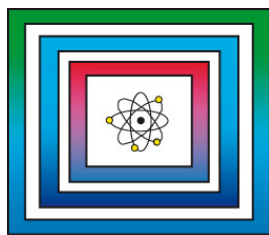


F+E Endlagerung

9Y2013030000

Verbreitung,
Zusammensetzung
und geologische
Lagerungsverhältnisse flach
lagernder Steinsalzfolgen in
Deutschland



Zwischenbericht

Hannover, Dezember 2014

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

F+E Endlagerung

Verbreitung und Eigenschaften flach lagernder Salzschieben in
Deutschland (BASAL)

Verbreitung, Zusammensetzung und geologische
Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in
Deutschland

Zwischenbericht

Autoren: Reinhold, Klaus
Hammer, Jörg, Dr.
Pusch, Maximilian

Auftraggeber: BMWi
Auftragsnummer: 9Y2013030000
Geschäftszeichen: B3/B50112-45/2014-0002/001
Datum: 10.12.2014

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

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

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung und Ziele der Studie.....	4
1.1 Bewertungen von Steinsalz als Endlagerwirtsgestein in Deutschland.....	6
1.2 Gesteinsmechanische Eigenschaften von Steinsalzschiechten unterschiedlicher Zusammensetzung.....	11
2 Salinare Formationen.....	18
2.1 Rotliegend-Salinar.....	22
2.2 Zechstein-Salinar.....	26
2.3 Alpines Salinar – Haselgebirge.....	34
2.4 Röt-Salinar.....	38
2.5 Muschelkalk-Salinar.....	44
2.6 Keuper-Salinar.....	52
2.7 Malm-Salinar.....	57
2.8 Tertiär-Salinar.....	61
3 Zusammenfassung.....	64
4 Grenzen der Studie.....	70
5 Ausblick.....	71
Literaturverzeichnis.....	72
Tabellenverzeichnis.....	94
Abbildungsverzeichnis.....	95
Anlagenverzeichnis.....	98

Gesamtblattzahl: 98, zusätzlich 12 Anlagen

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Reinhold, Klaus Hammer, Jörg, Dr. Pusch, Maximilian
Titel:	Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland
Schlagwörter:	Evaporite, salinare Formation, Standortwahl, Steinsalz, Wirtsgestein

Der Bericht repräsentiert einen ersten Zwischenstand der Untersuchungen im Arbeitspaket „Verbreitung und Eigenschaften flach lagernder Salzschieben in Deutschland (BASAL)“ und fasst den aktuellen Kenntnisstand zur räumlichen Verbreitung und lithologischen Zusammensetzung sowie zu den geologischen Lagerungsverhältnissen der flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland zusammen. Untersuchungsrelevante Steinsalzfolgen kommen in einzelnen Formationen der stratigraphischen Einheiten Rotliegend, Zechstein, Röt, Muschelkalk, Keuper, Malm und Tertiär vor. Viele der in diesen salinar geprägten Einheiten nachgewiesenen Steinsalzvorkommen liegen in sehr großen Tiefen, sind maximal meist nur wenige zehner Meter mächtig und durch tonige bzw. anhydritische Verunreinigungen geprägt. Entsprechend der vorliegenden bundesweiten Synthese der Informationen zu allen flach lagernden Steinsalzfolgen sollten sich, aufgrund der Mächtigkeit, mineralogischen Zusammensetzung und Tiefenlage, weiterführende Untersuchungen auf die Steinsalzlager des Zechstein in der Werra- und der Staßfurt-Formation beziehen.

1 Einleitung und Ziele der Studie

Mit der Nutzung radioaktiver Stoffe in Industrie, Medizin und Forschung oder als Brennstoff für Kernreaktoren besteht die Verpflichtung, die Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle sowie der abgebrannten Brennelemente sicherzustellen. Die radioaktiven Abfälle müssen so verwahrt werden, dass ihre sichere Isolation und damit ein dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt vor der schädlichen Wirkung der von den radioaktiven Elementen ausgehenden ionisierenden Strahlung gewährleistet ist.

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle sind in Deutschland im Wesentlichen durch das Atomgesetz (ATG 2013) und das Standortauswahlgesetz (STANDAG 2013) vorgegeben und werden durch die nationale Umsetzung der EU-Richtlinie 2011/70/EURATOM im Nationalen Entsorgungsprogramm ergänzt. Das am 27. Juli 2013 in Kraft getretene „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG)“ hat das Ziel, in einem wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahren für die im Inland angefallenen, insbesondere hoch radioaktiven Abfälle einen Endlagerstandort in Deutschland zu finden. Dem Prozess der praktischen Standortauswahl wird die Arbeit der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ vorangestellt. Die Kommission setzt sich aus Vertretern der Wissenschaft und gesellschaftlicher Gruppen (Umweltverbände, Religionsgemeinschaften, Wirtschaft und Gewerkschaften) sowie Mitgliedern aller im Deutschen Bundestag vertretenen Fraktionen und Mitgliedern von Landesregierungen zusammen. Diese Kommission hat insbesondere die Aufgaben, relevante Grundsatzfragen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle zu untersuchen und zu bewerten sowie Vorschläge für die Entscheidungsgrundlagen beim Standortauswahlprozess zu erarbeiten (u. a. geowissenschaftliche Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Hinblick auf die Eignung geologischer Formationen für die Endlagerung).

Weltweit besteht in der Wissenschaft Einigkeit darüber, dass die hoch radioaktiven Abfälle isoliert und konzentriert in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden (z. B. BMU 2010). Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) besitzt dafür langjährige Erfahrungen in der geowissenschaftlichen Analyse von potenziellen Wirtsgesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland (siehe Kapitel 1.1). Im Rahmen zahlreicher, durch die zuständigen Ministerien und Behörden in Auftrag gegebener Studien sowie wissenschaftlicher Forschungsprojekte hat sich der geologisch-geotechnische Kenntnisstand zu den potenziell geeigneten Wirtsgesteinen kontinuierlich erweitert. Ergänzend zu den in Deutschland seit Ende der 1950er Jahre auf Salzstöcke konzentrierten Untersuchungen wurden seit den 1960/1970er Jahren Informationen zu Tonsteinen und magmatischen Gesteinen zusammengetragen (z. B. MARTINI 1963, KOCKEL & ROLAND 1977) sowie auch flach lagernde salinare Formationen im Hinblick auf ihre Eignung für die Endlagerung bewertet (BEST et al. 1982, JARITZ 1983, KRULL 1991).

Unter Nutzung der vorliegenden geologischen Erkundungsdaten hat die BGR 1994 eine Bewertung der ggf. zu betrachtenden Kristallinvorkommen und 1995 einen Katalog der potenziell geeigneten Salzvorkommen in Deutschland veröffentlicht (BRÄUER et al. 1994, KOCKEL et al. 1995). Außerdem erfolgte eine zusammenfassende Darstellung der Verbreitung und Mächtigkeit der Halit-führenden Schichtenfolgen durch KRULL et al. (2004). Mit der 2003 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (heute: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; BMWi) in Auftrag gegebenen Studie zur Bewertung von Tongesteinsformationen hat die BGR 2007 die zusammenfassenden Bewertungen der in Deutschland potenziell in Frage kommenden Wirtsgesteinsformationen komplettiert. Im Unterschied zu früheren Studien wurden bei der „BGR-Tonstudie“ (HOTH et al. 2007) schon die 2002 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEND 2002) aufgestellten wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen angewendet.

Vor dem Hintergrund der neu formulierten politischen Rahmenbedingungen für die Auswahl eines Endlagerstandortes für hoch radioaktive Abfälle (STANDAG 2013) besteht die Notwendigkeit, die verfügbaren endlagerrelevanten Informationen über die potenziellen Wirtsgesteine in Deutschland zu aktualisieren. Für das Wirtsgestein Steinsalz in flacher Lagerung erfolgt dies im Auftrag des BMWi (Schreiben vom 16.09.2013) im Rahmen des BGR-Projektes „Verbreitung und Eigenschaften flach lagernder Salzschieben in Deutschland (BASAL)“.

Die flach lagernden Steinsalzvorkommen wurden im Gegensatz zu den mächtigen Zechstein-Steinsalz-Akkumulationen in Salzstöcken vor allem wegen ihrer geringeren Mächtigkeiten und des geringeren Kenntnisstandes über die petrophysikalischen Eigenschaften bisher nicht systematisch untersucht und im Detail bewertet (siehe Kapitel 1.1). Ziel des Projektes BASAL ist es, detaillierte Informationen zum Vorkommen, zur mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung sowie zur mikrostrukturellen und geomechanischen Charakterisierung flach lagernder Steinsalzvorkommen in Ergänzung zu den bisher vorliegenden Daten zu erarbeiten (vgl. Kapitel 1.2). Damit erfolgt eine Erweiterung der Datengrundlage für die im Standortauswahlgesetz (STANDAG 2013) geforderte vergleichende Neubewertung aller in Deutschland vorkommenden potenziellen Endlagerwirtsgesteine.

Der vorliegende Zwischenbericht des Projektes BASAL fokussiert auf die zusammenfassende geologische Beschreibung aller in Deutschland nachgewiesenen und flächig verbreiteten flach lagernden Steinsalzfolgen, die nicht oder nur in geringem Maße durch halokinetische Fließvorgänge beeinflusst wurden. Informationen zu den in Norddeutschland zahlreichen, räumlich gut abgrenzbaren Salzstrukturen, die infolge halokinetischer Prozesse durch eine sekundäre Akkumulation von Salzgesteinen entstanden sind (z. B. Salzkissen und Salzstöcke), sind nicht Inhalt dieses Berichtes. Allerdings sind aus den Kenntnissen zu den Salzstrukturen Rückschlüsse auf die Ausprägungen der Schichtenfolge und zur

Mächtigkeit von flach lagernden Steinsalzschiechten möglich, da es in der geologischen Entwicklung direkte Beziehungen gibt.

Die bundesweiten Darstellungen zu den einzelnen altersverschiedenen salinaren Schichtenfolgen beinhalten v. a. Angaben zur Verbreitung, Mächtigkeit, Tiefenlage und Genese sowie Beispiele für die oft regionsspezifische Schichtenfolge. Die Steinsalzvorkommen des Alpen Salinars in SE-Bayern sind dabei aufgrund ihrer Genese und der Lagerungsverhältnisse als eine Sonderform von Steinsalzlagerstätten in Deutschland zu betrachten. Damit, in Ergänzung zu den bereits vorliegenden Wirtsgesteinsstudien der BGR, zu allen salinaren Schichtenfolgen eine aktualisierte geologische Beschreibung vorliegt, wird das Alpine Salinar in diesem Bericht auch dargestellt.

1.1 *Bewertungen von Steinsalz als Endlagerwirtsgestein in Deutschland*

Die Arbeiten zur Auswahl von geeigneten geologischen Formationen für die Errichtung eines Endlagers für Wärme entwickelnde, hoch radioaktive Abfälle begannen in Deutschland Ende der 1950er Jahre. 1959 empfahl die Bundesanstalt für Bodenforschung (bis 1975 Vorgängereinstitution der BGR) auf einer, speziell dieser Thematik gewidmeten UN-Tagung Salz-Formationen zur Lagerung von schwach und mittel radioaktiven (in Kavernen) sowie hoch radioaktiven Abfällen (kontrollierte Lagerung in Bergwerken; WAGNER & RICHTER 1960). Gründe für die Empfehlung, das geplante Endlager in einer Salzstruktur zu errichten, waren:

- die günstigen Wirtsgesteinseigenschaften des Steinsalzes, wie z. B. praktisch wasserfreie Gesteine, gute Wärmeleitfähigkeit, sehr geringe Wasser- und Gas-Durchlässigkeiten,
- die bis Mitte des 19. Jahrhunderts zurückreichenden umfangreichen deutschen (und internationalen) Erfahrungen in Salz-Exploration und -Bergbau,
- die Ergebnisse von endlagerrelevanten Forschungsarbeiten im Salz, die seit Mitte der 1950er Jahre insbesondere in den USA durchgeführt wurden (z. B. THEIS 1956, BLOMEKE et al. 1963, STRUXNESS 1963, BRADSHAW et al. 1963) sowie
- das Vorhandensein vieler Salzstöcke (und damit Standortalternativen) in Deutschland, vor allem in Norddeutschland.

Auf dieser Grundlage sprach sich am 07.07.1961 die Deutsche Atomkommission für die Endlagerung in Salzlagerstätten des tieferen Untergrundes aus (DAK 1961). 1963 wurden im „Deutschen Atomprogramm I“ Untersuchungen zur Klärung der Eignung von Salz-Formationen für die unterirdische Lagerung radioaktiver Abfälle zur vordringlichen Forschungs- und Entwicklungsaufgabe erklärt. Im Mai 1963 legte die Bundesanstalt für Bodenforschung

einen Bericht vor, der die besondere Eignung von Salz-Formationen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle unterstrich und eine erste Bestandsaufnahme der Salzstrukturen im Untergrund der Bundesrepublik Deutschland (Schwerpunkte: Norddeutschland und Niederrheinische Bucht) zwecks Errichtung von Kavernen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle enthielt (MARTINI 1963).

Auf Erlass des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung (BMWF) vom 12.12.1963 wurden die, in der Bundesanstalt für Bodenforschung durchgeführten Arbeiten zur Vorauswahl möglicher Endlagerstandorte intensiviert und 1964 Salzstrukturen benannt, die ausgehend von v. a. geologischen Kriterien (u. a. Mächtigkeit, Homogenität, Größe der Salzstruktur, Tiefenlage) zur Aussolung von Kavernen zwecks Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet erschienen (RICHTER-BERNBURG & HOFRICHTER 1964). Detaillierter bewertet wurden sieben Standorte, wobei neben den norddeutschen Salzstöcken Heide (Holstein), Geesthacht (südöstlich von Hamburg), Harsefeld (westlich von Buxtehude), Bunde/Jemgum (Ostfriesland, an der Ems) und Bremen-Lesum auch die flach lagernden Salzvorkommen Krummendeich (Untere Elbe, gegenüber Brunsbüttelkoog) und Leutesheim (SSW Karlsruhe) betrachtet wurden. Geologische Standorterkundungsarbeiten wurden im Rahmen dieser Studie nicht realisiert. In diesen frühen Untersuchungen über potenziell geeignete Endlagerstandorte basierten die Auswahl und Bewertung auf den zu dieser Zeit vorliegenden Ergebnissen geologisch-geophysikalischer Erkundungsarbeiten. Eine systematische, kriteriengestützte Bewertung aller im Untergrund Deutschlands vorkommenden Salzlagerstätten erfolgte zu diesem Zeitpunkt nicht.

Der im Jahr 1973 durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) an die Firma „Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungs-Gesellschaft“ (KEWA) vergebene Auftrag zur Auswahl eines Standortes für ein integriertes Entsorgungszentrum (Wiederaufarbeitung, Konditionierung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle) enthielt keine Vorgabe bezüglich des Endlager-Wirtsgesteinstyps (KEWA-Studie 1976). Im Verlaufe dieser Arbeiten erfolgte, ausgehend von den geologischen Gegebenheiten in Deutschland, auf der Basis von geowissenschaftlichen Kartenwerken und Abhandlungen zur Tiefenlage, zu den Eigenschaften und zur Entstehung der Salzstrukturen NW-Deutschlands (z. B. RICHTER-BERNBURG 1966, HOFRICHTER 1966, JARITZ 1972, 1973) eine Festlegung auf Salzstrukturen als Endlager-Wirtsgesteinstyp. Durch die Anwendung zahlreicher, unterschiedlich gewichteter Kriterien wurden im Ergebnis der KEWA-Studie zehn Standorte ausgewählt, von denen sich die Mehrheit oberhalb von Salzstrukturen befand (Übersicht dazu siehe HAMMER et al. 2009, BMWi 2008). In dieser Phase der Auswahl eines Endlagerstandortes erlangte das Vorhandensein einer für die Endlagerung möglicherweise geeigneten Salzstruktur eine vorrangige Bedeutung. Begleitende Fachgutachten zum Standortauswahlverfahren (LÜTTIG & WAGER 1974, KBB 1974) wiesen mehrfach auf die unzureichende Datenlage für eine detaillierte Eignungsbewertung einzelner Salzvorkommen hin (insbesondere zum

internen Aufbau der Salzstrukturen) und bekräftigten die Notwendigkeit von ergänzenden, vor allem geologischen Erkundungsarbeiten.

1977 erstellte die BGR im Auftrag der „Kommission der Europäischen Gemeinschaften“ (Studienvertrag vom 31.12.1976) einen Katalog der zur Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle potenziell geeigneten geologischen Formationen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (KOCKEL & ROLAND 1977). Im Rahmen dieser Studie erfolgte keine Benennung konkreter Standorte. Vielmehr wurde auf der Grundlage der Mitte der 1970er Jahre vorhandenen geologisch-geotechnischen Kenntnisse zu Salinar-Formationen, Tonen/Tonsteinen bzw. Tonmergelsteinen sowie Intrusivgesteinen und basierend auf Analysen ihrer regionalen Verbreitung, strukturgeologischen Position und Lithologie die Eignung dieser Gesteinstypen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle kriteriengestützt bewertet. Neben Steinsalz wurden auch Granitoid- und Tonsteinformationen als für die Endlagerung radioaktiver Abfälle prinzipiell geeignete Wirtsgesteine angesehen.

Der von KOCKEL & ROLAND (1977) durchgeführte Vergleich der Verbreitung, Zusammensetzung sowie der spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Endlager-Wirtsgesteinstypen unterstrich die besondere Eignung der Steinsalzvorkommen der Staßfurt-Formation in den Salzstöcken NW-Deutschlands für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Es wurde festgestellt, dass starke Verunreinigungen mit Tonmineralen und/oder Anhydrit in den Salzgesteinen des Rotliegend und Keuper sowie in den Alttertiär- bzw. Miozän-Salzen¹ im südlichen bzw. nördlichen Oberrheingraben gegen deren Eignung als Endlagerwirtsgestein sprechen. Zu geringe Steinsalzmächtigkeiten führten nach KOCKEL & ROLAND (1977) zu einem Ausschluss des flach lagernden Werra-Steinsalzes in Hessen, Franken, am Niederrhein und im Emsland sowie in Kombination mit zu großen Teufenlagen zur Nicht-Berücksichtigung der flach lagernden Röt- und Muschelkalk-Salze. Wegen zu geringer Mächtigkeiten ihrer Steinsalz-Anteile kamen auch die flach lagernden Steinsalzfolgen in den Leine- und Aller-Formationen (Zechstein) in Westdeutschland nicht in Betracht.

Die nachfolgenden Wirtsgesteinsstudien der BGR konzentrierten sich bis Mitte der 1990er Jahre auf Bewertungen der in Deutschland vorkommenden Salz-Formationen, inklusive der flach lagernden salinaren Schichtenfolgen. BEST et al. (1982) analysierten im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) detailliert die salinar geprägten Formationen des Rotliegend, Zechstein und der Trias in Schleswig-Holstein sowie die hessischen Salzvorkommen der Werra-Formation im Werra-Fulda-Gebiet. Unter Zugrundelegung eines Bergwerkkonzeptes und von Anforderungen bezüglich der Mächtigkeit (Schwebe von 300 m, Festen zum Flankenbereich von 200 m), Tiefenlage (Salzspiegel mindestens 200 m tief, Top der Salzstruktur nicht tiefer als 700 m, Endlagerbergwerk nicht tiefer als 1000 m), Zusammensetzung der Salinare sowie der tektonischen und seismischen Aktivität in den zu bewertenden Regionen, wurden die Werra-Formation im

¹ Später wurde die salinare Schichtenfolge stratigraphisch ins Oligozän eingestuft.

Niederrhein-Gebiet, das Alpine Salinar in SE-Bayern, die Muschelkalk-Salinare in Baden-Württemberg und die Tertiär-Salinare im Oberrheingraben als nicht geeignet eingestuft. Die Nichteignung der Salinar-Formationen im Niederrhein-Gebiet wurde mit zu geringen Mächtigkeiten, erhöhter seismischer Aktivität und mit den konkurrierenden Nutzungen durch den Steinkohle-Bergbau begründet. Das Alpine Salinar SE-Bayerns weist aufgrund der Einbeziehung in die alpidische Orogenese und den alpinen Deckenbau ungünstige Lagerungsverhältnisse auf und stellt ein für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle ungeeignetes kataklasiertes Steinsalz-Ton-Mischgestein dar. Die Muschelkalk-Salinare sind nach BEST et al. (1982) zu geringmächtig. Die tertiären Salzvorkommen im Oberrheingraben befinden sich in einem seismisch aktiven Gebiet und weisen zahlreiche Einschaltungen von Kaliflözen und Mergeln auf.

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kam JARITZ (1983), der sich im Rahmen einer durch das BMFT im Januar 1982 beauftragten Bewertung der Salzstöcke Niedersachsens ebenfalls mit Optionen der Endlagerung in flach lagernden Salinar-Formationen beschäftigte. JARITZ (1983) empfahl lediglich die weitere Untersuchung der Keuper-Salinare im Bereich Weser-Ems, verwies allerdings darauf, dass die relativ geringen Mächtigkeiten der Keuper-Steinsalzlager (maximal ca. 100 m) ein anderes Endlagerkonzept (keine Kavernen, keine Endlagerung in Vertikalbohrungen) erforderlich machen.

Im Mai 1991 wurde die BGR durch das BMU beauftragt, die Salzvorkommen in den neuen Bundesländern auf der Grundlage der in BEST et al. (1982) und JARITZ (1983) enthaltenen endlagerkonzeptionellen Vorgaben hinsichtlich ihrer Eignung für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle zu bewerten. Im Rahmen dieser Studie wurden Daten zur Verbreitung, zu den Mächtigkeiten und zur lithologischen Ausbildung der Rotliegend-, Zechstein-, Röt-, Muschelkalk- und Keuper-Salinare zusammengestellt (KRULL 1991). Prinzipiell günstige Voraussetzungen für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes bieten lediglich einige, weiter im Detail zu erkundende Salzstrukturen in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Die flach lagernden Salzschichten und die Salzkissen in der Nordostdeutschen Senke liegen fast ausnahmslos zu tief für ein Endlagerbergwerk. So wurden z. B. Steinsalzfolgen des Rotliegend lediglich in Bohrungen von über 4000 m Tiefe nachgewiesen. Die evaporitisch geprägten Formationen des Rotliegend, Röt, Mittleren Muschelkalk und Keuper sind nach KRULL (1991) entweder zu unrein oder lagern in zu großen Tiefen oder die Steinsalzlager sind für den Bau eines Endlagers zu geringmächtig. Die flach lagernden Salinarschichten der Thüringischen und Hessisch-SW Thüringischen Senken weisen nach KRULL (1991) zu geringe Mächtigkeiten und zahlreiche Nutzungskonflikte mit aktuellen oder geplanten Salzbergbau-Projekten auf.

Die Koalitionsvereinbarung zur 12. Legislaturperiode von 1991 forderte eine Ergänzung der Kenntnisse über die in Deutschland vorkommenden Salinar-Formationen und eine Vervollständigung der Angaben zu den anderen, prinzipiell in Frage kommenden Wirtsgesteinsformationen. Auf der Basis eines Erlasses des BMU von April 1992 hat die BGR Mitte der 1990er Jahre eine aktualisierte zusammenfassende Studie über die Salz-Formationen in Deutschland vorgelegt. Der von KOCKEL et al. (1995) erstellte Untersuchungsbericht enthält keine systematische Bewertung aller im Untergrund Deutschlands vorkommenden Salinar-Formationen, sondern ergänzt bzw. aktualisiert die Daten für die von BEST et al. (1982), JARITZ (1983) und KRULL (1991) positiv bewerteten Salinar-Formationen. Auf der Grundlage dieser Datenzusammenstellungen werden 28 Zechstein- und sieben Rotliegend-/Zechstein-Salzstrukturen sowie sechs Keuper-Salinar-Vorkommen hinsichtlich ihrer Eignung für den Bau eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle neu bewertet. Die anderen Salinar-Formationen werden inklusive der flach lagernden Salinarvorkommen nur sehr knapp dargestellt, wobei auf früher publizierte Angaben und Eignungsbewertungen zurückgegriffen bzw. verwiesen wird.

Die Geschichte der Endlager-Standortauswahl und -Forschung in Deutschland belegt, dass sowohl Standortalternativen im Steinsalz, inklusive flach lagernder Salinar-Formationen, als auch in anderen Wirtsgesteinen geprüft und untersucht worden sind. Der Anfang der 1960er Jahre erstmalig und danach mehrfach getroffenen Entscheidung, bevorzugt die Eignung von Steinsalzvorkommen im Zentralbereich von Salzstöcken zu überprüfen, ging eine dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Analyse der Barriereigenschaften aller prinzipiell für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeigneten Gesteinstypen voraus. Letztmalig wurden von KRULL et al. (2004) Standortalternativen im Steinsalz beschrieben.

