Rückfluss des Grundwassers über die rechte Flanke des Salzdoms, mit Geschwindigkeiten etwas geringer gegenüber denen im Quartär.



Abbildung 24: Druckverteilung und Fließgeschwindigkeiten im S2-Modell für den Rechenfall "gemäßigtes Klima"

Im S2-Modell führen die Abfolge der hydrogeologischen Schichten mit den dazugehörigen Eigenschaften zur Ausbildung von Konvektionszellen in der undurchlässigeren Schicht des Unteren Buntsandsteins (Abbildung 25). Der Mittlere Buntsandstein weist eine höhere Permeabilität gegenüber dem Unteren Buntsandstein auf. Zusätzlich ist die

Neigung an der Grenzfläche zwischen dem Salzstock und dem Mittleren Buntsandstein deutlich größer (Tabelle 20), sodass die Fließgeschwindigkeiten im mittleren Buntsandstein zum Teil um das Hundertfache höher sind. Im Mittleren Buntsandstein wird das Salz primär durch advektive Prozesse transportiert, wohingegen im Unteren Buntsandstein diffusive Prozesse und der dichtegetriebene Transport dominieren. Das Salz strömt im Mittleren Buntsandstein vom Salzdom zu den Rändern des Modelles aus, dringt aber teilweise in den Unteren Buntsandstein ein und die Dichteunterschiede führen zu Konvektionszellen (Abbildung 25). Diese bilden sich bereits nach wenigen Jahren im Ansatz aus und reichen mit der Zeit immer weiter zum Rand des Modells und zur Modellbasis. Der Salztransport von der Modellbasis im Unteren Buntsandstein ist dabei langsamer als das Absinken des Salzes durch Konvektionszellen vom Mittleren Buntsandstein.

Nach weniger als 100 Jahren erreicht das Salz den linken und rechten Modellrand im Mittleren Buntsandstein. Die Strömungsverhältnisse führen in Verbindung mit den Randbedingungen zu den unterschiedlichen Salzkonzentrationen am rechten und linken Modellrand für den Klimazustand "gemäßigtes Klima" (Abbildung 24). Auf der rechten Modellseite strömt das Grundwasser auch im Mittleren Buntsandstein ein, dadurch entsteht ein stärkerer Kontrast zwischen Frisch- und Salzwasser und keine gleichmäßige Verteilung, wie es am linken Modellrand der Fall ist. Am linken Modellrand besteht im Rechenfall "gemäßigtes Klima" kein Einstrom in das Modell, sondern nur ein Ausstrom, sodass sich eine Salzverteilung ohne starken Kontrast zwischen Frisch- und Salzwasser einstellt.



Abbildung 25: Salzverteilung im S2-Modell nach 50, 100, 400, 1.000 und nach 7.000 Jahren für den Klimazustand "gemäßigtes Klima"

Die Salzverteilung im stationären Zustand für den Klimazustand "gemäßigtes Klima" wurde daraufhin als Anfangsbedingung für die weiteren Rechnungen für die anderen Klimazustände verwendet. Die Randbedingungen und eine ausführliche Ergebniszusammenstellung zu den Klimazuständen sind im Zwischenbericht zur Bewertung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum anhand hydrogeologischer Modelle (Johnen, Flügge & Fahrenholz 2024) zu finden. Nachfolgend werden die Ergebnisse knapp zusammengefasst.

Die Strömungsverhältnisse werden im zweidimensionalen Modell mit steil lagerndem Salz durch eine Zweiteilung des Modellgebietes geprägt. Die Strömung wird über den Salzstock geleitet, der in den meisten Klimazuständen als Engpass für die Strömung fungiert. In Abbildung 26 sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf der rechten Modellseite in 6.000 m vom linken Modellrand entfernt über ein Tiefenprofil aufgetragen.

Die Geschwindigkeiten reichen von $1 \cdot 10^{-5}$ m s⁻¹ bis $1 \cdot 10^{-13}$ m s⁻¹, geringere Geschwindigkeiten treten nur im Hutgestein auf. Die maximalen und minimalen Geschwindigkeiten finden sich im Quartär, einmal im Klimazustand "Vergletscherung" und im Klimazustand "Permafrost". Die hohen Geschwindigkeiten gehen auf den höheren Druckgradienten zurück, die geringen Geschwindigkeiten auf die gefrorenen bzw. undurchlässigen quartären Schichten. Die häufigsten Geschwindigkeiten liegen zwischen $1 \cdot 10^{-6}$ m s⁻¹ bis $1 \cdot 10^{-10}$ m s⁻¹, mit Ausnahme des Klimazustandes "Meeresspiegelanstieg", bei dem die Geschwindigkeiten etwa um ein bis zwei Größenordnungen geringer sind ($1 \cdot 10^{-8}$ m s⁻¹ bis $1 \cdot 10^{-11}$ m s⁻¹).

Im Ergebnisbericht sind auch Fließgeschwindigkeiten für die linke Modellhälfte abgebildet. Dort unterscheiden sich vor allem die Geschwindigkeiten im "Vergletscherung mit Permafrost" im oberflächennahen Bereich entsprechend dem Permafrostboden auf der linken Modellhälfte. Ansonsten befinden sich die Strömungsgeschwindigkeiten auf beiden Seiten in ähnlichen Größenordnungen.



Abbildung 26: Strömungsgeschwindigkeiten im S2-Modell 6.000 m vom linken Modellrand entfernt aufgetragen über die Tiefe für alle Klimazustände

Mit dem stationären Zustand des Klimazustandes "gemäßigtes Klima" beginnend, verändern sich die Salzkonzentrationsverteilungen für die weiteren Klimazustände und erreichen nach unterschiedlich langer Zeit den stationären Zustand (Abbildung 27).

Durch die gefrorenen oberflächennahen Schichten im Klimazustand "Permafrost" kommt es hydraulisch zu einer Zweiteilung des Modells aufgrund der Druckrandbedingungen, bei der auf beiden Seiten Frischwasser ins Modell einströmt. Dadurch bildet sich auch in der linken Modellhälfte ein deutliches Gefälle der Konzentration Frisch- und Salzwasser aus, wie es bereits in der rechten Modellhälfte gegeben ist.

Mit den Randbedingungen für "Vergletscherung und Permafrost" kommt es am linken Modellrand zu einer vergleichbaren Salzverteilung wie im Modellzustand "Permafrost", am rechten Modellrand führt der höhere Druck des Gletschers zu einer klareren Grenze zwischen Frisch- und Salzwasser. Die Grenze zwischen Salz- und Frischwasser verschiebt sich entsprechend dem höheren Frischwasserzustrom vom rechten Modellrand weiter nach links. Aufgrund der Permeabilitätsunterschiede bildet sich ein Versatz im Gefälle der Salzkonzentration zwischen Mittlerem und Unterem Buntsandstein aus.

Die Salzverteilung der Modellrechnung "Vergletscherung" weist in der rechten Modellhälfte nur geringfügige Unterschiede zum Rechenfall "Vergletscherung und Permafrost" auf. Oberhalb des Salzstocks verteilt sich das Salz gleichmäßiger in Richtung des linken Modellrandes, da hier kein Permafrost vorhanden ist. Der Grundwasserstrom über den Salzstock führt entgegen den Modellfällen mit Permafrost wieder zu einem gleichmäßigeren Salzgradienten am linken Modellrand durch den Ausstrom des Grundwassers über den gesamten linken Modellrand.

Im Klimazustand "Glaziale Rinnen" werden in den oberflächennahen Schichten höhere Permeabilitäten angenommen. Zu den betroffenen Schichten zählt auch das Hutgestein, sodass durch die höheren Permeabilitäten ein deutliches Lösungsverhalten an der Oberfläche des Salzstocks zu erkennen ist. Mit der nach links gerichteten Strömung wird Salz im Quartär und Tertiär aus dem Modell und ein Anteil auch in die darunterliegenden Schichten transportiert. Im Unteren und Mittleren Buntsandstein ähnelt die Verteilung dem Klimazustand "gemäßigtes Klima".

Entsprechend der hydraulisch geschlossenen rechten und linken Modellränder kommt es im Klimazustand "Meeresspiegelanstieg" zu einer nahezu kompletten Aufsättigung des Grundwassers mit Salz im gesamten Modellgebiet. Die geringere Salzkonzentration des Meerwassers verhindert eine stärkere Versalzung bis hin zur vollständigen Aufsättigung bis zur Modelloberfläche.

Permafrost - 1.0e+00 - 0.9 (-) 0.8 (-) 0.7 (-) 0.6 (-) 0.5 (-) 0.4 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.3 (-) 0.5 (-) 0.5 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.7 (-) 0.8 (-) 0.8 (-) 0.8 (-) 0.8 (-) 0.8 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.6 (-) 0.5 (-) 0.5 (-) 0.5 (-) 0.5 (-) 0.2 (-) 0.5 (-) 0.2 (-) 0.5 (-) 0.2 (-) 0.5 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.5 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.5 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.2 (-) 0.5 (-) 0.2 (-) 0.0e+00 Vergletscherung mit Permafrost 0.2 0.1 rel. 0.0e+00 Vergletscherung rel. soit concretration (.) 0.0e+00 Glaziale Rinnen / Erosion el. solt concretation (-) 0.1 ਰੁੱ 0.0e+00 Meeresspiegelanstieg 1.0e+00 0.9 0.8 concentration (-) 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 salt 0.2 Ð 0.1

Abbildung 27: Salzverteilungen im stationären Zustand für die Klimazustände "Permafrost" (2.800 Jahre), "Vergletscherung und Permafrost" (1.000 Jahre), "Vergletscherung" (2.000 Jahre), "Glaziale Rinnen" (1.600 Jahre) und "Meeresspiegelanstieg" (10.000 Jahre) des S2-Modells

0.0e+00

Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle

Die stationären Strömungsverhältnisse und Salzkonzentrationsverteilungen der Klimazustände führen zu unterschiedlichen Subrosionsraten. In den Zonen, die den seitlichen Rändern nahe liegen und geringe Hangneigungen aufweisen (Zone 1, 2, 12 und 13), liegen die Subrosionsraten, bis auf den Modellfall Vergletscherung in Zone 2 mit 0,16 mm a⁻¹, unter 0,1 mm a⁻¹. Weitere geringe Raten sind in Zone 7 (Hutgestein) zu finden, mit Ausnahme des Klimazustandes "glaziale Rinnen". Der Klimazustand "Glaziale Rinnen" hebt sich durch die hohen Subrosionsraten in Zone 7 hervor. Mit der Bildung der glazialen Rinne wird modelltechnisch auch das Hutgestein erodiert und der Freiraum mit Sedimentgestein verfüllt. Dadurch erhöht sich die Permeabilität und gering mineralisiertes Wasser strömt über den Salzstock. Dabei wird Salz gelöst, das zuvor durch die geringdurchlässige Schicht geschützt war.

In allen weiteren Zonen liegen die Subrosionsraten, mit Ausnahme des "Meeresspiegelanstiegs" (bis zu 1 mm a⁻¹ in den Zonen 6 und 8), deutlich höher. Im rechten Modellgebiet kommt es in den Zuständen "Vergletscherung" und "Vergletscherung mit Permafrost" zu geringeren Subrosionsraten durch die aufwärtsgerichtete Strömung durch den größeren Frischwasserzustrom vom rechten Modellrand, der dem abwärts gerichteten Salzstrom entgegenwirkt. Für die Rechenfälle "gemäßigtes Klima", "Permafrost" und "glaziale Rinnen" sind die Subrosionsraten ähnlich. Im linken Modellgebiet führen die Randbedingungen zu unterschiedlichen Subrosionsraten für die verschiedenen Zonen und Klimazustände. Beispielsweise kommt es im Klimazustand "Vergletscherung" durch den höheren Druck zu einer erhöhten Fließgeschwindigkeit über den Salzstock in die linke Modellhälfte. Dadurch erhöhen sich in den Zonen 3 bis 6 die Subrosionsraten. Im Modellfall "Vergletscherung mit Permafrost" ist dies nicht der Fall, da der Permafrost die Strömung zur linken Modellhälfte blockiert. Dennoch bleiben auch dort die Subrosionsraten hoch, da Frischwasser vom linken Modellrand einströmt.

4.4.5 Diskussion der subrodierten Gesteinsmächtigkeiten für die zu Grunde gelegten Klimaentwicklungen und Salzformationen

Im Zwischenbericht zur Bewertung der zukünftigen Entwicklung der Subrosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre (Fahrenholz et al. 2024) und in Kapitel 4.2 dieses Berichts werden mögliche Klimaszenarien für Nord- und Süddeutschland beschrieben. Diese basieren auf globalen Klimamodellen verschiedener Autoren und wurden entsprechend der Literatur auf mögliche zukünftige Entwicklungen in Deutschland angepasst. Das Resultat sind Szenarien, die als wahrscheinliche Entwicklungen für das zukünftige Klima in Deutschland gelten. Dennoch handelt es sich um mit erheblichen Ungewissheiten behafteten Szenarien, gerade in Bezug auf die ungewissen anthropogenen CO₂-Emissionen und deren Einfluss auf das Klima. Sicher ist jedoch, dass es über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren zu Veränderungen des Klimas in Deutschland kommen wird, die auch Einfluss auf den Prozess der Subrosion haben werden. Aus diesem Grund wurden, neben den bereits beschriebenen Szenarien zwei weitere Klimaszustände (Szenario 1 und 2) beispielhaft zur Berechnung möglicher Subrosionsmächtigkeiten verwendet (Abbildung 7).

4.4.5.1 Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten für die Klimaentwicklungen

Die jährlichen Subrosionsraten der jeweiligen stationären Klimazustände werden für die Berechnung der gesamten Subrosionsmächtigkeiten verwendet. Befinden wir uns in einer Warmzeit, so wird für die Dauer der Warmzeit die jährliche Subrosionsrate mit der Dauer des Klimazustandes multipliziert. Das Produkt aus dieser Berechnung wird mit weiteren im Klimaszenario auftretenden Produkten anderer Klimazustände addiert. Die Summe ergibt die Subrosionsmächtigkeit über den Zeitraum der gesamten definierten Klimaszenarien (Gleichung 1).

$$S_{Zone} = \sum_{i=1}^{n} (T_i * R_{Zone,k_i})$$
(1)

mit

Szone = Subrosionsmächtigkeit für eine bestimmte Zone in Millimetern,

n = Anzahl der Zeiträume und Klimazustand,

T_i = Dauer der i-ten Zeitraums in Jahren,

 $R_{Zone, ki}$ = Subrosionsrate für die Zone und die Klimazustand k_i in mm a⁻¹, mit k_i als Klimazustand des i-ten Zeitraums.

Entsprechend Gleichung (1) ergeben sich für die Zonen 1 bis 4 des S1-Modells mit niederdimensionaler Kluft für die jeweiligen Klimaszenarien Subrosionsmächtigkeiten zwischen 123 und 588 m (Abbildung 28). In Szenario 1 variieren die Subrosionsmächtigkeiten zwischen 126 und 285 m. Dabei wurden für Zone 1 die geringsten subrodierten Mächtigkeiten berechnet. Zone 4 mit dem durch die Randbedingungen gegebenen starken Salzkonzentrationsgradienten führt in allen Szenarien zu den höchsten Subrosionsmächtigkeiten. Zone 2 weist in allen Szenarien leicht höhere Werte gegenüber Zone 3 auf. Die höheren Werte können auf den Einfluss der Kluft zurückgeführt werden.

In allen Szenarien werden die geringsten Subrosionsmächtigkeiten in Zone 1 berechnet. Darauf folgen Zone 3, Zone 2 und zuletzt Zone 4 mit dem Übergang der Salzrandbedingung. Zudem zeigen die Klimaszenarien einen wesentlichen Einfluss auf die Subrosion. Der Klimazustand mit der Vergletscherung besitzt den größten Anteil an den gesamten Subrosionsmächtigkeiten, sodass die Dauer der Vergletscherungen als entscheidender Faktor für die Subrosion angesehen werden kann. Dieser Einfluss ist in den errechneten Subrosionsmächtigkeiten bei den Szenarien 3 und 4 mit deutlich längeren Zeiträumen der Vergletscherungen zu sehen.



Abbildung 28: Subrosionsmächtigkeiten für die vier Zonen des S1-Modells (niederdimensionale Kluft) für die vier Klimaszenarien (Abbildung 7)

Für die Zonen 1 bis 4 des S1-Modells mit äquidimensionaler Kluft ergeben sich für die jeweiligen Klimaszenarien Subrosionsmächtigkeiten zwischen 124 und 552 m (Abbildung 29). In Szenario 1 variieren die Subrosionsmächtigkeiten zwischen 126 und 269 m. Erneut sind in Zone 1 die geringsten subrodierten Mächtigkeiten zu erwarten. Zone 4 weist erneut die höchsten Werte auf und die Kluft führt zu größeren Subrosionsmächtigkeiten zu den in Kapitel 3.4 genannten absoluten Subrosionsmächtigkeiten und den genannten Subrosionsraten.



Abbildung 29: Subrosionsmächtigkeiten für die vier Zonen des S1-Modells (äquidimensionale Kluft) für die vier Klimaszenarien (Abbildung 7).

Im S2-Modell wurden für alle Klimazustände und Zonen stark variable Subrosionsraten errechnet und aus verschiedensten Gründen ist von einer deutlichen Überschätzung der Subrosionsraten auszugehen, die in den nachfolgenden Kapiteln weiter diskutiert werden. Da über den Bewertungszeitraum nicht mit diesen Subrosionsraten zu rechnen ist wird deshalb auf die Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten für das S2-Modell verzichtet. Die Überschätzung der Subrosionsraten ist auf die Zweidimensionalität, den

Ergebnisse des Forschungsvorhabens "Subrosion-ewG"

Strömungsengpass oberhalb des Hutgesteins und die konstante Salzrandbedingung zurückzuführen, die möglicherweise in einem dreidimensionalen Modell einen geringeren Einfluss haben. Werden die Subrosionsraten an den Flanken des Salzstockes betrachtet, so passen diese auch zu den höheren in Kapitel 3.4 genannten Subrosionsraten, sind nur eben nicht über einen langen Zeitraum zu erwarten.

Während der Modellierung konnten verschiedene wesentliche Prozesse identifiziert werden, die einen wesentlichen Einfluss auf die Subrosionsraten haben. Die auf Deutschland bezogenen generischen Modelle bieten eine Basis für die Modellierung und generelle Aussagen über den dichtegetriebenen Transport. Dennoch kommt es ohne spezifische Standortdaten zu einer unspezifischen und generischen Anwendung von Randbedingung. Das führt zu Ungewissheiten und die Modellergebnisse können nicht ohne Weiteres für potenzielle Standorte verallgemeinert werden. Es konnten dennoch einige relevante Aspekte mit Einfluss auf die Subrosionsraten identifiziert werden. Diese werden nachfolgend aufgegriffen und diskutiert.

4.4.5.2 Frischwasserzustrom und Permeabilität

Der stetige Frischwasserzustrom in den verschiedenen Klimazuständen verhindert die Ausbildung eines vollständig mit Salz gesättigten Lösungen im Modellgebiet. Nur beim Klimazustand "Meeresspiegelanstieg" steigt die Salzkonzentration fast im gesamten Modellgebiet aufgrund fehlender Druckgradienten und geschlossener Modellränder. In diesem Klimazustand kommt kein Frischwasser ins Modell und das Salz kann sich im gesamten Modellgebiet ausbreiten. Als Resultat verringern sich die Subrosionsraten und es dominiert die dichtegetriebene gegenüber der advektiven Strömung. Die höheren Salzkonzentrationen und der daraus resultierende geringere Salzgradient wirkt so als Subrosionshemmer. Neben dem Frischwasserzustrom spielen auch die Permeabilitäten und Schichtmächtigkeiten eine wesentliche Rolle für die Salzkonzentrationsverteilung im stationären Zustand, sofern eine gerichtete Strömung vorhanden ist. Diffundiert das Salz aus geringdurchlässigen Schichten in höher durchlässige Schichten, wird das Salz advektiv abtransportiert und es bildet sich ein stärkerer Salzkonzentrationsgradient zwischen Aquiferen und Aquitarden aus. Eine gleichmäßige Verteilung über das Modell ist somit weitestgehend unterbunden.