Zur Gewährleistung einer höchstmöglichen Transparenz und Nachvollziehbarkeit der früheren Entscheidungen und als eine Grundlage für zukünftige, auf gesamtgesellschaftlich akzeptierten Auswahlkriterien basierende Bewertungen von potenziellen Wirtsgesteinen werden in Kapitel 2 die geologischen Kenntnisse zu den flach lagernden Salinar-Formationen (inklusive Alpines Salinar) zusammenfassend dargestellt.

1.2 *Gesteinsmechanische Eigenschaften von Steinsalzschichten unterschiedlicher Zusammensetzung*

Konzepte zur Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe im Salz basieren auf einer langzeitsicheren Einlagerung der Abfälle in ausreichend großen, möglichst reinen Steinsalzschichten. Aufgrund ihrer Bildungsbedingungen enthalten salinare Schichtenfolgen neben Steinsalz auch tonige, karbonatische und anhydritische Ablagerungen sowie bei zunehmendem Eindunstungsgrad auch Kalimineralien. Die räumliche Verteilung und die endlagerrelevanten Eigenschaften dieser Komponenten sind bei der Bewertung der Barriereigenschaften für ein potenziell geeignetes Steinsalzvorkommen zu berücksichtigen, da sich Carnallit z. B. unter entsprechendem Gebirgsdruck bereits bei 130 °C bis 135 °C zersetzt (KERN & FRANKE 1986, KERN et al. 1992, SCHULZE 1996). Deshalb müssen in Langzeitsicherheitsanalysen neben den Daten zur räumlichen Verteilung von Ton-, Karbonat-, Anhydrit- und Kalisalzschichten auch Erkenntnisse zu den mikrostrukturellen und gesteinsmechanischen Auswirkungen von anhydritischen und tonigen Einlagerungen bzw. Kalimineralien in die Bewertung der geologischen Barriere einfließen.

Die Genese der Salinar-Formationen hat entscheidenden Einfluss auf die räumliche Verteilung und die Zusammensetzung bzw. die Eigenschaften der sie aufbauenden Gesteinsschichten (vgl. Kapitel 2). Flach lagernde Salinar-Formationen sind oft durch Wechsellagerungen von Steinsalzschichten mit anhydritisch-karbonatischen, tonigen oder kalihaltigen Gesteinsschichten gekennzeichnet. Die i. d. R. sehr mächtigen Steinsalzschichten im Zentralbereich von Salzstöcken sind aufgrund eines oft mehrere tausend Meter umfassenden Salzaufstiegsweges häufig weitgehend homogenisiert und anhydrit- bzw. tonmineralarm, mit nur geringen Gehalten salinarer Lösungen. In flach lagernden Salzvorkommen fehlen derartige, halokinetisch bzw. halotektonisch verursachte Salz-mobilisierungen sowie Homogenisierungsprozesse und der primäre Schichtenaufbau bleibt weitgehend erhalten (Abb. 1). Die Unterschiede in der Zusammensetzung und in der geologischen Entwicklung der Steinsalzschichten im Zentralteil von Salzstöcken und in flach lagernden Salinar-Formationen haben ein deutlich unterschiedliches geomechanisches Verhalten der Gesteine zur Folge. Mittels uniaxialer und triaxialer Kompressionsversuche haben LIANG et al. (2007) signifikante Variationen im geomechanischen Verhalten von flach lagernden Salzgesteinen, bestehend aus Halit-Anhydrit-Wechsellagerungen, im Vergleich mit Salzgesteinsproben aus Salzstöcken festgestellt. In den Anhydritlagen und im unmittelbar umgebenden Steinsalz kam es bei den Kompressionsversuchen zur Riss- bzw. Kluftbildung. Mehrheitlich sind die triaxialen Festigkeiten von Anhydrit-Halit-Wechsellagerungen höher sowie die axialen Strainwerte und die Elastizitätsmoduln deutlich geringer als bei reinen Steinsalzproben.

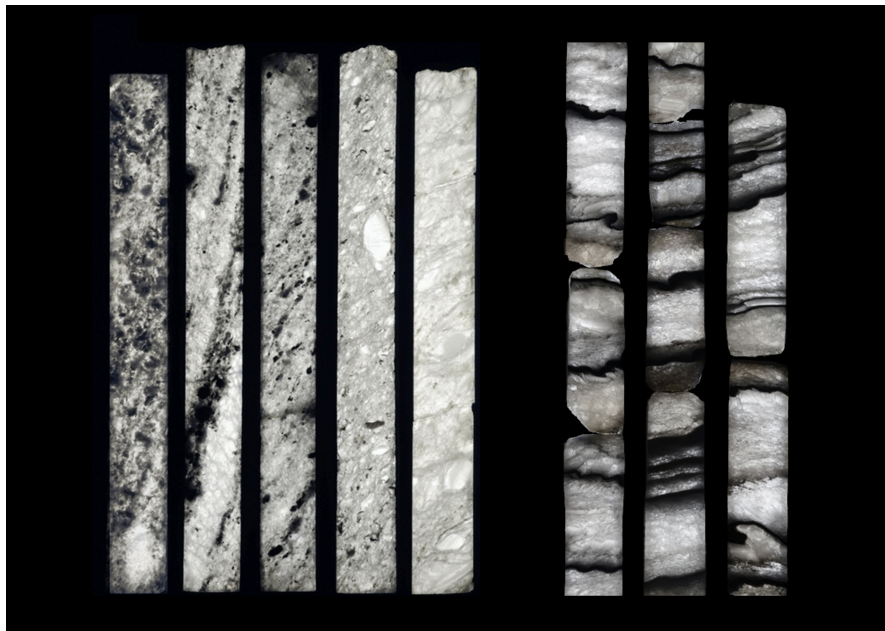


Abb. 1: Gegenüberstellung typischer Ausbildungsformen von halotektonisch veränderten (links, Staßfurt-Hauptsalz, Salzstock Gorleben) und weitgehend flach lagernden Steinsalzschichten (rechts, Steinsalze der Staßfurt-Formation, Teutschenthal). Durchlichtfotos polierter Kernanschliffe. Höhe der Kerne ca. 1 m.

Das Verformungsverhalten von salinaren Gesteinen variiert stark. Anhydritgesteine reagieren auf Deformation mit Rissbildung bzw. Zerblockung und Boudinage (siehe ZULAUF et al. 2010, 2012, MERTINEIT et al. 2012, 2014, HAMMER et al. 2014). Bei der in Anhydritgesteinen beobachteten spröde-viskosen Deformation sind Bruchbildung und Drucklösungsprozesse die dominanten Deformationsmechanismen, allerdings werden lokal Hinweise auf Dislokationskriechen, Subkornbildung und Korngrenzmigration beobachtet.

Steinsalz verfügt dagegen über sehr günstige felsmechanische bzw. rheologische Eigenschaften für die Errichtung unterirdischer Hohlräume bzw. für den Bau eines Endlagers. Die bei Anlegen eines äußeren Spannungsfeldes (z. B. beim Auffahren bergmännischer Hohlräume oder bei steigenden Temperaturen infolge des Wärmeeintrags durch ausgediente Brennelemente oder HAW-Kokillen) entstehenden Spannungsdifferenzen werden durch die viskoplastischen Eigenschaften des Steinsalzes reduziert. Im Unterschied zu Kristallingesteinen oder Tonsteinen können auch deutliche Veränderungen in den Spannungsverteilungen nicht dazu führen, dass im Steinsalz langfristig geöffnete Klüfte entstehen. Das plastisch reagierende Steinsalz baut bei Erreichen der Fließgrenze die auf Deformation zurückzuführenden Spannungen durch Verformung (Kriechen) und nicht durch das Aufreißen von Klüften ab. Die Bildung von Rissen oder Klüften ist für spröde reagierende Gesteine (z. B. Kristallingesteine) charakteristisch. In Steinsalz sind Rissbildungen z. B. bei geringen Differenzspannungen und hohen Strainraten möglich.

Die in Salinar-Formationen vorkommenden Klüfte wurden in den anhydritischen und tonig-karbonatischen Gesteinsschichten bzw. im unmittelbaren Umfeld dieser Gesteine nachgewiesen (z. B. WEISS 1980, LIANG et al. 2007, BORNEMANN et al. 2008).

Die geomechanischen Eigenschaften von Steinsalz, wie z. B. Elastizität, Fließgrenze, Plastizität sowie Druck- und Scherfestigkeit hängen entscheidend von der Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit sowie vom Fluidgehalt und vom Vorkommen von Inhomogenitäten bzw. Diskontinuitätsflächen in den Steinsalzschiechten ab. Bei schneller Verformung verhält sich Steinsalz spröde, bei langsamer Verformungsgeschwindigkeit reagiert Steinsalz überwiegend duktil, d. h. das Gestein beginnt zu kriechen. Bei einer Temperatur von 100 °C verzehnfacht sich die Plastizität (Viskosität) von Steinsalz im Vergleich zu einer Temperatur von 20 °C, während sich die Elastizität (Verformungsmodul) und die Fließgrenze um den Faktor drei bis vier verringern (LANGER 1972). Je größer die Belastungsgeschwindigkeit ist, desto größere Druckfestigkeiten und geringere Fließgrenzen werden beobachtet (z. B. CARTER et al. 1993). Erhöhte Gehalte von Fluiden im Salzgestein haben Einfluss auf die beim Salzaufstieg ablaufenden Deformationsmechanismen. Anreicherungen von interkristallinen Lösungseinschlüssen auf den Korngrenzen von Steinsalzkristallen führen schon bei geringen Differenzialspannungen und Temperaturen zu einem viskosen Verhalten des Steinsalzes (z. B. TER HEEGE et al. 2005).

Nach LANGER (1972), ALBRECHT & LANGER (1974) sowie HUNSCHKE et al. (1993, 2003) werden die Kriecheigenschaften von Steinsalzgesteinen im Wesentlichen bestimmt von:

- den Bildungsbedingungen der Gesteine
- ihrer mineralogischen Zusammensetzung
- dem lithostratigraphischen Aufbau der Salinar-Formation
- der Textur sowie der halotektonischen Entwicklung der Gesteine sowie ihrem Rekristallisationsgrad.

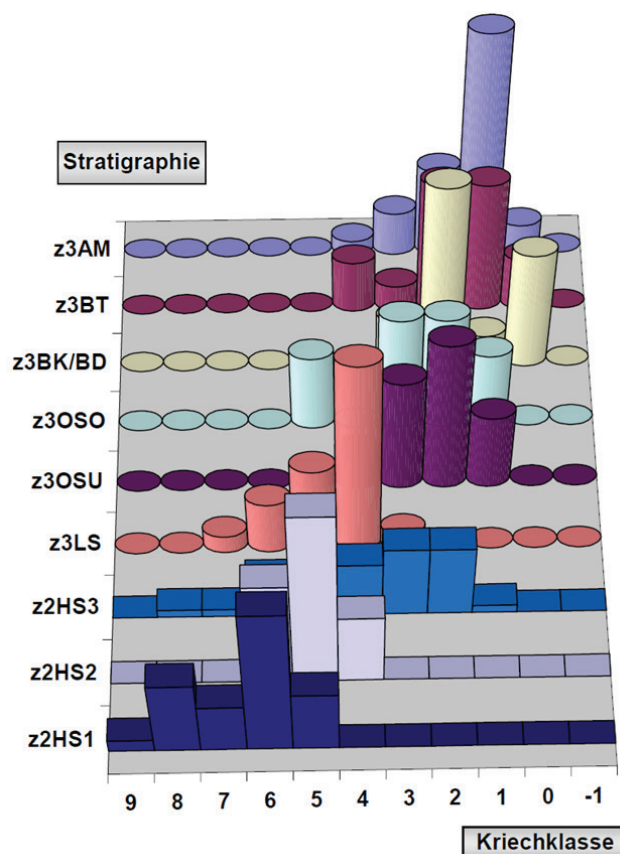


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung des Kriechvermögens von Steinsalzschichten der Staßfurt (z2)- und Leine (z3)-Formationen des Salzstocks Gorleben. Das Kriechvermögen (Kriechklasse) nimmt innerhalb der Zechstein-Formationen vom Liegenden zum Hangenden ab (aus: HUNSCHKE et al. 2003).

Einen entscheidenden Einfluss auf das Kriechverhalten von Steinsalzschichten haben die Gehalte und die Verteilung von Verunreinigungen sowie Mineral- und Fluideinschlüssen, z. B. in Form von Anhydrit, Kieserit oder Polyhalit. Unterschiedlich zusammengesetzte Steinsalztypen weisen z. T. beträchtliche Variationen im Kriechverhalten mit bis zu 100-fach unterschiedlichen Kriechraten auf (Abb. 2). Detaillierte Erläuterungen zum Kriechverhalten von Salzgesteinen und zur Ausweisung von Kriechklassen finden sich u. a. in HUNSCHKE et al. (2003) und PLISCHKE (2007). Bei Verformungs- bzw. Deformationsprozessen kommt es im Umfeld von Verunreinigungen bzw. an Diskontinuitätsflächen zu Stauungen der das Kriechen hervorrufenden Versetzungen. Dies führt zu Spannungskonzentrationen, die eine Festigkeitsminderung bzw. Zunahme der Dilatanz bei plastischer Deformation und ggf. die Bildung von Mikrorissen zur Folge haben. PEACH (1993) hat den Einfluss von Anhydrit-Verunreinigungen auf die Dilatanz und Permeabilität von Steinsalz experimentell untersucht. Dabei wurden ansteigende Dilatanz- und Permeabilitätswerte bei zunehmenden Anhydritgehalten im Steinsalz festgestellt. Je feinkörniger der Anhydrit, desto größere Dilatanzwerte wurden gemessen.

HUNSCHKE et al. (1993, 2003) haben an Steinsalzproben aus den Salzstöcken Sarstedt und Gorleben detailliert den Einfluss von anhydritischen, polyhalitischen und kieseritischen Verunreinigungen auf das Kriechvermögen der Gesteine untersucht. Es wurde festgestellt, dass innerhalb eines Evaporationszyklus die jüngeren Steinsalzschieichten, mit deutlich geringeren Gehalten von fein verteilten Verunreinigungen, deutlich langsamer kriechen als die älteren Schichten (Abb. 3). Die Ergebnisse werden durch Kriechversuche an Probenmaterial aus dem ERA Morsleben bestätigt, wonach das Staßfurt-Hauptsalz ein um ein bis vier Größenordnungen höheres Kriechvermögen aufweist als die Steinsalzschieichten in den Leine- und Aller-Formationen. Das Hauptsalz im Westfeld kriecht 10mal schneller, als das im Zentralteil dieser Salzstruktur (HUNSCHKE et al. 1998).

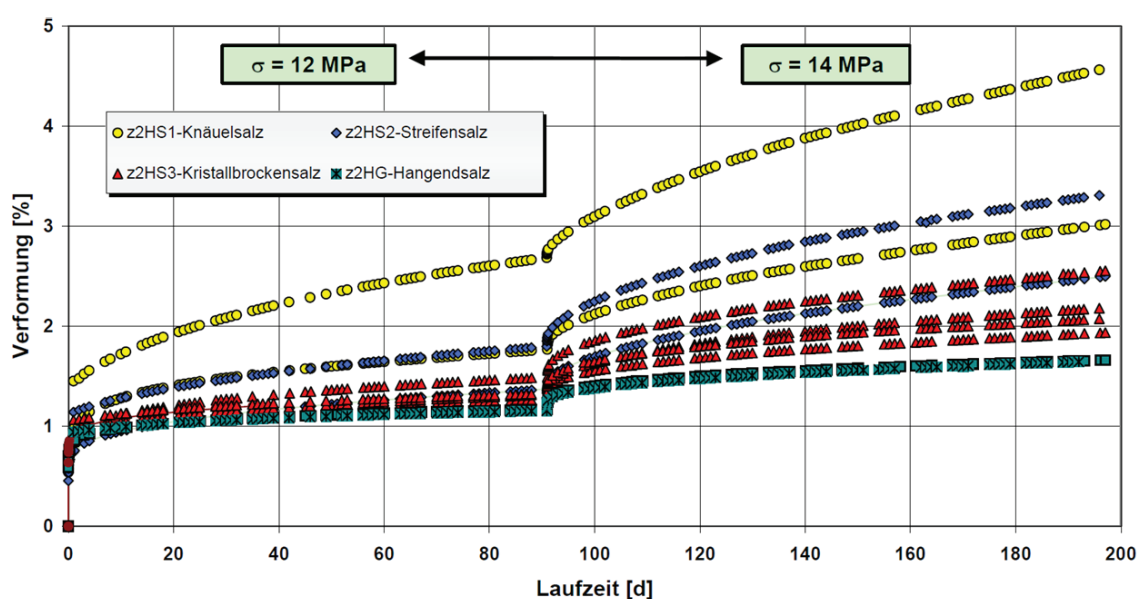


Abb. 3: Ergebnisse uniaxialer Kriechversuche ($T = 22\text{ °C}$) an Steinsalzproben der Staßfurt-Formation (z2) aus der Bohrung Go 1002 (Salzstock Gorleben). Die stationären Kriechraten von Knäuelsalz (z2HS1) unterscheiden sich um mehr als eine Größenordnung von denen des jüngeren Hangendsalzes (z2HG) (aus: HUNSCHKE et al. 2003).

Als Ursachen für die niedrigeren Kriechraten werden der geringere Abstand zwischen den feineren Verunreinigungen in den jüngeren Steinsalzschieichten (z2HS3, z2HG) und die daran gebundene stärkere Behinderung der für das Kriechen erforderlichen Versetzungsbewegungen angesehen (Abb. 4; HUNSCHKE et al. 2003). Auch ALBRECHT et al. (1993) führten die um mehr als eine Größenordnung schwankenden Kriechraten auf die unterschiedliche Ausbildung der Mikrogefüge in den Steinsalzschieichten zurück. Die i. d. R. geometrisch größeren Anhydrit-Agglomerate in den liegenden Steinsalzen eines Evaporationszyklus wirken sich aufgrund ihres größeren Abstandes untereinander nur geringfügig auf die Versetzungsbewegungen, d. h. auf das Kriechen aus. Die fein dispers verteilten Einschlüsse in den hangenden Steinsalzschieichten behindern dagegen effektiv die Versetzungsbewegungen.

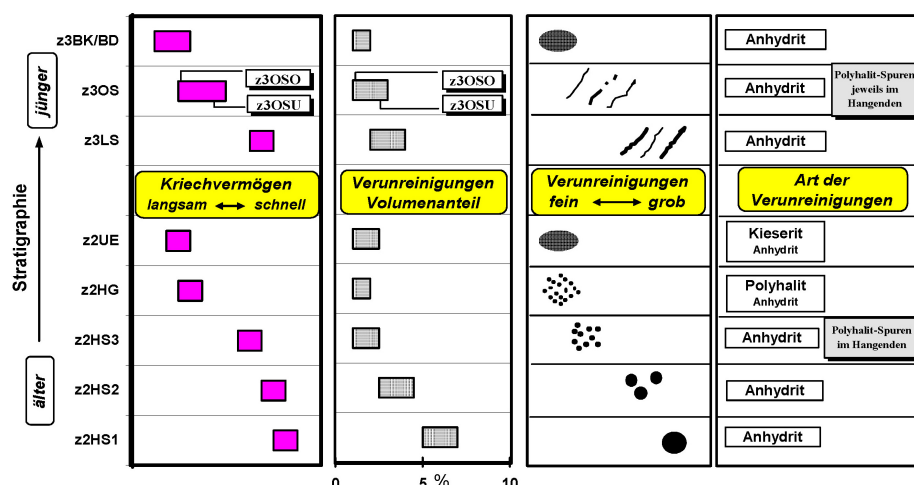


Abb. 4: Korrelation des Kriechvermögens und einiger Gefügeeigenschaften von unterschiedlichen Steinsalzschichten aus dem Salzstock Gorleben (aus: HUNSCHKE et al. 2003).

Werden erhöhte Carnallit-Gehalte in den Steinsalzschichten beobachtet, so hat dies i. d. R. zunehmende Kriechraten (Duktilitäten) zur Folge. Für das Kriechen von Kaligesteinen ist ihr Mineralbestand entscheidend. Carnallit, der ca. 40% Kristallwasser enthält, gibt bei mechanischer Belastung, die Dilatanz zur Folge hat, das Wasser in den neu geschaffenen Porenraum ab, was zu höheren Kriechraten führt. Hartsalze, d. h. Mischungen von Steinsalz mit Sylvinit, Kieserit und/oder Anhydrit, reagieren schon bei geringer Verformung mit Spröbruch und werden in deutlich geringere Kriechklassen eingeordnet. Auch die Untersuchungen von Proben des Kaliflözes Staßfurt aus dem ERA Morsleben zeigten für verschiedene lithologische Zusammensetzungen ein sehr unterschiedliches Kriechverhalten. Während das Kaliflöz Staßfurt in Trümmercarnallit-Fazies duktiler als Steinsalz ist, liegt die Kriechklasse des sylvinitischen Hartsalzes in der Größenordnung des Staßfurt-Steinsalzes. Kieseritisches Hartsalz verhält sich weniger duktil als Steinsalz (PLISCHKE 2007).

Ton- oder Tonstein-Einschlüsse, wie sie z. B. in den alpinen Haselgebirgssedimenten oder in den Rotliegend-Salinaren beobachtet werden, führen zu rheologisch weicherem Salzgestein (LANGER 1972, LOHKÄMPER et al. 2004, LIANG et al. 2007, LEITNER et al. 2013). Die Einschlüsse be- oder verhindern die Ausbildung eines homogenen Spannungszustandes und führen somit ggf. zu Problemen bei der Standfestigkeit von Bergwerksauffahrungen. Tonstein-Einlagerungen, die im alpinen Haselgebirge bis zu 70 Vol.-% des Salinargesteins bilden können (Kapitel 2.3), beeinflussen das Deformationsverhalten des Steinsalzes stark (LEITNER et al. 2013) und führen zu einer deutlichen Abnahme der Gesteinsfestigkeiten (LIANG et al. 2007). Erhöhte Lösungsgehalte in Ton-führenden Steinsalzen führen zur Dominanz anderer Deformationsmechanismen als das in reinem Steinsalz dominierende Lösungs-Fällungskriechen bzw. Versetzungskriechen. Neben den p-T-Bedingungen haben v. a. die Wassergehalte und die Korngrößen einen wesentlichen Einfluss auf das Deformationsverhalten von Steinsalzgesteinen (z. B. TER HEEGE et al. 2005).

LANGER & HOFRICHTER (1971) haben die Verformungseigenschaften von Steinsalz aus den Staßfurt- und Leine-Formationen (Bohrkerne aus den Bohrungen Lesum 102 und Lesum 103) und von Steinsalzen des Rotliegend mit Tongehalten < 20 Vol.-% bzw. zwischen 20 Vol.-% und 50 Vol.-% (Bohrkerne aus den Erkundungsbohrungen Kiel 101 und Heide 101) miteinander verglichen. Die Steinsalze des Rotliegend weisen keine Einschlüsse von sulfatischen oder Kalimineralen auf, aber lokal stark variierende, omni-präsente Tonanteile. Die experimentellen Studien ergaben bei zunehmenden Tongehalten abnehmende Zylinderdruckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und Fließgrenzen sowie ansteigende Verformungsmodul (Tab. 1). Die tonreichen Rotliegend-Salze wirken im Vergleich zu reinen Steinsalzgesteinen, die eine bis zu 10-fach höhere Kriechverformung zeigen, bezüglich der Hohlraumkonvergenz hemmend (LANGER & HOFRICHTER 1971).