Beispiele sind hier der Übergang vom Unterem zum Mittleren Buntsandstein in beiden Modellgeometrien. Im S1-Modell wird das Salz, das entsprechend dem hohen Gradienten von der Modellbasis im Unteren Buntsandstein (geringere Permeabilität) in Richtung der Modelloberfläche transportiert wird, advektiv in Strömungsrichtung abtransportiert, sobald es den Mittleren Buntsandstein erreicht. Ein weiterer Transport in die tertiären oder quartären Schichten verringert sich dadurch und die Salzkonzentration liegt unter der im Unteren Buntsandstein. Im S2-Modell sind die gleichen geologischen Einheiten vorhanden. Der Unterschied ist hier, dass das Salz durch den Salzstock an verschiedene geologische Schichten angrenzt und das Salz direkt in Schichten mit höheren Permeabilitäten gelöst und transportiert wird. Das führt dazu, dass sich zunächst eine Salzfront im Mittleren Buntsandstein ausbildet und sich daraufhin Konvektionszellen im unterlagernden Unteren Buntsandstein ausbilden. Die Konvektionszellen verschwinden erst durch die Aufsättigung des Mittleren Buntsandsteins durch das Salz und der Salzrandbedingung an der Modellbasis.

Da während der Modellierung keine Geometrieänderungen möglich sind, bleibt die Position, an der Salz gelöst wird, im Modell immer gleich. Die Permeabilität und der Salzgradient bleiben an diesem Punkt ebenfalls bestehen. In der Realität würde das Salz gelöst und es würde an diesem Punkt eine höhere Salzkonzentration im Wasser zu finden sein. Nach einiger Zeit käme es zur Bildung von Hutgestein und das darunter liegende Salz wäre durch geringere Durchlässigkeiten vor einer schnellen Lösung geschützt. Vor allem im S2-Modell kommt es dadurch zu Subrosionsraten, die nicht über lange Zeiträume zu erwarten sind und die für eine Betrachtung über eine Million Jahre so nicht angenommen werden können. Die geologischen Situationen bestehen seit Jahrtausenden und bei solch hohen Subrosionsraten müssten Nachweise für stark subrodierte Salzstöcke zu finden sein, bzw. keine Salzstöcke mehr vorhanden sein.

Die Subrosionsraten sind nicht für lange Zeiträume zu erwarten, da die Randbedingungen dazu führen, dass sich entlang des Salzstocks kein geringdurchlässiges Hutgestein ausbildet und keine langfristige Erhöhung der Salzkonzentration einstellt, da Frischwasser die Salzlösung immer wieder zum Modellrand abtransportiert. Ein Grund dafür ist die Zweidimensionalität des Modells, bei der der schmale Korridor oberhalb des Salzdiapirs als Flaschenhals fungiert. Das Grundwasser kann in diesem Fall nur dort entlang strömen kann, wodurch hohe Fließgeschwindigkeiten am Hang der Salzstruktur verursacht werden. In einem dreidimensionalen Modell käme es möglicherweise zu langsameren Strömungsgeschwindigkeiten, auch entlang des Salzkontaktes und zu einem Umströmen des Salzstocks.

4.4.5.3 Einfluss von Klüften (S1-Modell)

Im S1-Modell wurde eine Kluft mit einem Einfallswinkel von 35° im Modell integriert. Entlang dieser Kluft kann Frischwasser von der Modelloberfläche bis zur Salzbasis strömen. Diese stetige Wegsamkeit bringt über den Modellzeitraum neues Frischwasser an die Modellbasis und es wird dort mehr Salz gelöst. Der Unterschied kann in den Subrosionsraten der Zonen 2 und 3 gut verglichen werden, auch wenn die Zonen über unterschiedliche gemittelte Gesamtlängen betrachtet wurden. Im Modell mit äquidimensionaler Kluft wird durch die Strömungsverhältnisse vor allem in Zone 3 mehr Salz gelöst. Die Kluft verursacht in den umliegenden Gesteinsschichten eine veränderte Strömung und es bildet sich eine Mulde mit geringerer Salzkonzentration aus, da Frischwasser vom Mittleren in den Unteren Buntsandstein drückt. Im Modell ohne Kluft ist diese Mulde nicht zu sehen und es kommt zu geringeren Subrosionsraten in Zone 3.

Weitere Berechnungen mit anderen Einfallswinkeln oder anderen Kluftparametern, wie einer veränderten Kluftöffnungsweite oder -permeabilität, wurden nicht durchgeführt. Welche Auswirkungen der Frischwasserzustrom auf die Subrosionsrate hat, zeigen neben der Subrosionsrate im Kluftbereich auch die Subrosionsraten in Zone 4. Hier befindet sich der Übergang von einer hohen zu einer geringen Salzkonzentrationsrandbedingung. Der Konzentrationsgradient ist, sogar extremer als im Bereich der Kluft, größer und es wird mehr Salz vom Rand ins Modellgebiet gelöst und transportiert. Die Subrosionsraten der Zone 4 bilden somit eine Art "worst case" ab, der in der Realität als unwahrscheinlich eingestuft werden kann. In der Realität ist von geringeren Salzgradienten aufgrund langfristiger und stärkerer Versalzung auszugehen.

4.4.5.4 Hangneigungswinkel (S2-Modell)

Neben der Permeabilität ist auch die Modellgeometrie und der Hangneigungswinkel für die Subrosionsraten von Bedeutung. Die Konstellation des Mittleren Buntsandsteins mit direktem Anschluss an die Salzrandbedingung in einem Bereich mit einem Gefälle von mehr als 45° führt in den meisten Modellrechnungen zu Subrosionsraten größer als 200 mm a⁻¹ in den Zonen 4 und 10. Vergleichsrechnungen ohne hydraulisches Gefälle, jedoch weiterhin mit 0,2 m a⁻¹ Grundwasserneubildung zeigten dabei ebenfalls höhere Fließgeschwindigkeiten gegenüber der Umgebung auf. Aufgrund des Frischwasserzustroms von der Modelloberfläche bleiben die Subrosionsraten weiterhin hoch. Geringere Subrosionsraten treten am Hang der Salzstruktur nur im Klimazustand des Meeresspiegelanstiegs auf. Die Fließgeschwindigkeiten sind am Salzkontakt durch den dichtegetriebenen Transport weiterhin höher gegenüber der Umgebung. Durch den geringeren Salzkonzentrationsgradienten kommt es jedoch zu einer Verringerung der Lösungsraten. Mithilfe der Modellergebnisse konnte der Hangneigungswinkel als wichtige Einflussgröße identifiziert werden.

4.4.5.5 Literaturvergleich

In der Literatur gibt es nicht viele Modellierungen, die die Subrosion über lange Zeiträume betrachten, so dass als Vergleich vorwiegend Literaturwerte aus Experimenten und Untersuchungen verwendet wurden. In einzelnen Veröffentlichungen werden Modellierungen zum Salzeintrag in stratiform und steil lagernden Salzformationen beschrieben. In Zidane et al. 2014a und Zidane et al. 2014b geht es um ein etwa 1.000 m langes und 160 m mächtiges Grundwassermodell in der Region der Nordschweiz, bei dem ein ausgeschnittener Bereich im Modell mit einer Salzrandbedingungen versehen ist, an dem Salz gelöst und ins Modell transportiert wird. Die Modellierung betrachtet die gelösten Massen über einen Zeitraum von wenigen Jahren und weisen vergleichbare Subrosionsraten zu den hier beschriebenen Modellen auf. Die Subrosionsraten liegen je nach Position im Modell zwischen 20 und weniger als 1 mm a⁻¹. In einzelnen Modellkonfigurationen werden Subrosionsraten von bis zu 200 mm a⁻¹ erreicht.

Eine weitere Veröffentlichung beschreibt ein numerisches Grundwassermodell das die Subrosionsrate entlang eines Salzstocks in der Region Transsylvaniens (Rumänien) beschreibt Zechner et al. 2019. Die beschriebenen Subrosionsraten wurden ebenfalls entsprechend der hier gewählten Umrechnung von einströmender Salzmasse in eine Subrosionsrate umgerechnet und weisen je nach Randbedingungen Subrosionsraten von mehreren Millimetern pro Jahr auf. In einem Rechenfall werden auch über definierte Zonen Subrosionsraten von 85 mm a⁻¹ erreicht. Auch in diesem Modell ist die Strömungsrichtung entlang des Salzstocks eine Ursache für die unterschiedlichen Subrosionsraten. Beispielsweise sind die Randbedingungen des Modells im Szenario 1 so gewählt, dass die Strömung in Richtung der Salzstruktur gerichtet ist. In Szenario 2 strömt das Grundwasser entlang der Salzstruktur in Richtung Modellbasis und ist somit vergleichbar zu den Ergebnissen des in diesem Bericht erstellten S2-Modells. Diese Ergebnisse zeigen, dass bei der Modellierung mit festen Randbedingungen und Permeabilitäten das Lösungsverhalten überschätzt wird. Der Lösungsprozess verändert die Grenzen der lithologischen Einheiten und auch deren Eigenschaften. Über kurze Zeiträume sind solche Subrosionsraten also möglich, über längere Zeiträume sind geringere Werte unter 1 mm a⁻¹ zu erwarten.

Weitere Daten zu Subrosionsraten sind vor allem im Zusammenhang mit vergangenen Untersuchungen am Standort Gorleben zu finden. Messdaten z. B. aus Bohrkernen lassen auf Subrosionsraten von bis zu 0,5 mm a⁻¹ für den Zeitraum zwischen der Menap-Kaltzeit und der Elster-Kaltzeit schließen (Köthe et al. 2007). Für den Zeitraum nach der Elster-Kaltzeit werden Subrosionsraten von 0,1 bis 0,2 mm a⁻¹ mit einem Maximum von 0,4 mm a⁻¹ während der Saale Kaltzeit angeführt (Klinge 2007; Zwirner, Zirngast & Köthe 2004). In Duphorn et al. 1983 wurden Subrosionsraten von 1,9 mm a⁻¹ für das Drenthe-Stadium während der Saale-Kaltzeit ermittelt. Appel & Habler 1998 gehen während der Saale-Kaltzeit von 0,46 mm a⁻¹ aus. Nach der Saale Kaltzeit werden geringere Raten von 0,01 bis 0,05 mm a⁻¹ erwähnt. Auch in Best & Zirngast 2002 werden für Gebiete im norddeutschen Raum Subrosionsraten von 0,2 mm a⁻¹ aufgeführt. In den Modellierungen von Flügge 2009 werden in den Grundwassermodellen Subrosionsraten von 0,034 und 6,4 mm a⁻¹ errechnet.

4.4.5.6 Klimaszenarien

Die Subrosionsmächtigkeiten über den gesamten Bewertungszeitraum entsprechend den verschiedenen betrachteten Klimaszenarien erscheinen für das S1-Modell plausibel. Eine Überschätzung der Subrosionsraten ist aufgrund der über lange Zeiträume konstanten Randbedingungen und der unendlichen Salzquelle dennoch wahrscheinlich. Die höheren Raten in Zone 4 zeigen, dass ein Aufeinandertreffen ungesättigter und gesättigten Lösungen Einfluss auf die Subrosionsrate hat. Die Ergebnisse für diese Zone sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Modelle mit einer Kluft oder Störungszone, an der Frischwasser bis zur Salzbasis gelangt und den Prozess der Subrosion damit verstärkt. In der eigentlichen Kluft ist dieser Effekt ebenfalls zu erkennen, nur nicht in dem Ausmaß, wie es in Zone 4 der Fall ist.

Die für die Klimazustände errechneten Subrosionsraten bilden die Basis zur Berechnung der Subrosionsmächtigkeiten über 1 Million Jahre und stellen somit eine wichtige Kenngröße dar. Wie bereits zuvor beschrieben, können sich die Subrosionsraten je nach Modellgeometrie, Randbedingungen und Parametern voneinander unterscheiden, sodass die hier modellierten Subrosionsraten nur für diese Modellgeometrien und -parametrisierungen gelten und nicht ohne Weiteres zu verallgemeinern sind. Dennoch lassen die Ergebnisse der Modellrechnungen für die verschiedenen Klimazustände Aussagen über das Subrosionsrisiko zu. Durch das erhöhte hydraulische Gefälle bei Vergletscherung oder Gletschernähe werden die höchsten Subrosionsraten erreicht. Wird in den Klimaszenarien von längeren Zeiträumen der Vergletscherungen ausgegangen, so erhöht sich auch die Subrosionsrate dementsprechend. Durch die Ungewissheiten der zukünftigen Klimaszenarien bleibt die Aussagen zur absoluten Mächtigkeit von subrodierten Gesteinsmassen mit großen Ungewissheiten behaftet.

Für das S2-Modell führen die modellierten Subrosionsraten über 1 Million Jahre mit den angewandten Klimaszenarien zu unrealistisch hohen Subrosionsmächtigkeiten. In dieser Modellkonstellation ohne die Betrachtung der Bildung von Residual- oder Hutgestein und einem geringeren sich einstellendem Konzentrationsgradienten ist von einer deutlichen Überschätzung stetiger Subrosionsraten auszugehen. Die Kombination aus schnell abtransportiertem Salz aufgrund von Hangneigung, zweidimensionalem Modell mit schneller Strömung an der Modellbasis, sowie der Grundwasserneubildung an der Oberfläche sind wahrscheinliche Gründe für die hohen Subrosionsraten.

In der Realität ist nicht von solchen Subrosionsraten über lange Zeiträume auszugehen, da sonst nur wenige Salzstöcke in ihrer heutigen Form bestand haben würden. Eine Überschätzung der Raten ist somit wahrscheinlich. Wie bereits für das S1-Modell beschrieben, liegen mögliche Gründe dafür in der Salzrandbedingung, die eine konstante Salzquelle darstellt, bei der die eigentlichen Auslaugungsprozesse und Strukturveränderungen im Gestein nicht berücksichtigt sind. Nach dem Auslaugen des Salzes bleibt oft ein Hutgestein zurück. Dieses weist häufig geringe Durchlässigkeiten auf und in Verbindung mit einer höheren Salzkonzentration im Wasser, schützt es das tieferliegende Salzgestein vor weiterer Subrosion. Die ermittelten Subrosionsraten sind somit nicht ohne Weiteres auf andere Konstellationen von stratigraphischen Einheiten mit dazugehörigen Gesteinseigenschaften zu übertragen. Zudem können die Subrosionsraten eher als maximale und kurzfristig auftretende Werte gesehen werden, die, entsprechend den zuvor beschriebenen Prozessen, über einen zeitlichen Verlauf abnehmen würden. Im S2-Modell scheint der hydraulische Gradient in Verbindung mit der Zweidimensionalität hohe Fließgeschwindigkeiten an den Hängen der Salzstruktur und über dem Hutgestein zu verursachen. Zusätzlich verhindern die angesetzten Randbedingungen eine stärkere Versalzung um den Salzstock herum, wie es in der Realität eher zu erwarten wäre.

5 Von der Subrosion ausgehende Risiken für die Barrierewirkung

Das Deckgebirge eines Endlagers trägt durch eine genügend große Mächtigkeit und geeignete hydraulische Eigenschaften zur Barrierewirkung bei. Subrosionsprozesse nehmen auf beide Aspekte Einfluss und stellen damit ein Risiko für die Barrierewirkung des Deckgebirges und des Wirtsgesteins Steinsalz dar.

5.1 Von der Subrosion ausgehende Risiken für das Deckgebirge

Die Vergangenheit zeigt, dass die Subrosion unterschiedliche Spuren im Deckgebirge hinterlässt. Diese können ausschließlich oberflächennah vorkommen (z. B. Karren) oder in unterschiedlichen Tiefen (z. B. Höhlen). Je nach Subrosionserscheinung und Intensität wirkt sich der Subrosionsprozess damit auf die Gesteinsstruktur (z. B. Kluftweiten, längen), die Mächtigkeit und Topographie (z. B. Subrosionssenken, Erdfälle) des Deckgebirges aus. Die jeweilige Ausprägung der Subrosionserscheinung hängt von der Löslichkeit der vorhandenen Deckgebirgsschichten und der Chemie des vorhandenen Wassers ab (Oberflächen-/Grundwasser). Durch Subrosion entstandenen Kluft- und Höhlensysteme haben das Potenzial, über weite Teile des Deckgebirgsbereiches Strömungspfade zu bilden und/oder zu verändern und können so den Stofftransport beeinflussen. Subrosionsprozesse im Deckgebirge können dadurch bis auf zur Grenze zwischen Deckgebirge und Salzformation Einfluss nehmen.

Die durch Subrosion stattfindende Lösung und Umwandlung des Gesteins kann mit der einhergehenden Bildung und/oder Weitung von Klüften und/oder dem Mächtigkeitsverlust des subrodierten Gesteins auch die Stabilität der Deckgebirgsschichten beeinträchtigen und dann zu einem Verbruch führen.

In Tabelle 21 wird die Auswirkung subrodierbarer Deckgebirgsschichten im Hinblick auf das Risiko einer Subrosion in stratiform lagerndem bzw. steilem Salzgestein diskutiert.

Tabelle 21:Zusammenstellung genereller, von Subrosion ausgehender Risiken auf
die Barrierewirkung subrosionsanfälliger (hier verkastungsanfälliger)
Deckgebirgsschichten steiler und stratiform lagernder Salzgesteinsfor-
mationen

Verkarstungsfähiges Deckgebirge über stratiformen Salzgesteinsformationen	Verkarstungsfähiges Hutgestein über steilen Salzgesteinsformationen
Je nach Vorhandensein verkarstungsfä- higen Gesteins erfolgt die Subrosion in unterschiedlichen Tiefenlagen und über weite Entfernungen/Tiefen. Dadurch kön- nen Strömungs- und Transportprozesse verändert und/oder verstärkt werden. Die Chemie und die Fließpfade des Wassers (Oberflächen-, Grundwasser) bestimmen die Intensität der Subrosion in Zeit und Raum. Je nach Subrosionserscheinung und In- tensität wirkt sich der Subrosionsprozess damit auf die Gesteinsstruktur (Bildung/ Weitung von Klüften), die Mächtigkeit und Topographie (Subrosionssenken, Erdfälle) des Deckgebirges, seine Stabili- tät und die Grenze Deckgebirge/Salzfor- mation (Form, Tiefenlage) aus.	Die Verbreitung und Mächtigkeit des ver- karstungsfähigen Hutgesteins zeigt, in welchen Bereichen der Salzoberfläche bereits eine Subrosion stattgefunden hat und wie hoch diese war. Wie groß die Gebirgsdurchlässigkeit des Hutgesteins ist, hängt von den stattgefundenen Ver- karstungs- und Verheilungsprozessen und deren Alter ab. Hohlraumbildungen können zum Verbruch des Hutgesteins führen.
In welchem Zeitraum und wie intensiv die S Randbedingungen (Standortdaten, Klimazu Hinweise hierzu liefert die generelle Bewer Dissolution im angrenzenden Gestein (Ver tive Einschätzung der Subrosionsrate in Al	Subrosion stattfindet, ist von den äußeren ustand und seine Ausprägung) abhängig. tung des FEP "OU00 LG06 Large Scale karstung)" aus Tabelle 16 und die qualita- ohängigkeit des Klimas aus Abbildung 3.

Subrosionsbedingter Massenverlust kann innerhalb des subrodierten Gesteins, aber auch in überlagernden Gesteinen zu Spannungsänderungen führen, die die Bildung von Klüften und Verbruch verursachen können.

In welchem Zeitraum und wie intensiv die Subrosion stattfindet ist, von den äußeren Randbedingungen (Standortdaten, Klimazustand und seine Ausprägung) abhängig. Hinweise hierzu liefert die generelle Bewertung des FEP "OU00 LG01 Tectonic Activity im angrenzenden Gestein" aus Tabelle 16.