Tab. 1: Gegenüberstellung der mittleren gesteinsmechanischen Kennwerte für Steinsalzgesteine der Zechstein-Salinare und für tonreiche Gesteine der Rotliegend-Salinare (aus: LANGER & HOFRICHTER 1971)

Gestein	Beschreibung	Zylinderdruckfestigkeit in kp/cm ² : *)			Oktaedrische Fließgrenze in kp/cm ² : **)			Verformungsmodul: ***)			Zugfestigkeit in kp/cm ²
		20°C	60°C	100°C	20°C	60°C	100°C	20°C	60°C	100°C	
Staßfurt-Steinsalz	grob- bis mittelkristallin, geringer Anhydrit- und Kieseritgehalt	200	150	75	100	75	25	12000	9000	3000	12
Leine-Steinsalz	fein- bis mittelkristallin, 2 bis 5 % Kieserit-/Anhydritgehalt	240	180	90	120	90	30	15000	12000	4000	15
Rotliegendes (<20% Ton)	grobkristallin, Tonsubstanz als Einsprenglinge	170	135	70	85	60	22	24000	18000	6000	10
Rotliegendes (20 % bis 50 % Ton)	mittelkristallin, Tonsubstanz in Zwickeln	150	120	60	75	50	20	18000	15000	5000	9

*) quasistatische Belastungsgeschwindigkeit (<1kp/min) Probenlänge: Durchmesser l/d > 2,0

**) aus Beginn der bleibenden Scherverformung im triaxialen Versuch abgeleitet

***) als Sekantenmodul $\nu = \frac{\text{Zylinderdruckfestigkeit}}{\text{Bruchdehnung}}$ berechnet

Das unterschiedliche Kriech- und Deformationsverhalten von Steinsalzschiechten ist bei der Wirtsgesteins- und Standortauswahl, bei der Entwicklung des Endlagerkonzeptes und bei der Planung der Auslegung des Endlagers unbedingt zu berücksichtigen. Verunreinigungen oder Diskontinuitätsflächen im Steinsalz können infolge des Auftretens von tektonischen Spannungen, Spannungsumlagerungen, Spannungskonzentrationen oder Abnahmen der Gesteinsfestigkeit zu Veränderungen in den Konvergenzraten aufgefahrener Hohlräume, zu Problemen bei der Standsicherheit oder zu Beeinträchtigungen bei der Dichtigkeit des Wirtsgesteins führen. Tonige Einlagerungen oder schichtig bzw. in größeren Akkumulationen

eingelagerte anhydritische Gesteine führen zu geringeren Standfestigkeiten der Hohlräume und behindern durch Spannungskonzentrationen die Ausbildung eines homogenen Spannungszustandes. Spannungsspitzen an Hohlraumrändern werden von unreinem Steinsalz infolge seiner rheologischen Eigenschaften schlechter abgebaut, was die Gefahr von Ausbrüchen z. B. aus der Firste deutlich erhöht. Eine geringere Standfestigkeit der Hohlräume erfordert spezielle Ausbaumaßnahmen, was die Kosten des Endlagerbaus deutlich erhöht und zusätzliche Probleme beim Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagers (verursacht durch die Ausbaumaterialien) schafft.

Erhöhte Ton- und/oder Anhydritgehalte vermindern im Vergleich zu reinem Steinsalz die Wärmeleitfähigkeit der Steinsalzsichten und steigern die Wahrscheinlichkeit von Lösungs- oder Gaszutritten aus den anhydrithaltigen Gesteinen bzw. ihrem unmittelbaren Umfeld in das Endlagerbergwerk. Die im Vergleich zu reinem Steinsalz geringeren Wärmeleitfähigkeiten von Ton- bzw. Anhydrit-reichem Steinsalz führen bei unverändertem Endlagerkonzept zu einer größeren thermischen Belastung der Gesteine. Verursacht durch die sehr geringe Permeabilität von Steinsalzsichten, kann das primär in den Tonmineralen tonreicher Salzgesteine enthaltene Wasser sowie das Porenwasser von Tongesteinsschichten im Verlauf der geologischen Entwicklung nicht oder nur eingeschränkt abgeführt werden. Daher ist zu erwarten, dass tonreiche Salzgesteine zu starken Überdruck-Reaktionen und zu erhöhten Wassergehalten neigen können.

Die in Kapitel 2 dargestellten Kenntnisse zur Genese und Lithologie der salinaren Schichtenfolgen und der darin enthaltenen Steinsalzlager ermöglichen auf der Grundlage dieser Datenzusammenstellungen eine Prognose der gesteinsmechanischen Eigenschaften der verschiedenen flach lagernden Salinare in Deutschland.

2 Salinare Formationen

Eine Formation ist eine lithostratigraphische Gesteinseinheit, die aufgrund ihrer besonderen lithologischen Merkmale identifiziert und in Aufschlüssen bzw. in Bohrungen kartiert werden kann. Die Gesteine einer Formation entstanden unter ähnlichen Bedingungen, welche z. B. durch tektonische Bewegungen, Meeresspiegelschwankungen oder das Klima bestimmt werden (BACHMANN & SCHWAB 2008). Mehrere Formationen werden zu Gruppen oder Subgruppen zusammengefasst. Salinar geprägte Formationen sind dadurch charakterisiert, dass innerhalb ihrer sedimentären Schichtenfolge Evaporite vorkommen. Evaporite sind chemische Sedimente, die vorwiegend aus wasserlöslichen Salzmineralen – meist Chloride und Sulfate der Alkali- und Erdalkalimetalle – aufgebaut werden und aus hoch konzentrierten wässrigen Lösungen auskristallisiert sind (WARREN 2006). Dabei variiert der Anteil der einzelnen Komponenten (z. B. Anhydrit, Steinsalz)

innerhalb der salinaren Formationen in Abhängigkeit von den Sedimentations-, Diagenese- und Metamorphosebedingungen. Steinsalz kann in einer Salinar-Formation als fein verteilter Zement, als nestartige Einlagerung, als geringmächtige Lage oder in Form von mehreren, bis hunderte Meter mächtigen Steinsalzschieben vorliegen. Im Fokus dieses Berichtes stehen salinare Formationen, in denen regional verbreitet flach lagernde, mindestens mehrere zehner Meter mächtige Steinsalzschieben vorkommen. Eine Abfolge derartiger Steinsalzschieben innerhalb einer Salinar-Formation wird als Steinsalzlager oder Steinsalzfolge bezeichnet. Sie sind in Deutschland in unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus ausgebildet (Abb. 5) und werden in den folgenden Kapiteln einzeln ausführlicher beschrieben.

Die räumliche Verteilung der salinaren Formationen konzentriert sich auf Gebiete, die im Laufe ihrer geologischen Entwicklung eine Absenkung erfahren haben. In vielen Beckenstrukturen, wie z. B. im Norddeutschen Becken², kam es zur Akkumulation mächtiger sedimentärer Schichtenfolgen. Innerhalb der großen geologischen Becken- und Grabenstrukturen sind die Variationen in der Mächtigkeit und in der Zusammensetzung der salinaren Formationen zu einem großen Teil auf primäre Einflüsse zurückzuführen. Klimatische Bedingungen und chemische Reaktionen, z. B. zwischen der konzentrierten Lauge und den bereits gebildeten chemischen Sedimenten (Rücklösung), haben einen direkten und wesentlichen Einfluss auf die Bildung der Evaporite. Auch die paläogeographische Position des Ablagerungsraums im Becken ist bedeutend für die räumliche Verteilung und die lithologische Ausprägung evaporitischer Schichtenfolgen, wobei eine interne synsedimentäre Differenzierung des Beckens durch Schwellen und Senken zusätzliche Auswirkungen auf die Evaporitbildung hat.

² Norddeutsches Becken, eine in Deutschland gebräuchliche Bezeichnung für das südliche Teilbecken des Mitteleuropäischen Beckensystems. Das Teilbecken erstreckt sich von England bis Polen und wird nach der Entstehungszeit auch als Südliches Permbecken bezeichnet. In der Triaszeit erweiterte sich der Sedimentationsraum bis nach Süddeutschland (Germanisches Becken).

System	Serie / Gruppe	internationale Stufe / Subgruppe / Formation	
Quartär	ca. 1,8 Ma		
Neogen	Pliozän	Ober	
		Unter	
	Miozän	Ober	
		Mittel	
Paläogen	Oligozän	Unter	
		Chatium	
		Rupellium	
	Eozän	Priabonium	
		Bartonium	
		Lutetium	
	Paläozän	Ypresium	
		Thanetium	
		Seelandium	
		Danum	
Kreide	Oberkreide	ca. 65 Ma	
		Maastrichtium	
		Campanium	
		Santonium	
		Coniacium	
	Unterkreide	Turonium	
		Cenomanium	
		Albium	
		Aptium	
		Barremium	
		Hauterivium	
		Valanginium	
		Berriasium	
Jura	Oberjura (Malm)	ca. 142 Ma	
		Tithonium	
		Kimmeridgium	
	Mitteljura (Dogger)	Oxfordium	
		Callovium	
		Bathonium	
		Bajocium	
	Unterjura (Lias)	Aalenium	
		Toarcium	
		Pliensbachium	
Trias	Keuper	ca. 200 Ma	
		Sinemurium	
		Hettangium	
		Exter-Formation	
		Arnstadt-Formation	
	Muschelkalk	Weser-Formation	
		Stuttgart-Formation	
		Grabfeld-Formation	
	Buntsandstein	Erfurt-Formation	
		Oberer Muschelkalk	
		Mittlerer Muschelkalk	
		Unterer Muschelkalk	
		Röt-Formation	
		Solling-Formation	
Perm	Zechstein	Hardeggen-Formation	
		Detfurth-Formation	
		Volpriehausen-Formation	
		Quickborn-Formation	
		Bernburg-Formation	
		Calvörde-Formation	
		Fulda-Formation	
	Rotliegend	Friesland-Formation	
		Ohre-Formation	
		Aller-Formation	
		Leine-Formation	
		Stäsfurt-Formation	
		Werra-Formation	
		Elbe-Subgruppe	
		Havel-Subgruppe	
		Müritz-Subgruppe	
		Altmark-Subgruppe	

 Vorkommen von Steinsalzlager

Abb. 5: Stratigraphische Position und Bezeichnung der salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlager in Deutschland (MENNING & HENDRICH 2002, verändert).

Aber auch sekundäre Prozesse können die flach lagernden Salzgesteine in ihrer Mächtigkeit und Zusammensetzung verändern. Dazu zählen Ablaugungsprozesse, die in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Bedingungen insbesondere die leicht löslichen Stein- und Kalisalze bis in Teufen von einigen hundert Metern erreichen können. Außerdem belegen die zahlreichen Salzstrukturen in Norddeutschland (Abb. 6), dass die Salzgesteine eine außerordentlich große Verformbarkeit aufweisen. Salzstrukturen, in Form von Salzkissen oder Salzstöcken, entwickelten sich vor allem durch die Mobilisation der Steinsalzfolgen in den Ablagerungen des Rotliegend, Zechstein, Keuper, Malm und Tertiär. Dabei kommt es in den Salzkissen und Salzstöcken zur Akkumulation des Steinsalzes, wogegen in den Salzabwanderungsgebieten die horizontbezogene Mächtigkeit der Steinsalzlager stark reduziert wird. An die Entstehung von Salzstrukturen ist die Bildung von halokinetisch verursachten Schwellen und Senken geknüpft, welche die strukturelle und sedimentäre Entwicklung im Norddeutschen Becken beeinflussten.

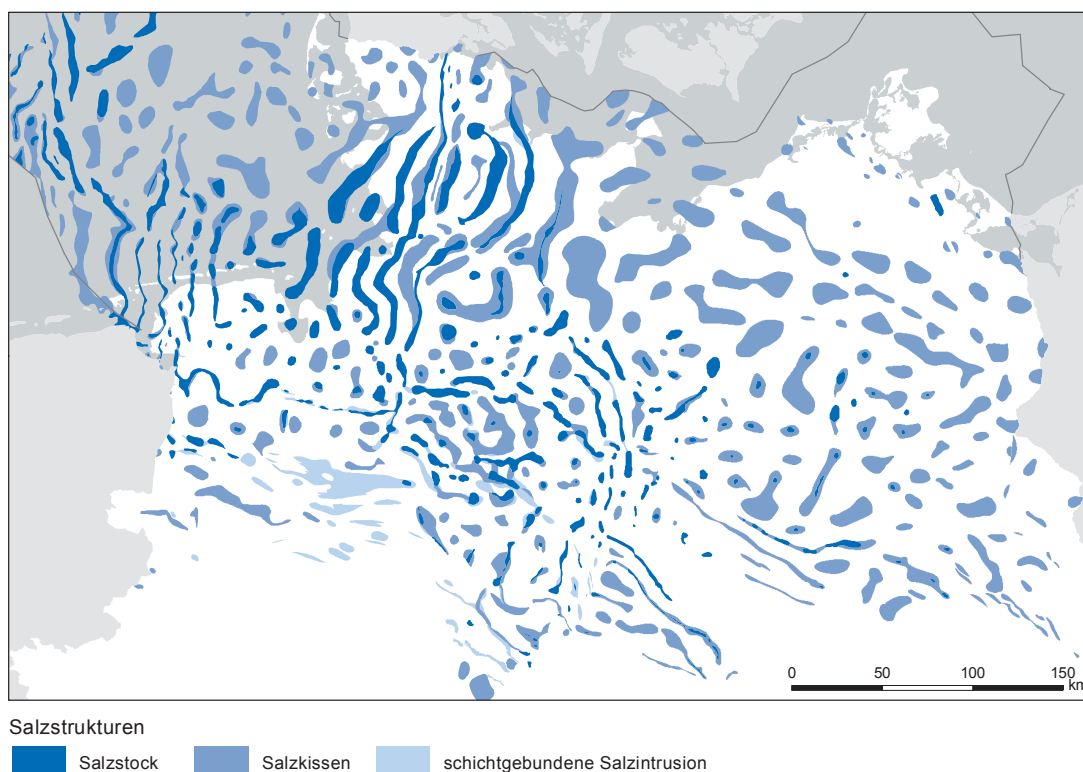


Abb. 6: Verbreitung von Salzstrukturen in Norddeutschland (nach: REINHOLD et al. 2008).

Im Hinblick auf eine Bewertung des Nutzungspotenzials von flach lagernden Steinsalzlageren wird darauf hingewiesen, dass auch in den großräumig eher flach und stratiform gelagerten salinaren Schichtenfolge lokal begrenzt flachwellige Deformationsstrukturen und intern z. T. intensiv verfaltete Salzlagen (z. B. Kaliflöze) beobachtet werden (Intrasalinarstrukturen). Meist handelt es sich dabei nur um kleine Schichtverstellungen oder um lokal verfaltete Salzschichten sowie Flexurbildungen, die auf das „Abpuffern“ von Störungszonen im Liegenden und/oder Hangenden der Salzlager zurückzuführen sind.

Unter Berücksichtigung der Vielzahl von Faktoren, welche die Verbreitung und Ausprägung der Steinsalzlager im Untergrund beeinflussen, werden im Folgenden die Vorkommen der altersverschiedenen salinaren Schichtenfolgen bundesweit schematisch dargestellt. Diese Übersichtsabbildungen berücksichtigen insbesondere Informationen über die großräumige Verbreitung und Fazies der salinaren Formationen. Lokale Entwicklungen, wie z. B. Schichtausfall oberhalb von Salzstöcken oder Mächtigkeitsschwankungen infolge einer halokinetischen Salzmobilisierung, bleiben hier meist unberücksichtigt und sind großmaßstäblicheren bzw. detaillierten regionalen Studien vorbehalten. Die im Bericht enthaltenen Bohrprofile (siehe Anlagen) sollen vor allem die Ausprägung der Steinsalzlager in den salinaren Schichtenfolgen verdeutlichen, stellen aber keine geologischen Profile sensu stricto dar.

2.1 Rotliegend-Salinar

Das Rotliegend ist als eine lithostratigraphische Einheit im Rang einer Gruppe definiert und wird in Norddeutschland nach PLEIN (1995) in 4 Subgruppen gegliedert (Abb. 7): Altmark-(Unter-Rotliegend), Müritz- (Ober-Rotliegend I), Havel- und Elbe-Subgruppe (beide Ober-Rotliegend II).

System	Gruppe	Formation
P E R M	Rotliegend Ober-Rotliegend II	Elbe-Subgruppe Hannover
		Dethlingen
		Havel-Subgruppe Mirow
		Parchim
	Ober-Rotliegend I	Müritz-Subgruppe
	Unter-Rotliegend	Altmark-Subgruppe

Abb. 7: Stratigraphische Gliederung des Rotliegend; Entstehungszeitraum von Steinsalzlagern blau gekennzeichnet (nach: PLEIN 1995).

Die älteste Rotliegend-Schichtenfolge (Ablagerungen der Altmark-Subgruppe) ist durch Vulkanite und vulkanoklastische Sedimente gekennzeichnet (HOTH et al. 1993a). In den Müritz-, Havel- und Elbe-Subgruppen wurden hingegen vorrangig terrigene Sedimente abgelagert. Im Ober-Rotliegend II kam es in den beckenzentralen Bereichen zur Ablagerung von evaporitisch geprägten Schichtenfolgen, die heute noch weit verbreitet sind (LINDERT et al. 1990, PLEIN 1995, MENNING et al. 2005).

Durch eine expansive Beckenentwicklung im Ober-Rotliegend II (Havel- und Elbe-Subgruppen) entstand in Norddeutschland ein zusammenhängender, ESE-WNW streichender Ablagerungsraum, das Norddeutsche Becken. Es bildet den Zentralteil des Südlichen

Permbeckens. Die Lithofazies und die Mächtigkeit der dort sedimentierten Schichtenfolgen sind durch klimatische Bedingungen beeinflusst und eng mit der strukturellen Entwicklung des Südlichen Permbeckens verknüpft. In den Havel- und Elbe-Subgruppen entwickelte sich eine zunehmend ausgeglichene Beckenmorphologie und am Beckenrand überlagern die jüngeren Sedimente der Beckenfazies die älteren Abfolgen progressiv und diskordant (GRALLA 1988, PLEIN 1995, SCHRÖDER et al. 1995, LEGLER 2006). Die überwiegend kontinentalen, klastischen und evaporitischen Ablagerungen zeichnen somit ein großräumiges, hydrologisch geschlossenes und expandierendes intrakontinentales Becken nach. Gegen Ende des Rotliegend besaß das Südliche Permbecken eine Ausdehnung, die von Polen bis nach England reichte. Nur sporadisch und kurzzeitig wurden in diesem Becken auch marine Sedimente abgelagert (LEGLER 2006, STOLLHOFEN et al. 2008).

Das Ablagerungszentrum der salinaren Fazies lag während des Rotliegend im Gebiet der Südlichen Nordsee und im Elbmündungsgebiet sowie im südlichen Schleswig-Holstein. Dort sind die Ablagerungen des Ober-Rotliegend II von pelitischen Sedimenten und von salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlager geprägt. Kalisalze fehlen in der evaporitischen Schichtenfolge. Zwischen Helgoland und dem Elbmündungsbereich ist die Schichtenfolge des Ober-Rotliegend II z. T. mehr als 1500 m mächtig (GRALLA 1988, PLEIN 1995).

Die Vorkommen von Steinsalzlager in der zyklisch aufgebauten Havel-Subgruppe sind auf relativ kleine Gebiete begrenzt. In der Parchim-Formation konnte bisher nur in der Bohrung Schwerin 1 eine bankartige Halit-Einschaltung nachgewiesen werden (SCHRÖDER et al. 1995). Diese stark mit äolischem Material verunreinigte Steinsalzschiefer ist etwa 75 m mächtig und liegt in mehr als 6900 m Tiefe (PLEIN 1995).

In der Mirow-Formation treten zwei sehr unreine Steinsalzlager auf, die eine maximale Mächtigkeit von ca. 80 m erreichen und durch einen halitzementierten feinklastischen Abschnitt unscharf voneinander getrennt sind. Die beiden Steinsalzlager sind durch grobe Halitkristalle geprägt, die in einer sandig-siltigen Matrix eingeschlossen sind. Die salinare Schichtenfolge wurde nur im südöstlichen Nordseeraum nachgewiesen und liegt in Tiefen unterhalb von 4600 m, z. B. in der Bohrung Nordsee (D) J-5 1 (GRALLA 1988, GEBHARDT 1994, PLEIN 1995).

Mit dem Beginn der Elbe-Subgruppe prägte ein großer perennierender Salzsee die Sedimentation im Bereich der heutigen Nordsee, der sich im Ober-Rotliegend II stetig weiter nach Westen, Süden und Osten ausdehnte (SCHRÖDER et al. 1995, LEGLER et al. 2011). Im Zusammenhang mit dem vorherrschenden ariden Klima führte dies, vom Älteren zum Jüngeren, zu einer immer größeren Verbreitung der Halit-führenden Schichten. Die jüngsten evaporitisch geprägten Sedimente des Rotliegend sind, entsprechend der expansiven Beckenentwicklung, vom britisch-niederländischen Beckenteil bis zur Müritz und in der Altmark verbreitet (Abb. 8; GAST, R. 1991, GEBHARDT 1994, GAST, R. et al. 1998).

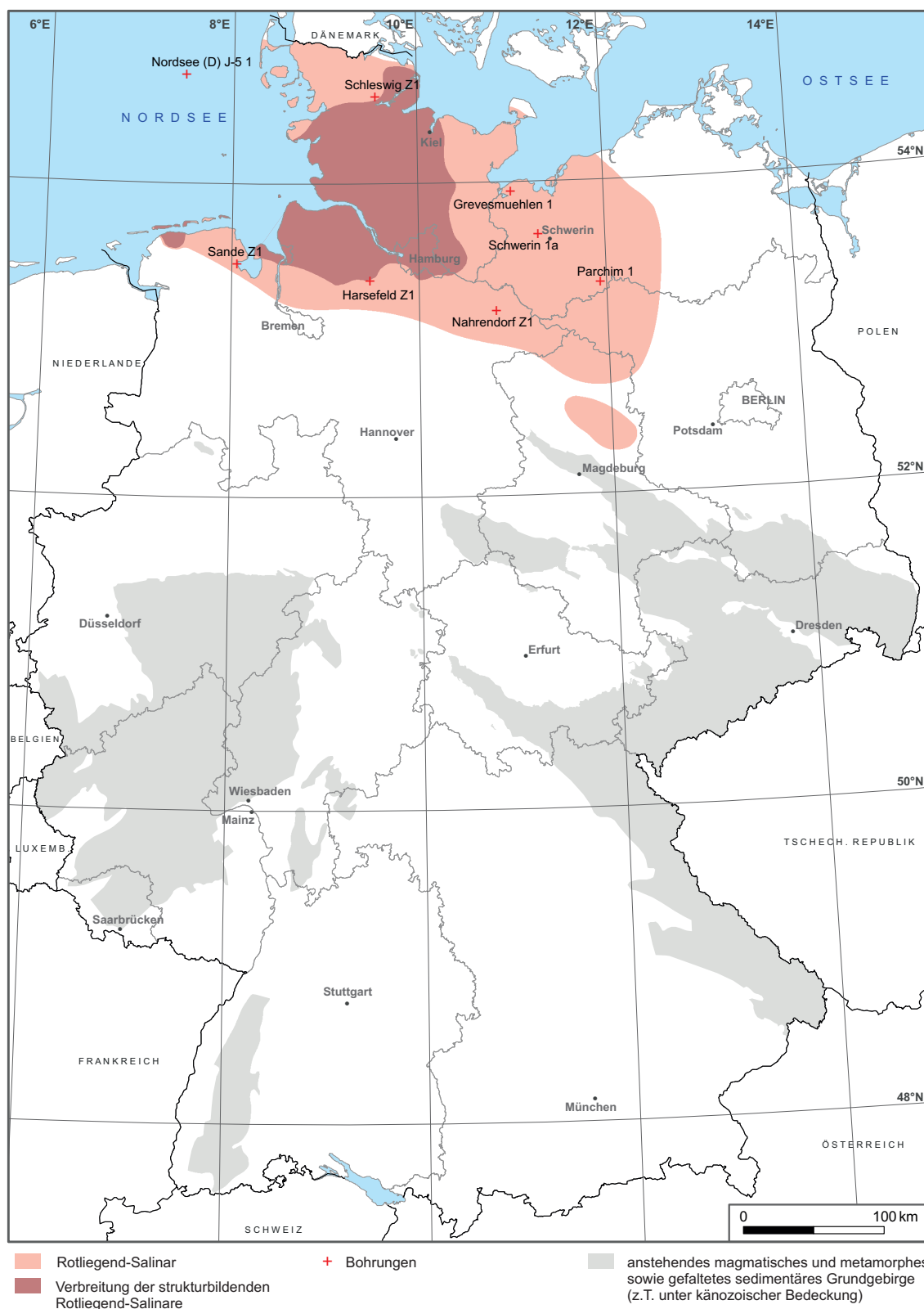


Abb. 8: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Rotliegend-Salinare in Deutschland (nach: KATZUNG 1991, BALDSCHUHN et al. 1999, KRULL et al. 2004).

Die Playa-Sedimente dieses Salzsees sind meist feinkörnig und tonreich, mit zahlreichen eingeschalteten Halit-führenden Schichten (GAST, R. 1991, GEBHARDT 1994, GAST, R. et al. 1998). Im Zusammenhang mit der variablen Salinität und der Verbreitung des Salzsees tritt das Steinsalz als fein verteilter Zement (vorzugsweise in sandigen und siltigen Gesteinen), als nestartige Einlagerungen auf oder kommt in Form von geringmächtigen Lagen oder als Wechsellagerung von mehrere Meter mächtigen Steinsalzlager mit tonigen Ablagerungen vor (KATZUNG 1991, LEGLER et al. 2011). Mächtigkeit und Vorkommen der Steinsalzlager variieren innerhalb des Verbreitungsgebietes der bis maximal etwa 1000 m mächtigen, zyklisch aufgebauten Ablagerungen der Elbe-Subgruppe deutlich (PLEIN 1995). Steinsalzlager in hoher Anzahl und großer Mächtigkeit kommen vor allem im Beckenzentrum vor (siehe Anlage 1). Dort dominieren im Ober-Rotliegend II die Steinsalzlager die Schichtenfolge, d. h. die Ton-Zwischenlagen treten im Vergleich zur Beckenrandfazies deutlich zurück (GRALLA 1988, SCHRÖDER et al. 1995, GAUPP et al. 2000).

Auf dem heutigen festländischen Gebiet, d. h. in Richtung des ehemaligen Beckenrandes, nehmen die Anzahl und die Mächtigkeit der Steinsalzlager tendenziell ab. In den weiter südlich und östlich liegenden Bohrungen beschränkt sich ihr Vorkommen überwiegend auf die Abfolge der Hannover-Formation (siehe Anlage 2). Hier ist das Verhältnis der Mächtigkeiten der Steinsalzlager zu den Ton-Zwischenlagen deutlich zugunsten der Ton-Zwischenlagen verschoben. Die maximale Mächtigkeit von reinen Steinsalzschiechten liegt bei etwa 20 m, meist aber sind diese innerhalb der Ablagerungszyklen nur wenige Meter mächtig (BEST et al. 1982, KATZUNG 1991). Im proximalen Bereich des Salzsees weisen die Steinsalzfolgen zunehmend tonige Zwischenlagen auf oder werden durch feinlaminierter Karbonat- und Anhydrit-Mergelsteine vertreten, d. h. durch eine schwach salinare Randfazies (PLEIN 1993, GEBHARDT 1994, LEGLER 2006).

Verursacht durch die spätere Entwicklung von Salzkissen und -diapiren sind die primären Lagerungsverhältnisse und die Mächtigkeit der Steinsalz-Tonstein-Wechselfolge der Elbe-Subgruppe häufig gestört bzw. verändert. Im Gebiet von Schleswig-Holstein und im Elbmündungsgebiet kam es zur Entstehung sogenannter Doppel-Salinare (Doppel-Diapire). Dabei handelt es sich um Diapire, die durch zwei verschiedene salinare Schichtenfolgen (Rotliegend und Zechstein) aufgebaut sind. Im Kernbereich einer solchen Struktur befindet sich das haselgebirgsähnliche Rotliegend-Salinar (FRISCH & KOCKEL 2003). Das „Haselgebirge“ ist dabei die Bezeichnung für ein ungeschichtetes, brekziöses Salz-Tonstein-Gemisch, das als Fluidal-Tektonit gedeutet wird (KRULL et al. 2004).

In Folge halokinetischer Prozesse innerhalb der Rotliegend-Steinsalzlager veränderte sich deren Mächtigkeit (GRALLA 1988). In den Doppel-Salinar-Strukturen ist die Mächtigkeit der Rotliegend-Steinsalzlager deutlich sekundär erhöht. Die sekundäre Mächtigkeit des Rotliegend-Salinars in den Diapiren kann mehrere 1000 m erreichen (BEST et al. 1982).

Unter Berücksichtigung einer Massenbilanzierung wird für eine derartig großräumige halokinetische Akkumulation von Steinsalz ein dementsprechend großes Gebiet mit mächtigen Steinsalzlager benötigt, die ausgedünnt wurden. Somit ist zu erwarten, dass in den lateral angrenzenden Bereichen der Doppel-Salinar-Strukturen die Mächtigkeit der Rotliegend-Steinsalzlager stark variiert (GRALLA 1988, JÄHNE et al. 2012). Allerdings weisen JÄHNE et al. (2012) anhand neuer Ergebnisse aus der Interpretation reflexionsseismischer Daten darauf hin, dass im Bereich der deutschen Nordsee die halotektonische Mobilisation der Abfolgen des Ober-Rotliegend II häufig eng im Zusammenhang mit Störungsmustern im Prä-Zechstein steht und dort keine weitreichende Mobilisierung festzustellen ist.

Im gesamten Verbreitungsgebiet der Rotliegend-Salinare liegen die stratiformen Steinsalzlager deutlich tiefer als 4000 m u. NN (DOORNENBAL & STEVENSON 2010). Das Vorkommen von Rotliegend-Steinsalz in geringeren Tiefen ist mit den Doppel-Salinar-Strukturen verbunden. Vereinzelt reichen diese Doppel-Salinar-Strukturen in Schleswig-Holstein bis an die Geländeoberfläche (z. B. Lieth bei Elmshorn, Segeberg; WEBER 1977). In Schleswig-Holstein wurden Kavernen im haselgebirgsähnlichen Rotliegend-Salinar, das strukturell bedingt nur in geringer Tiefe vorkommt, gesolt. Trotz eines wechselnden Tongehaltes zwischen 20 % und 50 % ist das Rotliegend-Salinar im Bereich der Salzstöcke für die soltechnische Realisierung der Kavernen geeignet, wobei der Tongehalt von 40 % möglichst nicht überschritten werden sollte. Vorteilhaft für die Erstellung der Kavernen ist das Fehlen von massiven Anhydrit-Bänken und Kaliflözen. Beispiele für die Nutzung sind die Kavernen in den Salzstöcken Heide (Haselgebirge mit etwa 15 % Tonanteil) und Honigsee (WEBER 1977, RÜHL 1992).

2.2 Zechstein-Salinar

Der Zechstein (Oberperm) ist eine lithostratigraphische Einheit im Rang einer Gruppe, die vom Liegenden zum Hangenden in die Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formationen unterteilt wird (Abb. 9; KÄDING 2005, STDK 2012). In allen sieben Formationen sind Steinsalzlager in unterschiedlicher Mächtigkeit und Verbreitung entwickelt (FRISCH & KOCKEL 2003), die in Norddeutschland sowie teilweise bis nach Thüringen, Süd-Hessen und Nord-Bayern nachgewiesen wurden.

System	Gruppe	Formation
Perm	Zechstein	Fulda
		Friesland
		Ohre
		Aller
		Leine
		Staßfurt
		Werra

Abb. 9: Stratigraphische Gliederung des Zechstein; Entstehungszeitraum von Steinsalzlagern blau gekennzeichnet (nach: KÄDING 2005, STDK 2012).

Die ursprüngliche Verbreitung der Halit-führenden Schichtenfolge des Zechstein war bestimmt durch die Ausdehnung des NW-SE streichenden Südlichen Permbeckens³. Paläogeographische Hochlagen, welche die Verbreitung der salinaren Fazies im Zechstein mitbestimmten, waren im Nordwesten das Mittel-Nordsee-Hoch sowie im Norden und Nordosten das Ringkøbing-Fünen-Møn-Arkona-Hoch. Die südliche Verbreitungsgrenze der salinaren Fazies in Deutschland verlief etwa vom südöstlichen Brandenburg (Niederlausitz-Becken⁴) über die weit nach Süden reichenden Randsenken Thüringer Becken und Werra-Fulda-Becken. Im Nordwesten Deutschlands bildeten die Münsterland-Scholle und nördlich davon die Hunte-Schwelle, eine nach Norden ins Becken vorstoßende Schwellenregion. Westlich davon, im Emsland und in der Niederrheinischen Bucht, sind die marinen Ablagerungen des Zechsteinmeeres erneut bis weit nach Süden verbreitet (FRISCH & KOCKEL 2003).

Die salinare Beckenfazies ist durch z. T. sehr mächtige, marine, evaporitische Ablagerungen charakterisiert. Infolge mehrerer, vorwiegend aus dem Norden erfolgter Transgressionen des Zechstein-Meeres in das Südliche Permbecken und der Evaporation des Meerwassers unter ariden Klimaverhältnissen entstanden sieben zyklisch gegliederte Formationen des Zechstein (McCANN 2008, DOORNENBAL & STEVENSON 2010). Eine zyklische Abfolge der Beckenfazies besteht aus basalen feinklastischen Ablagerungen gefolgt von Karbonaten, die durch Evaporite überlagert werden. Die Abscheidung der Salzgesteine erfolgt in der Reihenfolge zunehmender Löslichkeit (Anhydrit, Steinsalz, z. T. Kali- und Magnesiumsalze). Im Bereich des Beckenrandes ist die salinare Schichtenfolge zunehmend durch Anhydrit, Karbonate und Klastika dominiert (vgl. Anlagen 3 bis 7; KÄDING 2005). Eine grobklastische Randfazies ist großflächig im nördlichen Baden-Württemberg, in NE-Bayern, am östlichen Rand des Rheinischen Schiefergebirges und am Rand des Thüringischen Schiefergebirges entwickelt (LANGBEIN & SEIDEL 2003b, RUPF & NITSCH 2008).

Die Basis des Steinsalzes kann am Südrand des Norddeutschen Beckens in wenigen hundert Metern liegen, zum Beckenzentrum sinkt sie in Tiefen von über 5000 m ab

³ Norddeutsches Becken ist der zentrale Teil des Südlichen Permbeckens

⁴ Lausitzer Senke, Lausitzer Lagune

(KRULL et al. 2004). In Abhängigkeit von der paläogeographischen Position innerhalb des Beckens und der synsedimentären Tektonik zu Beginn des Zechstein (insbesondere in der Werra-Formation) variieren Verbreitung, Fazies und Mächtigkeit der Steinsalzlager. Im Mesozoikum und im Känozoikum führten halokinetische Prozesse, z. T. initiiert durch aktive Störungen im Untergrund oder durch hohe Deckgebirgsmächtigkeiten, zur Entstehung zahlreicher Salzstrukturen im Norddeutschen Becken (Abb. 10). Flach lagernde Steinsalzschieben mit mehreren zehner Metern Mächtigkeit und regionaler Verbreitung sind daher entweder auf intern durch Anhydrit- und Karbonat-Wälle differenzierte Senken im südlichen Randbereich des Beckens beschränkt oder kommen in Regionen vor, in denen nur unbedeutende halokinetische Fließvorgänge abgelaufen sind.

Die regionalen Ausprägungen der einzelnen Zechstein-Formationen werden nachfolgend für einzelne Gebiete beschrieben. Gebiete mit flach lagernden Steinsalzfolgen des Zechstein sind (Abb. 10):

- Niederrhein-Ems-Gebiet
- Werra-Fulda-Becken (inklusive Fränkisches Becken)
- Thüringer Becken
- Calvörde-Scholle
- SE-Brandenburg (Lausitzer Lagune)
- Solling-Becken⁵

Im Niederrhein- und im Werra-Fulda-Becken sind insbesondere Steinsalzlager der Werra-Formation verbreitet. Im Thüringer Becken wurden Steinsalzlager mit über 100 m Mächtigkeit in den Ablagerungen der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formationen nachgewiesen und in der „Lausitzer Lagune“ in SE-Brandenburg insbesondere in der Werra-Formation. Auf der Calvörde-Scholle, einer oberkretazisch-alttertiär herausgehobenen geologischen Struktureinheit, ist das Staßfurt-Steinsalzlager über 100 m mächtig, die Steinsalzlager der Leine-Formation erreichen mehrere zehner Meter Mächtigkeit. Im Solling-Becken kommen mächtige Steinsalzlager in den Staßfurt-, Leine- und Aller-Formationen vor (vgl. Anlagen 3 bis 7; KRULL et al. 2004).

⁵ Mittelweser-Gebiet, Weser-Senke

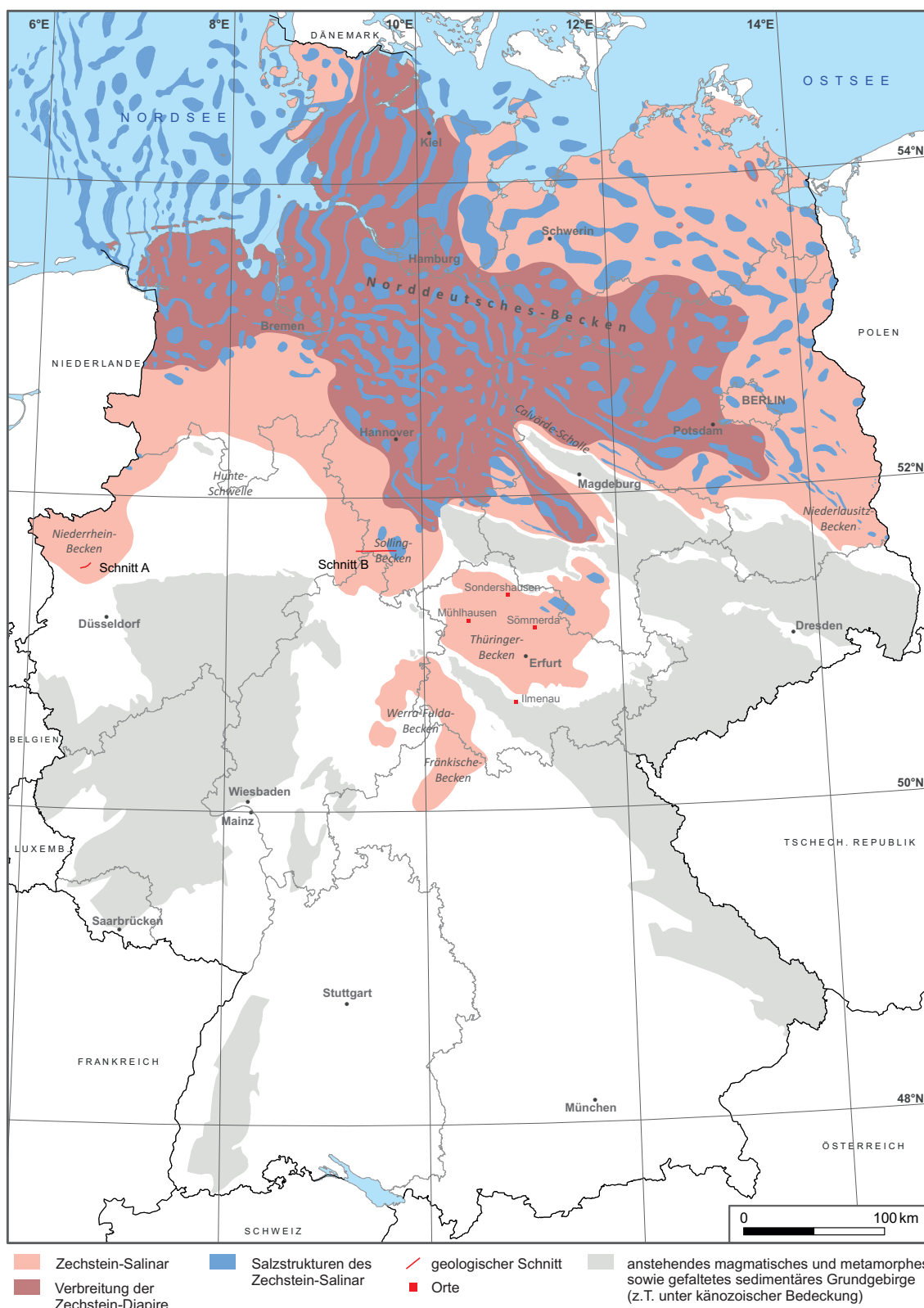


Abb. 10: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Zechstein-Salinare in Deutschland (nach: KULICK et al. 1984, FREUDENBERGER & SCHWERT 1996, KRULL et al. 2004), Verbreitung der Zechstein-Salzstrukturen nach REINHOLD et al. (2008).

Im Niederrhein-Becken sind flach lagernde Steinsalzschiechten der Werra-Formation in einer Region verbreitet, die eine SW-NE-Ausdehnung von ca. 120 km aufweist und etwa 30 km bis 50 km breit ist (TEICHMÜLLER 1957). Das Steinsalzvorkommen in diesem Randbecken des Zechsteinmeeres ist durch syndementär aktive Grabenstrukturen bestimmt, wodurch Fazies, Mächtigkeit und Lagerungsverhältnisse der Steinsalzlager regional stark variieren (Anlage 8; WOLF 1985, HISS & MILBERT 1983). In Grabenpositionen kann die Mächtigkeit des Steinsalzes der Werra-Formation Werte zwischen etwa 200 m und 450 m erreichen (Bohrung Xanten nach LANDGRÄBER 1935: 476 m und bei Borth 185 m). In den Hochlagen (Horst-Strukturen) liegt die Mächtigkeit des Steinsalzes meist deutlich unter 100 m, z. T. fehlt es gänzlich. Als weitere Ursachen für die auftretenden Mächtigkeitsschwankungen können Salzablaugungen, insbesondere auf den Hochschollen, aber auch in geringerem Maße halokinetische Prozesse angenommen werden (Abb. 11).

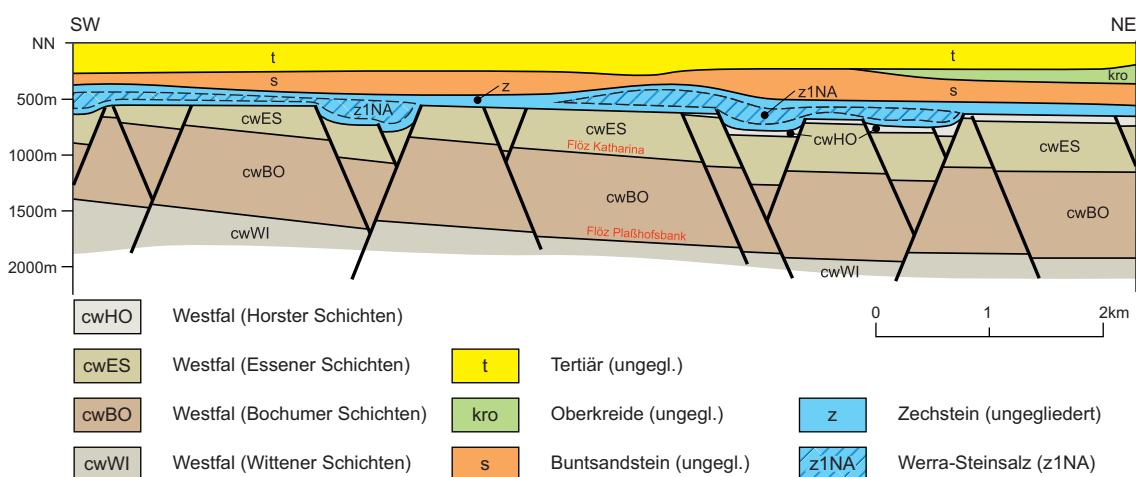


Abb. 11: Beispiel für die Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine im Niederrhein-Becken; Schnitt A in Abb. 10 (WOLF 1985, verändert).

Die tektonisch starke Zergliederung des Untergrundes im Niederrhein-Becken (kleinräumige Graben-Horst-Tektonik) führte dazu, dass die Tiefenlage der Steinsalzlager über kurze Distanzen z. T. um mehrere hundert Meter variiert (Abb. 11; FULDA 1938, ZIMMERMANN 1935). Generell nimmt die Tiefenlage der Steinsalzlager von SE nach N und NW zu, im Süden mit Werten von etwa 450 m u. GOK⁶ und im N in Teufen⁷ von 1000 m u. GOK und mehr. Vor allem in Regionen, in denen das Steinsalzlager eine hohe Mächtigkeit erreicht, ist eine z. T. etwa 40 m mächtige Kalisalz-führende Schichtenfolge (Wechselagerung von Steinsalz und Carnallit sowie z. T. Hartsalz) in das Steinsalzlager eingeschaltet. Dadurch kommt es zu einer Aufteilung des Steinsalzlagers in ein „Oberes“ und „Unteres Steinsalz“ (Anlage 8; TEICHMÜLLER 1958, HISS & MILBERT 1983, WOLF 1985). Im südlichen Emsland liegen die salinar geprägten Sedimente des Zechstein über 1000 m tief (DOORNENBAL & STEVENSON 2010),

⁶ m u. GOK eine Abkürzung für Meter unter Geländeoberkante.

⁷ In diesem Bericht wird die bergmännische Bezeichnung Teufe als Angabe für die Tiefe unter der Geländeoberfläche verwendet.

wobei lokal Salzstrukturen (Gildehaus Süd, Gronau-Epe) durch die Akkumulation von Werra-Steinsalz entstanden sind.

Das Werra-Fulda-Becken und das Fränkische Becken, paläogeographisch zwischen dem Rheinischen Massiv und der Böhmisches Masse gelegen, waren rheinisch streichende Senkungsgebiete, in denen Steinsalzlager in der Werra-Formation vorkommen. Die in diesen Beckenstrukturen nachgewiesenen, flach lagernden Steinsalzschieben der Werra-Formation wurden, insbesondere im Werra-Fulda-Becken, durch den Bergbau intensiv untersucht und mehrfach beschrieben (z. B. HOPPE 1960, KÄSTNER 1972, HAASE 1976, KÄDING 1978, SESSLER 1987, JAHNE 1988, BECKER & BECHSTÄDT 2006).

In weiten Teilen des Werra-Fulda-Beckens wird das Steinsalzlager der Werra-Formation durch die Kaliflöze Thüringen und Hessen dreigeteilt. Dabei sind die Kaliflöze Thüringen und Hessen durch etwa 50 m bis 80 m Steinsalz voneinander getrennt (Anlage 3) (BLASIG 1993, BEER 1996). Das Steinsalzlager, inklusive der Kaliflöze Thüringen und Hessen, ist im Werra-Becken maximal bis etwa 300 m und im Fulda-Becken bis etwa 220 m mächtig (Anlage 3). Östlich von Bad Hersfeld liegen die Ablagerungen des Zechstein in 600 m bis 1000 m Tiefe (AHORNER & SOBISCH 1988) und südöstlich von Kassel in nur einigen hundert Meter Tiefe. Der bergmännische Abbau erfolgt in Tiefen von 400 m bis 1000 m (BLASIG 1993).

Auch im Werra-Fulda-Becken sind Variationen im Aufbau und in der Zusammensetzung der salinaren Schichtenfolgen primär auf Unterschiede in der Beckenposition bzw. paläogeographischen Lage des Ablagerungsraumes und synsedimentäre tektonische Differenzierungen der Sedimentbecken zurückzuführen (SCHARBRODT & BAUMANN 1986). Zusätzlich verursachten nachfolgende salzkinematische Prozesse (HOPPE 1960, HAASE 1976) und Ablaungsprozesse in Gebieten ohne hinreichende hydraulische Abdichtung ebenfalls Mächtigkeitsschwankungen in der salinaren Schichtenfolge (BAURIEGEL 2004).

Eine Besonderheit der Region des Werra-Fulda-Beckens steht im Zusammenhang mit dem tertiären Vulkanismus in der Rhön, bei dem Basaltgänge in die Steinsalzvorkommen des Werra-Fulda-Gebietes eingedrungen sind. Dadurch kam es zu CO₂- und N₂-Gaseinschlüssen im Salz (sogenanntes „Knistersalz“; BLASIG 1993, POHL 2005). Dieses „mineralgebundene“ Gas steht oft unter einem hohen Druck. Bei der bergmännischen Erschließung von großen gasgefüllten Gebirgsbereichen kann es zu explosionsartigen Gasausbrüchen kommen. Einer der größten bekannten Ausbrüche ereignete sich unter Freisetzung von 700.000 t CO₂ und 65.000 t Salz in der Kaligrube Menzengraben im Werra-Fulda-Revier (POHL 2005). Zudem informierte BEER (1996) über vereinzelte Salzlösungsvorkommen mit einem Volumen von mehreren tausend m³ im Salinar sowie über wenige Zuflüsse von gesättigten Salzsolen, die aus dem Liegenden des Steinsalzes der Werra-Formation gespeist werden und Schüttungen bis 100 l/min aufweisen.

Das Fränkische Becken im Südosten ist durch die Spessart-Rhön-Schwelle vom Werra-Fulda-Becken getrennt. In diesem vergleichsweise kleinen Teilbecken wurden maximal etwa 180 m Steinsalz nachgewiesen, wobei Steinsalzlager ohne Kaliflöze oder die Kaliflöze selbst nur in sehr geringer Mächtigkeit vorkommen (KÄSTNER 1972). Die Steinsalze des Fränkischen Beckens zeigen eine große laterale Faziesvariabilität, was auf ein sehr kleinräumiges salinares Becken hindeutet. In Richtung Beckenrand nimmt die Mächtigkeit des Steinsalzes schnell ab und es kommt zunehmend zu tonigen Sedimenteinschaltungen. Infolge von Subrosion weisen die salinaren Schichten der Werra-Formation im Fränkischen Becken z. T. nicht mehr ihre ursprüngliche Mächtigkeit auf.

Im Thüringer Becken bewirkten paläogeographisch wirksame Schwellen und Senken (z. B. die Eichsfeld-Schwelle, aber auch kleinere zechsteinzeitlich entstandene Karbonat- und Sulfatwälle) sowie das naheliegende ehemalige Festland starke laterale und vertikale Veränderungen von Mächtigkeit und Fazies innerhalb der Schichtenfolgen des Zechstein (KÄSTNER 1996).

Die größten Tiefenlagen der Basis der zechsteinzeitlichen Schichtenfolge befinden sich in der paläogeographisch aktiven, SW-NE streichenden und nach NE einfallenden Thüringischen Senke, die durch die NW-SE streichende Hermundurische Scholle in einen südwestlichen und einen nordöstlichen Teil getrennt wird. Die Basis der Ablagerungen des Zechstein befindet sich am Beckenrand nahe der Oberfläche und im Beckenzentrum in Tiefen bis etwa 2000 m (ZANDER & HUCKRIEDE 2011).