5.2 Von der Subrosion ausgehende Risiken für den potenziellen ewG (hier: Wirtsgestein)

Eine Subrosion vom Wirtsgestein Salzgestein kann nur stattfinden, wenn an dessen Grenzfläche zum Deckgebirge gering mineralisiertes Grundwasser vorhanden ist. Das darüber liegende Deckgebirge oder das randliche Nebengestein muss demzufolge wasserwegsam sein.

In steil lagernden Salzformationen kann während des Salzaufstiegs insbesondere der obere Teil der Salzstöcke bei Kontakt zu gering mineralisiertem Grundwasser von der Subrosion betroffen gewesen sein. Durch den Massenverlust kam es zu der Bildung von Subrosionssenken und im Laufe der Zeit bildete sich das Hutgestein, welches das übrige Salzgestein vor Subrosion schützt. Während des zu betrachtenden Bewertungszeitraumes wird eine weitreichende Salzbewegung der heutigen steil lagernden Salzformationen weitestgehend ausgeschlossen. Das Risiko einer weitergehenden Subrosion im Salzgestein ist daher in Zukunft nur dann gegeben, wenn es zu einem Versagen der Barrierewirkung des Hutgesteins durch Kluftbildung kommt. Eine Beeinträchtigung der schützenden Deckschicht im unmittelbaren Kontakt zum Wirtsgestein kann durch Spannungsänderungen erfolgen, die eine Klüftung bewirkt (mechanische Beanspruchung durch Be-/Entlastung oder Salzmobilisation).

Während des Bewertungszeitraumes wird in stratiform lagernden Salzformationen eine nur geringe Mobilisierung mit geringen Aufstiegsraten erwartet. Solange das Salz von einer intakten Tonschicht vor eindringendem Grundwasser geschützt wird, kann eine Subrosion daher nur durch seitlichen Einstrom erfolgen. Für eine Subrosion an anderer Stelle muss eine Beeinträchtigung der schützenden Deckschicht im unmittelbaren Kontakt zum Wirtsgestein vorliegen. Diese kann durch Spannungsänderungen hervorgerufen werden, die eine Klüftung bewirken kann (mechanische Beanspruchung durch Be-/Entlastung oder Salzmobilisation).

In Tabelle 22 werden die steile und stratiforme Salzformation im Hinblick auf das Risiko ihrer Subrosion diskutiert.

Tabelle 22:Zusammenstellung genereller, von Subrosion ausgehender Risiken auf
die Barrierewirkung steiler und stratiformer Salzformationen.

Risiko für das Salzgestein in steiler Lagerung	Risiko für das Salzgestein in stratiformer Lagerung	
Die generelle Reduzierung der Mächtigke insbesondere von seinen Lösungseigens -durchflussmenge an seiner Grenzfläche geologischen Eigenschaften und den klin im Zeitverlauf verändern (z. B. quartäre F querschnitt durch Permafrost). Die Zusan in denen eine verstärkte Subrosion stattfi ten Einstrom gering mineralisierten Grund besonderes Risiko für eine tiefergehende Mächtigkeit zu erwarten. Eine Einschätzung des Ausmaßes des M sich nur anhand lokaler Standorteigensch rend der subrosionsintensiven Klimazusta nerelle Bewertung des FEP "HR00 LG06 rosion)" aus Tabelle 16 und die "Qualitati Abhängigkeit vom Klima" aus Abbildung 3	eit des Salzgesteins durch Subrosion wird chaften sowie der Grundwasserchemie und beeinflusst. Diese hängen von den hydro- natischen Verhältnissen ab und können sich Rinnen, Kluftnetzwerke, verringerter Fließ- nmensetzung des Salzes gibt Bereiche vor, nden kann. Sind diese von einem verstärk- dwassers betroffen, ist an diesen Stellen ein e Subrosion und eine Verringerung der lächtigkeitsverlustes durch Subrosion lässt naften und deren möglicher Änderung wäh- ände geben. Hinweise hierzu liefert die ge- Large Scale Dissolution in Host Rock (Sub- ve Einschätzung der Subrosionsrate in 3.	
Rinnenbildung und hohe Schmelzwas- servolumen können zu einer Reduzie- rung des Salzgesteins durch Erosion und Subrosion führen.	Bei einer grundwasserhemmenden Wir- kung des Deckgebirges erfolgt aufgrund der Tiefenlage die Subrosion des Salzge- steins erst verzögert. Ein tiefgehender bzw. großflächiger Mächtigkeitsverlust ist unwahrscheinlicher als bei steiler Salzla- gerung.	
Eine Reduzierung der Salzgesteinsausdehnung durch Subrosion wird insbesondere von den Lösungseigenschaften seiner Oberfläche sowie durch die Grundwasserche- mie und -durchflussmenge an seiner Grenzfläche beeinflusst. Eine Einschätzung des Ausmaßes der Subrosion und ihres Einflusses auf die Ausdehnung des Salzgesteins lässt sich nur anhand lokaler Standorteigenschaften und deren möglicher Änderung während der subrosionsintensiven Klimazustände geben. Hinweise hierzu liefert die generelle Bewertung des FEP "HR00 LG06 Large Scale Dissolution in Host Rock (Subrosion)" aus Tabelle 16 und die "Qualitative Einschät- zung der Subrosionsrate in Abhängigkeit vom Klima" aus Abbildung 3.		
Eine Subrosion des Salzgesteins erfolgt zunächst in höherliegenden Bereichen, welche aufgrund ihrer geringeren Tiefe i. d. R. zuerst unter Grundwasserein- fluss gelangen. Lokal können auch tiefer liegende Salz- bereiche von der Subrosion betroffen sein, wenn entsprechende Fließpfade vorliegen.	Das Salzgestein kann der Subrosion un- terliegen, wenn Wässer lokal durch Inho- mogenitäten im Tongestein die Salzober- fläche erreichen, oder ein seitlicher Grundwassereinstrom erfolgt.	
Unverheilte und vernetzte Bereiche des Salzgesteins, insbesondere im Anhydrit, können an hydraulischen Prozessen teilhaben. Subrosionserscheinungen in ihrer di- rekten Umgebung sind dann zu erwarten.		

Zusammengefasst bestehen für das Deckgebirge, aber auch für das Wirtsgestein Steinsalz nicht nur während der subrosionsintensiven Klimazustände Risiken in Bezug auf die Barrierewirkung, sondern auch im Anschluss an diese. Subrosive Auswirkungen können ggf. eine Veränderung der hydraulischen Gegebenheiten zur Folge haben wie z. B. in Form einer beschleunigten Grundwasserfließgeschwindigkeit infolge von Verkarstung oder Kluftbildung (Verbruch, Gebirgsspannung), oder in Form bevorzugter Infiltrationsgebiete infolge topographischer Veränderungen (Absacken oberflächennaher Deckschichten).

Während die Grundwasserchemie des Deckgebirges in der Regel unmittelbar durch frisch infiltrierendes Oberflächenwasser und seitlichen Grundwasserzufluss Änderungen erfährt und subrosiv auf das Deckgebirge wirken kann, wird das Wirtsgestein Steinsalz nur dann subrosiv verändert, wenn das direkt überlagernde Hut- oder Tongestein einen Grundwasserkontakt zulässt. Das Wirtsgestein wird daher nur dann subrodiert, wenn eine Beeinträchtigung der schützenden Deckschicht im unmittelbaren Kontakt zum Wirtsgestein vorliegt, die zu einer Veränderung der Grundwasserchemie führt (Abbildung 2 und Abbildung 6). Eine tiefergehende Subrosion des Salzes ist zudem nur wirksam, wenn ein stetiger Grundwasserumsatz im Kontaktbereich stattfindet, der eine stetige Lösung bzw. Umwandlung des Gesteins erlaubt.

Das von der Subrosion ausgehende Risiko für die Stabilität des Deckgebirges insgesamt hängt in großem Maße von der Form, Größe und Tiefe der gebildeten Hohlräume ab. Das Ausmaß möglicher zukünftiger Subrosionsvorkommen lässt sich daher nur mit entsprechender Standortdaten und auf der Grundlage von Annahmen für die einflussnehmenden Randbedingungen in den zu erwartenden Klimazuständen abschätzen.

Die auf der Salzoberfläche aufliegenden Deckgebirgsschichten des Hut- bzw. Tongesteins besitzen in jedem Fall eine ganz besondere Relevanz für den Schutz des Salzgesteins. Kommt es in ihnen zu einer Verkarstung oder Kluftbildung, und erreichen diese die Salzformation, kann die Subrosion in diesen Bereichen lokal erfolgen oder auch verstärkt werden. Von der Beeinträchtigung dieser Deckschichten geht daher ein besonderes Risiko für die Barrierewirkung des Salzgesteins aus.

Das Risiko einer Subrosion des Wirtsgesteins ist in hohem Maße an den Klimazustand gekoppelt, weil dieser die Grundwasserchemie in den Deckschichten vorgibt (insbesondere durch den Anfall von Schmelzwasser) und ggf. Bedingungen schafft, die zu einer Be- und anschließenden Entlastung des Deckgebirges führt und diese in ihrer Integrität beeinträchtigen kann. Je nach Ausprägung der Deckschichten, insbesondere derjenigen in direktem Kontakt zum Salzgestein, und ihrer Veränderung im Verlauf der zu erwartenden Klimata, fällt die Subrosion unterschiedlich hoch aus. In Tabelle 23 sind die wesentlichen Aussagen zusammengestellt.

Tabelle 23:	Qualitative Einschätzung der möglichen Subrosionsintensität und ihrer Bandbreiten / Unsicherheiten an Salzformationen in
	Abhängigkeit vom Klima

Klima	Ausmaß der		Wesentliche Faktoren, die die Einschätzung bedingen (steile und stratiforme Salz-	
	Subrosion	Bandbreite, Ungewiss- heiten	formation)	
Warmzeit (küstennah, Meerwasser- überde- ckung)	zu vernachläs- sigen	sehr gering, sehr gering	Aufgrund der zunehmenden Versalzung des Grundwassers kommt der Subrosionspro- zess sowohl im Deckgebirge als auch im Salzgestein zum Erliegen. Unabhängig von der Lagerung findet eine Aufsättigung des Grundwassers an der Kontaktfläche zum Salz statt. Das Vorhandensein struktureller Inhomogenitäten in den schützenden Deckschich- ten ist daher von geringer Bedeutung.	
Warmzeit: küstenfern	gering	sehr gering, gering	Treibende Kraft einer möglichen Subrosion im Deckgebirge ist die Veränderung der Grundwasserchemie, die durch einen entsprechenden Grundwasserumsatz erfolgt. Die- ser steht in Zusammenhang mit dem seitlichen Grundwassereintrag und dem Eintrag bzw. Austausch oberflächennaher Wässer. Die hydraulischen Bedingungen des Deckge- birges und der direkt angrenzenden Deckschicht (hier: Hutgestein, Tongestein) sind von besonderer Relevanz für den Ort und die Intensität einer möglichen Subrosion. Struktu- relle Komplikationen im Hut-/Tongestein können ggf. zu einem Kontakt des Salzgesteins mit niedrig mineralisiertem Grundwasser führen und bei entsprechendem Umsatz eine geringe Subrosion hervorrufen.	
Tabelle 23 (Forts.): Qualitative Einschätzung der möglichen Subrosionsintensität und ihrer Bandbreiten / Unsicherheiten an Salzformationen in Abhängigkeit vom Klima

Klima	Ausmaß der		Wesentliche Faktoren, die die Einschätzung bedingen (steile und stratiforme Salz-
	Subrosion	Bandbreite, Ungewiss- heiten	formation)
Periglazial: gletscherfern	mäßig (im Bereich kontinuierli- chen Perma- frosts)	gering, mäßig	s. Warmzeit küstenfern Im Unterschied sind, abhängig von der Permafrosttiefe und dem sich dadurch ergeben- den Fließquerschnittes sowie des Grundwasserumsatzes durch den seitlichen Einstrom höher mineralisierten Grundwassers, evtl. höhere Subrosionsraten im Deckgebirge mög- lich. Erreicht der seitliche Einstrom das Salzgestein (insb. in stratiformer Lagerung), so kann dieses Wasser ggf. eine fortschreitende Subrosion des Wirtsgesteins hervorrufen. Strukturelle Komplikationen im Hut-/Tongestein können ggf. zu einem Kontakt des Salz- gesteins mit niedrig mineralisiertem Grundwasser führen und bei entsprechendem Um- satz eine Subrosion bervorrufen.
			Für die Subrosion im Salzgestein der steilen Lagerung bzw. unter dem Tongestein der stratiformen Lagerung sind strukturelle Komplikationen im Hut-/Tongestein notwendig, die einen Kontakt des Salzgesteins mit niedrig mineralisiertem Grundwasser ermöglichen und bei entsprechendem Umsatz eine Subrosion hervorrufen können. Die Beeinträchtigung der Barrierewirkung wird im Wesentlichen durch Spannungsänderungen hervorgerufen, die eine Klüftung zur Folge haben. Während der Zeit des Periglazials ist eine solche Spannungsänderung durch Be- oder Entlastung oder Diapirismus nicht zu erwarten. Fluideinschlüsse im Salzgestein wirken zudem der Subrosion entgegen.

106

potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines

Tabelle 23 (Forts.): Qualitative Einschätzung der möglichen	Subrosionsintensität und ihrer Bandbreiten / Unsicherheiten an S	Salzformatio-
nen in Abhängigkeit vom Klima		

Klima	Ausmaß der		Wesentliche Faktoren, die die Einschätzung bedingen (steile und stratiforme Salz-
	Subrosion	Bandbreite, Ungewiss- heiten	formation)
Periglazial: gletscherfern	mäßig bis hoch (im Ein- flussbereich ei- nes Taliks)	hoch	s. Periglazial gletscherfern Im Unterschied ist im Bereich eines Taliks der Grundwasserumsatz im Deckgebirge er- höht. Die Subrosion des Deckgebirges wird daher intensiver sein, ebenso das Risiko ei- ner seitlichen Subrosion stratiformer Salzformationen.
Periglazial gletschernah (prä-/postgla- zial)	mäßig bis hoch	mäßig hoch	Präglazial Es wird davon ausgegangen, dass die Ausbildung von Permafrostböden rückläufig und diese nur noch vereinzelt vorhanden sind. Die mögliche Subrosion des Deckgebirges steht im Zusammenhang mit dem seitlichen Grundwassereintrag und dem Austausch mit oberflächennahen Wässern, insbesondere den niedrig mineralisierten Schmelzwässern eines Gletschers oder Permafrostbodens. Es wird davon ausgegangen, dass der Grundwasserumsatz im Wesentlichen in den obe- ren Deckschichten erfolgt und in diesen mäßige bis hohe Subrosionsraten zur Folge hat. Strukturelle Komplikationen des Hut- und Tongesteins sind in Abhängigkeit der Entfer- nung zum Gletscher und der Tiefenlage zu erwarten und damit ebenfalls Subrosionsraten mäßiger bis hoher Intensität. Auch eine Minerallösung vorhandener Kluftfüllungen ist denkbar, die möglicherweise Wegsamkeiten innerhalb des Hutgesteins schaffen. Eine seitliche Lösung stratiformer Salzformationen kann weiterhin, unabhängig von einer Beeinträchtigten Barrierewirkung des Tongesteins, stattfinden.

Tabelle 23 (Forts.): Qualitative Einschätzung der möglichen Subrosionsintensität und ihrer Bandbreiten / Unsicherheiten an Salzformationen in Abhängigkeit vom Klima

Klima	Ausmaß der		Wesentliche Faktoren, die die Einschätzung bedingen (steile und stratiforme Salz-
	Subrosion	Bandbreite, Ungewiss- heiten	formation)
Periglazial gletschernah (prä-/postgla- zial)	mäßig bis hoch	mäßig hoch	Präglazial Es wird davon ausgegangen, dass die Ausbildung von Permafrostböden rückläufig und
			diese nur noch vereinzelt vorhanden sind.
			Die mögliche Subrosion des Deckgebirges steht im Zusammenhang mit dem seitlichen Grundwassereintrag und dem Austausch mit oberflächennahen Wässern, insbesondere den niedrig mineralisierten Schmelzwässern eines Gletschers oder Permafrostbodens. Es wird davon ausgegangen, dass der Grundwasserumsatz im Wesentlichen in den obe- ren Deckschichten erfolgt und in diesen mäßige bis hohe Subrosionsraten zur Folge hat.
			Strukturelle Komplikationen des Hut- und Tongesteins sind in Abhängigkeit der Entfer- nung zum Gletscher und der Tiefenlage zu erwarten und damit ebenfalls Subrosionsraten mäßiger bis hoher Intensität.
			Auch eine Minerallösung vorhandener Kluftfüllungen ist denkbar, die möglicherweise Wegsamkeiten innerhalb des Hutgesteins schaffen. Eine seitliche Lösung stratiformer Salzformationen kann weiterhin, unabhängig von einer Beeinträchtigten Barrierewirkung des Tongesteins, stattfinden.

potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle

Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines

Tabelle 23 (Forts.): Qualitative Einschätzung der möglichen	Subrosionsintensität und ihrer l	Bandbreiten / Unsicherheiten an	Salzformatio-
nen in Abhängigkeit vom Klima			

Klima	Ausmaß der		Wesentliche Faktoren, die die Einschätzung bedingen (steile und stratiforme Salz-
	Subrosion	Bandbreite, Ungewiss- heiten	Tormation)
	hoch sehr hoch (geringer als bei Glet- scherüberde- ckung)	hoch sehr hoch	Postglazial s. Gletscherüberdeckung
		Im Unterschied wird der Grundwasserumsatz durch den erhöhten Schmelzwasseranfall anwachsen. Die erosive Tiefenwirkung wird geringer ausfallen, jedoch in der Fläche zu- nehmen. Je nach hydrogeologischen Bedingungen ist eine weiterhin sehr hohe Subrosi- onsrate im Deckgebirge anzunehmen.	
			Es wird vermutet, dass der Grundwasserumsatz vor allem oberflächennah und in den oberen Deckschichten erhöht sein wird, ihre Tiefenwirkung jedoch nachlässt, weil die ge- bildeten Rinnen mit der Zeit zusedimentieren und der Gletscher einen oberflächennahen Abfluss nicht mehr behindert. Die Teufe des Salzgesteins hat eine Auswirkung darauf, inwieweit eine Subrosion weiterhin stattfinden kann.
			Wenn die direkten Deckschichten des Salzgesteins (Hut- und Tongestein) in ihrer Barri- erewirkung durch z. B. Klüftung oder Minerallösung in verheilten Klüften beeinträchtigt ist, kann daher von einer hohen bis sehr hohen Subrosion am Salzgestein ausgegangen werden. Eine seitliche Lösung in stratiformen Salzformationen kann weiterhin, unabhän- gig von einer Beeinträchtigung der Barrierewirkung des Tongesteins, stattfinden.

potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle

Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines

Tabelle 23 (Forts.): Qualitative Einschätzung der möglichen Subrosionsintensität und ihrer Bandbreiten / Unsicherheiten an Salzformationen in Abhängigkeit vom Klima

Klima	Ausmaß der		Wesentliche Faktoren, die die Einschätzung bedingen (steile und stratiforme Salz-
	Subrosion	Bandbreite, Ungewiss- heiten	tormation)
Klimaüber- gänge			Klimaübergänge sind häufig mit Änderungen im Grundwasserumsatz, der Grundwasser- chemie und der Hydrogeologie verbunden, können jedoch bei entsprechender Druckver- änderung durch Be- oder Entlastung auch Änderungen im Spannungsfeld des Gebirges verursachen.
			Die Intensität, mit der die Veränderungen erfolgen, aber auch die Länge des Intervalls sind ausschlaggebend im Hinblick auf die Subrosionswirkung im Deckgebirge und dem Wirtsgestein.