Die Steinsalzlager der Werra-Formation sind im Thüringer Becken in größerer Mächtigkeit in einem NW-SE streichenden Gebiet zwischen Mühlhausen und Ilmenau verbreitet (nordöstlich des Thüringer Waldes; siehe Abb. 10). In dieser Region erreicht das Steinsalzlager eine Mächtigkeit von etwa 200 m und wird teilweise durch einen wenige Meter mächtigen grauen Ton überlagert (Anlage 3). Nach Nordosten nimmt seine Mächtigkeit bis auf wenige zehner Meter ab (ZANDER & HUCKRIEDE 2011). Innerhalb des hellgrauen Werra-Steinsalzes treten in diesem Gebiet Anhydrit-Schlieren und -Bänke sowie Tonflocken auf. Das südliche und insbesondere das südöstliche Randgebiet der Steinsalzverbreitung der Werra-Formation ist durch klastische Einschaltungen innerhalb der salinaren Ablagerungen gekennzeichnet (LANGBEIN & SEIDEL 2003b).

Das häufig reinere Steinsalz der Staßfurt-Formation weist die höchsten Mächtigkeiten im NE der Thüringischen Senke (100 m bis 500 m) auf. Dort kam es zu halokinetischen Mobilisierungen des Salzes und es entstanden Salzkissen (z. B. Rosslebener Sattel). In südliche Richtungen, zum Rand der Thüringischen Senke hin, nimmt die Mächtigkeit des Steinsalzlagers ab. In das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation ist das bis zu 20 m mächtige Kaliflöz Staßfurt eingeschaltet (Anlage 4). Das Steinsalzlager befindet sich im

NE der Thüringischen Senke, außerhalb der Salzstrukturen, in Tiefen von etwa 800 m bis 1000 m und im Südosten dieser Senke deutlich unterhalb 1000 m.

Im Südharz-Kalirevier, einer dem Harz südlich vorgelagerten Region, sind weitere Gebiete mit größerer Mächtigkeit der Steinsalzlager der Staßfurt-Formation bekannt, z. B. bei Sömmerda über 200 m. Auch ist eine größere Mächtigkeit der Steinsalzlager der Leine-Formation (bis 130 m) im Südharz-Kalirevier westlich von Sondershausen verbreitet (Anlage 5).

Das Steinsalz der Leine-Formation ist im nördlichen Thüringer Becken verbreitet und erreicht dort maximal etwa 40 m Mächtigkeit. Die Mächtigkeit der Schichtenfolgen der Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formationen sind deutlich geringer, insgesamt unter 100 m.

Die Calvörde-Scholle (Abb. 10) hat eine Ausdehnung in WNW-ESE-Richtung von etwa 63 km und in SSW-NNE-Richtung von etwa 20 km. Auf der gesamten Calvörde-Scholle war der salinare Zechstein in typischer Art der zentralen Beckenfazies entwickelt, Steinsalzlager der Werra-Formation fehlen. Die höchste Mächtigkeit weist das Steinsalzlager in der Staßfurt-Formation auf, in der Leine- und in der Aller-Formation sind die Steinsalzlager bereits deutlich weniger mächtig und die jüngeren Formationen des Zechstein erreichen insgesamt nur wenige Meter Mächtigkeit (Anlagen 5 bis 7).

Über weite Bereiche der Calvörde-Scholle weist das Staßfurt-Steinsalz Mächtigkeiten zwischen etwa 100 m und 300 m auf. Geringere Mächtigkeiten bis hin zum Fehlen des Steinsalzlagers werden für das Gebiet des Wannefelder Sattels (bedingt durch Subrosion) und den Bereich des Haldenslebener Abbruchs sowie lokal in den Umrandungen der Salinarstrukturen Colbitz, Zobbenitz und Dannefeld (Salzabwanderung) beschrieben (BURCHARDT et al. 1980). Die Basis der Steinsalzlager der Staßfurt-Formation liegt im SW in Tiefen maximal zwischen 1500 m und 1800 m sowie im NW großflächig in Tiefen zwischen 1000 m und 1200 m. Im NE, im Bereich des Wannefelder Sattels, treten mit 300 m u. GOK bis 400 m u. GOK die geringsten Tiefenlagen auf.

Bereichsweise sind im Salinar Änderungen der Mächtigkeiten und der Zusammensetzung sowie Verfaltungen von teilweise beträchtlichen Ausmaßen zu beobachten, so z. B. im Bereich der Zielitzer Zentralstörung, einer S-förmigen Großfalte mit einer Sprunghöhe von 150 m (BEER 1996). Kalisalze kommen mit dem überwiegend carnallitisch ausgebildeten Kaliflöz Staßfurt in der Staßfurt-Formation vor (BURCHARDT et al. 1980). Auf der Calvörde-Scholle erreicht die Mächtigkeit des Steinsalzlagers der Leine-Formation maximal etwa 145 m, inklusive des eingeschalteten, überwiegend sylvinisch ausgebildeten Kaliflöz Ronnenberg. Das Steinsalzlager in der Aller-Formation ist etwa 50 m mächtig.

Südost-Brandenburg war im Zechstein ebenfalls ein beckenrandliches Ablagerungsgebiet, in dem eine Sabkha- und Karbonatplattform-Fazies vorherrschte und es im Niederlausitz-Becken („Lausitzer Lagune“) zur Entstehung von Steinsalzlager der Werra- und Staßfurt-Formationen kam. Im Vergleich zu den Steinsalzlager der Staßfurt-Formation wurde die Fazies der salinaren Schichtenfolge der Werra-Formation im Niederlausitz-Becken durch synsedimentäre, bruchtektonische Aktivitäten sehr stark beeinflusst. Die Steinsalzlager der Werra-Formation sind bis zu 400 m mächtig (Anlage 3; KRULL et al. 2004) und liegen in Richtung SE in immer geringeren Tiefen, mindestens aber in mehreren hundert Metern (BEBIOLKA et al. 2011, GÖTHEL 2012, HÖDING 2014).

Im Solling-Becken (Abb. 10) wurde eine 700 m bis 800 m mächtige salinare Schichtenfolge des Zechsteins erbohrt, in der Steinsalzlager insbesondere in der Staßfurt-Formation vorkommen (KÄDING 1987). Nach KÄDING (1987) hat das Staßfurt-Steinsalz eine Mächtigkeit von etwa 200 m bis 500 m, das Leine-Steinsalz von etwa 50 m bis 80 m sowie das Aller-Steinsalz von etwa 40 m bis 70 m (Anlagen 4 bis 6). Die Schichtenfolgen der Ohre- und Friesland-Formationen sind durch pelitische Ablagerungen dominiert. Das Kaliflöz Staßfurt ist in Hartsalzfazies entwickelt. Die Steinsalzlager der Leine-Formation sind im Vergleich zu denen der Staßfurt-Formation oft durch höhere Sulfat- und Tonanteile charakterisiert, Kaliflöze fehlen (KÄDING 1987). Die regional flach lagernden Steinsalzlager liegen in Tiefen um die 1000 m (Abb. 12). Lokal wurden die Lagerungsverhältnisse und die Mächtigkeit der Steinsalzlager durch halokinetisch entstandene Salzkissen (z. B. Volpriehausen, Silberborn) verändert.

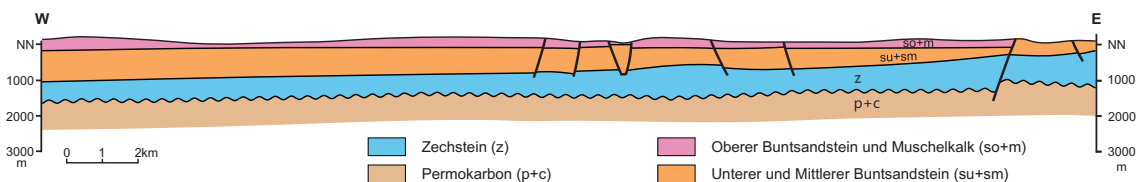


Abb. 12: Lagerungsverhältnisse der salinaren Schichtenfolge des Zechstein (z) im Solling-Becken, Schnitt B in Abb. 10 (nach: BALDSCHUHN et al. 2001).

2.3 Alpines Salinar – Haselgebirge

In Oberbayern sind zwei größere Steinsalzverbreitungsgebiete bekannt (Abb. 13), welche zu einer unregelmäßigen Kette von einzelnen Salz- und Gipsvorkommen gehören, die innerhalb des Deckenkomplexes der Nördlichen Kalkalpen auftreten. Das gesamte Verbreitungsgebiet dieser Vorkommen erstreckt sich von Hall in Tirol (im Westen) über Bad Reichenhall, Bad Dürrenberg, Hallstatt und Altaussee bis nach Wien im Osten (SCHAUBERGER 1986, EXLER 1987, KELLERBAUER 1996).

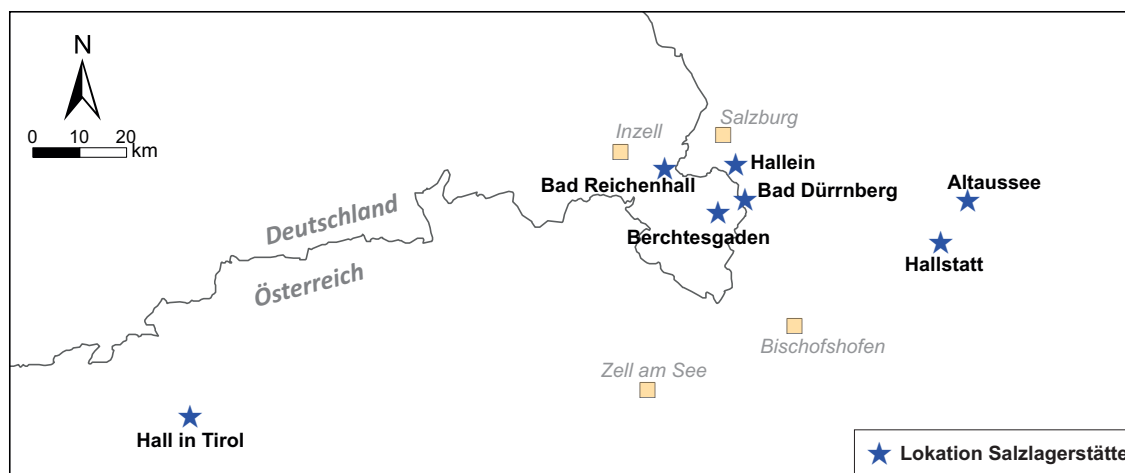


Abb. 13: Alpine Salzlagertätten im Bereich der Zentralen Nördlichen Kalkalpen (nach: LEITNER & NEUBAUER 2011, SCHORN et al. 2013a).

Die Salzvorkommen sind Teil der ostalpinen Haselgebirgsformation, die Ablagerungen aus dem Zeitraum Oberes Perm bis Untere Trias enthält (SPOETL 1989). Die oberpermischen, marinen Evaporite entstanden in einem Teilbecken der Tethys und weisen wiederholt einen deutlich terrestrischen Sedimentationseinfluss auf. In Folge dessen kam es zur Ablagerung einer Wechselfolge von Salz- und Tonschichten, untergeordnet treten anhydritische Schichten auf. Kaliflöze sind nicht entstanden (SCHAUBERGER 1986, PLÖCHINGER 1996, KELLERBAUER 2003).

Angaben zur ursprünglichen Mächtigkeit der salinaren Schichtenfolge sind nicht möglich, da aus einer Vielzahl von Deformationsprozessen (halokinetische Prozesse, Massenverlagerungen und alpinotype Tektonik) sehr komplizierte Lagerungsverhältnisse resultierten und die laterale Verbreitung der Steinsalzvorkommen häufig durch Störungen begrenzt ist (PLÖCHINGER 1990, SCHORN et al. 2013b). Nach SCHAUBERGER & ZANKL (1976) weist der Internbau der Salzlagertätte Bad Reichenhall zudem ein halokinetisch verursachtes Fluidalgefüge auf, das auf eine sekundäre Akkumulation des Salzes hinweist. Auch in Berchtesgaden-Hallein und im Hallstatt-Gebiet (Österreich) erreichen Salzstock-ähnliche Strukturen mehr als 1000 m Mächtigkeit (DOBEN & RISCH 1996).

Die heutige lithologische Zusammensetzung des evaporitreichen Haselgebirges ist generell durch eine chaotische Mischung aus Salz-, Gips- und Tongestein geprägt, in der Zentimeter bis Meter große Nebengesteinskomponenten (Schiefer, Schluff und Sandstein, Anhydrit, Karbonate und seltener Magmatite) in einer oft tonigen Steinsalzmatrix auftreten (SPOETL 1989, DOBEN & RISCH 1996, LEITNER et al. 2014).

Bezogen nur auf den Halit-führenden Teil der Haselgebirgsformation besteht diese im Mittel zu 50 % aus Steinsalz, zu 40 % aus Tongestein und zu etwa 10 % aus Anhydrit (SCHAUBERGER 1986). Die Durchmischung mit meist feinklastischen Sedimenten kann so weit gehen, dass der Durchschnittsgehalt von Steinsalz in einer Lagerstätte auf 30 % absinkt (EXLER 1987). Für reine Steinsalzlager werden Höchstwerte von 10 m Mächtigkeit angegeben (SCHAUBERGER 1955).

In den ostalpinen Steinsalzlagerstätten Bad Reichenhall, Berchtesgaden und Hallein sind i.e.S. vorrangig die folgenden Gesteinstypen am Aufbau der salinaren Schichtenfolge beteiligt (SCHAUBERGER 1986):

- „Bänder- bzw. Liniensalz“ (Anteil Steinsalz > 90 %) ⁸
- „Kerngebirge“ (Anteil Steinsalz 70 % bis 90 %)
- „Haselgebirge“ (Anteil Steinsalz 10 % bis 70 %); einzelne reine Steinsalzschieben fehlen
- „Blättersalzgebirge“ (Anteil Steinsalz 20 % bis 35 %); insbesondere als sekundäres Steinsalz in den Tonsteinklüften
- Anhydritische Ton- und Dolomitgesteine (Anteil Steinsalz < 10 %)

Anhand der in der salinaren Schichtenfolge dominierenden Gesteinstypen sowie ihrer petrographischen Zusammensetzung werden in den alpinen Salzlagerstätten mehrere Salzgebirgsarten unterschieden. Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass in den Salzlagerstätten Hallein und Berchtesgaden vorwiegend „Rotsalzgebirge“ und „Grüntongebirge“ sowie eine Mischung dieser beiden Salzgebirgsarten vorkommen. In Bad Reichenhall sind dagegen nur „Buntes Salztongebirge“ und anhydritisches „Grausalzgebirge“ sowie ein Übergangsgebirge dieser beiden entwickelt. Hinsichtlich ihrer petrographischen Zusammensetzung unterscheiden sich die beiden Steinsalzvorkommen in Oberbayern somit deutlich (SCHAUBERGER & ZANKL 1976, SCHAUBERGER 1986, EXLER 1987). Insgesamt weist im Salzbergwerk Berchtesgaden das Halit-führende Gebirge einen durchschnittlichen Gehalt von etwa 50 % Halit auf, die Nebengesteinskomponenten bestehen vorwiegend aus Tongestein (inklusive geringmächtiger sulfatischer Lagen; LEITNER et al. 2014).

⁸ Durch tonige oder anhydritische Einschaltungen geschichtete Steinsalzfolgen werden je nach Stärke und Häufigkeit der Schichten als Bänder- oder Liniensalz bezeichnet.

Tab. 2: Lithologische Merkmale der Salzgebirgsarten in Oberbayern (aus: SCHAUBERGER & ZANKL 1976 (gekennzeichnet durch *), SCHAUBERGER 1986)

Salzgebirgsart	Gesteinstyp (dominiert)	Begleitkomponenten	Klastische Bestandteile	Anteil in den Salzlagerstätten [%]		
				Bad Reichenhall	Berchtesgaden	Hallein/Dürrenberg
Rotsalzgebirge	Bändersalz, Kerngebirge	Anhydrit	Salzton	-	28 / 30*	30 / 30*
Grüntongebirge	Linien- und Haselgebirge z. T. Blättersalz	Anhydrit Tonanhydrit	Salzton	-	40 / 47*	37 / 47*
rot/grünes Übergangsgebirge	Hasel-, und Blättersalzgebirge	Anhydrit	Salzton, (Sandstein)	-	16	16
Buntes Salztongebirge	Haselgebirge	Anhydrit	Salzton, (Salzsandstein)	39*	16 / 18*	15 / 14*
Grausalzgebirge	Hasel-, und Blättersalzgebirge	Anhydrit	Salzton	23*	-	2 / 2*
buntes/graues Übergangsgebirge	Steinsalz als Grundmasse (50% bis 60%)	Anhydrit & anhydritischer Dolomit		38*	5*	7*

Im Raum Berchtesgaden bis Bad Reichenhall wird seit Jahrhunderten in größerem Umfang Steinsalz aus den salinaren Schichten der Haselgebirgsformation gewonnen. So wird durch das Salzbergwerk Berchtesgaden (Berchtesgaden/Bad Dürrenberg) ein Salzvorkommen erschlossen, das eine Länge von 0,5 km bis 2 km und eine Breite von etwa 7 km besitzt und mindestens 600 m, evtl. sogar mehr als 1000 m mächtig ist (LEITNER et al. 2011, LEITNER et al. 2014). In Bad Reichenhall hat der Salzkörper bis zur Staatsgrenze eine E-W-Erstreckung von etwa 4,5 km und senkrecht dazu etwa 2,5 km und reicht bis in eine Tiefe von über 1200 m (SCHAUBERGER & ZANKL 1976).

In den Salzbergen (Berchtesgaden, Bad Dürrenberg, Hallein) reicht die Subrosion bis etwa 80 m u. GOK. Das aufgrund natürlicher Ablaugung durch Grundwasser entstandene salzfreie Haselgebirge bedeckt das Steinsalzvorkommen. Durch die geringe Wasserdurchlässigkeit der Rückstandssedimente (Residualgestein, bestehend aus Tongestein, Anhydrit und Gips) sind die Steinsalzvorkommen vor weiterer Ablaugung geschützt (PLÖCHINGER 1990, KELLERBAUER 2003). Dagegen wurde im Talkessel von Bad Reichenhall die Ablaugung der Salze auch im Tiefenbereich zwischen etwa 450 m u. GOK bis 500 m u. GOK nachgewiesen (SCHAUBERGER & ZANKL 1976).

Mit der bergmännischen Erschließung der Lagerstätten Bad Reichenhall, Altaussee sowie Bad Dürrenberg und Hallein wurden einzelne unterirdische Zuflüsse von gesättigten oder z. T. übersättigten Salzsolen bekannt. Weiterhin sind in den ostalpinen Salzlagerstätten Gaszutritte beobachtet worden, die in Form von eruptiven Gasbläsern auftraten oder zu erhöhten Gaskonzentrationen in schlecht bewetterten Grubenräumen führten. Es handelt

sich bei diesen Gasen in erster Linie um Stickstoff und Methan, untergeordnet um Wasserstoff und weitere Kohlenwasserstoffe (z. B. C_6H_6), Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff (SCHAUBERGER 1986).

2.4 Röt-Salinar

Die Röt-Formation ist die lithostratigraphische Einheit, die dem Zeitraum des Oberen Buntsandstein der Germanischen Trias entspricht (Abb. 14). Insbesondere in Norddeutschland werden die Ablagerungen des unteren Teils der Röt-Formation von einer stark evaporitisch geprägten Beckenfazies dominiert, in der Steinsalzlager in der Vitzenburg-Subformation und in der Glockenseck-Subformation vorkommen. Die zwischengeschaltete Göschwitz-Subformation und der obere Teil der Röt-Formation sind im Beckenzentrum vor allem durch pelitische Sedimente dominiert (LEPPER et al. 2013).

System	Gruppe / Subgruppe	Formation	Subformation
Trias	Buntsandstein	Oberer Buntsandstein	Röt
			Dornburg
			Gleina
			Karsdorf
			Glockenseck
			Göschwitz
			Vitzenburg
		Mittlerer Buntsandstein	
		Unterer Buntsandstein	

Abb. 14: Stratigraphische Gliederung des Oberen Buntsandstein; Entstehungszeitraum von Steinsalzlager blau gekennzeichnet (nach: LEPPER et al. 2013).

Die Evaporite entstanden unter ariden Klimaverhältnissen in einem flachen Meer (Typ Endsee), in dem sich durch Verdunstung und einen stark eingeschränkten Wasseraustausch hochsalinare Lösungen anreicherten, aus denen Steinsalze auskristallisierten (FEIST-BURKHARDT et al. 2008, LEPPER et al. 2013).

Die nachfolgenden generellen Beschreibungen von charakteristischen Merkmalen der Halit-führenden Schichtenfolgen basieren vorrangig auf den Zusammenstellungen der Deutschen Stratigraphischen Kommission über die Stratigraphie des Buntsandstein (DSK 2013), speziell RÖHLING (2013), sowie den Ausführungen von FRISCH & KOCKEL (2003).

Das Vitzenburg-Steinsalzlager ist im Liegenden und Hangenden durch sulfatische Schichtenfolgen begrenzt (Basal- und Deckanhydrit). In Abhängigkeit von der paläogeographischen Lage im Becken ist der Basalanhydrit wenige Zentimeter bis zu mehreren Metern mächtig. Der wenige zehner Meter mächtige Deckanhydrit ist durch Einschaltungen von

Ton- und Siltsteinlagen teilweise stark gegliedert und unregelmäßig mit Steinsalz durchsetzt. Das zwischen Basal- und Deckanhydrit liegende Vitzenburg-Steinsalzlager besteht aus meist mittel- bis grobkristallinen, oft stark rekristallisierten Steinsalzen unterschiedlicher Ausprägung. Das Vitzenburg-Steinsalzlager ist teilweise durch toniges oder anhydritisches Material gebändert, im oberen Teil des Steinsalzlagers treten drei horizontbeständige Anhydrit-/Ton-Mittel auf. Die Zwischenmittel bestehen aus anhydritischen Tonsteinen, in die im Beckenzentrum Anhydritbänke mit einer Mächtigkeit bis zu 2 m eingeschaltet sein können. In den beckenrandlicheren Gebieten (Subherzyn, Thüringer Senke, Lausitz) treten im oberen Teil des Vitzenburg-Steinsalzlagers bis zu drei Tonmittel auf. In Richtung zu den beckeninternen Schwellen und zum Beckenrand hin wird das im Norddeutschen Becken maximal 150 m mächtige Steinsalzlager aufgrund von Mächtigkeitsabnahmen seiner tieferen Schichten immer geringmächtiger. Die eingeschalteten Tonmittel ändern dagegen schwellenwärts kaum ihre Mächtigkeit.

Auch in der Glockenseck-Subformation ist das Steinsalzlager durch sulfatische Schichtenfolgen im Hangenden und Liegenden begrenzt. Allerdings ist die Verbreitung des Steinsalzlagers im Vergleich zu dem Steinsalzlager der Vitzenburg-Subformation deutlich eingeschränkt und die Mächtigkeit viel geringer (Anlage 9). Die maximale Mächtigkeit des Steinsalzlagers der Glockenseck-Subformation (10 m bis 20 m) ist auf die ehemals tiefer gelegenen Bereiche des Beckens beschränkt. Das Steinsalzlager ist vor allem in NW-Deutschland flächenhaft verbreitet. Im westlichen Mecklenburg dagegen erreicht das Steinsalzlager nur noch eine Mächtigkeit von wenigen Metern.

Zwischen den Ablagerungen dieser beiden salinarbetonten Subformationen sind z. T. karbonatische Ton-, Silt- und Feinsandsteine sowie untergeordnet auch dolomitische Schichten der Göschwitz-Subformation verbreitet, die mehrere Meter Mächtigkeit erreichen können.