110

6 Ausblick

6.1 Ausblick

Im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens wurden verschiedene offene Punkte identifiziert, die im Folgenden weiterbearbeitet, bzw. mit denen die Arbeiten in diesem Vorhaben komplettiert werden könnten.

6.1.1 Ausblick Webanwendung

Nach Abschluss der Literaturauswertung und Dateneingabe sind weitere Literaturstellen identifiziert worden, die ggf. relevant für die bearbeiteten Fragestellungen sein könnten. Diese sind in Anhang A.3 zusammengestellt.

Während der Literaturauswertung und Dateneingabe wurden einige Punkte zur Weiterentwicklung der Webanwendung identifiziert, die im Folgenden aufgelistet sind.

Auswertung weiterer Literaturstellen:

- Auswertung von nicht ausgewerteten Literaturstellen (s. Anhang A.3)
- Auswertung von Literatur aus anderen Ländern: Einige wenige Angaben für z. B. Italien und Mexiko sind vorhanden und könnten noch in die Webanwendung aufgenommen werden. Literaturstellen für andere Länder wurden nicht explizit ausgewertet. Eine Auswertung von Literatur für Nachbarländer könnte zusätzliche Erkenntnisse z. B. zu Subrosionsabläufen und -tiefen unter anderen klimatischen Verhältnissen bzw. Randbedingungen liefern.

Weiterentwicklung der Webanwendung:

- Geographische Lagen:
 - Die Namensgebung f
 ür die geographischen Lagen k
 önnte vereinheitlicht werden, z. B. Bundesland/Ort/Besonderheit. Dies w
 ürde eine schnellere Erfassung der geographischen Zuordnung beim Lesen erm
 öglichen.
 - Die Strukturierung der Namensgebung f
 ür die geographischen Lagen und Ablage k
 önnte verbessert werden (z. B. als Baumstruktur mit Zuordnung von kleinr
 äumigen geographischen Lagen zu gro
 ßr
 äumigen geographischen Lagen).

• Subrosion:

- Die Namensgebung für die Subrosionseinträge könnte vereinheitlicht werden.
- Die Einträge für die Subrosionserscheinungen enthalten immer die Angaben aus genau einer Literaturstelle. Es könnte jedoch vorteilhaft sein, mehrere Literaturstellen pro Subrosionseintrag zuzulassen. Manchmal liegt beispielsweise in einer Literaturstelle nur ein Satz zu einer Subrosionserscheinung vor, die bereits in der Webanwendung enthalten ist. Dieser Satz könnte dann einem bereits existierenden Eintrag zugeordnet werden.
- In den Subrosionseinträgen können mehrere Auswirkungen von Subrosion erfasst werden. Bei einer Aufnahme jeder einzelnen Auswirkung in einem separaten Eintrag wären die Informationen einfacher und gezielt durch Abfragen wiederzufinden. Auf der anderen Seite würde solch eine Trennung viele zusätzliche Einträge nach sich ziehen.
- Einträge zur Petrographie sollten anhand einer zusätzlich zur Geologischen Kartieranleitung (AG Geologie 2019), projektspezifischen Auswahlliste zugeordnet werden können.
- Einträge im Freitext sollten vereinheitlicht werden (z. B. immer Angabe im Singular oder Plural, etc.). Die Angaben zu den Auswirkungen könnten ebenfalls als Auswahlliste bereitgestellt werden oder Vorgaben zur einheitlicheren Dateneingabe gemacht werden.
- Der Angabe von Teilgebieten, die in der unmittelbaren N\u00e4he zur betrachteten Subrosion liegen, erfordert einheitliche Kriterien. Bisher ist es nicht m\u00f6glich, Teilgebiete benachbarter geographischer Lagen aufzunehmen, obwohl sie in der N\u00e4he liegen, weil die Angabe zu den Teilgebieten an die geographische Lage der Subrosionsvorkommen gekoppelt ist.

6.1.2 Ausblick Modellrechnungen

Während der Modellierungsarbeiten wurden die Permeabilität und Geometrie der geologischen Schichten als wichtiger Einflussfaktor für die resultierenden Subrosionsraten identifiziert. Die gezeigten Modellierungen und Parametrisierungen bauten auf die Modelle aus dem Vorhaben RESUS auf, um möglichst repräsentative Daten für einen potenziellen Endlagerstandort in Deutschland als Modellgrundlage zu verwenden. Eine Veränderung der Gesteinseigenschaften würde voraussichtlich auch andere Salzverteilungen und Subrosionsraten mit sich ziehen. Andere Gesteinsabfolgen und Eigenschaften könnten in zukünftigen Vorhaben untersucht und mit den vorliegenden Ergebnissen verglichen werden. Ein weiterer Aspekt, der im zeitlichen Verlauf des Vorhabens nicht bearbeitet werden konnte, ist die Betrachtung der dreidimensionalen Umströmung eines Salzstocks. Im zweidimensionalen Modell können die Fließgeschwindigkeiten und damit auch die Subrosionsraten an den Salzhängen und oberhalb des Salzstockes durch die Zweidimensionalität überschätzt werden. Bei verschiedenen Fließwegen über oder um den Salzstock herum würden die Fließgeschwindigkeiten sich voraussichtlich in den meisten Klimazuständen verringern. Es wäre für zukünftige Vorhaben zu quantifizieren, inwieweit die Modelldimensionen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse und Subrosionsraten haben.

Die Modellrechnungen geben einen guten Überblick über potenzielle Subrosionsraten in der Zukunft und bieten eine Grundlage für weitere Arbeiten, zeigen aber auch die Grenzen der Aussagefähigkeit dieser Modelle für reale Standorte auf. Es fehlt an standortbezogenen Daten und Parametern, wie beispielsweise der Salzkonzentration über die Teufe in der Nähe des Salzstocks und der Permeabilität der Gesteine in direkter Umgebung des Salzstocks.

Insgesamt ist im numerischen Modell aufgrund der verwendeten Randbedingungen von einer Überschätzung der Subrosionsraten auszugehen. Der Gradient am Modellrand zum Modellinneren verringert sich mit der zunehmenden Versalzung zwar, aber in der Realität kann von der Bildung eines Hutgesteins ausgegangen werden, wodurch sich eine undurchlässigere Schicht am Modellrand mit Salzrandbedingung ausbilden würde und die verfügbare Salzmasse an diesem Rand mit zeitlichem Verlauf abnehmen würde. Diese Aspekte und Fragestellungen könnten in zukünftigen Vorhaben weiter untersucht werden.

7 Literaturverzeichnis

- AG Geologie (2019): Geologische Kartieranleitung, Petrographische Bezeichnung. Stand vom 26. Juli 2019, erreichbar unter https://www.geokartieranleitung.de /Fachliche-Grundlagen/Gesteinsbeschreibung/Petrographische-Bezeichnung/Petrographische-Bezeichnung, abgerufen am 16. Dezember 2021
- Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz (NNA) (1998): Gipskarstlandschaft Südharz, Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven. NNA-Berichte, Bd. 2, 209 S.
- Andersson, J., Carlsson, T., Eng, T., Kautsky, F., Söderman, E. & Wingefors, S. (1989): The joint SKI/SKB scenario development project, SKB Report TR 89-35, December 1989. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (Hrsg.), SKB Technical Report, TR-06-09, 181 S.: Stockholm, Schweden
- Appel, D. & Habler, W. (1998): Quantifizierung postholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben durch statistische Auswertung von Bohrergebnissen. Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, S. 7–30
- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B. & Hammer, J. (2020a): RESUS - Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in steil lagernden Salzformationen. GRS, Bd. 569, GRS-569, 187
 S., ISBN 978-3-947685-55-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig
- Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B. & Hammer, J. (2020b): RESUS - Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen. GRS, Bd. 568, GRS-568, 189
 S., ISBN 978-3-947685-54-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig
- Best, G. & Zirngast, M. (2002): Die strukturelle Entwicklung der exhumierten Salzstruktur "Oberes Allertal". Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 978-3-9813373-0-3
- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2017): Naturräume und Großlandschaften Deutschlands, Nach Ssymank und Meynen/Schmithüsen.
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (2020): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG, Stand: 28.09.2020. Peine

- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (2022): Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. 744 S.: Peine
- Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) (2023): Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren. 41 S.: Peine
- Cedercreutz, J. (2004): Future Climate Scenarios for Olkiluoto with Emphasis on Permafrost. Posiva OY, POSIVA 2004-06, ISBN 951-652-132-0
- Chapman, N. A., Andersson, J., Robinson, P., Skagius, K., Wene, C.-O., Wiborgh, M. & Wingefors, S. (1995): Systems Analysis, Scenario Construction and Consequence Analysis Definition for SITE-94. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI Statens Karnkraftinspektion), SKI Report, 95:26
- Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U. & Schröder, P. (1983): Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben, Abschlussbericht Quartärgeologische Gesamtinterpretation. Kiel
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2024): ArcGIS Pro: Version 3. Windows: Redlands, CA
- Fahrenholz, C., Flügge, J., Schönwiese, D. & Johnen, M. (2024): Bewertung der zukünftigen Entwicklung der Subrosion im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre, Bericht zum AP 1.2 des Vorhabens "Subrosion-ewG". Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Braunschweig
- Fein, E. (Hrsg.) (2004): Software package r3t, Model for transport and retention in porous media ; final report. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-192, 319 S., ISBN 3-931995-60-7: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig, Braunschweig
- Fein, E. & Schneider, A. (1999): d3f ein Programmpaket zur Modellierung von Dichteströmungen, Abschlußbericht. GRS, Bd. 139, GRS-139, 261 S., ISBN 3-923875-97-5, GRS: Braunschweig
- Flügge, J. (2009): Radionuclide Transport in the Overburden of a Salt Dome, The Impact of Extreme Climate States. Dissertation, Fakultät für Architektur, Bauingenieur und Umweltwissenschaften, Universität Braunschweig: Braunschweig

- Flügge, J., Fahrenholz, C., Johnen, M., Schönwiese, D. & Seher, H. (2024): Regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen stratigraphischen Einheiten in Deutschland, Zwischenbericht zum AP 1.1 und AP 2.1 des Vorhabens "Subrosion-ewG. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Braunschweig
- Forsström, L. (1999): Future glaciation in Fennoscandia. Posiva OY, Posiva Report, 99-30: Helsinki
- Freeze, G. E. a. (2020): Generic FEPs Catalogue and Salt Knowledge Archive, SANDIA REPORT. 151 S.
- Jeannin, P.-Y., Malard, A., Eichenberger, U. & Rick, B. (2015): Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene, Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2, Expertenbericht zuhanden des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung (ISSKA), Dr. von Moos AG, Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI)
- Johnen, M., Flügge, J. & Fahrenholz, C. (2024): Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle: Bewertung der Subrosionsraten über den Bewertungszeitraum anhand hydrogeologischer Modelle, Zwischenbericht zum AP 2.2 des Vorhabens "Subrosion ewG". Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Braunschweig
- Kahnt, R. & Wenderholm, S. (2023): Erstellung eines konzeptionellen Modells des Salzstocks Bahlburg unter vereinfachten Annahmen. G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbh (Hrsg.), Projektnummer 30210251, 48 S.: Halsbrücke
- Keller, S., Mrugalla, S., Weber, J. R., Krone, J., Lommerzheim, A., Buhmann, D., Mönig, J. & Wolf, J. (2010): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW ISIBEL, Zusammenfassender Abschlussbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-09-2010-AP, 52 S.
- Kempe, S. (1987): Exkursion: Salzstock und Höhle Bad Segeberg. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft für Karstkunde in Niedersachsen, Nr. 3

- Kempe, S. (2005): Karstgebiete und Höhlen in Deutschland. Geographische Rundschau, Bd. 57, Nr. 6, S. 44–52
- Klinge, H. E. a. (2007): Hydrogeology of the overburden of the Gorleben salt dome, Description of the Gorleben Site Part 1. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 975-3-510-95962-4
- Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M. & Zwirner, R. (2007): Geology of the overburden and adjoining rock of the Gorleben salt dome, Description of the Gorleben Site Part 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 978-3-510-95963-1: Hannover
- Mattheß, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers, Lehrbuch der Hydrogeologie. 3. Aufl.
- Meschede, M., Murawski, H. & Meyer, W. (2021): Geologisches Wörterbuch. Springer-Verlag GmbH, 13. Aufl., 487 S., ISBN 978-3-662-62722-8, DOI 10.1007/978-3-662-62722-8, Springer Spektrum: Berlin, Heidelberg
- Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose, Bericht zum Arbeitspaket 2 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-275, 169 S., ISBN 9783939355519: Köln
- Mrugalla, S. (2014): Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes f
 ür ein HAW-Endlager im Tonstein, Geowissenschaftliche Langzeitprognose f
 ür Norddeutschland - ohne Endlagereinfluss, Ergebnisbericht. Bundesanstalt f
 ür Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 190 S.: Hannover
- Näslund, J.-O., Liakka, J., Alexandersson, H., Jansson, P., Harper, J., Meierbachtol, T., Whitehouse, P., Hartikainen, J., Hall, A., Goodfellow, B., Heyman, J., Krabbendam, M., Stroeven, A. & Olvmo, M., et al. (2020): Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark – Climate and climaterelated issues, PSAR version. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-20-12, 405 S.: Solna
- Noseck, U., Becker, D.-A., Brasser, T., Fahrenholz, C., Flügge, J., Herber, H.-J., Ionescu, A., Kröhn, K.-P., Kull, H., Meleshyn, A., Mönig, J., Röhlig, K., Rübel, A., Rothfuchs, T. & Wolf, J. (2012): Scientific Basis for a Safety Case of Deep Geological Repositories. GRS-298, ISBN 978-3-939355-77-9

- Noseck, U., Becker, D.-A., Fahrenholz, C., Fein, E., Flügge, J., Kröhn, K.-P., Mönig, J., Müller-Lyda, I., Rothfuchs, T., Rübel, A. & Wolf, J. (2008): Assessment of the long-term safety of repositories, Scientific basis. Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-237, ISBN 978-3-939355-11-3
- OECD/NEA (2019): International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Version 3.0. 166 S.
- Popp, T. (2022): Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Beauftragung: 45201365. Institut für Gebirksmechanik (IFG), 115 S.
- QGIS Development Team (QGIS) (2024): QGIS Geographic Information System. Windows, QGIS Association
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 111 S.: Hannover
- Reiter, S. B. (2022): ProMesh. Erreichbar unter https://www.promesh3d.com/, abgerufen am 17. Januar 2024
- Rübel, A. P. & Gehrke, A. C. (2022): Modellierung des Radionuklidtransports im Tongestein, Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland. GRS, Bd. 668, GRS-668, 161
 S., ISBN 978-3-949088-59-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig
- Schléder, Z., Urai, J. L., Nollet, S. & Hilgers, C. (2008): Solution-precipitation creep and fluid flow in halite: a case study of Zechstein (Z1) rocksalt from Neuhof salt mine (Germany). International Journal of Earth Sciences, Bd. 97, Nr. 5, S. 1045–1056, DOI 10.1007/s00531-007-0275-y
- Schöttle, M., Bergner, H.-D., Burgmeier, G. & Huth, T. (2007): Geotope im Regierungsbezirk Tübingen, Steckbriefe. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Stand vom August 2007, erreichbar unter https://pd.lubw.de/ 45542, abgerufen am 3. August 2022
- Seher, H., Flügge, J., Fahrenholz, C., Johnen, M. & Schönwiese, D. (2024): Regionalgeologische Zusammenstellung der von Subrosion betroffenen

stratigraphischen Einheiten in Deutschland: Literaturauswertung, Entwicklung und Verwendung der Webanwendung, Zwischenbericht zum AP 1.1 und AP 2.1 des Vorhabens "Subrosion-ewG". Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Braunschweig

- StandAG (2023): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle - Standortauswahlgesetz (StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBI. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 22. März 2023 (BGBI. I 2023, Nr. 88)
- Stark, L. (2014): Geowissenschaftliche Langzeitprognose f
 ür S
 üddeutschland ohne Endlagereinfluss (AnSichT), Ergebnisbericht. Bundesanstalt f
 ür Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), F + E Endlagerung, F
 örderkennzeichen 02E11061C, 153 S.: Hannover
- Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (2006): Long-term safety for KBS-3 repository at Forsmark and Laxmar - a first evaluation, Main report of the SR-Can project. SKB Technical Report, TR-06-09, 620 S.: Stockholm, Schweden
- Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Volume I-III. SKB Technical Report, TR-11-01: Stockholm
- Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (2020): Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Climate and climate-related issues, PSAR version. SKB Technical Report, TR-20-12, 405 S.
- Zechner, E., Dresmann, H., Mocuţa, M., Danchiv, A., Huggenberger, P., Scheidler, S., Wiesmeier, S., Popa, I. & Zlibut, A. (2019): Salt dissolution potential estimated from two-dimensional vertical thermohaline flow and transport modeling along a Transylvanian salt diapir, Romania. Hydrogeology Journal, Bd. 27, Nr. 4, S. 1245–1256, DOI 10.1007/s10040-018-1912-1
- Zidane, A., Zechner, E., Huggenberger, P. & Younes, A. (2014a): Simulation of rock salt dissolution and its impact on land subsidence. Hydrology and Earth System Sciences, Bd. 18, Nr. 6, S. 2177–2189, DOI 10.5194/hess-18-2177-2014
- Zidane, A., Zechner, E., Huggenberger, P. & Younes, A. (2014b): On the effects of subsurface parameters on evaporite dissolution (Switzerland). Journal of contaminant hydrology, Bd. 160, S. 42–52, DOI 10.1016/j.jconhyd.2014.02.006

Zwirner, R., Zirngast, M. & Köthe, A. (2004): Der Aufbau des Deckgebirges und die Strukturentwicklung des Salzstocks Gorleben The structure of the cover rock and the structural development of the Gorleben salt dome. In: Zeitschrift für geologische Wissenschaften (Hrsg.): Band 32 Heft 5/6. ISBN 0303-4534

A Anhang

A.1 Glossar

Alle Definitionen in diesem Glossar sind, sofern sie nicht anders gekennzeichnet sind, (Meschede, Murawski & Meyer 2021) entnommen.

Abfluss

m., (runoff, discharge), das unter Einfluss der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche fließende Wasser. [...] Dieses Wasservolumen setzt sich zusammen aus dem Oberflächenabfluss (surface runoff; Abflussanteil, der oberirdisch dem zufließt, ohne in den Boden eingedrungen zu sein), dem Zwischenabfluss (interflow; Abflussanteil, der dem Vorfluter unterirdisch mit nur geringer Verzögerung zufließt) und dem grundwasserbürtigen A. (basal runoff; Abflussanteil, der dem Vorfluter mit großer Verzögerung zufließt).

Abgleitvorgang

Aus Gravitative Tektonik: Schwerkraftbedingte (= gravitative) Gleitungen (= Schweregleiten) erzeugen Deformationen des abgleitenden Gesteinsmaterials

Ablaugung

f., (leaching), \rightarrow Auslaugung, \rightarrow Subrosion

Abri

(frz. Unterstand), n., (abri), \rightarrow Balme.

Absenkung

n., (subsidence), Vertikalbewegung der Lithosphärenplatten nach dem Prinzip des Schwimmgleichgewichts (Isostasie) an passiven Kontinenträndern, mittelozeanischen Rücken, zunehmender Sedimentauflast usw.

Absinken

→ Absenkung

Akkumulation

f., (accumulation), Bez. für Vorgang und Produkt der Ablagerung von Sedimenten; meist gebraucht bei verstärkter örtlicher Anhäufung derselben in Gewässern oder durch Wind.

Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle

Anhydrit

m., (anhydrite), (Werner 1803, bei Ludwig 1804), Calciumsulfat, CaSO4, Mineral- und Gesteinsname, s. a. \rightarrow Gips.

Aragonit

(n. d. Landschaft Aragonien, NE-Spanien), m., (aragonite), (*Werner 1788), orthorhombische Modifikation des CaCO3.

Auslaugung

f., (leaching, eluviation), allg. Bez. für die durch Wasser hervorgerufene chemische Lösung entsprechender Substanzen aus Gesteinen und Böden (z. B. Auslaugungssee, Austiefungssee). Bei Salzgesteinen wird vielfach von einer breitflächigen subterranen (= unterirdischen) Ablaugung (→ Subrosion, *Seidl 1926) durch das Grundwasser mit Bildung eines Salzspiegels oder Salzhangs im Gegensatz zu einer unregelmäßigen, zu Bildung von Schlotten, Karren, Höhlen usw. führenden Auslaugung i. e. S. gesprochen. Jedoch ist hier die Definition nicht immer eindeutig.

Auslaugungsbrekzie

 \rightarrow Auslaugung, \rightarrow Brekzie

Auslaugungshohlform

→ Auslaugung

Auslaugungssenke

 \rightarrow Subrosionssenke, \rightarrow Subrosion

Auslaugungstal

 \rightarrow Auslaugung, \rightarrow Tal

Bachschwinde

f., (sinkhole) \rightarrow Schwinde.

Balme

f., (balm), Nische an Felswänden; meist in verwitterungsempfindlichen Schichten unter harten Gesteinsbänken auftretend. – Felsnischen mit höhlenartigem Charakter werden als \rightarrow Abri bezeichnet.

Becken

Aus Sedimentationsbecken: n., (basin, sedimentary basin), mehr oder weniger großer, in seiner Umgebung eingetiefter Sedimentationsraum, der oft durch synsedimentäre oder zeitweilig verstärkte tektonische Senkungen (Senkungsbecken, subsidence basin) erhebliche Sedimentmächtigkeiten erreichen kann; z. B. Wiener Becken, Mainzer Becken, Pariser Becken usw. – Im Gegensatz zu den Senkungsbecken am Außenrand der \rightarrow Orogene, den Molasse-B. (molasse basin, Molasse), werden die im Innenbereich des Orogens gelegenen als intramontane B. (intramontane basin) bezeichnet.

Biotop

Aus Biozönose: (gr 74, 187), f., (biocenosis), (*Moebius 1877), Vergesellschaftung von Lebewesen, die einen gemeinsamen Lebensraum (Biotop, habitat) bewohnen und in einem Zustand mehr oder weniger gegenseitiger Bedingtheit leben (Lebensgemeinschaft).

Bodenbildung

f., (soil formation), Verwitterungsprozess an der Erdoberfläche in Abhängigkeit von der Klimazone. Die Eindringtiefe der B. kann von wenigen mm bis hin zu mehreren hundert m reichen.

Breccie

 \rightarrow Brekzie

Brekzie

f., (n. Wagner 1928, schon mehrfach bei J.W. von Goethe), (breccia), verfestigtes Trümmergestein, dessen Bruchstücke eckig-kantig ausgebildet sind. Beim Zerbrechen infolge tektonischer Bewegungen entstehen tektonische B. (tectonic breccia), Störungsbrekzien fault breccia), Reibungsbrekzien (friction breccia), Gangbrekzien (vein breccia). [...] Bei unterirdischer Ablaugung und \rightarrow Auslaugung entstehen Auslaugungs- (evaporite- solution breccia), Einsturz- (founder breccia) oder Einbruchsbrekzien (collapse breccia) als Nachsturzmaterial über und in Ab- und Auslaugungsstellen.

brine

 \rightarrow Sole

cave

 \rightarrow Höhle

Cenote

(n. d. Mayasprache ts'ono'ot = Heilige Quelle), m., (cenote), wassergefülltes, dolinenartiges Loch in einer Kalksteinplattform, entstanden durch Einsturz einer Höhlendecke. – s. a. Karst.

collapse

→ Kollaps-Struktur

collapse doline

 \rightarrow Doline, \rightarrow Kollaps-Struktur

Deformation

(lt 101), f., Verformung, f., (strain), Gestalts- oder Volumenveränderung, die ein Körper beim Einwirken einer äußeren Kraft erfährt.

deformation

 \rightarrow Deformation

Depression

(lt 105), f., (depression) 1. Negativ morphologisches Element der Landoberfläche, entstanden durch tektonische Senkungen, Einbrüche der Erdoberfläche oder äolische Abtragung; i. e. S. Bez. für Einsenkungen unter das Meeresniveau. [...]

dissoluton

 \rightarrow Auslaugung, \rightarrow Subrosion

Doline

(slowen. Dolina = Tal), f., (doline, sinkhole), (*Cvijic 1893), Karsttrichter (swallet bole), schlot-, trichter- oder schüsselartige Vertiefung der Karstoberfläche (Schacht-, Trichter-, Schüsseldoline; shaft doline, funnel sink, nested sink) mit rundem oder elliptischem, auch unregelmäßigem, Umriss. Ihr Durchmesser kann 10 m bis 1,5 km, ihre Tiefe bis 300 m betragen. – Trichterförmige Karsthohlformen mit Durchmessern von 1 bis 10 m werden als Kleindolinen (small doline) bezeichnet. Der Boden der D. kann mit Sturzblöcken, Verwitterungssedimenten usw. gefüllt sein. – Dolinen bilden sich durch Einsinken des Gesteins über nach Gesteinsauflösung entstandenen Hohlräumen: Lösungsdoline. Der Begriff Einsturzdoline (durch Einsturz unterirdischer Lösungshohlräume entstanden; collapse sinkhole) wird heute vielfach durch die Bez. Einsturzkessel, Einsturztrichter ersetzt. – Bei Abdichtung des Dolinenbodens mit Sedimenten können Dolinenseen (sinkhole lake) entstehen. – Größere zusammenhängende Karstflächen mit netzartig verteilten Dolinen werden als Dolinenfelder (doline field), reihenartig angeordnete Dolinen als Dolinenteihen (doline chain) bezeichnet.

Dolinenfeld

siehe Dolinenfeld unter \rightarrow Doline

Dolomit

(1796 von H.B. de Saussure zu Ehren des Mineralogen D.G. de Dolomieu [1750–1801] benannt), m., (dolomite), Mineral- und Gesteinsname für ein Karbonatgestein, das zu mind. 90 % aus dem Mineral D. besteht, im Engl. auch dolostone für das Gestein D. Chemische Formel: CaMg(CO₃)₂. Dolomitstein entsteht durch primäre Ausfällung oder durch die sekundäre Dolomitisierung von kalkigen Sedimenten. [...]

Donauversickerung

 \rightarrow Versinkung

Druse

(Wortstamm wie Drüse), f., (druse), Kristalldruse, mit Kristallen (z. B. Quarz, Amethyst, Calcit usw.) ausgekleideter Hohlraum in Gesteinen mit noch verbleibendemzentralem Resthohlraum.

Durchbruchstal

Aus Klus: f., (klus), enges tief eingeschnittenes Quertal (Durchbruchstal), das durch einen antezedenten Fluss gebildet wurde, der sich während der Heraushebung eines Höhenzuges in diesen erosiv einschneidet.

earthquake shocks

→ Kollapsbeben

Einbruch

Aus Einbruchsgebirge, n., (collapse mountains) \rightarrow Salzspiegel.

Einbruchschlot

 \rightarrow Schlot

Einsenkung

 \rightarrow Depression

Einsturzdoline

f., Einsturzkessel, m., Einsturztrichter, m., (doline, sinkhole) \rightarrow Doline.

Einsturzgebirge

 \rightarrow Salzspiegel

Einsturztrichter

Aus Einsturzdoline: f., Einsturzkessel, m., Einsturztrichter, m., (doline, sinkhole) \rightarrow Doline.

Erdfall

m., (sinkhole), (schon bei Naumann 1850), infolge unterirdischer Auslaugung von Salz oder Gips durch plötzlichen Einsturz an der Erdoberfläche entstehender Trichter. Durchmesser bis zu mehreren m. – s. a. \rightarrow Doline.

Erdfall-See/ Erdfallsee

s. Dolinensee unter \rightarrow Doline.

Erdfallfeld

s. Dolinenfeld unter \rightarrow Doline.

Erdfalltümpel

s. Dolinensee unter \rightarrow **Doline**.

Erdfallweiher

s. Dolinensee unter \rightarrow **Doline**.

Erosion

(It 143), f., (erosion), (wahrscheinl. Lyell 1830–1833), Oberbegriff für Abtragungsprozesse, bei denen Material durch Agenzien (Wasser, Eis, Wind) verlagert wird. Im weiteren Sinn auch Oberbegriff für alle Prozesse, die Boden- und Gesteinsmaterial aus ihrem Verband lockern, lösen und verlagern (Denudation). Erosion tritt ein, wenn die vom Agens ausgeübten Kräfte (Scher-/Schubspannungen) Partikel aufnehmen und transportieren können [...]

Erosionskessel

m., Erosionskolk, m., Laugungskolk, m., Kolkloch, n., Strudelkessel, m., Strudelloch, n., Strudeltopf, m., (erosion scour, pothole), trichter- bis kesselförmige Aushöhlungen im Gestein. Sie können entweder vorwiegend durch die mechanische Kraft des fließenden Wassers, oft kombiniert mit der Scheuerwirkung mitgeführter Gesteinsbruchstücke, entstehen (z. B. Erosionskolke) oder ihre Entstehung vorwiegend chemischer Lösung verdanken (z. B. Laugungskolke). [..]

Estavelle

f., (estavelle, inversac) häufig in den \rightarrow Poljen des Karstes auftretendes Loch mit zeitlich wechselnder Quellen bzw. \rightarrow Schwinden-Funktion. Druckveränderungen im Karstwassersystem können ein Wasserspeiloch (Karstquelle) an der Oberfläche in ein aktives Schluckloch umfunktionieren. – s. a. \rightarrow Katavothre.

Felsenschlucht

 \rightarrow Schlucht

Firnmulde

n., (firn field) Firnmulde, f., (firn trough),

Aus Gletscher: [...] Bei einem G. unterscheidet man zwischen dem oberhalb der Schneegrenze liegenden Nährgebiet (Akkumulationsgebiet, accumulation area, catchment basin), das entweder eine Hochfläche (Firnfeld, firn field, snowfield) oder eine muldenartige Senke (Firnmulde, névé basin) darstellt, und dem unterhalb der Schneegrenze liegenden Zehr- oder Abschmelzgebiet (Ablationsgebiet, ablation area), das den größten Teil der Gletscherzunge (glacial lobe, tongue) einnimmt. Nach der Form dieser Gletscherzunge lassen sich der alpine Typ (mit langer stromartiger Gletscherzunge) und der norwegische Typ (Fjeld- oder Firnplateau-Typ, da mit tafelförmigem Firnfeld und mehreren, voneinander getrennten, kurzen, aber breiten Gletscherzungen) unterscheiden.

Fließerde

f., (solifluction soil), infolge starker Durchnässung nach oberflächlichem Auftauen von Permafrost oder jahreszeitlich gefrorenem Untergrund sich bildender Bodenbrei, der bereits bei geringen Gefällswinkeln bergabwärts fließt und zu Kryoturbationserscheinungen führen kann.

Flussanzapfung

f., (stream capture), durch rückschreitende fluviale Erosion wird ein benachbartes Einzugsgebiet umgelenkt und dadurch entsteht im neuen Quellgebiet des angezaptes Flusses ein Trockental (streamless valley), das Tal endet als geköpftes Tal (beheaded valley).

Flussversinkung

f., (sinking), Bez. für starken Wasserverlust von Oberflächengewässern durch

Abströmen in Schlucklöcher und Spalten des Flussbettes; z. B. Donauversinkung östl. von Tuttlingen. – s. a. \rightarrow Karst, \rightarrow Schwinde.

Fracturing, fracture \rightarrow Kluft

geologische Orgel \rightarrow Karst, \rightarrow Schlotte

Gips

(alter Begriff, schon bei Herodot und Plato), m., (gypsum), CaSO4·2H2O, mineral- und Gesteinsname – Bereits seit dem Altertum wird ein Gipsgestein mit mikroskopisch feiner Körnigkeit als Alabaster bezeichnet.

Gipshut

m., (cap rock) \rightarrow Salzspiegel.

Gipsblase Nach (NNA 1998) → Quellungshöhle

Gipshöhle → Gips, → Höhle

Gipskarst \rightarrow Gips, \rightarrow Karst

Grundwasserabfluss

Aus Abfluss: m., (runoff, discharge), das unter Einfluss der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche fließende Wasser. Quantitativ ist es das Wasservolumen aus dem Einzugsgebiet, das den Abflussquerschnitt in einer bestimmten Zeiteinheit durchfließt (m³/s). – Dieses Wasservolumen setzt sich zusammen aus dem Oberflächenabfluss (surface runoff; Abflussanteil, der oberirdisch dem \rightarrow Vorfluter zufließt, ohne in den Boden eingedrungen zu sein), dem Zwischenabfluss (interflow; Abflussanteil, der dem Vorfluter unterirdisch mit nur geringer Verzögerung zufließt) und dem grundwasserbürtigen A. (basal runoff; Abflussanteil, der dem Vorfluter mit großer Verzögerung zufließt). [...]

Grundwassertrog

Aus (Kempe 1987):

"Wenn in dem Kluftinstem des Gipsberges Teile unterhalb des Grundwassserspiegels in sich geschlossen sind, also einen Grundwassertrog bilden, so muss sich in diesem

schließlich an Gips gesättigtes und daher schwereres Grundwasser sammeln und zwar bis zur Höhe der tiefsten Stelle in der Umrandung des Troges."

Hochmoor

Aus Moor: n., Bruch, n., (moor, swamp), Bez. Für alle natürl. Vorkommen mit Torfbildung. [...] – Tritt jedoch bei günstigem Feuchtklima ein Weiterwachsen über den Wasserspiegel oder ein Wachsen ohne Vorhandensein eines geschlossenen Wasserbeckens ein, so kann das nur über die Ansiedlung wasserspeichernder Torfmoose (Sphagnum) geschehen. Diese können sogar einen vorhandenen Wald zum Absterben bringen. Da die Moose infolge der günstigen Wachstumsbedingungen in der Mitte des Moorkörpers besser gedeihen als in den Randpartien, erhält das M. mit der Zeit eine diese Verhältnisse abbildende Uhrglasform: Hochmoor (domed bog, highmoor). [...]

Hutgestein

(bergm.), n., (cap rock), infolge unterirdischer chemischer Lösung durch Grundwässer (\rightarrow Subrosion) in den obersten Teilen von Salzstöcken (Diapir) nach Auflösung der leichtlöslichen Salze (Steinsalz, Kali- und Magnesiumsalze) übrigbleibende, schwerer lösliche Gesteine wie Anhydrit, Gips (Gipshut), verschiedentlich auch Kalk. Diese Gesteinsmassen sitzen dann dem Salzstock gewissermaßen wie ein Hut auf. – In der Praxis wird oft auch der engl. Ausdruck Cap Rock verwendet.

Aus (BGE 2023):

"Gestein, das über Salzgesteinen beim Kontakt mit (salz)ungesättigten Wässern entsteht. Steigt Salz im Verlauf der Salzstockbildung auf, kann es bis in grundwasserführende Schichten gelangen. Bei Kontakt mit dem Grundwasser werden die Salzbestandteile aufgelöst. Zurück bleiben die wasserunlöslichen Bestandteile, insbesondere Gips. Diese bilden oberhalb des Salzspiegels (oberste, meist horizontale Begrenzungsfläche eines Salzstockes) das Hutgestein."

Hutgesteinsbildung

→ Hutgestein

Hydratation

(gr 392), f., (hydration), Anlagerung von Wassermolekülen an einzelne Ionen. Im idealen Fall – in Lösungen – können sie mantelartig das Ion umlagern. Wird Gas von Wasser umschlossen, entstehen dabei Gashydrate. Ähnliche Prozesse können an Grenzflächenionen von Kristallen, Mineralbruchstücken usw. stattfinden. Der Prozess kann nach und nach ganze Minerale oder gar Gesteine erfassen, indem er allmählich von außen nach innen fortschreitet. Mit der H. sind Volumenvergrößerungen verbunden. So vergrößert z. B. der Anhydrit (CaSO₄) bei der Umbildung zu Gips (CaSO₄·2H₂O) sein Volumen um 60 %.

Höhle

f., (cave), natürlicher unterirdischer Hohlraum im Gestein, der ganz oder tw. von gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen erfüllt ist. Er kann gleichzeitig mit dem Gestein als primäre H. (primary cave) entstehen [...]. Die meisten H.n sind jedoch sekundäre H.n (secondary caves). Sie können sich z. B. auf Schichtfugen oder auch tektonischen Vorzeichnungen bilden: Schichtfugenhöhle (bedding cave), tektonische H. (tectonic cave), Klufthöhle (fissure cave), Spaltenhöhle (fissure cave), Bruchfugenhöhle (crack cave), Zerklüftungshöhle (fracture cave). Verschiedene H.n können auf Verwitterungsvorgänge (Verwitterungshöhle, erosional cave), auf nachbrechendes Gestein (Versturzhöhle, rubble cave) oder auf Bergstürze (Trümmerhöhle, rubble breccia cave) zurückgeführt werden. Bei den Erosionshöhlen (erosional caves) bildet die Tätigkeit der Brandung die Brandungshöhlen (sea cave), diejenige der Gletscherwässer die Gletscherhöhlen (ice cavern). Einen sehr großen Raum, v. a. im \rightarrow Karst (Karsthöhle, cave), nehmen die Korrosions- oder Auslaugungshöhlen (leaching cavity) ein, bei denen man Sickerwasserhöhlen (seapage water cavity), Flusshöhlen (river cave) und ähnliche Gebilde unterscheiden kann. Auch bei Bildung der Karsthöhlen tritt neben die Korrosionswirkung die Erosionsfähigkeit des Wassers. - Alle diese Höhlen können einen (Blindhöhle, blind cave) oder mehrere Zugänge (Durchgangshöhle, cave passage) besitzen. Bei den Karsthöhlen bilden meist die Klüfte, Schichtflächen und andere Schwächestellen Angriffspunkte für CO2-haltige Sickerwässer. So bildet sich ein erster Lösungshohlraum: Evakuation (evacuation). - Der Höhlenraum wird von den Höhlenwänden (cave wall), der Höhlendecke (cave ceiling) und der Höhlensohle (cave floor) umschlossen. Die Aneinanderreihung einzelner Höhlenräume wird als Höhlenzug (cave series), eine Anzahl zusammengehörender Einzelhöhlen oder Höhlenzüge als Höhlensystem (cave system) bezeichnet. – H.n können trocken liegen, von einem fließenden Höhlengewässer (cave waters) durchströmt (Höhlenfluss, -bach, subterranean river) oder z. T. von einem stehenden Gewässer mehr oder weniger gefüllt sein (Höhlensee, underground lake). Es handelt sich bei diesen Wässern um Versickerungs- und Versinkungswässer von der Erdoberfläche. – Der Höhleninhalt kann gasförmig (Höhlenluft, Höhlenwetter, cave air), flüssig (Höhlenwässer, cave water) oder fest sein. Als feste Stoffe treten auf: Höhlenlehm (= feinkörnige, eingeschwemmte und Lösungsrückstand-Sedimente; cave loam), Knochenbrekzien oder Bonebeds (bone beds) und die verschiedenartigsten Schuttsedimente (herabgestürzte Blöcke, eingeschwemmtes Material usw.). Weiterhin kann chemische Ausscheidung aus Lösungen (v. a. Kalkausscheidung) zur Bildung von Sintern, Tropfsteinen (Tropfsteinhöhle, stalactite cavern) und Höhlenperlen (cave pearl) führen. Manche Höhlen enthalten das ganze Jahr hindurch oder über lange Zeiten des Jahres hinweg Höhleneis (Eishöhlen, ice cavern).