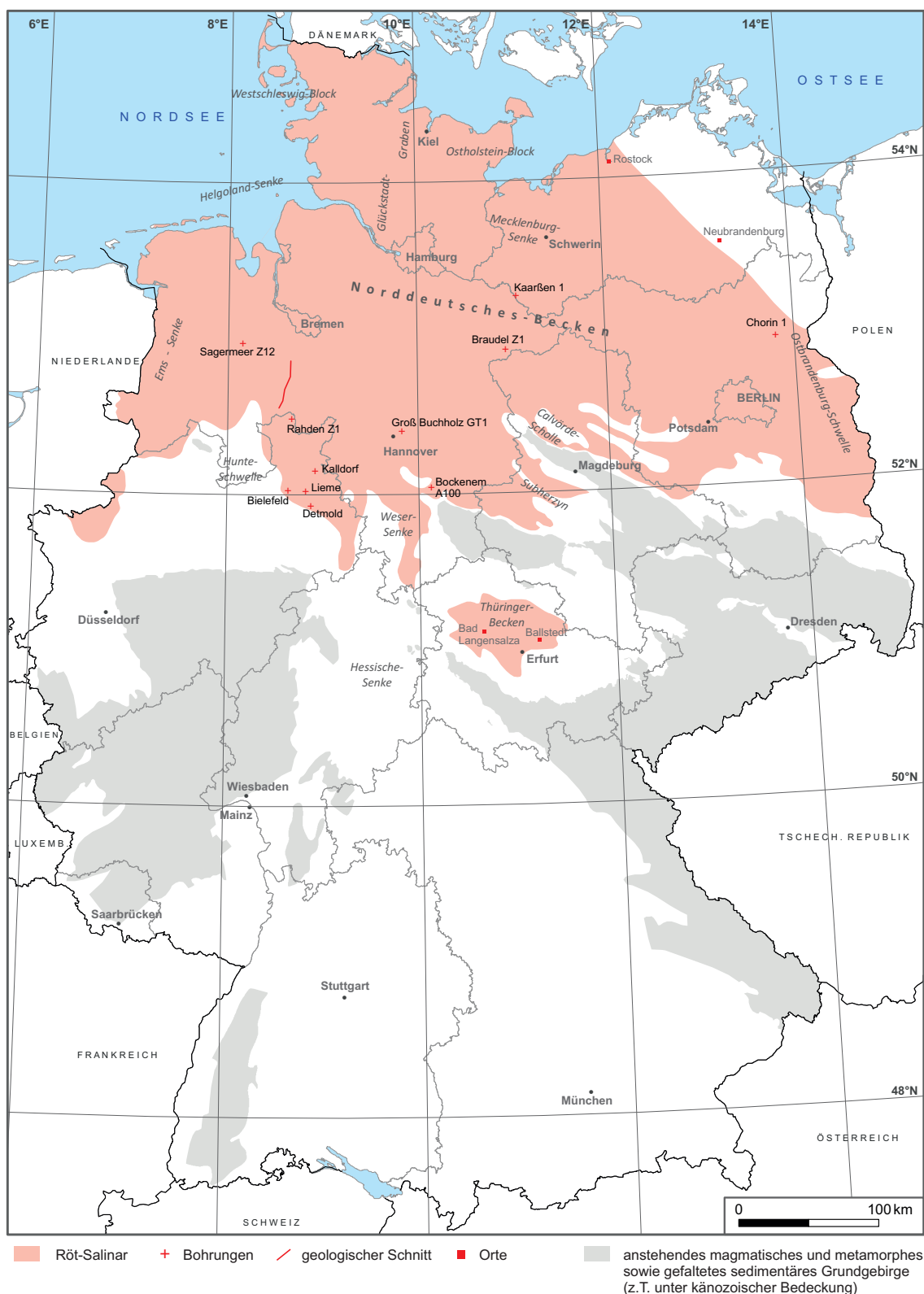


Abb. 15: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Röt-Salinare in Deutschland (nach: BEYWL et al. 1974, BEUTLER 2004, KRULL et al. 2004, RÖHLING, H.-G. & LEPPER 2013).

Die Hauptverbreitung der evaporitisch geprägten Beckenfazies der Röt-Formation (Steinsalz und Anhydrit) war durch die generelle WNW-ESE-Ausrichtung der Beckenachse des Südlichen Mitteleuropäischen Beckens bestimmt und reichte nach Süden bis ins Thüringer Becken und in die Hessische Senke hinein (Abb. 15; LEPPER et al. 2013). Regional wurden die Mächtigkeit und die Fazies der salinaren Ablagerungen durch paläogeographisch wirksame Schwellen und Senken im Becken beeinflusst. Bedeutende Schwellenstrukturen waren die Hunte-Schwelle (Mächtigkeit der Röt-Formation unter 100 m) und die Ostbrandenburg-Schwelle. Die Gebiete mit der höchsten Steinsalzmächtigkeit sind die nördliche Ems-Senke (Mächtigkeit der Röt-Formation mehr als 300 m), die Helgoland-Senke, der südliche Teil des Glückstadt-Grabens, der südwestliche Teil der Mecklenburg-Senke sowie die nördliche Hessische Senke bzw. Weser-Senke (Mächtigkeit der Röt-Formation mehr als 300 m). Im Thüringer Becken ist die halitisch geprägte Beckenfazies nur im Norden und im Westen verbreitet. Im südlichen Teil dieser Senke schließt sich eine breite Übergangszone mit vorwiegend pelitischen Sedimenten an, die über große Flächen auch geringmächtige halitische und sulfatische Einschaltungen enthalten kann (LANGBEIN & SEIDEL 1997).

Regional wurde die primäre Mächtigkeit der Röt-Steinsalzlager durch halokinetische, halotektonische und tektonische Prozesse sowie infolge von Subrosion verändert. Ein in Süd-Niedersachsen häufig beobachtetes Phänomen ist die an den Salzaufstieg gebundene Intrusion von Zechstein-Salzen in die salinar geprägte Röt-Formation (Bildung von „Salzkeilen“), welches dadurch eine deutliche Mächtigkeitszunahme aufweist (Abb. 16; BALDSCHUHN et al. 1998). Diese sekundäre Salzmobilisierung fand meist während der oberkretazischen Inversionsphase statt. Dabei wurde das Röt-Steinsalzlager stark tektonisch überprägt, teilweise ausgequetscht oder diente als Gleithorizont. Sekundäre Mächtigkeitsreduzierungen erfolgten infolge zunehmender sedimentärer Auflast durch schichtparallele Abwanderung des Röt-Salzes, vorwiegend aus den Bereichen von Randsenken der Salzstrukturen (FRISCH & KOCKEL 2003).

In Gebieten, in denen die Steinsalzlager der Röt-Formation zeitweise von weniger als 300 m bis 350 m Sediment bedeckt waren, werden intensiv subrodierte salinare Schichtenfolgen bzw. deren Residuen beobachtet, so z. B. oberhalb der zahlreichen Salzstrukturen sowie in Teilen des Subherzyns, auf der nach NE herausgehobenen Calvörde-Scholle, in Thüringen sowie flächig in Süd-Brandenburg (JUBITZ 1969, SEIDEL 2009).

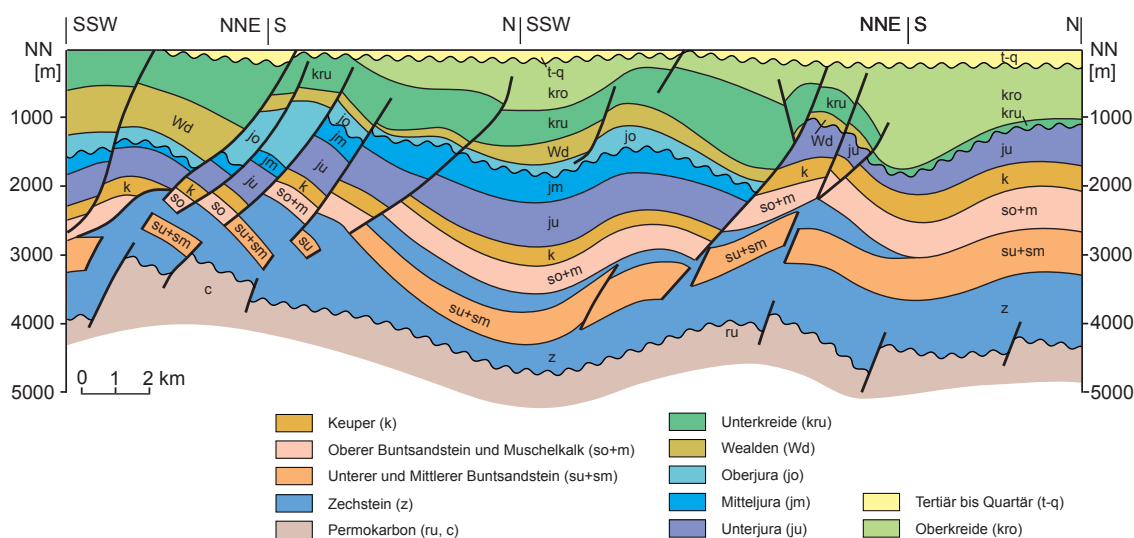


Abb. 16: Verdickung des Steinsalzlagers im Oberen Buntsandstein (so) infolge der Intrusion von Zechstein-Salzen (z), Lage des geologischen Schnitts in Abb. 15 (nach: BALDSCHUHN et al. 2001).

Die maximale Steinsalzmächtigkeit innerhalb der Röt-Formation von insgesamt etwa 150 m bis 170 m kommt in den genannten paläogeographischen Senken in NW-Deutschland vor, wobei sich die Sedimente heute in mehr als 2000 m Tiefe befinden (FRISCH & KOCKEL 2003, FEIST-BURKHARDT et al. 2008, DOORNENBAL & STEVENSON 2010, RÖHLING, H.-G. 2013). In SW-Mecklenburg und NE-Brandenburg liegen die etwa 100 m mächtigen Steinsalzlager in den Randsenken der Salzstrukturen z. T. etwa 4000 m tief (BEBIOLKA et al. 2011, BRANDES & OBST 2011). Auch im nördlichen Sachsen-Anhalt befindet sich das insgesamt etwa 90 m bis 120 m mächtige Steinsalzlager in mehreren 1000 m Tiefe (BENOX et al. 1997, RADZINSKI 2008a, BRANDES 2011).

Dagegen weist die Basis dieser evaporitischen Schichtenfolge im Thüringer Becken (Abb. 15) generell eine Tiefenlage von weniger als 700 m u. GOK auf (HUCKRIEDE & ZANDER 2011). Das Steinsalzlager ist im NE der Thüringer Senke bis nach Süden etwa bis zur Linie Bad Langensalza-Erfurt-Ballstedt ca. 50 m mächtig (SEIDEL 1964, LANGBEIN & SEIDEL 1997, HUCKRIEDE & ZANDER 2011). Das Steinsalzlager im Thüringer Becken ist ein fein- bis grobkörniges, von Anhydritfasern sowie -lagen und vereinzelt von Tonflocken durchsetztes Steinsalz (SEIDEL 1964). Das Steinsalzlager ist durch ein etwa 2 m bis 7 m mächtiges anhydritisches, tonig-mergeliges Zwischenmittel zweigeteilt. Der untere Teil ist etwa 20 m bis 45 m und der obere Abschnitt etwa 5 m bis 15 m mächtig (SEIDEL 1964, LANGBEIN & SEIDEL 1976, RÖHLING, H.-G. 2013).

Im Raum Berlin liegt die Röt-Formation zwischen 1000 m und 2000 m tief. Das Vitzenburg-Steinsalzlager ist etwa 45 m mächtig. In Richtung SE-Brandenburg verringern sich generell die Tiefenlage und die Mächtigkeit des Steinsalzlagers. In der nördlichen Lausitz liegt ein

nur etwa 15 m mächtiges Steinsalzlager wenige hundert Meter unter der Geländeoberfläche (BEBIOLKA et al. 2011, RÖHLING, H.-G. 2013). In NE-Brandenburg befindet sich das nur etwa 20 m mächtige Steinsalzlager in etwa 2000 m Tiefe und die Mächtigkeit nimmt in Richtung Osten, hin zur Ostbrandenburger Schwelle, weiter stetig ab (KUHLMANN 2014). Im Raum Rostock erreicht das Steinsalzlager der Vitzenburg-Subformation nur noch maximal 10 m und liegt unterhalb von 2000 m (BRANDES & OBST 2011, RÖHLING, H.-G. 2013). Nordöstlich der Linie Rostock-Neubrandenburg fehlt das Steinsalzlager der Röt-Formation primär (BEUTLER 2004).

In Schleswig-Holstein sind die Steinsalzlager der Röt-Formation flächig verbreitet. Ihre Mächtigkeit nimmt generell von Norden nach Süden zu. In Gebieten der tektonisch relativ gering beanspruchten Westschleswig- und Ostholstein-Blöcke liegen Steinsalzlager der Röt-Formation in Tiefen von etwa 1600 m, während im Glückstadt-Graben Tiefenwerte von über 5000 m zu erwarten sind (HABLE et al. 2011).

Im Gebiet des Ostholstein-Blocks kommen in der Vitzenburg-Subformation Ablagerungen von Steinsalz und dolomitisiertem Anhydrit mit eingeschalteten geringmächtigen Ton- bzw. Silt-Lagen vor. Außerdem können geringmächtige Staubsandsteinlagen eingeschaltet sein. Die kumulative Mächtigkeit der Steinsalzlager beträgt 26 m bis 40 m, wobei die Mächtigkeit der reinen Steinsalzsichten zwischen 3 m und 18 m schwankt. Die Schichtenfolge der Glockenseck-Subformation ist in diesem Gebiet vorwiegend durch eine Wechsellagerung von Tongesteinen und Anhydrit gekennzeichnet, durchgehende Steinsalzlager sind nicht bekannt (HABLE et al. 2011).

Im Gebiet des Westschleswig-Blocks variiert die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzlager zwischen 40 m im Norden und 120 m im Südwesten. Das Steinsalz wird als durchscheinend, stellenweise als milchig trüb beschrieben. Häufig werden Anhydrit- und Gipseinlagerungen beobachtet, seltener Tonstein- oder Anhydritverwachsungen mit Steinsalz oder tonige Einschaltungen. Das Steinsalzlager ist durch mehrere Meter mächtige Zwischenmittel aus Tonsteinen, Tonmergeln bzw. Gips und Anhydrit gegliedert. In einigen Bohrungen sind bis zu fünf einzelne Salzlager zu differenzieren. So ist z. B. ein insgesamt etwa 59 m mächtiges Steinsalzlager aus folgenden Schichten (vom Älteren zum Jüngeren) aufgebaut: 29 m Steinsalz; 6 m Zwischenmittel; 20 m Steinsalz; 12 m Zwischenmittel; 5 m Steinsalz; 30 m Zwischenmittel; 5 m Steinsalz (HABLE et al. 2011).

Im Vergleich zum zentralen Norddeutschen Becken liegen die Steinsalzlager der Röt-Formation in Süd-Niedersachsen und im nördlichen Nordrhein-Westfalen meist in geringeren Tiefen, wobei die Tiefenwerte kleinräumig stark variieren. Die Mächtigkeit der Steinsalzlager von insgesamt über 100 m im Raum Hannover (z. B. Bohrung Groß Buchholz GT1: 126 m) wird auch weiter südöstlich in der Bohrung Bockenem-A100 (etwa

120 m) erreicht (RÖHLING, H.-G. 2013). Im östlichen Nordrhein-Westfalen ist dagegen die Mächtigkeit geringer: Bielefeld 60 m, Kalldorf 30 m, Lieme 20 m und Detmold 8,5 m (Abb. 15; DÖLLING & LINDER 2010).

Im Subherzyn wird das etwa 80 m bis 100 m mächtige Steinsalzlager der Röt-Formation durch zwei bis drei Tonmittel gegliedert (BEYWL et al. 1974, RÖHLING, H.-G. 2013). Es liegt in Tiefen zwischen 1500 m und wenigen 100 m (DOORNENBAL & STEVENSON 2010). Auf der Calvörde-Scholle beträgt die Mächtigkeit der Steinsalzsichten im östlichen Teil (bei Burg) etwa 80 m bis 100 m (SCHULZE 1964). Insgesamt ist auf der nach NE ansteigenden Calvörde-Scholle das Steinsalz der Röt-Formation großflächig subrodiert (RADZINSKI 2008a).

2.5 Muschelkalk-Salinar

Der Muschelkalk ist als eine lithostratigraphische Einheit im Rang einer Gruppe definiert und wird im Germanischen Becken⁹ in 3 Subgruppen gegliedert: Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk (Abb. 17). Die Beckenfazies des Unteren und Oberen Muschelkalk ist durch Kalksteine sowie durch Zwischenlagen von Tonmergelsteinen dominiert. Typisch für den Mittleren Muschelkalk sind insbesondere Sulfatgesteine (Anhydrit, Gips) und Dolomite sowie Steinsalzlager, die in den distalen Sedimentationsräumen des Germanischen Beckens in der Schichtenfolge der Heilbronn-Formation vorkommen (HAGDORN & SIMON 2005).

System	Gruppe / Subgruppe		Formation
Trias	Muschelkalk	Oberer Muschelkalk	
		Mittlerer Muschelkalk	Diemel
			Heilbronn
			Karlstadt
		Unterer Muschelkalk	

Abb. 17: Stratigraphische Gliederung des Muschelkalk; Entstehungszeitraum von Steinsalzlager blau gekennzeichnet (nach: HAGDORN & SIMON 2005).

Die Verbreitung der Muschelkalk-Evaporite reichte von Norddeutschland über Thüringen und Hessen bis nach Baden-Württemberg und die Nord-Schweiz. Durch Ablaungsprozesse fehlen heute insbesondere die leicht löslichen Steinsalze, welche z. T. großflächig bis in Teufen von maximal 450 m u. GOK abgelaugt wurden (z. B. in Hessen, Sachsen-Anhalt und Thüringen). An ihre Stelle treten geringmächtige Mergelgesteine (Kalk- bis Tonmergel) und teilweise auch Sulfatgesteine als Ablaungsresiduen. Vollständige, nicht abgelaugte

⁹ Mitteleuropäisches Becken in „germanischer Fazies“, für die Trias auch kurz als Germanisches Becken bezeichnet.

Profile sind nur in Tiefbohrungen und in Gruben-Aufschlüssen zu beobachten, wo die Steinsalzlager aufgrund einer geringen Grundwasserströmung in größeren Teufen und/oder durch abdichtende Schichtenfolgen im Hangenden gegen Ablaugung geschützt sind (ALTHEN et al. 1980, RÖHLING, S. 2002, LANGBEIN & SEIDEL 2003a, BOCK et al. 2009). Heute sind nur noch die Steinsalzvorkommen in Norddeutschland, im Thüringer Becken sowie südlich des Main (Kitzingen, Burgbernheim, Schwäbisch Hall, Heilbronn, Stuttgart, Stetten und Rottweil bis Rheinfelden) erhalten (Abb. 18).

Unterschiede in der Lithofazies und der primären Mächtigkeit des salinar geprägten Muschelkalk wurden durch paläogeographisch großräumige Schwellen und Senken verursacht, die den Sedimentationsraum des Germanischen Beckens intern gegliedert haben. Steinsalzlager, insbesondere mit einer höheren primären Mächtigkeit, sind auf die ehemaligen Senken beschränkt. In den Schwellengebieten und in Annäherung an den Beckenrand ist die Mächtigkeit der Steinsalzlager stark reduziert oder diese fehlen ganz (primär oder z. T. auch sekundär), wohingegen die Anteile an Sulfatschichten (z. B. Anhydrit) und dolomitisch geprägten Schichten bzw. nach NE (Richtung Rügen) der Anteil an Mergel- und Tonmergelstein im Profil zunehmen. Bedeutende geologische Strukturräume in Nord- und Mitteldeutschland sind die etwa NNE-SSW streichenden Thüringen-Westbrandenburg-Senke, Eichsfeld-Altmark-Schwelle, Leine-Weser-Senke, Hunte-Schwelle und die Ems-Senke. Im nördlichen Teil des generell WNW-ESE streichenden Norddeutschen Beckens sind zudem das Helgoland-Becken, der Glückstadt-Graben und die Holstein-Westmecklenburg-Senke weitere regionale Strukturräume, die Steinsalzfolgen im Muschelkalk aufweisen (ALTHEN et al. 1980, BEUTLER 1993, GAERTNER & RÖHLING 1993, RÖHLING, S. 2002, LANGBEIN & SEIDEL 2003a). Bedeutung für die primäre Verbreitung des Muschelkalk-Steinsalzes in Südwestdeutschland hatten die paläogeographischen Strukturräume Fränkische Senke (Kraichgau und Nord-Württemberg), West-Schwäbische Senke (oberer Neckar), die Badische Senke und die Burgundische Senke (GEYER & GWINNER 2011).

Neben der Differenzierung der Mächtigkeit und Fazies durch die regionalen Schwellen und Senken zeigt die salinare Schichtenfolge des Mittleren Muschelkalk auch lokal synsedimentäre, primäre Mächtigkeitszunahmen. Diese deuten auf eine verstärkte Subsidenz in den aktiven tektonischen Zonen (Glückstadt-Graben, Westdorf-Graben) hin oder wurden, wie z. B. in Ostfriesland und in Südwest-Mecklenburg, zusätzlich durch halokinetische Prozesse im Untergrund (Mobilisierung des Zechstein-Salzes) hervorgerufen (ALTHEN et al. 1980, BEST et al. 1993, GAERTNER 1993).

Je nach paläogeographischer Position innerhalb des Salinar-Beckens können bis zu sechs Halit-führende Salinar-Zyklen in der Heilbronn-Formation vorkommen (vgl. Anlage 10). Eine detaillierte Darstellung der Verbreitung der einzelnen Steinsalzlager in NW-Deutschland wurde durch GAERTNER & RÖHLING (1993) publiziert. Anhand von geophysikalischen Bohrlochmessungen korrelierte RÖHLING, S. (2002) für das gesamte Salinar-Becken neun zyklisch aufgebaute Schichtenfolgen im Mittleren Muschelkalk. Nach diesen Ergebnissen wird der Salinar-Zyklus 1 der Karlstadt-Formation zugeordnet, die Zyklen 2 bis 8 sind Teil der Halit-führenden Heilbronn-Formation und die Diemel-Formation besteht aus dem Zyklus 9. In der Halit-führenden Heilbronn-Formation enthält der Zyklus 8 keine Halit-Lagen und die Salinar-Zyklen 2, 5, 6 und 7 nur in speziellen Subsidenzräumen (z. B. Ems-Senke, Helgoland-Becken). Am weitesten verbreitet sind die Steinsalzlager der Salinar-Zyklen 3 und 4, die auch die größte Mächtigkeit aufweisen.

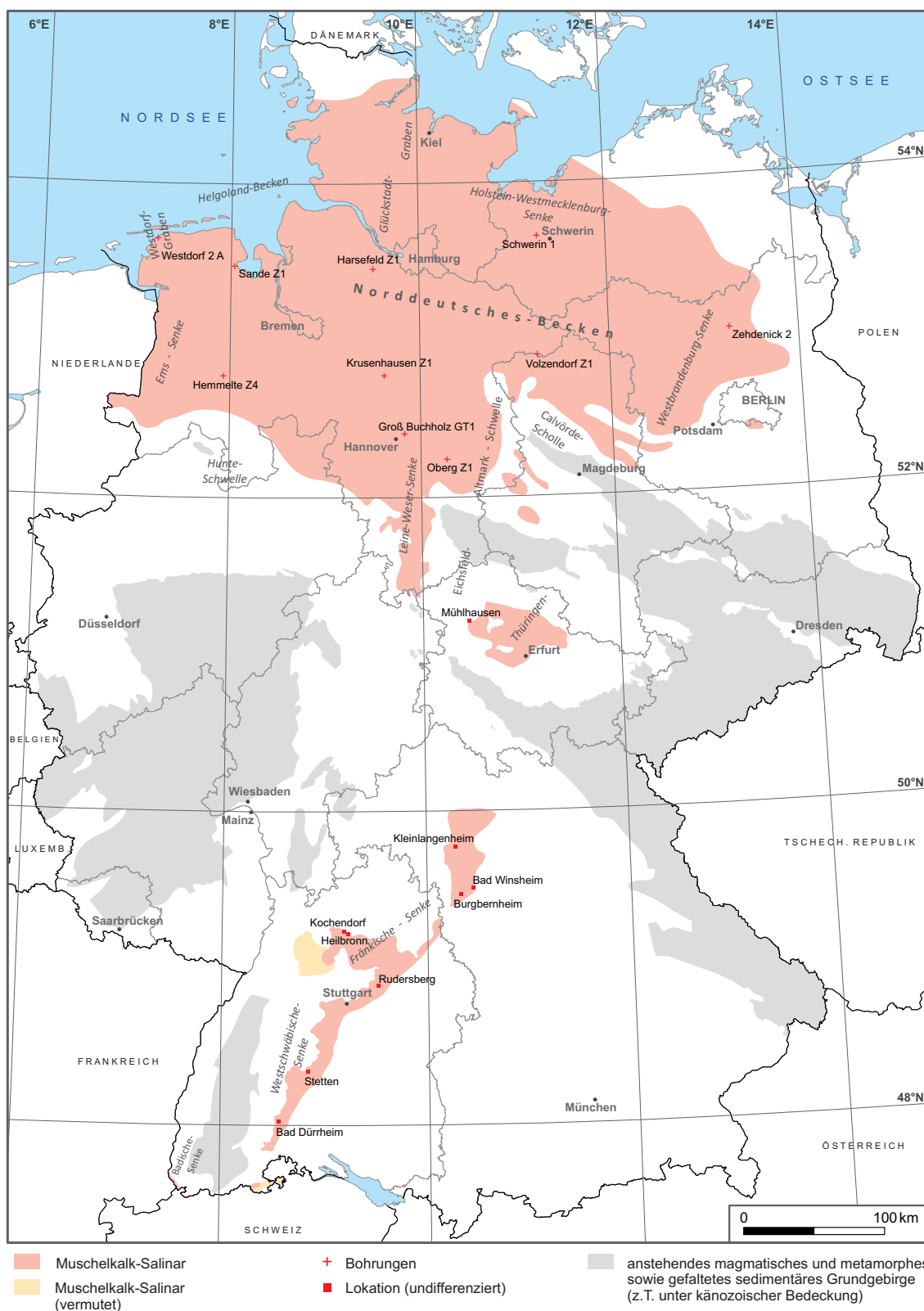


Abb. 18: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Muschelkalk-Salinare in Deutschland (nach: SEIDEL 1964, CRAMER 1965, BEYWL et al. 1974, ALTHEN et al. 1980, EXLER 1987, MERZ 1987, GAERTNER & RÖHLING 1993, FREUDENBERGER & SCHWED 1996, KRULL et al. 2004, BOCK et al. 2009).