Höhlensystem

 \rightarrow Höhle

Hülbe

Aus (Schöttle et al. 2007):

Durch Lehm oder wenig durchlässige Gesteine abgedichtete Hohlform, in der sich Wasser sammelt

Karre

f., Pl. Karren, Schratten (Volksausdrücke, n. char, althochdt. = Fels), (karren, solution channels), (*Hirzel-Escher 1829, aber auch bei Escher von der Linth 1841), Rinnen und napfartige Löcher verschiedener (bis zu m-)Tiefe auf freiliegenden Kalksteinoberflächen, aber auch unter Bodenbedeckung; v. a. auf reinen und nicht allzu feingeschichteten Kalken bei flacher oder schwach geneigter Schichtlage. Es handelt sich um chemische Auslaugungs-, in viel geringerem Maße um mechanische Spülwirkungen von Regen- und Schmelzwässern. - Beim Auftreten vieler solcher Rinnen entstehen Karren- oder Schrattenfelder (karrenfeld, lapiés), bei denen die Rinnen oft durch messerscharfe Grate getrennt sind. Sehr viel unregelmäßigere Formen bilden sich an Meeresküsten als Brandungs-, Küsten- oder litorale K.n. Karren werden in K. 1., 2. und 3. Ordnung eingeteilt: 1. Ordnung – groß, 1 bis > 10 m (Flachkarren, clints; Kluftkarren, grikes; Spitzkarren, pinnacles), 2. Ordnung: dm bis m (Kamenitza, kamenitza; Rinnenkarren, groove karren; u. a.), 3. Ordnung: klein, < 10 cm (Napfkarren, panhole; löchrige Strukturen, rainpits; Lösungsrippel, solution ripples; u. a.). Eine andere Einteilung sind drei Gruppen von K.typen: Freie K., scharfkantig, auf freiem Gestein (Firstkarren, ridge karren; Rillenkarren, groove karren); halbfreie K., von dünner Humusschicht bedeckt, z. T. mit unterhöhlten Seitenwänden (Kamenitza, kamenitza; Hohlkarren, hollow karren); bedeckte K., unter einer Bodendecke (Rundkarren, rounded clints) – Karrenähnliche Erscheinungen bei Graniten, Sandsteinen usw., wurden z. T. auch als Pseudokarren (pseudokarren) bezeichnet oder mit Gesteinsbez. versehen (z. B. Granitkarren, granite karren). Da sie ähnlicher Entstehung wie K. in leichter löslichen Gesteinen sind, werden sie heute zusammenfassend als Silikatkarren (silica karren) bezeichnet; z. T. sind sie auch auf rein mechanische Wasserspülung zurückzuführen.

Karst

(n. d. Karst-Geb. d. nordost-adriatischen Raumes), m., (karst), bildet sich in Gebieten mit chemisch angreifbaren (löslichen) Gesteinen, v. a. Kalken, Anhydrit/ Gips und Salzgesteinen. In Kalkgebieten überwiegt – infolge starker Versickerung der Niederschlagsund weitgehender Versinkung vorhandener Oberflächenwässer – die unterirdische Entwässerung bei weitem gegenüber der oberirdischen. Auf diese Weise resultiert die typische Karsthydrographie (karst hydrography): oberirdisch oft ein Netz von Trockentälern, unterirdisch eines aus Spalten- und Höhlenwässern. Dieses Karstwasser (karst water; *Grund 1903) bzw. Karstgrundwasser (karst groundwater) tritt an günstigen Stellen als Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des ewG und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle

meist stark schüttende Karstquelle zutage. – Die durch das Wasser hervorgerufenen Korrosionserscheinungen kennzeichnen das morphologische Bild: Karsttopographie (karst topography; Formen: \rightarrow Dolinen (sink hole), \rightarrow Cenote (cenote), geologische Orgeln (s. a. Erläuterung zu \rightarrow Schlotte), \rightarrow Schlotten (pipes), \rightarrow Karren (karren), \rightarrow Poljen (poljes), \rightarrow Uvalas (uvalas) usw.). – Es kann zwischen dem durch eine Verwitterungsdecke überzogenen, in Mitteleuropa oft auftretenden bedeckten K. (covered k.) und dem v. a. im Hochgebirge erscheinenden nackten K. (naked k.) unterschieden werden. – Eine verkarstete Gesteinsschicht, bei der nur eine Verkarstung in geologisch vergangener Zeit nachweisbar ist, heißt fossiler K. oder auch Paläokarst (paleokarst). – s. a. Katavothre

Aus (BGE 2023):

Der Begriff Karst steht für die Gesamtheit der Formen von durchlässigen, wasserlöslichen Gesteinen (z. B. Kalkstein, Gips, Salze), die durch Oberflächen- und Grundwasser ausgelaugt werden. Durch Lösungsvorgänge kommt es zu charakteristischen Karsterscheinungen.

karst spring

→ Karstquelle

Karsthohlräume

 \rightarrow Karsthöhle, \rightarrow Höhle, \rightarrow Karst

Karsthöhle

f., (cave) \rightarrow Höhle, \rightarrow Karst

karstification

 \rightarrow Karst

Karstquelle f., (karst spring) \rightarrow Karst, \rightarrow Quelle

Karstschlotte

 \rightarrow Schlotte

Karstsenke \rightarrow Karst, \rightarrow Senke, \rightarrow Subrosion

Karstspalte

→ Karst

Karsttrichter

m. (funnel sink, doline) \rightarrow Doline.

Karstwanne

Aus Kamenitza: (n. slow. Kamenica), f., (kamenitza, panhole), Opferkessel, m., (weathering pit), auch als Napfkarren oder Lösungswannen (solution pans) bezeichnet, rundliche, beckenförmige Hohlformen mit z. T. > 1 m Durchmesser, die durch Lösungsverwitterung in verkarstungsfähigen Gesteinen entstehen.

Karstwasser

 \rightarrow Karst

Katavothre

(Katavothra: volkstüml. Ausdruck aus den gr. Karstgebieten), f., (katavothron), Ponor (kroat.), m., (ponor), Schluckloch, Schlundloch, Schwundloch, (swallet), trichter- oder schachtförmige Löcher im Karst, in die das Oberflächenwasser hineinströmt oder -stürzt, um die unterirdischen Wasserwege zu erreichen. – s. a. Schwinde.

Kaverne

(lt 53), f., (cavern), künstlich hergestellter unterirdischer Hohlraum zur Speicherung fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe: Kavernenspeicher (storage cavern) oder zur Unterbringung eines Kraftwerkes: Kavernenkraftwerk (underground power station).

Kessel

Aus Kesselbruch, (*Suess 1883), m., Kesseleinbruch, m., (cauldron, fault pit), (*Freiherr von Richthofen 1886), konzentrisch von Brüchen (peripherische Brüche, *Deffner in Suess 1883) umgebenes und daher mehr oder weniger rundliches bis polygonales Senkungsfeld relativ geringen Umfangs. Besitzt es dagegen ein größeres Ausmaß, so wird es als Senkungsbecken (subsidence basin) bezeichnet (Beckensenkung, Schüsselsenkung bei Freiherr von Richthofen 1886).

Klippe

f., (cliff), schroffe Felsformen an Berg- und Gebirgshängen [...]

Kluftbildung

 \rightarrow Kluft

Kluftkarre

→ Karre

Kluft

f., (fracture, crevasse, joint), feine, nicht oder nur wenig geöffnete Gesteinsfuge, an der keine wesentliche Bewegung stattgefunden hat. Sie entwickelt sich zur Spalte (fissure), wenn die beiden Kluftflächen (joint planes) breiter auseinanderklaffen. Auf den Kluftflächen können Kluftminerale (fissure minerals) auskristallisieren. – In ungefähr gleicher Richtung verlaufende Kluftgemeinschaften werden Kluftschar (joint set), die Zusammenfassung gleich alter, jedoch verschieden streichender Scharen Kluftsystem (joint system) genannt. – Zwei genetisch zusammengehörige und auch in erkennbarer Symmetriebeziehung zueinander stehende Kluftscharen werden auch als konjugierte Kluftscharen (conjugate joints) bezeichnet. – Vielfach lassen sich nach dem Studium des Kluftnetzes (fracture pattern) eines Gebietes Aussagen über die tektonischen Beanspruchungspläne machen.

Kluftquelle

Aus Quelle, f., (spring), örtlich begrenzter, natürlicher Grundwasseraustritt, auch wenn er eine künstliche Fassung erhalten hat. – Q.n, die aus Spalten oder Klüften austreten, werden Spalten- oder Kluftquellen (crevisse spring, fissure spring) genannt, solche, die aus Verwerfungen entspringen, Verwerfungsquellen (fault spring).

Kolk

→ Erosionskessel

Kollapsbeben

→ Kollaps-Struktur

Kollaps-Struktur

(lt 63, 378), f., (collapse structure), (*Harrison und Falcon 1934, 1936), schwerkraftbedingte Zergleitung und Fältelung von Schichten, auch Zurücksinken und Einbrechen von Hangendschichten anlässlich von Salz- oder Magmenbewegungen im Untergrund.

Konvektionshöhle

Aus (Kempe 2005):

Konvektionshöhlen (Laughöhlen) sind phreatisch, d.h. tief im Gestein unterhalb des Karstwasserspiegels entstanden.

"Eine Verbindung zur Oberfläche ist hierbei nicht erforderlich. Konvektionshöhlen sind durch große, hallenartige Räume gekennzeichnet, die nicht oder nur zufällig miteinander verbunden sind. Auf kleinem Raum konzentrieren sich hierbei große Hohraumdichten. Diese Eigenschaften stehen im Gegensatz zum Charakter der Höhlen im Bereich der vadosen Zone, die sich linear über größere Entfernungen erstrecken und deren Umgebungsgestein nur geringe Hohlraumdichten aufweist."

Korrosion

(lt 92), f., (corrosion), 1. Chemische Zerstörung eines Gesteins durch Wasser und die im Wasser enthaltenen reaktiven Bestandteile – s. a. Erosion, Karst. [...]

Korrosionskolk

 \rightarrow Kolk, \rightarrow Korrosion

Lagerungsstörung

Aus Dislokation: (It 122, 250), f., (dislocation), (schon bei Naumann 1850), jegliche strukturelle Veränderung eines Gesteinsverbandes und jegliche Unterbrechung eines ursprünglichen Zusammenhanges: Störung. Solche Lagerungsstörungen können durch kompressive Bewegungen bei Einengungstektonik oder durch distraktive Bewegungen bei Zerrungstektonik hervorgerufen werden.

Aus Salztektonik: (gr 372), f., (salt tectonics), Bez. für tektonische Strukturen oder Vorgänge, an deren Ausgestaltung das Salz ursächlich oder doch maßgeblich beteiligt ist. Das gilt für das Salzgebirge selbst, aber auch für die durch solche Vorgänge entstandenen \rightarrow Deformationen des Deckgebirges. – Lagerungsstörungen, die durch Salzauslaugung entstanden sind, werden nicht als S. bezeichnet. [...]

land fall

 \rightarrow Erdfall

Laugdecke

Aus (NNA 1998):

"Die Segeberger Höhle ist labyrinthisch, besitzt flache Decken und auffällig nach innen fallende Wände [...]. Gripp schloß daraus, daß sich die Höhle durch langsames Lösen in einem mehr oder weniger stehenden Wasserkörper gebildet hat. Er postulierte zudem, daß die zunächst vertikalen Wände der Höhle erst mit dem fortschreitenden Lösungsprozeß nach außen "kippen " würden. 1926 veröffentlichte Friedrich Stolberg eine Zusammenstellung der begehbaren Gipshöhlen im Harz zusammen mit neuen Plänen. Mit Stolbergs Plänen und Gripps Hypothesen überarbeitete Walter Biese 1931 die Theorie der Gipshöhlenbildung und gründete das Konzept der Laughöhlen, die durch flache Decken und geneigte Wände charakterisiert sind. Er führte entsprechend die Begriffe

"Laugdecke" und "Laugfacette" ein und zeigte, daß auch die Schlotten des Kupferschieferbergbaus zu den Laughöhlen gehören."

Laugnapf

 \rightarrow Karre

Laugung

 \rightarrow Auslaugung, \rightarrow Subrosion

leaching → Auslaugung

Lösungsdoline

Siehe Lösungsdoline unter→ Doline

Napfkarre

→ Karre

Naturschacht

m., Karstbrunnen, (jama), senkrechter oder schräger, gelegentlich bis mehrere hundert m tiefer, zylinderartiger Kanal in Karstgebieten, der durch Lösungseinwirkungen des Wassers von der Erdoberfläche her in karbonatischen Gesteinen erzeugt wird. – s. a. Karst.

Polje

n., Pl. Poljen, (serbokroat. poljana = Ebene, Feld), (polje), großes, geschlossenes, meist steilwandiges Becken mit ebenem Aufschüttungsboden und elliptischem oder polygonalem Umriss. Solche – nur im \rightarrow Karst auftretende – P. haben unterirdische Entwässerung (s. a. Katavothre); sie können dauernd trocken sein, aber auch eine periodische oder dauernde Wasserfüllung aufweisen (Poljensee, polje lake). – Solche Formen können durch das Zusammenwachsen von \rightarrow Dolinen oder \rightarrow Uvalas, aber auch durch chemische und mechanische Ausweitung tektonischer Schwächezonen verschiedener Art – z. T. unter Mitwirkung von Flüssen – entstehen.

Ponor

(serbokroat. = Abgrund), m., (ponor) \rightarrow Katavothre.

Pseudodoline

Aus Pseudokarst: (gr 424, n. d. Karst-Geb. d. nordost-adriatischen Raumes), m., (pseudo-karst), heute nicht mehr verwendeter Begriff für Karsterscheinungen in schwer

löslichen Gesteinen (z. B. Granit) und Karst-ähnlichen Erscheinungen ohne Beteiligung von Lösungsvorgängen (z. B. in Periglazialgebieten durch Abschmelzvorgänge).

Pseudomorphose

f., (pseudomorph), (*Hauy 1822. – Werner 1792, gebrauchte hierfür den Begriff Afterkristall), Gebilde, bei dem die äußere Form einem ursprünglichen Kristall entspricht, der Inhalt jedoch eine Neubildung ist.

Quelle

f., (spring), örtlich begrenzter, natürlicher Grundwasseraustritt, auch wenn er eine künstliche Fassung erhalten hat. [...] – Die einer Q. entströmende und in Liter pro Sekunde (l/s) gemessene Wassermenge wird Quellschüttung (spring discharge) genannt. [...].

Aus Quellentypen: [...] Im Karst treten die stark schüttenden Karstquellen (karst spring), (Vaucluse-Q.) auf, hier und anderwärts auch Höhlenquellen (cave spring) [...]

Quellungshöhle

Aus (NNA 1998):

"Quellungshöhlen bilden sich durch die Ausdehnung (+ 26 Vol.%) bei der Umwandlung (Hydratisierung) von Anhydrit zu Gips (Reimann, 1991)."

Relief

Aus Reliefenergie: (frz. relief = Höhengestaltung), f., (relief intensity), (i. d. geografischen Lit. seit Ende d. 19. Jh.), Aussage über den Charakter des Reliefs, wobei lebhaftes Relief eine hohe, schwaches Relief eine niedrige R. besitzt.

Residualer Anhydrit

siehe Residualgebirge in \rightarrow Salzspiegel

Rillenkarre

→Karre

Rinnenkarre

→ Karre

Rutschung

f., (creep, landslide), durch Einwirken der Gravitation an einem Berghang abgerutschte Masse. Je nach Geschwindigkeit und Wassergehalt ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen der Massenbewegungen

salt water ascension

Salzwasseraufstieg

Salzspiegel

m., (salt table), (*Fulda 1909), durch Ablaugungstätigkeit des Grundwassers an Salzlagern, v. a. Salzstöcken, erzeugte horizontale Fläche. Meist liegt auf dem S. als schwerer löslicher Rückstand ein Residualgebirge (Gipshut, caprock). – Seitliche Subrosion erzeugt am Salzlager den Salzhang (salt flank) (*Fulda 1923). – Durch Massendefizit infolge der Lösungswirkungen tritt oft über dem S. und neben dem Salzhang ein stark zerrissenes, z. T. verstürztes Einsturz- bzw. Einbruchsgebirge auf.

Schachtdoline

f., (shaft sinkhole) \rightarrow Doline.

Schachthöhle

 \rightarrow Höhle, \rightarrow Katavothre

Schichtstufe

f., (cuesta), (erste eingehende wiss. Bearbeitung durch Ramsay 1863), Geländestufe, deren Steilwand als Stufenstirn (Trauf, cuesta scarp), deren Fläche als Stufenlehne (Stufenfläche, Landterrasse; cuesta back slope) bezeichnet wird [...]. Hervorgerufen wird sie durch Abtragungsvorgänge verschiedener Art an den Schichtköpfen von Gesteinsverbänden unterschiedlicher Widerstandsfähigkeit in flach geneigten Schichtpaketen; z. B. die Schichtstufenlandschaft (cuesta landscape) der Schwäbischen und Fränkischen Alb.

Schicht

f., (layer, bed), tafel- oder plattenförmiger Gesteinskörper, dessen Dicke (= Mächtigkeit) gegenüber seiner horizontalen Ausdehnung gering ist.

Schlot

m., (funnel, vent), [...] 2. Verschiedentlich werden auch vertikale Höhlenstrecken, die sich von der Höhlendecke nach oben entwickeln, als Schlote (Deckenschlot; vertical cave) bezeichnet. Man kann hiervon solche vertikalen Gebilde unterscheiden, die etwa durch Erweiterung einer Bruchfuge von oben her entstanden sind. Sie werden als Schacht (shaft) bezeichnet.

Schlotte

f., (pipe), infolge Auslaugung durch eindringende Sickerwässer am Ausgehenden von Kalk-, Dolomit- oder Gipsgesteinen gebildete, steilstehende bis saigere, zylindrische, kessel-, schacht- oder trichterartige Vertiefung, die im Wesentlichen durch

Lösungserweiterung vorhandener Spalten oder Klüfte entstanden ist. Eine ganze Serie solcher Schlotten wird auch als geologische Orgel bezeichnet. s. a. Karst. Für Schlottenbruch, aus geologische Orgel: f., (nicht ins Englische übersetzbar), säulenartig ausgeprägte Karsterscheinungen, die meist vollständig mit Sediment bedeckt sind; Sonderform der bedeckten \rightarrow Karre (solution fissure).

Schlucht

Schlucht, f., (gorge), tief eingeschnittenes Erosionstal.

Schluckloch

Schlundloch, n., (ponor) \rightarrow Katavothre.

Schotterkörper

Aus Geröll: n., (boulder), durch bewegtes Wasser transportiertes und abgelagertes Gesteinsbruchstück (Bach-, Fluss-, Strandgeröll). Durch gegenseitiges An- und Aufschlagen auf den Untergrund erfolgt ein mehr oder weniger starker Abrieb, der mit einer Kantenrundung beginnt [...] Eine Anhäufung von Geröllen wird als Schotter oder Kies (gravel), eine größere natürliche Schottermasse als Schotterkörper (heap of gravel) bezeichnet. [...]

Schutt

m., (debris, talus), durch Verwitterung und Erosion entstandene und am Fuß von Steilhängen und Felswänden abgelagerte Anhäufung von unverfestigten Gesteinsbruchstücken, die durch die Wirkung mechanischer Verwitterung erzeugt worden sind; z. B. Schutthalde (detritral slope, rubble tip), Schuttkegel am Fuß steiler Felspartien und Berghänge (debris cone) [...]. Bei sehr großen Gesteinsbruchstücken spricht man von Blockschutt (scree).

Schüsseldoline

f., (uvala, karst valley) \rightarrow Doline, \rightarrow Uvala.

Schüttung siehe Quellschüttung unter \rightarrow Quelle

Schwalgloch

 \rightarrow Erosionskessel

Schwinde

f., (ponor, katavothron), Stelle an der Erdoberfläche, an der Wasser ausschließlich infolge seiner Schwerkraft in unterirdische Gerinne abfließt. Je nach ihrer Lage werden sie als Bach-, Fluss-, See- oder Meeresschwinde bezeichnet. Daneben findet sich auch die Bez. Schlinger (swallet), m., für eine S., bei der die Zufuhrmenge größer als der unterirdische Abfluss ist.