Ausgehend vom Beckeninneren hat RÖHLING, S. (2002) die salinaren Zyklen der Heilbronn-Formation mit den Muschelkalk-Steinsalzlager in Mecklenburg und Brandenburg bis nordöstlich von Berlin sowie mit denen des Thüringer Beckens und Baden-Württembergs korreliert. Das Untere Salzlager in diesen mehr beckenrandlich gelegenen Gebieten entspricht demnach dem Salinar-Zyklus 3 und das lokale Vorkommen eines Oberen Salzlagers (z. B. bei Heilbronn) wird dem Salinar-Zyklus 4 zugeordnet. Die Halit-führenden Schichten werden je nach regionaler Lage durch anhydritische, tonige, mergelige bis dolomitische Zwischenmittel getrennt. Kalium- und Magnesiumsalze fehlen in allen Salinar-Zyklen (FISCHBECK et al. 2003).

Im Hauptverbreitungsgebiet der Halit-führenden Heilbronn-Formation in Baden-Württemberg (Abb. 18) werden die Steinsalzlager in das Untere Salz (grobspätig, vertikal gestreift, mit Anhydritlagen und -knauern), das Bändersalz (Wechselfolge von Halit mit dünnen Anhydritlagen) und das Obere Salz (grobspätig) gegliedert. Diese liegen zwischen den Unteren und Oberen Sulfatschichten, d. h. anhydritisch dominierten Schichtenfolgen, in weitgehend flacher Lagerung. Nur lokal wurden in den Lagerstätten gegeneinander versetzte, flexurartig verbogene oder gestauchte Salzlager beobachtet (HAGDORN et al. 1987, FISCHBECK et al. 2003). In der Steinsalzlagerstätte Stetten wurden z. B. an SW-NE streichenden Störungen Versatzbeträge bis zu 20 m festgestellt (KIMMIG et al. 1999).

Das Obere Salz (entspricht etwa Salinar-Zyklus 4) kommt nur in der Region Heilbronn vor, wo die Steinsalzmächtigkeit maximal Werte von etwa 45 m erreicht (in Kochendorf 36 m) und in Teufen zwischen etwa 150 m u. GOK und 200 m u. GOK nachgewiesen wurde (vgl. Abb. 19) (GEYER & GWINNER 2011). Dagegen wurden im Bereich des Salzbergwerkes Stetten in Teufen zwischen 110 m und 230 m im Mittel nur Salzmächtigkeiten von etwa 10 m bis 12 m (maximal 16 m) bestimmt (KIMMIG et al. 1999). Im Raum Bad Dürkheim wiederum wurden in etwa 176 m Teufe zwei Steinsalzlager von insgesamt 26 m Mächtigkeit erbohrt (ALT & WASILEWSKI 1994, ROGOWSKI & SIMON 2005). Im Bereich der Schwellen nimmt innerhalb einer nur wenige hundert Meter breiten Übergangszone die Mächtigkeit der Steinsalzlager auf 0 m ab (Abb. 19) und das Salzlager wird durch brekziöse Ablaugsresiduen (Anhydrit, Ton und örtlich Gips) vertreten (KIMMIG et al. 1999).

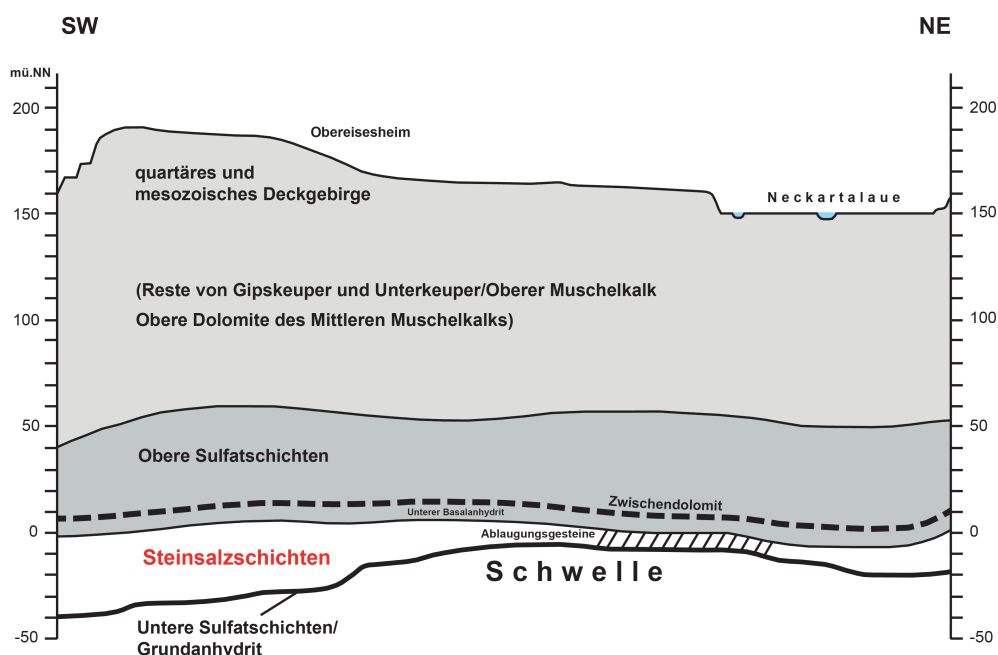


Abb. 19: Skizze zu den Schichtenfolgen im Bereich der Steinsalzlagerstätte Heilbronn/Kochendorf (siehe Abb. 18; aus: BOHNENBERGER & RÜTHER 2011, verändert).

Im nordwestlichen Bayern ist innerhalb des Gebiets mit Halit-führendem Mittleren Muschelkalk die größte Mächtigkeit der Steinsalzfolge aus dem westlichen Verbreitungsgebiet bekannt (Kleinlangenheim 30 m). Dort liegt die Basis der Steinsalzlager zwischen 150 m und 170 m u. GOK (CRAMER 1965). Die Gesamtmächtigkeit erreicht Werte zwischen 6 m (Bad Winsheim) und ca. 35 m, wobei das Untere Salzlager immer deutlich mächtiger ausgebildet und durch anhydritische Zwischenlagen von dem Oberen Salzlager getrennt ist (Abb. 20; EXLER 1987, FREUDENBERGER & SCHWERD 1996). Die Nutzung des durch Sulfatschichten im Hangenden und Liegenden begrenzten Steinsalzvorkommens in NW-Bayern beschränkt sich derzeit auf eine balneologische Nutzung von Sole.

In der Thüringischen Senke treten im unteren Teil des Mittleren Muschelkalk ebenfalls halitisch-sulfatische Abfolgen auf (Abb. 18), die nach BRÜCKNER-RÖHLING & LANGBEIN (1993) mit dem Salinar-Zyklus 3 von Norddeutschland zu korrelieren sind. Das Steinsalzlager erreicht eine Gesamtmächtigkeit von wenigen Metern bis etwa 30 m (LANGBEIN & SEIDEL 1997). Die Verbreitung von mehrere zehner Meter mächtigen Salzlagern ist auf kleinräumige Senken innerhalb der Thüringer Senke (z. B. östlich Mühlhausen, Erfurt) beschränkt. Die hier vorkommenden Steinsalzlager sind mit Anhydrit durchsetzt oder weisen eine Wechsellagerung von sulfatisch und halitisch dominierten Ablagerungen auf (Abb. 20) (MERZ 1987, LANGBEIN & SEIDEL 2003a). In Erfurt liegt das etwa 27 m mächtige Steinsalzlager in einer Tiefe von etwa 350 m u. GOK (SEIDEL 1964), vergleichbar der Tiefenlage im Gebiet östlich von Mühlhausen. Insgesamt werden Tiefenwerte zwischen 300 m und 400 m erwartet, wobei in Richtung des Zentrums der Thüringer Senke höhere Tiefenwerte auftreten.

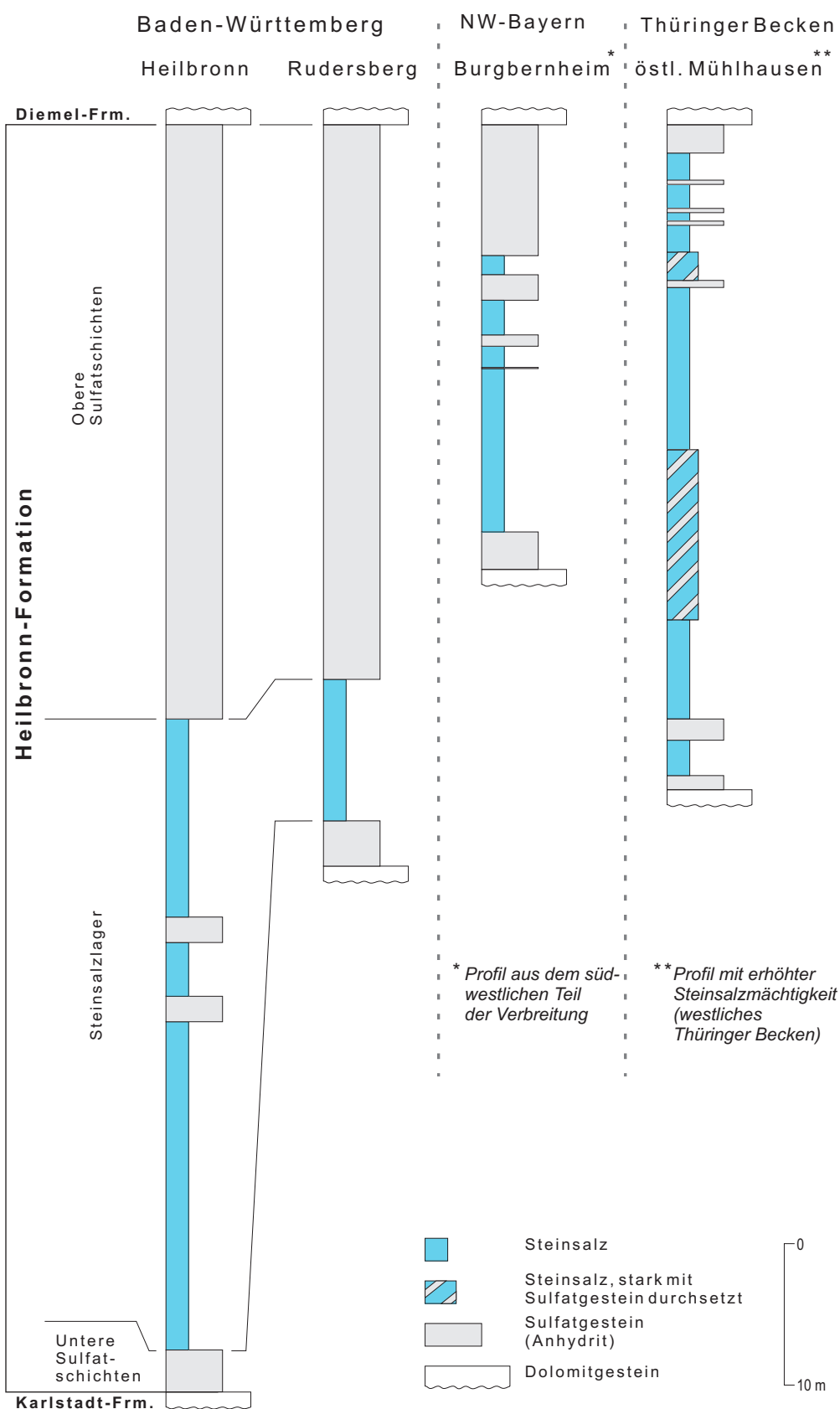


Abb. 20: Schematische Schichtenfolgen im salinar geprägtem Muschelkalk von Baden-Württemberg, Bayern und Thüringen (nach: CRAMER 1965, MERZ 1987, GEYER & GWINNER 2011).

In Sachsen-Anhalt und in den nordöstlichen Verbreitungsgebieten des Halit-führenden Mittleren Muschelkalk in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern liegt die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzlager bei nur wenigen zehner Metern (10 m bis 40 m; vgl. ALTHEN et al. 1980, RÖHLING, S. 2002, RADZINSKI 2008b). Die salinaren Schichtenfolgen sind insgesamt durch eine zyklische Wechsellagerung tonig-mergeliger, kalkig-dolomitischer, sulfatischer und halitischer Gesteinsfolgen gekennzeichnet (BEYWL et al. 1974), wobei Steinsalzlager nur in den Salinar-Zyklen 3 und 4 vorkommen (RÖHLING, S. 2002). Am Südwestrand der Calvörde-Scholle, in einer schmalen Muldenstruktur, wurde in mehreren Bohrungen insgesamt ein etwa 40 m mächtiges anhydritisches Steinsalzlager erbohrt (SEIDEL 1964).

In Norddeutschland nimmt in Richtung Nordwesten, entsprechend der WNW-ESE ausgerichteten paläogeographischen Beckenachse und der Lage des Beckenzentrums im Nordwesten, sowohl die Anzahl der Halit-führenden Salinar-Zyklen als auch die Mächtigkeit der Steinsalzlager zu (Anlage 10). Im hannoverschen Raum liegt die Mächtigkeit bei etwa 70 m bis 86 m (Bohrungen Krusenhausen Z1: 75 m, Groß Buchholz GT1: 86 m, Oberg Z1: 80 m). Zwischengeschaltet sind Dolomite und Anhydritlagen (BALDSCHUHN & KOCKEL 1998, GAST, S. & RÖHLING 2012). Dabei wird bis östlich und süd-östlich der Region Unterweser (Bremen) die zunehmende Gesamtmächtigkeit des Steinsalzes insbesondere durch die Steinsalzlager der Salinar-Zyklen 3 und 4 bestimmt (RÖHLING, S. 2002, GAST, S. & RÖHLING 2012). Weiter nordwestlich und nördlich sind die höchsten Mächtigkeiten in Norddeutschland erbohrt worden (z. B. Sande Z1: 100 m). In der Bohrung Westdorf 2A im Westdorf-Graben wurden sechs Salzlager der Salinar-Zyklen 2 bis 7 angetroffen, die insgesamt eine im Vergleich ungewöhnlich große Mächtigkeit von etwa 400 m erreichen (BEST et al. 1993, RÖHLING, S. 2002). Dies verdeutlicht, dass der generelle Trend in der Mächtigkeitsverteilung durch regionale Schwellen- und Senkenstrukturen sowie lokal begrenzt durch Gräben und halokinetische Prozesse (Salzkissenbildung und Randsenkenentwicklung) überlagert ist (GAERTNER 1993).

Die Tiefenlage mächtiger Steinsalzlager des Mittleren Muschelkalk ist im Norddeutschen Becken durch Tiefen unterhalb von 2000 m gekennzeichnet. Im Gebiet der Altmark-Schwelle sowie im Topbereich von Salzkissen in der Region Schwerin und in Richtung Beckenrand werden Tiefen zwischen 1500 m und 2000 m beobachtet (vgl. HOTH et al. 1993b, DOORNENBAL & STEVENSON 2010, GAST, S. & RÖHLING 2012, KUHLMANN 2014). Weiterhin ist die Tiefenlage der Steinsalzlager durch die Entwicklung von Salzdiapir-Strukturen im Norddeutschen Becken überprägt. An deren Flanken können die Salinare des Mittleren Muschelkalk auch in geringeren Tiefen als 1500 m auftreten.

2.6 *Keuper-Salinar*

Der Keuper besitzt den Rang einer lithostratigraphischen Gruppe der Germanischen Trias, die in drei Subgruppen gegliedert wird: Unterer, Mittlerer und Oberer Keuper (Abb. 21). In den Ablagerungen aus dem Mittleren Keuper kommen im Norddeutschen Becken bis zu acht Steinsalzlager vor, davon bis zu fünf Salzlager in der Grabfeld-Formation (A bis E) und bis zu drei Salzlager (F bis H) in der Weser-Formation.

System	Gruppe / Subgruppe		Formation
Trias	Keuper	Oberer Keuper	Exter
		Mittlerer Keuper	Arnstadt
			Weser ■
			Stuttgart
			Grabfeld ■
		Unterer Keuper	Erfurt

Abb. 21: Stratigraphische Gliederung des Keuper; Entstehungszeitraum von Steinsalzlager blau gekennzeichnet (nach: NITSCH 2005).

Die Halit-führenden Formationen des Mittleren Keuper entstanden unter Playa-ähnlichen Bedingungen, so dass die Steinsalzlager Teile einer tonigen, mergeligen, sulfatischen und teilweise dolomitischen Schichtenfolge sind. Zwischen den beiden salinarbetonten Formationen befindet sich die Stuttgart-Formation mit terrigenen Sedimenten und deutlichen Merkmalen einer fluviatilen und lakustrinen Fazies (BEUTLER & TESSIN 2005, NITSCH 2005).

Die nachfolgenden Beschreibungen von charakteristischen Merkmalen der Salzlager wurden den Ausführungen von BEUTLER et al. (1999), KOCKEL et al. (1999), FRISCH & KOCKEL (2003), KRULL et al. (2004), BEUTLER & TESSIN (2005) und BARNASCH (2009) entnommen.

Danach ist das Steinsalzlager A in der Grabfeld-Formation meist eine feingegliederte Schichtenfolge von geringmächtigen Steinsalzlagen, vorrangig in Wechsellagerung mit Tongestein, aber auch mit anhydritischen Lagen. In NW-Deutschland ist diese halitische Schichtenfolge i. d. R. das mächtigste Steinsalzlager der Grabfeld-Formation. In anderen Regionen erreicht das Steinsalzlager A aber nur wenige Meter. Im Gegensatz dazu ist das Steinsalzlager B sehr kompakt ausgebildet und nahezu ungegliedert, meist aber weniger mächtig. Das Steinsalzlager C ist ein ungegliedertes Steinsalzpaket von maximal 10 m Mächtigkeit. Die Steinsalzlager D und E bilden ein, durch ein geringmächtiges Tonsteinmittel untergliedertes Doppelsalinar, das maximal 70 m mächtig werden kann.

Das anhydritreiche Steinsalzlager F der Weser-Formation ist ein kompaktes, schwach gegliedertes Lager von 30 m bis 40 m Mächtigkeit, das nur in Nordwestdeutschland vorkommt. Das ebenfalls anhydritreiche Steinsalzlager G weist nur wenige Meter Mächtigkeit auf und hat nur eine geringe regionale Verbreitung (z. B. im Gebiet der unteren Aller). Das Steinsalzlager H kann dagegen eine Mächtigkeit von mehreren hundert Metern erreichen, wobei die Mächtigkeit starken lateralen Veränderungen unterworfen ist. Es ist nur durch wenige tonige und anhydritische Einschaltungen gegliedert. In Gebieten mit hoher Primärmächtigkeit neigen die Salze des Steinsalzlagers H, ähnlich den Zechsteinsalzen, zu sekundärer, halokinetisch bedingter Akkumulation (Salzkissen Hemmoor siehe Abb. 22; Salzkissen Glückstadt, Ottenbüttel und Hardebek siehe FRISCH 1990).

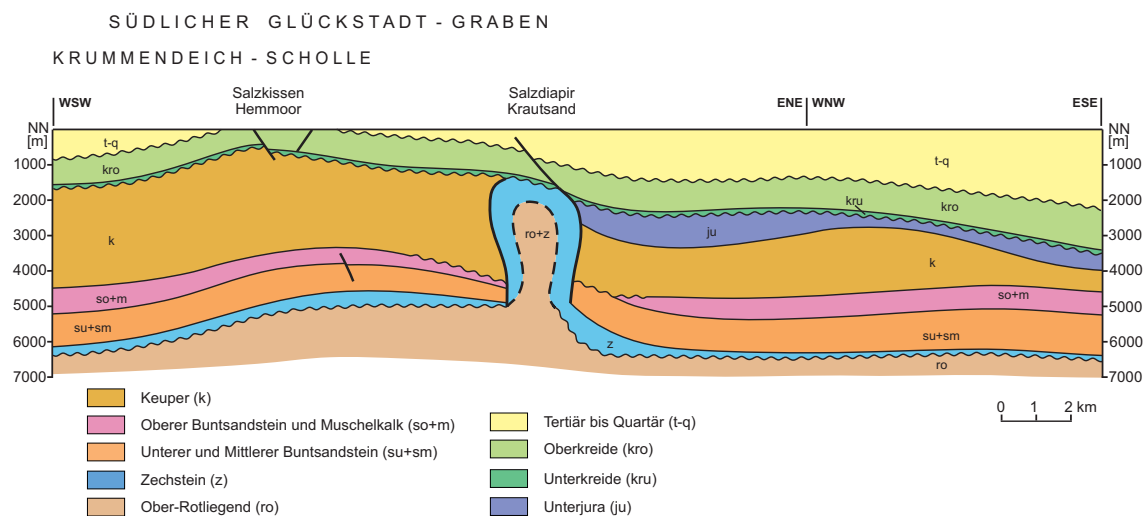


Abb. 22: Geologischer Schnitt mit einer halokinetischen Akkumulation von Steinsalz innerhalb der Ablagerungen des Keuper (braun), gekennzeichnet durch eine erhöhte Mächtigkeit, Lage des Schnitts siehe Abb. 23 (nach: BALDSCHUHN et al. 2001). Im mittleren Teil der Abbildung befindet sich die Doppelsalinar-Struktur Krautsand, die sich aus Rotliegend- und Zechstein-Gesteinen aufbaut. Sowohl östlich als auch westlich dieser Struktur sind Kissenbildungen innerhalb des Keuper erkennbar.

Vorkommen von Kalisalzen in größerer Mächtigkeit (Kaliflöze) sind innerhalb der Steinsalzlager nicht bekannt (BALDSCHUHN & KOCKEL 1998), es wurden jedoch mineralogisch-geochemisch geringe Anteile von Kalisalzen nachgewiesen (LEWANDOWSKI 1988 in BEUTLER et al. 1999).

Die Verbreitungsgebiete der Salzlager der Grabfeld- und der Weser-Formationen sind annähernd identisch, wobei die primäre Mächtigkeit regional starken Schwankungen unterliegt. Die größten Mächtigkeiten kommen im Bereich der deutschen Nordseebucht vor, in Gebieten, die durch hohe Subsidenzraten gekennzeichnet waren (BEUTLER et al. 1999). Verursacht wurden diese Senkungen durch synsedimentär aktive Grabenzonen und/oder die Entwicklung von Randsenken an Salzstrukturen (Salzabwanderung im Untergrund;

BEUTLER & TESSIN 2005, BARNASCH 2009). Im Bereich von paläogeographischen, tektonisch oder halokinetisch gebildeten Schwellen sind die salinaren Formationen dagegen durch Schichtenfolgen mit Ton- und Sulfatgesteinen geprägt. Aus den synsedimentären halokinetischen Aktivitäten in den Steinsalzschichten des Zechstein und den gleichzeitigen tektonischen Bewegungen resultiert eine räumlich sehr differenzierte Verbreitung der Steinsalzlager, die in Abb. 23 vereinfacht dargestellt wurde und nachfolgend nur anhand lokaler Befunde beschrieben werden kann.

Regionen mit hohen Subsidenzraten sind im Westen von Niedersachsen die N-S streichende Riftstruktur des Ems-Grabens sowie im Gebiet von Schleswig-Holstein und im Unterelbauraum der N-S streichende Glückstadt-Graben. Dazwischen liegt der Senkungsraum der Ostfriesland-Scholle und im Osten von Niedersachsen die Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone. Außerdem kommen einige Spezialtröge auf der östlichen Pompeckj-Scholle und in Nordwest-Brandenburg die Thüringen-Westbrandenburg-Senke vor (Abb. 23; KRULL et al. 2004, FRANZ 2008).