Senke

 \rightarrow Subrosion

Senkungswanne

Aus Kamenitza: (n. slow. Kamenica), f., (kamenitza, panhole), Opferkessel, m., (weathering pit), auch als Napfkarren oder Lösungswannen (solution pans) bezeichnet, rundliche, beckenförmige Hohlformen mit z. T. > 1 m Durchmesser, die durch Lösungsverwitterung in verkarstungsfähigen Gesteinen entstehen.

Senkungsmulde

 \rightarrow Absenkung, \rightarrow Synform

Sickerschacht \rightarrow Schachtdoline, \rightarrow Doline

sink → Versinkung

sinkhole

 \rightarrow Bachschwinde, \rightarrow Doline

Sole

f., (brine), Salzwasser mit mind. 14 g gelöster Stoffe (meist NaCl) in 1 kg Wasser.

Solquellen

 \rightarrow Sole, \rightarrow Quelle

Spalte

f., (fissure, crevice), klaffende Fuge im Gestein. [...]

spring

 \rightarrow Quelle

Stufen- und Hügelland

siehe Schichtstufenlandschaft in \rightarrow Schichtstufe

Störung

f., (fault), allg. Ausdruck für eine Trennfuge im Gebirge, an der eine Verstellung der beiden angrenzenden Schollen stattgefunden hat. Das Ausmaß der Verstellung kann vom cm- bis km-Bereich gehen. – Verschiedentlich wird auch der Bewegungsvorgang selbst – und nicht nur das Ergebnis dieses Vorgangs – als Störung bezeichnet. – s. a. Verwerfung.

stream shrinkage

→ Versinkung

subrosion

 \rightarrow Subrosion

Subrosion

(lt 379, 338), f., (subrosion), (*Seidl 1925), unter der Erdoberfläche stattfindende Ablaugung an leichtlöslichen Gesteinen, insbesondere Salzen, durch Grundwässer. – Solche unterirdische Ablaugung kann ein Nachsinken des darüber liegenden Gebirges zur Folge haben, sodass sich an der Erdoberfläche eine Senke (Subrosionssenke, subrosion depression) bildet.

AUS /BGE 20b/:

Unterirdische Lösungsverwitterung leicht löslicher Gesteine, vor allem von Salzen
Subrosionsbecken

siehe Senkungsbecken in \rightarrow Becken, \rightarrow Subrosion

Subrosionsbrekzie

Aus Brekzie, (von ital. breccia: Geröll), f., (n. Wagner 1928, schon mehrfach bei J.W. von Goethe), (breccia), verfestigtes Trümmergestein, dessen Bruchstücke eckig-kantig ausgebildet sind. [...]. Bei unterirdischer Ablaugung und \rightarrow Auslaugung entstehen Auslaugungs- (evaporite- solution breccia), Einsturz- (founder breccia) oder Einbruchsbrekzien (collapse breccia) als Nachsturzmaterial über und in Ab- und Auslaugungsstellen.

Subrosionskessel

 \rightarrow Kessel, \rightarrow Subrosion

Subrosionssenke siehe Subrosionssenke in \rightarrow Subrosion

Subrosive Einsenkung

siehe Subrosionssenke in \rightarrow Subrosion

Subsidenz

f., (subsidence), örtliche oder regionale Absenkung der Erdoberfläche.

Subsidenzstruktur

 \rightarrow Subsidenz

Synform

Aua Synklinale: Synkline, f., (syncline), Adj. Synklinal (gr 349), (synclinal), (n. Lyell 1833; zuerst von Sedgwick 1846, gebraucht; synklin auch bei Buckland und Conybeare 1824), durch Faltung entstandene tektonische Form mit nach oben divergierenden Faltenschenkeln. – Einige Autoren benutzen den Begriff S. nur bei gesicherter Altersfolge der Schichten. Ist das nicht der Fall, sprechen sie, rein geometrisch, von einer Synform (synform). [...]

Tal

n., (valley), vorwiegend durch Erosion gebildeter, mehr oder weniger schmaler und tiefer Einschnitt in die Erdoberfläche mit generell gleichsinnigem Sohlengefälle.

Talentwicklung

 \rightarrow Tal

Talnetz

→ Tal

Talzug

 \rightarrow Tal

Trockental

n., (dry valley, combe), 1. Tal, das keine Oberflächengewässer enthält. Solche Täler finden sich besonders häufig im \rightarrow Karst, dessen Hauptentwässerung unterirdisch erfolgt.

Trichterdoline

f., (funnel dolina) \rightarrow Doline.

Tropfsteinhöhle

 \rightarrow Höhle, \rightarrow Tropfstein

Tropfstein

m., (dripstone); Ausscheidung von Kalkstein (CaCO₃) aus Ca(HCO₃)₂-haltigen Tropfwässern an der Höhlendecke (Stalaktit) und am Höhlenboden (Stalagmit).

Umlaufberg

m., (meander core), ein von der Flusserosion übrig gelassener Berg inmitten eines Tales, der aus dem Sporn eines ehemaligen Talmäanders (\rightarrow Mäander) dadurch entstanden ist, dass der Fluss am Spornhals durchbrach und damit seinen eigenen Mäander stilllegte. Daher wird ein U. zumeist nur auf einer Seite von dem Fluss, auf den anderen Seiten von dem – meist trocken liegenden – einstigen Flussbett begrenzt. [...]

Uvala

Uvala, (Bez. a. d. dinarischen Ländern), n., (uvala), Schüsseldoline (Krebs 1904, 1928), große seichte Doline mit etwa ovalem Umriss, einem Tiefen-Breiten-Verhältnis von 1:10 und einer breiten, unebenen Sohle, die meist mit Lehm bedeckt ist. Ein U. entsteht durch Aufzehren der trennenden Riedel zwischen benachbarten \rightarrow Doline. – s. a. \rightarrow Polje.

Verbruch

 \rightarrow Versturz

Verkarstung

f., (karstificaton), natürliche chemische Auflösungs- und Zersetzungsprozesse an Gesteinen (z. B. Kalk, Dolomit, Gips, Steinsalz) durch Wasser. Diese chemischen Prozesse werden meist von mechanischen Vorgängen und Versturz begleitet. Das kann zu einer vollkommenen Umgestaltung des oberirdischen Reliefs und zur entscheidenden Veränderung der Hydrologie (vgl. \rightarrow Karst) in diesem Gebiet führen, wo bei dann der größte Teil des Wasserabflusses unterirdisch erfolgt. – s. a. \rightarrow Subrosion.

Versinkung

f., (sinking), Bez. für starken Wasserverlust von Oberflächengewässern durch Abströmen in Schlucklöcher und Spalten des Flussbettes; z. B. Donauversinkung östl. von Tuttlingen. – s. a. \rightarrow Karst, \rightarrow Schwinde.

Versturz

Für Versturz, aus: Salzspiegel: Durch Massendefizit infolge der Lösungswirkungen tritt oft über dem S. und neben dem Salzhang ein stark zerrissenes, z. T. verstürztes Einsturz- bzw. Einbruchsgebirge auf.

Für Versturz, aus: Verkarstung: natürliche chemische Auflösungs- und Zersetzungsprozesse an Gesteinen (z. B. Kalk, Dolomit, Gips, Steinsalz) durch Wasser. Diese chemischen Prozesse werden meist von mechanischen Vorgängen und Versturz begleitet.

void

Hohlraum

Zerrung

f., (extension, stretching) eine Beanspruchungsart der Tektonik, die durch voneinander weg gerichtete Kräfte verursacht wird (Zugbeanspruchung, tensile stress). Als Zugfestigkeit (tensile strength) bezeichnet man den Widerstand gegen die Zugbeanspruchung. – Die der Z. zugeordnete Deformation wird als Dehnung (extension) bezeichnet.

A.2 Für die Eingabe in die Webanwendung verwendete Literatur

Die folgenden 95 Literaturstellen wurden geprüft, ausgewertet und die Inhalte in die Webanwendung aufgenommen.

- Aderhold, G. (2005): Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karstgefährdeten Gebieten Hessens, Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumaßnahmen. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Geologische Abhandlungen Hessen, Bd. 115, 104 S., ISBN 3-89531-817-5
- Appel, D. & Habler, W. (1998): Quantifizierung postholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben durch statistische Auswertung von Bohrergebnissen. Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, S. 7–30
- Aurada, K. D. & Rödel, R. (2005): Widerspiegelung von Natur-, Technik- und Kulturgeschichte im Landschaftsbild des mitteldeutschen Raumes, Wissenschaftliche Grundlagen einer Exkursion. Greifswalder geographische Arbeiten, Bd. 37, 136 S., ISBN 3-86006-249-2: Greifswald
- Balzer, D. (1998): Planfeststellungsverfahren zur Stillegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, Geologische Bearbeitung des Hutgesteins. Bundesamt für Strahlenschutz (BFS), I-046
- Balzer, D. & Krone, B. (2000): Ergebnisse hydrogeologischer Untersuchungen im Hutgestein des Ascherlebener Salzsattels. Zeitschrift Angewandte Geologie, Bd. 46, Nr. 1-2, S. 35
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2016): "Donnerlöcher"-Erdfälle im Alpenvorland. 4 S.
- Becker, A., Piepjohn, K. & Schröder-Ritzrau, A. (2020): The Erdmannshöhle near Hasel,
 SW Germany: karst environment and cave evolution. Swiss Journal of
 Geosciences, Bd. 113, Nr. 1, DOI 10.1186/s00015-020-00363-5
- Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF / NIRAS) (2001): SAFIR 2, Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, Chapters 0 - 10. NIROND 2001-06 E, 1477 S.
- Best, G. & Zirngast, M. (1998): Analyse der strukturgeologischen Entwicklung der Salzstruktur Oberes Allertal und ihrer Umgebung, Abschlußbericht zum AP 9M

2124201100. Bundesamt für Strahlenschutz (BFS), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), P-073

- Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A. & Wolf, J. (2012): Szenarienentwicklung, Methodik und Anwendung, Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-284, 239 S., ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln
- Biewald, W. (2002): Subrosionsvorgänge und Kupferschieferaltbergbau zwischen Ilmenau und Elgersburg – Vorstellung einer Landschaft vor der Nordrandstörung des Thüringer Waldes (Exkursion D am 4. April 2002). Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Bd. 84, S. 117–134, DOI 10.1127/jmogv/84/2002/117
- Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Dörr, S., Filbert, W., Gehrke, A., Heemann, U., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Rübel, A., Weber, J. R. & Wolf, J. (2017): Evaluation of methods and tools to develop safety concepts and to demonstrate safety for an HLW repository in salt. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), 258 S.: Peine
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation, Description of the Gorleben Site Part 3. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 978-3-510-95964-8: Hannover
- Bornemann, O. & Fischbeck, R. (1986): Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben. Zeitschrift deutsche geologische Gesellschaft, Bd. 137, S. 71–83
- Brasser, T., Fahrenholz, C., Kull, H., Meleshyn, A., Mönig, H., Noseck, U., Schönwiese, D. & Wolf, J. (2014): Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-365, ISBN 978-3-944161-46-4

- Bronner, G. (1995): Höhlen und Dolinen. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Biotope in Baden Württemberg, Bd. 2, 24 S.
- Brust, M. & Graf, J. (2016): Die Schlotte auf dem Segen-Gottes-Stollen und die Elisabethschächter Schlotte. Grubenarchäologische Gesellschaft (GAG), Stand von 2016, erreichbar unter http://www.untertage.com/downloads/Brust_et_Graf_2016_Die_Schlotte_auf_ dem_Segen-Gottes-Stollen_etc.pdf, abgerufen am 12. September 2022
- Brust, M. & Kupetz, M. (1993): Tiefreichende Erdfälle im Buntsandstein der Windleite als schutzwürdiger geologischer Aufschluß (Kreis Sondershausen, Thüringen). Veröff. Naturkundemuseum Erfurt, Nr. 12, S. 20
- Burgmeier, G. & Schöttle, M. (2002): Geotope im Regierungsbezirk Stuttgart. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Bodenschutz, Bd. 12, 1. Aufl., 348 S., ISBN 3882512830, JVA: Mannheim
- Büttner, G., Pamer, R. & Wagner, B. (2003): Hydrogeologische Raumgliederung von Bayern. Bayerisches Geologisches Landesamt, GLA-Fachberichte, Nr. 20, 90 S.: München
- Buurman, N. (2010): Charakterisierung von Zirkularstrukturen im geologischen Untergrund Hamburgs zur Abgrenzung verkarstungsgefährdeter Bereiche. Dissertation, Universität Hamburg
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (DBG) (1995): Exkursionsführung, Bodennutzung und Bodenschutz im mitteldeutschen Industriegebiet. Jahrestagung 1995, Halle, Bd. 77

Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG) (2015): DGG- Kolloquium. 82 S.

- Dölling, M. & Stritzke, R. (2009): Geowissenschaftliche Untersuchungen im Subrosionsgebiet des "Heiligen Feldes" (nördliches Münsterland, Nordwestdeutschland). Geol. Paläont. Westf., Nr. 72, S. 31–69
- Engelmann, D., Gerlach, H. & Wächter, K. (1982): Komplexe Kontrolle und Untersuchung von subrosionsbedingten Senkungsvorgängen im Altbergbaugebiet von Staßfurt als Grundlage für die Territorialplanung. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Nr. 10, S. 153–159

- Flechtner, F. & Scholz, H. (2012): Untersuchungen zur Verkarstungsfähigkeit von Molassekonglomeraten des Hochgrat-Adelegg-Fächers im Südwesten Bayerns (Allgäu). Grundwasser, Bd. 17, Nr. 2, S. 69–78, DOI 10.1007/s00767-012-0193-1
- Flügel, H.-J. (2017): Wildbienen vom Eschkopf und der Doline bei Rockensüß ein Vergleich. LEBBIMUK, Nr. 14, S. 54–66
- Fulda, E. (1935): Handbuch der Stratigraphie Deutschlands, Zechstein.
- Geyer, O. F. & Gwinner, M. P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. 4. Aufl., 482 S., ISBN 3510651464, E. Schweizerbart: Stuttgart
- Goos, W. (2022): Geologie in Ludwigsburg. Stadt Ludwigsburg, Stand vom März 2022, erreichbar unter https://www.ludwigsburg.de/site/Ludwigsburg-Internet-2020/get/params_E2024857166/18152656/Geologie_in_Ludwigsburg.pdf, abgerufen am 19. Mai 2022
- Groetzner, J.-P., Rogge, A. & Scherler, P.-C. (1996): Interaction of salt/fresh-water flow and hydrochemical zoning in an aquifer of Pyrmont area, SW Lower Saxony.
- Grube, A., Grube, F., Rickert, B.-H. & Strahl, J. (2017): Eemian fossil caves and other karst structures in Cretaceous chalk and succeeding Quaternary sediments covering the salt structure Krempe-Lägerdorf (SW Schleswig-Holstein, North Germany). Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 168, Nr. 2, S. 263–284, DOI 10.1127/zdgg/2017/0110
- Grube, A. & Rickert, B.-H. (2019): Karstification on the Elmshorn salt diapir (SW Schleswig-Holstein, Germany). Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, Nr. 4, S. 547–566, DOI 10.1127/zdgg/2019/0177
- Grüger, E. & Jerz, H. (2011): Untersuchung einer Doline auf dem Zugspitzplatt: Ein palynologischer Beitrag zur holozänen Gletschergeschichte im Wettersteingebirge. E&G Quaternary Science Journal, Bd. 59, Nr. 1/2, S. 66– 75, DOI 10.3285/eg.59.1-2.06
- Herold, U. (2015): Großerdfälle von Lutherstadt Eisleben, Georisiko Subrosion in Sachsen-Anhalt. BDG-Mitteilungen, Nr. 125, S. 37–40

- Hofrichter, E. (1974): Speicherkavernen in Salzstöcken Nordwestdeutschlands -Geologische Probleme, Bemerkungen zur selektiven Auflösung von Kalisalzen. Erzmetall, Bd. 27, Nr. 5, S. 219–226
- Hohm, D. (1979): Über Erdfälle am nordwestlichen Harzrand zwischen Hahausen und Osterde am Harz (Niedersachsen). DOI 10.15488/429: Hannover
- Hötzel, H. (1996): Origin of the Danube Aach system. Environmental Geology, Nr. 27, S. 87–96
- Jaritz, W. (1994): Die Entwicklungsgeschichte des Standortes Gorleben als natürliches Analogon für das Langzeitverhalten eines Endlagers. Zeitschrift deutsche geologische Gesellschaft, Bd. 145, S. 192–206
- Käbel, H. (2000): Planfeststellungsverfahren zur Stillegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, Verfahrensunterlagen, Projekt ERA Morsleben: Langzeitbewertung der Durchlässigkeit des Hutgesteins. Bundesamt für Strahlenschutz (BFS) (Hrsg.), 37 S.
- Käbel, H., Keller, S. & Gerardi, J. (1999): Szenarienanalyse Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen, Verfahrensunterlage. Bundesamt für Strahlenschutz (BFS)
- Käsbohrer, F., Kuss, J. & Voigt, T. (2021): Exkursionsführer zur Geologie des Unteren Buntsandsteins (Untertrias) zwischen Harz und Thüringer Wald. Hercynia -Ökologie und Umwelt in Mitteleuropa, Bd. 54, Nr. 1, S. 1–64
- Katzschmann, L., Pustal, I. & Schmidt, S. (2015): Erdfälle geologische Grundlagen, Untersuchungsmethoden und Überwachungsmöglichkeiten erläutert an Fallbeispielen aus Thüringen. In: Deutsche Geophysikalische Gesellschaft (DGG): DGG- Kolloquium. S. 3–4
- Kaufmann, G. & Romanov, D. (2009): Geophysical investigation of a sinkhole in the northern Harz foreland (North Germany). Environmental Geology, Bd. 58, Nr. 2, S. 401–405, DOI 10.1007/s00254-008-1598-0
- Kaufmann, G. & Romanov, D. (2016): Structure and evolution of collapse sinkholes: Combined interpretation from physico-chemical modelling and geophysical field work. Journal of Hydrology, Bd. 540, S. 688–698, DOI 10.1016/j.jhydrol.2016.06.050

- Kempe, S. (1987): Exkursion: Salzstock und Höhle Bad Segeberg. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft für Karstkunde in Niedersachsen, Nr. 3
- Kempe, S. (2005): Karstgebiete und Höhlen in Deutschland. Geographische Rundschau, Bd. 57, Nr. 6, S. 44–52
- Kieser, H. (1974): Eine bisher unbekannte Doline im Bereich des Sattels von Holte bei Osnabrück. Osnabrücker Naturwissenschaftliche Mitteilungen, Nr. 3, S. 79–84
- Kirsch, R. (2004): Wenn der Boden einbricht Erdfälle in Schleswig-Holstein. Jahresbericht Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, S. 201–210
- Klinge, H., Köthe, A., Ludwig, R.-R. & Zwirner, R. (2002): Geologie und Hydrogeologie des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben. Zeitschrift Angewandte Geologie, Nr. 2, S. 7–15
- Klinge, H. E. a. (2007): Hydrogeology of the overburden of the Gorleben salt dome, Description of the Gorleben Site Part 1. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 975-3-510-95962-4
- Kloppmann, W., Négrel, P., Casanova, J., Klinge, H., Schelkes, K. & Guerrot, C. (2001): Halite dissolution derived brines in the vicinity of a Permian salt dome (N German Basin). Evidence from boron, strontium, oxygen, and hydrogen isotopes. Geochimica et Cosmochimica Acta, Bd. 65, Nr. 22, S. 4087–4101, DOI 10.1016/s0016-7037(01)00640-8
- Kobe, M., Gabriel, G., Weise, A. & Vogel, D. (2019): Time-lapse gravity and levelling surveys reveal mass loss and ongoing subsidence in the urban subrosion-prone area of Bad Frankenhausen, Germany. Solid Earth, Bd. 10, Nr. 3, S. 599–619, DOI 10.5194/se-10-599-2019
- Kober, M. & Voigt, T. (2009): Untergrundmodell der Thüringer Mulde, Zum 150. Geburtstag von ERNST ZIMMERMANN. Beiträge zur Geologie von Thüringen Neue Folge, Nr. 16, S. 51–83
- Kockert, W. (1972): Höhlenbildung im Zechstein der DDR und einige grundsätzliche Bemerkungen zur Karsthydrologie der Zechsteinschichten. Berichte der Deutschen Gesellschaft für Geologische Wissenschaften, Bd. 17, S. 261–272

- Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M. & Zwirner, R. (2007): Geology of the overburden and adjoining rock of the Gorleben salt dome, Description of the Gorleben Site Part 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ISBN 978-3-510-95963-1: Hannover
- Krawczyk, C. M., Polom, U., Trabs, S. & Dahm, T. (2012): Sinkholes in the city of Hamburg—New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subrosion structures. Journal of Applied Geophysics, Bd. 78, S. 133–143, DOI 10.1016/j.jappgeo.2011.02.003
- Kukla, P. A., Pechnig, R. & Urai, J. L. (2011): Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG). nse international, GRS-276, ISBN 978-3-939355-52-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
- Landesamt für Geologie, Rohstoffe, Bergbau (LGRB) (2020): Karrenfeld in Bubental. Stand vom 4. August 2020, erreichbar unter https://lgrbwissen.lgrbbw.de/printpdf/23692, abgerufen am 12. September 2022
- Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (1995): Großer Segeberger See, Bericht über die Untersuchung des Zustandes des Großen Segeberger Sees vom Dezember 1989 bis Dezember 1990. LW 631-5203.71-21: Kiel
- Landkreis Sangerhausen (1996): Verordnung des Regierungspräsidiums Halle über die Festsetzung des Naturschutzgebietes "Gipskarstlandschaft Questenberg" zuletzt geändert 1996
- Luo, J., Diersch, H.-J. G. & Monninkhoff, L. M. M. (2012): 3D Modeling of Saline Groundwater Flow and Transport in a Flooded Salt Mine in Stassfurt, Germany. Mine Water and the Environment, Bd. 31, Nr. 2, S. 104–111, DOI 10.1007/s10230-012-0181-9
- Maystrenko, Y., Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2005): Structure and evolution of the Glueckstadt Graben due to salt movements. International Journal of Earth Sciences, Bd. 94, Nr. 5-6, S. 799–814
- Migalk, A. & Tschapek, M. (2017): Verkarstungsphänomene im Freistaat Sachsen. LfULG-Schriftenreihe, Nr. 12

- Mrugalla, S. (2011): Geowissenschaftliche Langzeitprognose, Bericht zum Arbeitspaket 2 ; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-275, 169 S., ISBN 9783939355519: Köln
- Mrugalla, S. (2014): Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Norddeutschland - ohne Endlagereinfluss, Ergebnisbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 190 S.: Hannover
- Müller, K., Polom, U., Winsemann, J., Steffen, H., Tsukamoto, S., Günther, T., Igel, J., Spies, T., Lege, T., Frechen, M., Franzke, H.-J. & Brandes, C. (2020): Structural style and neotectonic activity along the Harz Boundary Fault, northern Germany: a multimethod approach integrating geophysics, outcrop data and numerical simulations. International Journal of Earth Sciences, Bd. 109, Nr. 5, S. 1811–1835, DOI 10.1007/s00531-020-01874-0
- Müller, U. & Obst, K. (2008): Junge halokinetische Bewegungen im Bereich der Salzkissen Schlieven und Marnitz in Südwest-Mecklenburg. Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 15, Nr. 1/2, S. 147–154
- Naturpark und Biosphärenreservat Bayerische Rhön e.V. (2020): Rhöner Geologie Erleben.
- Nielbock, R. (2006): Einhornhöhle bei Scharzfeld/Harz. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)
- Ortlam, D. (1989): Geologie, Schwermetalle und Salzwasserfronten im Untergrund von Bremen und ihre Auswirkungen. Neues Jahrbuch für Geologie und Palaeontologie, Nr. 8, S. 489–512
- Ortlam, D. & Schnier, H. (1981): Erdfälle und Salzwasseraufstieg in Bremen, Typbeispiel für Süßwasserdepressionsgebiete. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Nr. 4, S. 236–256, DOI 10.1127/njgpm/1981/1981/236
- Paul, J. (2022): Paläogeographie und Subrosion des Werra-Salzes in der Hessischen Senke (Zechstein, Deutschland). Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 173, Nr. 1, S. 237–250, DOI 10.1127/zdgg/2021/0291

- Pfeffer, K.-H. (1995): Karstlandschaften. Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland Relief, Boden und Wasser, 94-95
- Popp, T. (2022): Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle, Beauftragung: 45201365. Institut für Gebirksmechanik (IFG), 115 S.
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland. Bundesanstalt f
 ür Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 111 S.: Hannover
- Reinhold, K., Müller, C. & Riesenberg, C. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland, Synthese, Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Riedler, R. (2016): Tunnelbau im Karst am Beispiel des Steinbühltunnels. Masterarbeit,
 79 S., Lehrstuhl für Subsurface Engineering, Monetanuniversität Leoben:
- Rogge, A. & Nowag, S. (2018): Hydrogeologisches Gutachten über die staatlich anerkannten Heilquellen von Bad Pyrmont (Niedersächsiches Staatsbad Pyrmont), mit einem Vorschlag zur Abgrenzung und Gliederung des Heilquellenschutzgebietes.
- Röhling, S. & Fleig, S. (2020): Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft), Doppelsalinare und flach lagernde Salzschichten, Teilprojekt Salzund Strukturgeologie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 219 S.
- Scheck, M., Bayer, U. & Lewerenz, B. (2003): Salt movements in the Northeast German Basin and its relation to major post-Permian tectonic phases—results from 3D structural modelling, backstripping and reflection seismic data. Tectonophysics, Bd. 361, Nr. 3-4, S. 277–299, DOI 10.1016/s0040-1951(02)00650-9
- Scholz, H. & Strohmenger, M. (1999): Dolinenartige Sackungsstrukturen in den Molassebergen des südwestbayerischen Alpenvorlandes. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Bd. 81, S. 275–283, DOI 10.1127/jmogv/81/1999/275

- Schöttle, M. (2000): Geologische Naturdenkmale im Regierungsbezirk Karlsruhe. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Bodenschutz, Bd. 5, ISBN 3-88251-079-X
- Schöttle, M., Bergner, H.-D., Burgmeier, G. & Huth, T. (2007): Geotope im Regierungsbezirk Tübingen, Steckbriefe. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Stand vom August 2007, erreichbar unter https://pd.lubw.de/45542, abgerufen am 3. August 2022
- Schöttle, M., Burgmeier, G., Busch, K. J., Genser, H., Huth, T. & Spatz, P. (2005): Geotope im Regierungsbezirk Freiburg. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Bodenschutz, Bd. 18, ISBN 3-88251-293-8
- Stadler, S., Sültenfuß, J., Holländer, H. M., Bohn, A., Jahnke, C. & Suckow, A. (2012): Isotopic and geochemical indicators for groundwater flow and multi-component mixing near disturbed salt anticlines. Chemical Geology, Bd. 294-295, S. 226– 242, DOI 10.1016/j.chemgeo.2011.12.006
- Stedingk, K., Herold, U. & Heckner, J. (2006): Kupferschieferbergbau und Gipskarst im Südharz (Exkursion I am 21. April 2006). Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Bd. 88, S. 345–368, DOI 10.1127/jmogv/88/2006/345
- Steinbrecher, B. (1959): Die Subrosion des Zechsteingebirges im östlichen und nordöstlichen Harzvorland mit besonderer Berücksichtigung der Edderitzer Mulde. Geologie <Berlin> / Beiheft, Nr. 8, S. 489–522
- Toepfer: Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz (NNA) (1998): Gipskarstlandschaft Südharz, Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven. NNA-Berichte, Bd. 2, 209 S.
- Vladi, F. (1976): Quartärgeologiesche Untersuchungen zu den Terassen der Sieben am Südwestrande des Harzes. Diplomarbeit, 69 S., Universität Hamburg
- Vladi, F., Röhling, H.-G. & Knolle, F. (2017): Erdfälle im Geopark Harz . Braunschweiger Land . Ostfalen. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft für Karskunde Harz, Bd. 38, 1+2, S. 17–38
- Wagner, B., Kus, G., Kainzmaier, B., Spörlein, T., Wilferth, T., Veit, W., Fritsch, P., Wrobel, M., Lindenthal, W., Neumann, J. & Sprenger, W. (2009): Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte von Bayern 1:500.000. Bayerisches Landesamt

für Umwelt (LfU), Hydrogeologische Karte Umwelt spezial, ISBN 9783936385335: Augsburg

- Weinberg, H.-J. (1981): Die erdgeschichtliche Entwicklung der Beiersteinsenke als Modell für die jungquartäre Morphogenese im Gipskarstgebiet Hainholz/Beierstein (südwestliches Harzvorland). Bericht der Naturhistorischen Gesellschaft zu Hannover, Nr. 124, S. 67–112
- Wolf, M. (2016): Subrosion at the Late Cimmerian Unconformity and its impact on the barrier potential of the Lower Cretaceous - an example from the central German North Sea., Subsurface Potentials for Storage and Economic Use in the North German Basin (TUNB). Präsentation, Conference: Mesozoic Resource Potential in the Southern Permian Basin: London, September 2016
- Zhang, Y., Krause, M. & Mutti, M. (2013): The Formation and Structure Evolution of Zechstein (Upper Permian) Salt in Northeast German Basin: A Review. Open Journal of Geology, Bd. 03, Nr. 08, S. 411–426, DOI 10.4236/ojg.2013.38047
- Zirngast, M. (Hrsg.) (1991): Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben, Ergebnis einer strukturgeologischen Bearbeitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Bd. 132: Hannover

A.3 Nicht ausgewertete Literatur

Die folgenden 40 Literaturstellen wurden als potenziell relevant für die Eingabe in die Webanwendung identifiziert, jedoch im Rahmen des Vorhabens nicht ausgewertet.

- Bauriegel, Arndt (2004): Das rezente Subrosionsgeschehen am Salzhang des Werra Salinars bei Bad Salzungen und dessen Auswirkungen auf die Erdoberfläche.
 Hg. v. Jürgen Wunderlich. Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie. Jena (Subrosion und Baugrund in Thüringen).
- Best, Gerhard; Zirngast, Max (2002): Die strukturelle Entwicklung der exhumierten Salzstruktur "Oberes Allertal".
- Brunotte, E.; Sickenberg, O. (1978): Die mittel- und jungquartäre Entwicklung des Leinetales zwischen Northeim und Salzderhelden unter besonderer Berücksichtigung der Subrosion. In: Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft A44. Stuttgart: Schweizerbart (Reihe A, Heft A44), S. 3–43. Online verfügbar unter https://www.schweizerbart.de/publications/detail/artno/186004400/.
- Büchner, Karl-Heinz (1991): Die Gefährdung von Bauwerken durch Erdfälle im Vorland des Westharzes. Stuttgart: Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Band C59). Online verfügbar unter https://www.schweizerbart.de/publications/detail/artno/186045900.
- Burliga, Stanislaw (1996): Kinematics within the Klodawa salt diapir, central Poland. In:
 I. Davison, G. I. Alsop und D. J. Blundell (Hg.): Salt Tectonics. London (Geological Society Special Publication, 100), S. 11–21.
- Domínguez, Eduardo A.; Mas, Graciela R.; Cravero, Fernanda (Hg.) (2003): 2001, a clay odyssey. Proceedings of the 12th International Clay Conference, Bahía Blanca, Argentina, July 22-28, 2001. Amsterdam, Boston: Elsevier.
- Fleig, Stephanie; Kühnlenz, Tatjana (2013): Projekt Gorleben: Bewertung der Genese des Salzstocks Gorleben (Salzaufstieg, Subrosion): Ergebnisbericht.
 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover.
- Flügge, Judith (2009): Radionuclide Transport in the Overburden of a Salt Dome. The Impact of Extreme Climate States. Dissertation. Universität Braunschweig, Braunschweig. Fakultät für Architektur, Bauingenieur und Umweltwissenschaften.

- Franke, Dietrich (2022): Regionale Geologie von Ostdeutschland Ein Kompendium. Online verfügbar unter http://regionalgeologie-ost.de/.
- Freeze, Geoff et al (2020): Generic FEPs Catalogue and Salt Knowledge Archive. SANDIA REPORT.
- Haack, W. (1939): Der Untergrund der Lüneburger Heide unter Berücksichtigung der neuesten Bohrungen.
- Herrmann, Albert Günter; Siewers, Ulrich; Harazim, Bodo; Lodziak, Julian; Weck, Hans-Dieter; Straßburg, Silke (2000): Die Herkunft von Haupt-, Nebenund Spurenelementen in Salzlösungen der Zechsteinevaporite Mittel- und Norddeutschlands. In: Glückauf 136 (12), S. 771–783.
- Herrmann, Axel (1969): Einführung in die Geologie, Morphologie und Hydrogeologie des Gipskarstgebietes am südwestlichen Harzrand. In: Jahresheft des Verb. dt. Höhlen- u. Karstforsch. (9), S. 1–10.
- Herrmann, Axel (1981): Zum Gipskarst am südwestlichen und südlichen Harzrand. In: Bericht der Naturhistorischen Gesellschaft zu Hannover (124), S. 35–45.
- Herrmann, Rudolf (1968): Auslaugung durch aufsteigende Mineralwässer als Ursache von Erdfällen bei Bad Pyrmont. In: Geologisches Jahrbuch Band 85. Festschrift Prof. Dr. Hans Joachim Martini. Stuttgart: Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch, Band 85), S. 265–284.
- Hofrichter, Erich (1967): Subrosion und Bodensenkungen am Salzstock von Stade. In: Geologisches Jahrbuch, Band 84. Hannover: Landesamt für Bodenforschung (Geologisches Jahrbuch, Band 84), S. 327–340.
- Jankowski, Günter (1964): Die Tertiärbecken des SE-Harzvorlandes und ihre Beziehungen zur Subrosion. In: K. Kauter, F. Stammberger und G. Tischendorf (Hg.): Zeitschrift für angewandte Geologie: De Gruyter, S. 498–501.
- Jordan, Heinz; Büchner, Karl-Heinz; Nielsen, Heimo; Plaumann, Siegfried (1986): Halotektonik am Leinetalgraben nördlich Göttingen. In: Geologisches Jahrbuch, Reihe A Heft 92. Stuttgart: Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 92).
- Käbel, Herbert (2006): Salzbergbau und Grundwasser zwei Beispiele angewandter Montanhydrogeologie aus Thüringen und Sachsen-Anhalt. Stuttgart:

Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch Sonderhefte Reihe C, Hydrogeologie,
Ingenieurgeologie,
https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510959532.

- Kaiser, Diethelm (2020): Historical Earthquakes, Paleoseismology, Neotectonics and Seismic Hazard: New Insights and Suggested Procedures. Unter Mitarbeit von FID GEO und Diethelm Kaiser: Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB) e.V.
- Kauter, K.; Stammberger, F.; Tischendorf, G. (Hg.) (1964): Zeitschrift für angewandte Geologie: De Gruyter. Online verfügbar unter https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783112562185/html.
- Keller, Siegfried; Mrugalla, Sabine; Weber, J. R.; Krone, Jürgen; Lommerzheim, Andree; Buhmann, Dieter et al. (2010): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW ISIBEL. Zusammenfassender Abschlussbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC) (TEC-09-2010-AP).
- Klinge, H.; Schelkes, K.; Ruebel, A. (2002): The Saltwater/Freshwater Regime in the Sedimentary Cover of the Gorleben Salt Dome. In: Transport in porous media 47, S. 125–148.
- Kohlhepp, Bernd; Lehmann, Robert; Seeber, Paul; Küsel, Kirsten; Trumbore, Susan E.; Totsche, Kai U. (2017): Aquifer configuration and geostructural links control the groundwater quality in thin-bedded carbonate–siliciclastic alternations of the Hainich CZE, central Germany. In: Hydrology and Earth System Sciences 21 (12), S. 6091–6116. DOI: 10.5194/hess-21-6091-2017.
- König, Wolfram (2008): Zeitliche und genetische Einordnung von tertiären Sedimentvorkommen im Mittelharz und im Harzvorland - ein Beitrag zur Reliefentwicklung und zur Karstmorphogenese im Harz. Dissertation. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle.
- Kopp, Jürgen; Simon, Andreas; Göthel, Michael (2006): Die Kupfer-Lagerstätte Spremberg-Graustein in Südbrandenburg. In: Brandenburgische geowissenschaftliche Beiträge (13), S. 117–132.
- Laemmlen, Manfred (1991): Subrosionsschlote, Vulkanschlote : einige Beispiele aus Osthessen. In: Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 124. Stuttgart: Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch, Reihe A, Heft 124), S. 31–58.

- Langkutsch, U.; Käbel, Herbert; Blazer, D. (1999): Hydrogeologische Kennzeichnung des Hutgesteins über der Allertal-Salzstruktur. In: Zeitschrift für Angewandte Geologie (Hg.): Band 45 Heft 2. Stuttgart: Schweizerbart, S. 88–95.
- Morgenroth, Volker (1994): Subrosion einer Anhydritlinse im Trusetaler Bergbaurevier. In: Veröff. Naturkundemuseum Erfurt, S. 72–78.
- Mutz, Sebastian G.; Ehlers, Todd A. (2019): Detection and explanation of spatiotemporal patterns in Late Cenozoic palaeoclimate change relevant to Earth surface processes. In: Earth Surf. Dynam. 7 (3), S. 663–679. DOI: 10.5194/esurf-7-663-2019.
- Noseck, Ulrich; Schneider, Anke (2009): Impact of climate change on far-field and biosphere processes for a HLW-repository in rock salt. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig (GRS-241). Online verfügbar unter https://www.grs.de/sites/default/files/publications/GRS%2520-%2520241d.pdf.
- Preul, Friedrich (1968): Die Subrosion am Salzstock von Salzgitter-Lebenstedt. In: Geologisches Jahrbuch Band 85. Festschrift Prof. Dr. Hans Joachim Martini. Stuttgart: Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch, Band 85), S. 809–816.
- Prinz, Helmut; Strauß, Roland (2018): Ingenieurgeologie. 6. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter http://nbnresolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1542123.
- Rogge, Axel (2001): Geologie und Hydrogeologie im Raum Bad Pyrmont unter besonderer Berücksichtigung des Quellensystems. In: Geologische Beiträge Hannover (Band 3), S. 1–76.
- Simon, Theo (1980): Erdfälle im Muschelkalkkarst der westlichen Hohenloher Ebene zwischen Kocher und Jagst. In: Geologisches Jahrbuch Reihe A, Heft A56. Stuttgart: Schweizerbart (Geologisches Jahrbuch, Reihe A Heft A56), S. 45–75.
- Völkner, Elke et al (2017): Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA (9Y2015010000).
- Welk, Astrid; Eckstein, Jan; Thurow, Astrid (2019): Managementplan (Fachbeitrag Offenland) für das FFH-Gebiet 234 "Reesberg". Hg. v. Landesamt für Umwelt,

Bergbau und Naturschutz (LUBN). Büro für Ökologie und Naturschutz Frank Meyer (RANA).

- Zeitschrift für Angewandte Geologie (Hg.) (1999): Band 45 Heft 2. Stuttgart: Schweizerbart.
- Zeitschrift für geologische Wissenschaften (Hg.) (2004): Band 32 Heft 5/6. Online verfügbar unter http://www.zgw-online.de/pages/_ausgabe2004.php.
- Zwirner, Rainer; Zirngast, Max; Köthe, Angelika (2004): Der Aufbau des Deckgebirges und die Strukturentwicklung des Salzstocks Gorleben The structure of the cover rock and the structural development of the Gorleben salt dome. In: Zeitschrift für geologische Wissenschaften (Hg.): Band 32 Heft 5/6. Online verfügbar unter http://www.zgw-online.de/bestellung.php?heft=327-045&preis=8.40&preis2=12.00.

Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

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

Boltzmannstraße 14 **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