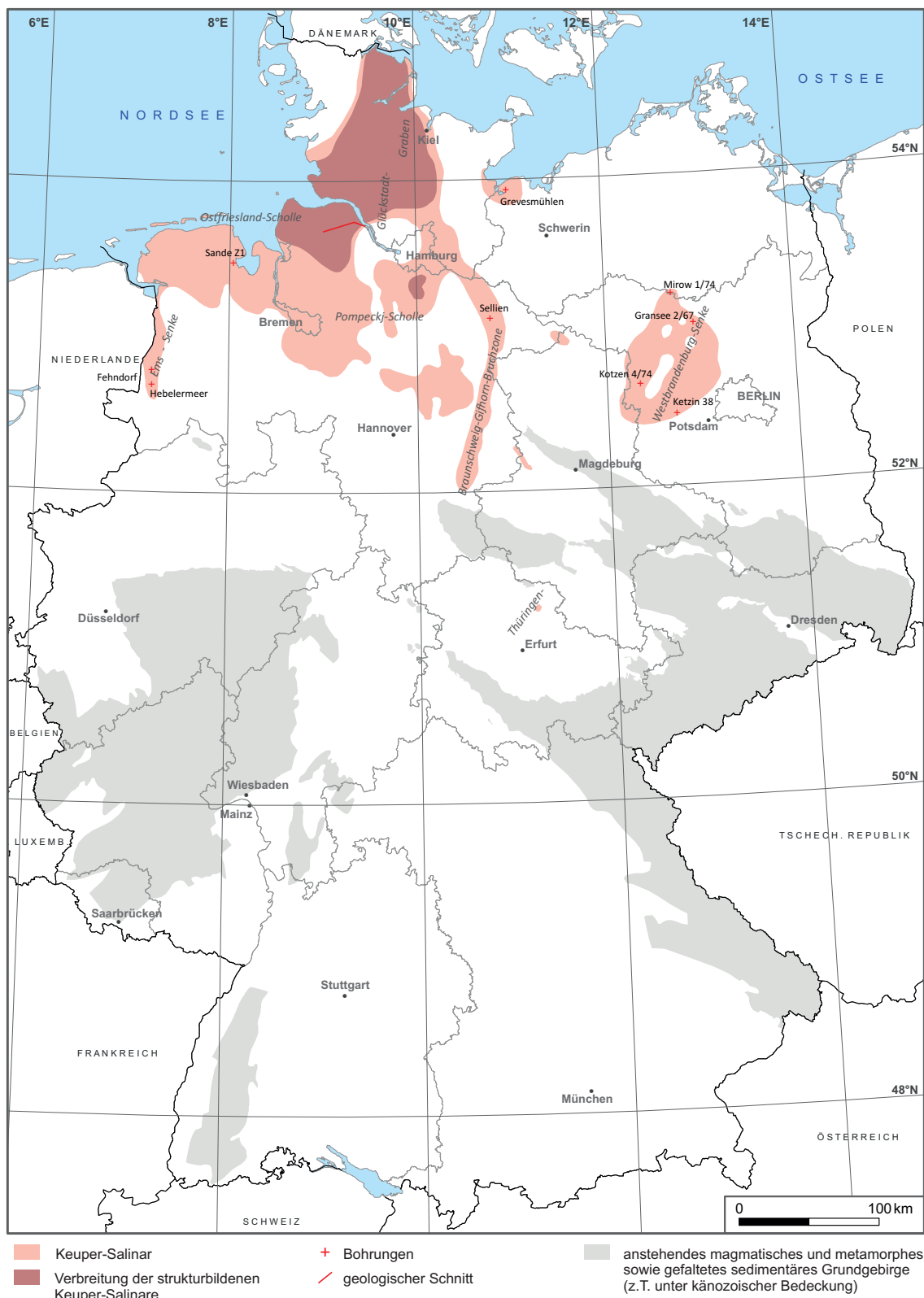


Abb. 23: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Keuper-Salinare in Deutschland (nach: KOCKEL et al. 1999, KRULL et al. 2004; verändert).

Eine sehr markante Riftstruktur im Norddeutschen Becken ist der Glückstadt-Graben, in dem die mächtigsten keuperzeitlichen Steinsalzlager vorkommen, z. B. mit etwa 2400 m Salzmächtigkeit auf der Krummendeich-Scholle, südlich der Elbe (Abb. 22). Allerdings werden die einzelnen Steinsalzlager durch Tonsteinmittel und Sulfathorizonte unterschiedlicher Mächtigkeit voneinander getrennt (KRULL et al. 2004). Sehr reines Steinsalz größerer Mächtigkeit kann in dem, durch halokinetische Prozesse im Steinsalzlager H akkumulierten Steinsalz der Keuper-Salzkissen auftreten (Abb. 23), z. T. mit einer Mächtigkeit von 1700 m. Die Verbreitung von Steinsalzlagern in relativ reiner Form ist weitgehend auf den Unterelberaum, Ostfriesland, das südliche Schleswig-Holstein und die deutsche Bucht beschränkt (KOCKEL et al. 1999, KRULL et al. 2004). Dort kommt es am Rande von Zechstein-Salzstöcken oder von Doppel-Salinaren oft zur Anschweißung derartiger Keuper-Salzkissen (z. B. bei den Salzstrukturen Tellingstedt, Hardebek, Itzehoe). In dieser Region sind auch eigenständige Keuper-Salzkissen bekannt, wie z. B. die Struktur Struvenhütten (vgl. auch Abb. 22). Die Tiefenlage der Topfläche der Keuper-Salzkissen beträgt ausnahmslos mehr als 1200 m (KRULL et al. 2004). Keuper-Salzstöcke wurden bisher nicht beobachtet (BEUTLER et al. 1999, KOCKEL et al. 1999, FRISCH & KOCKEL 2003, KRULL et al. 2004, BEUTLER & TESSIN 2005, BARNASCH 2009).

In Ostdeutschland sind die Steinsalzlager des Mittleren Keuper wesentlich unreiner und geringmächtiger. In Mecklenburg-Vorpommern wurden Keuper-Steinsalzlager bei Grevesmühlen und südlich der Müritz nachgewiesen (Abb. 23). Die Steinsalzlager der Grabfeld-Formation sind in der Bohrung Grevesmühlen insgesamt etwa 13 m sowie in der Bohrung Mirow 1/74 etwa 70 m mächtig und durch Ton- und Anhydritschichten gegliedert. Aus der Weser-Formation wurde eine Steinsalz-Gesamtmächtigkeit von etwa 14 m in der Bohrung Grevesmühlen erbohrt. In der Bohrung Mirow 1/74 wurden in einer Tiefe von etwa 2450 m Steinsalzlager von insgesamt etwa 20 m Mächtigkeit nachgewiesen (HOTH et al. 1993b, BEUTLER 2004, FRANZ 2008). FRANZ (2008) weist zudem auf keuperzeitliche Salzlager von begrenzter Ausdehnung hin, die in Salzstock-Randsenken entstanden sind, so z. B. in der Region Gorlosen.

Die in der Bohrung Mirow 1/74 angetroffenen Steinsalzlager wurden auch in Nord-Brandenburg nachgewiesen und erreichen z. B. in der Bohrung Kotzen 4/74 eine Gesamtmächtigkeit von bis zu 90 m (FRANZ 2008). Beide Bohrungen liegen in einer paläogeographischen Senke, der Thüringen-Westbrandenburg-Senke (Abb. 23). Dort entwickelten sich im Verlaufe des Keuper im Untergrund aufgrund von halokinetischen Prozessen Zechstein-Salzstrukturen. Dadurch kann die primäre Mächtigkeit der einzelnen keuperzeitlichen Steinsalzlager beeinflusst worden sein (vgl. Anlage 11).

Weitere Nachweise für die Verbreitung von Keuper-Steinsalzlagern in dieser Region sind die Bohrungen Gransee 2/67 südlich der Salzstruktur Dallgow und die Bohrung Ketzin 38 im Bereich der Struktur Roskow-Ketzin. In der Bohrung Gransee 2/67 kommen zwei

anhydritische Steinsalzlager der Grabfeld-Formation vor, das obere Lager ist 45 m und das untere Lager ist 18 m mächtig. In der Bohrung Ketzin 38 wurden etwa 50 m Steinsalz nachgewiesen, das in einer Tiefe von über 2000 m angetroffen wurde (FÖRSTER et al. 2006, GÖTHEL 2006). Im Ergebnis der halokinetischen Entwicklung der Zechstein-Salzstrukturen kam es im Top-Bereich der Strukturen zur sekundären Reduzierung der Steinsalzmächtigkeit des Keuper, so dass heute die Keuper-Steinsalzlager lokal ganz fehlen.

Die Verbreitung der Keuper-Steinsalzlager in Sachsen-Anhalt ist meist nur kleinräumig und an Salzstock-Randsenken gebunden, z. B. in der subherzynen Lappwaldmulde oder der Salzstruktur Aulosen (Altmark). Die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzlager, die mit den Steinsalzlager D und E parallelisiert werden, kann bis zu 80 m erreichen (BEUTLER 2008).

Im Thüringer Becken wurde nur in der Schillingstedter Mulde (Abb. 23) ein anhydritisch-tonig verunreinigtes Steinsalzlager größerer Mächtigkeit (etwa 25 m) erbohrt, das in eine von Ton- und Anhydritgesteinen dominierte Schichtenfolge des Keuper eingeschaltet ist (DOCKTER & LANGBEIN 2003).

Bis auf eine Ausnahme ist keine wirtschaftliche Nutzung (z. B. Kavernen) der keuperzeitlichen Steinsalzlager bekannt. Nur im Kavernenfeld Blexen in der Salzstruktur Dedesdorf steht eine der Kavernen im Keuper-Salz (FRISCH & KOCKEL 2003).

2.7 Malm-Salinar

Im Oberjura (Malm-Subgruppe) wurden Steinsalzlager in größerer Mächtigkeit im süd-westlichen Niedersachsen und im angrenzenden Nordrhein-Westfalen nachgewiesen. Ihre Verbreitung ist eng mit der geologischen Entwicklung des zentralen und westlichen Niedersachsen-Beckens verknüpft (KOCKEL et al. 1995). Die gesamte Schichtenfolge des Oberjura und der ältesten Unterkreide wird dort in folgende Formationen gegliedert: Herrsumer Schichten, Korallenoolith, „Kimmeridge“, Gigas-Schichten, Eimbeckhäuser Plattenkalk, Münder Mergel und Serpulit (Abb. 24). Diese lithostratigraphischen Einheiten werden zur Malm-Subgruppe zusammengefasst, wobei die Ablagerungen der Oberen Münder Mergel und der Serpulit-Formation dem Berriasium, also dem Jura-Kreide-Grenzbereich zugeordnet werden bzw. Teil der Unterkreide-Schichtenfolge sind (BRINKMANN 1977, GRAMANN et al. 1997, MÖNNIG 2005). In der Münder Mergel-Formation kommen Steinsalzlager vor (Abb. 24).

System	Gruppe / Subgruppe		Formation
Kreide	Unter- kreide	Malm-Subgruppe	Serpulit
Jura	Oberjura		Münder Mergel
			Eimbeckhäuser Plattenkalk
			Gigas-Schichten
			„Kimmeridge“
			Korallenoolith
			Heersumer-Schichten

Abb. 24: Stratigraphische Stellung der Malm-Subgruppe in Niedersachsen; Entstehungszeitraum von Steinsalzlagerblöcken blau gekennzeichnet (nach: HEUNISCH et al. 2007).

Während der Ablagerung des Eimbeckhäuser Plattenkalks und der Unteren Münder Mergel kam es zu einer Verengung des Sedimentationsraumes im westlichen Niedersachsen-Becken und zur Entstehung hypersaliner Verhältnisse (GRAMANN et al. 1997). Das Gebiet zwischen dem Emsland im Westen und nördlich des Weser-Wiehengebirges im Osten sowie südlich der Linie Aschendorf (Ems)-Nienburg (Abb. 26) war während der Sedimentation der Münder Mergel-Formation durch hohe Subsidenzraten gekennzeichnet. Diese generell hohen Subsidenzraten können lokal variieren, was durch synsedimentär aktive Horst- und Grabenstrukturen verursacht wurde und zu entsprechenden Mächtigkeits- und Faziesvariationen in den Ablagerungen der Teilbecken führte. In den synsedimentär aktiven Senken bildeten sich mehrere Steinsalzlager (Anlage 12), die sich in eine Schichtenfolge von Tonmergelsteinen einschalteten. Die Tonmergelsteine können teilweise höhere Anteile an organischer Substanz aufweisen (BOIGK 1981, KOCKEL et al. 1995, GRAMANN et al. 1997).

Im salinar geprägten Malm sind somit mehrere Steinsalzlager entwickelt, die durch Zwischenmittel aus Tonstein und Anhydrit voneinander getrennt sind. Kalisalze wurden nicht beobachtet (FRISCH & KOCKEL 2003). Im zentralen und westlichen Niedersachsen-Becken beträgt die durchschnittliche Mächtigkeit der meist stratiform lagernden salinaren Schichtenfolge in den Zentren der Teilsenken etwa 800 m (TRUSHEIM 1971). In Richtung des Beckenrandes im Norden und Westen nimmt die Mächtigkeit der Schichtenfolge ab (BOIGK 1981). Östlich der Weser hat die salinare Schichtenfolge nur eine geringe Mächtigkeit. Sie ist dort auf lokale Senken beschränkt und z. T. nur durch sulfatische Gesteine vertreten (KOCKEL et al. 1995, HERRMANN & KUNZ 1999, KRULL et al. 2004).

In einzelnen Senken des westlichen Niedersachsen-Beckens hat die primäre Mächtigkeit der Steinsalz-Tonstein-Anhydrit-Wechselagerung wahrscheinlich sogar maximal etwa 1000 m betragen, z. B. im zentralen Bereich der paläogeographisch aktiven Menslage-Alfhausen-Lembruch-Senke (BOIGK 1981). Durch halokinetische Prozesse während der Oberkreide kam es insbesondere in diesen Gebieten zu sekundären Akkumulationsprozessen des Steinsalzes (Abb. 26). Dies führte zur Bildung von Kissen-Strukturen, wie z. B. bei Haselünne,

Ohrte, Alfhausen, Damme, Lehmbruch, Georgsdorf-Wietmarschen, Lohne und Baccum (Abb. 25). In diesen teilweise über 2000 m mächtigen Salzstrukturen können relativ reine Steinsalzschichten mit mehr als 150 m Mächtigkeit vorkommen (KOCKEL et al. 1995).

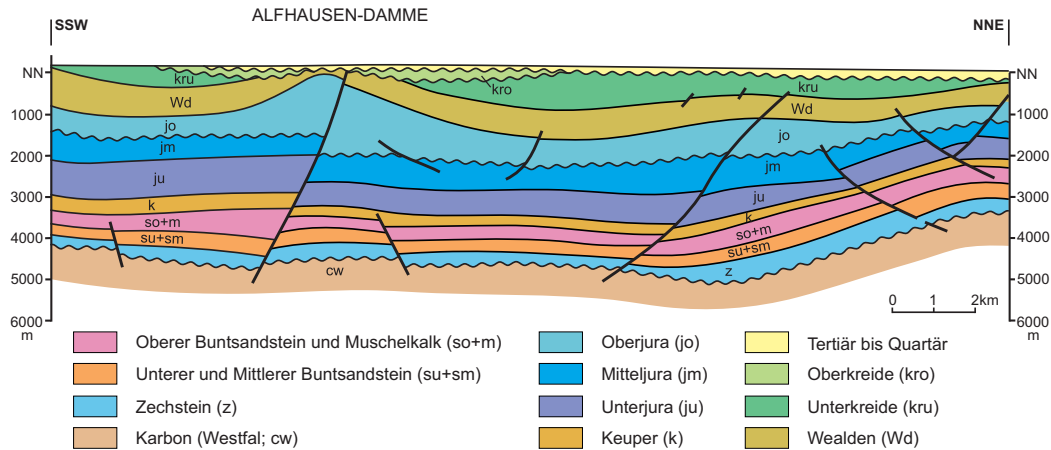


Abb. 25: Lagerungsverhältnisse und halokinetisch verursachte Mächtigkeitszunahmen in der salinaren Schichtenfolge des Oberjura (jo), Lage des geologischen Schnitts in Abb. 26 (nach: BALDSCHUHN et al. 2001).

Infolge der Inversion des Niedersachsen-Beckens im Zeitraum Oberkreide bis Paläogen (BETZ et al. 1987, KLEY et al. 2008) wurden tief versenkte Gesteine wieder in geringere Tiefen emporgehoben. Die salinare Schichtenfolge der Münder Mergel-Formation wurde dabei zeitweise bis an die Erdoberfläche bzw. in deren Nähe gehoben, so dass es zur Subrosion kam. Die Kulminationen (Top-Fläche) der Oberjura-Salzkissen liegen heute meist zwischen 300 m u. GOK und 800 m u. GOK. Lokal lagern känozoische Sedimente diskordant über der salinaren Schichtenfolge (KOCKEL et al. 1995).

Aufgrund der synsedimentären tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge mit den eingeschalteten Steinsalzlageren regional deutlich. Die nachfolgenden Bohrprofile (vgl. Abb. 26), die Malm-Salinar aufgeschlossen haben, belegen dies deutlich (vom Hangenden zum Liegenden):

- Bohrung Alfhausen: 165 m relativ reines Steinsalz; 10 m Anhydrit; 50 m Tonstein; 220 m Steinsalz, vorwiegend durch Tonsteine verunreinigt; 240 m Steinsalz, vorwiegend durch Anhydrit verunreinigt; 110 m Steinsalz, vorwiegend durch Tonstein verunreinigt.
- Bohrung Besten: 115 m relativ reines Steinsalz; 56 m Tonstein; 65 m relativ reines Steinsalz; 40 m Tonstein; 416 m Steinsalz, das durch dünne Anhydrit- und Tonsteinlagen verunreinigt ist.
- Bohrung Menslage-Berge 1: 808 m nahezu reine Steinsalzabfolge mit nur einem kompakten Tonmittel von etwa 30 m Mächtigkeit. Das Salz wird durch zahlreiche dünne Tonstein- und Anhydritlagen verunreinigt (KOCKEL et al. 1995).

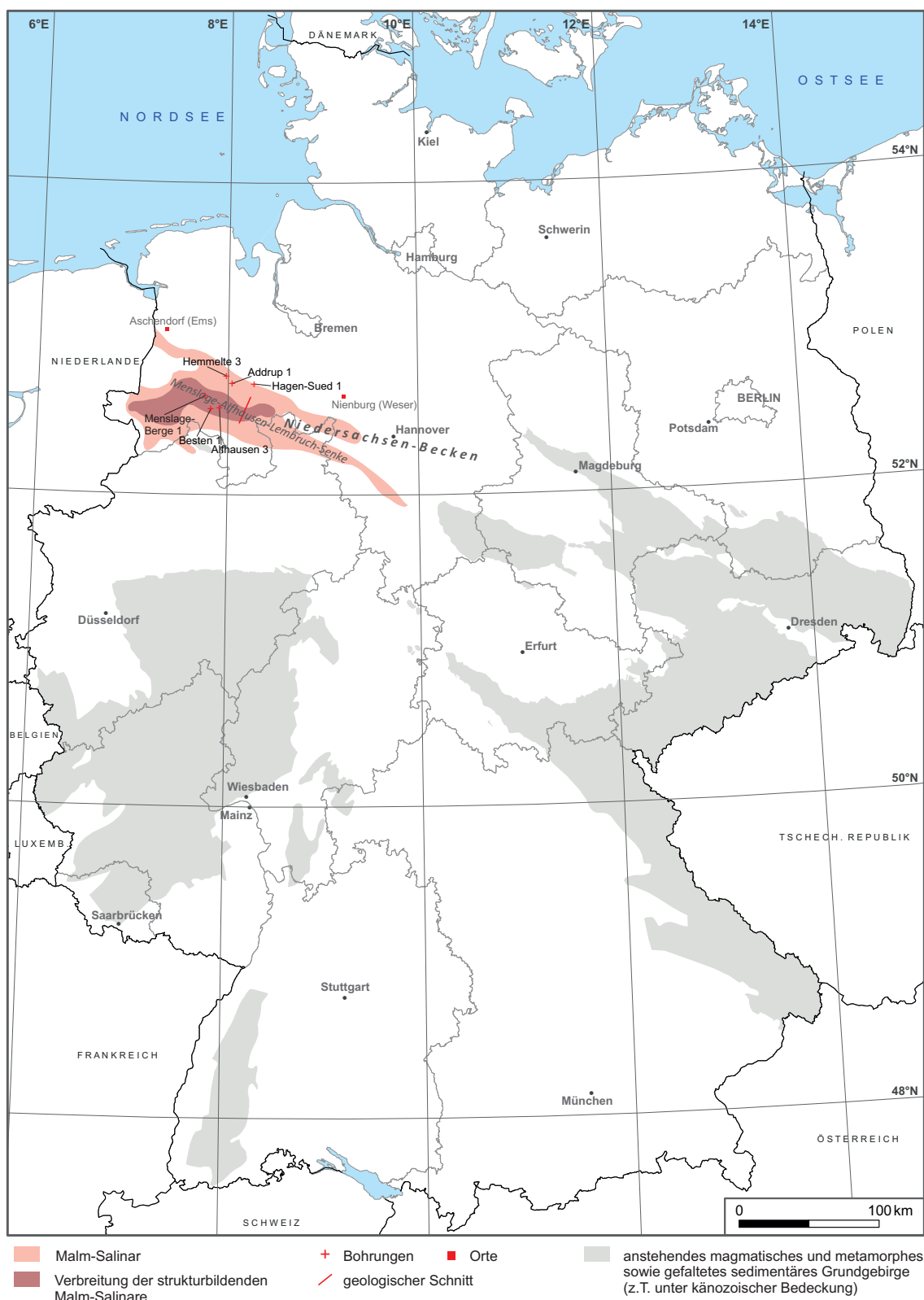


Abb. 26: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Malm-Salinare in Deutschland (nach: KOCKEL & ROLAND 1977, KRULL et al. 2004).

2.8 Tertiär-Salinar

Stratiforme Steinsalzlager innerhalb der tertiären¹⁰ Schichtenfolge sind in Deutschland ausschließlich im Oberrheingraben verbreitet. Stratigraphische Gliederungen der dortigen Schichtenfolgen und deren Bezeichnungen wurden 2011 sowohl von der Subkommission Tertiär der Deutschen Stratigraphischen Kommission (DSK 2011) als auch von GEYER & GWINNER (2011) veröffentlicht. Für die nachfolgende zusammenfassende Beschreibung der Tertiär-Salinare im Oberrheingraben wird die Nomenklatur nach GEYER & GWINNER (2011) verwendet, wonach Steinsalzlager in der Wittelsheim-Formation und in der Bruchsal-Formation („Mittlere Cerithienschichten“) vorkommen (Abb. 27).

System	Serie / Stufe	Formation
Paläogen	Oligozän	Bruchsal 
		Niederrödern
		Froidefontaine
	Eozän	Pechelbronn
		Wittelsheim 
		Haguenau
		Schliengen
	Paläozän	

Abb. 27: Schematische stratigraphische Gliederung des Paläogen für den Zeitraum der Entstehung von Steinsalzlagern (blau gekennzeichnet) im Oberrheingraben (nach: GEYER & GWINNER 2011).

Der Oberrheingraben, als Teil des Rheingrabensystems¹¹, ist ein etwa 300 km langer, durchschnittlich etwa 36 km breiter, SSW-NNE verlaufender Grabenbruch, dessen Entwicklung im Eozän begann (GRIMM et al. 2011). Zwischen den bis etwa 1000 m NN aufragenden Gebirgen Schwarzwald und Vogesen sowie Odenwald und Pfälzer Wald ist die Grundgebirgsoberfläche im Oberrheingraben bis zu 4000 m u.NN eingesunken. Die Sprunghöhe an einzelnen Randstörungen kann z. T. über 2000 m betragen. Die mannigfaltige synsedimentäre Entwicklung des tektonischen Strukturinventars im Grabeninneren (Ab- und Horizontalverschiebungen) führte zu einer komplexen Verteilung der Subsidenzzentren. Daraus resultieren sprunghafte laterale Mächtigkeits- und Faziesänderungen der tertiären Sedimente. Auf der Basis der tertiären sedimentären Grabenfüllung und des tektonischen Baus wird der Oberrheingraben (ORG) in drei Teile gegliedert (Abb. 28): nördlicher ORG (Taunus-Südrand bis etwa Heidelberg), mittlerer ORG (südlich von Heidelberg bis etwa Strasbourg) und südlicher ORG (südlich von Strasbourg) (BOIGK 1981, GEYER & GWINNER 2011).

¹⁰ Für die stratigraphische Bezeichnung Tertiär werden heute auch die Bezeichnungen Paläogen und Neogen verwendet, wobei Paläogen die Serien Paläozän, Eozän und Oligozän und Neogen die Serien Miozän und Pliozän beinhalten.

¹¹ auch bezeichnet als Mittelmeer-Mjösen-Zone (STILLE 1925) oder als European Cenozoic rift system (ZIEGLER 1992)

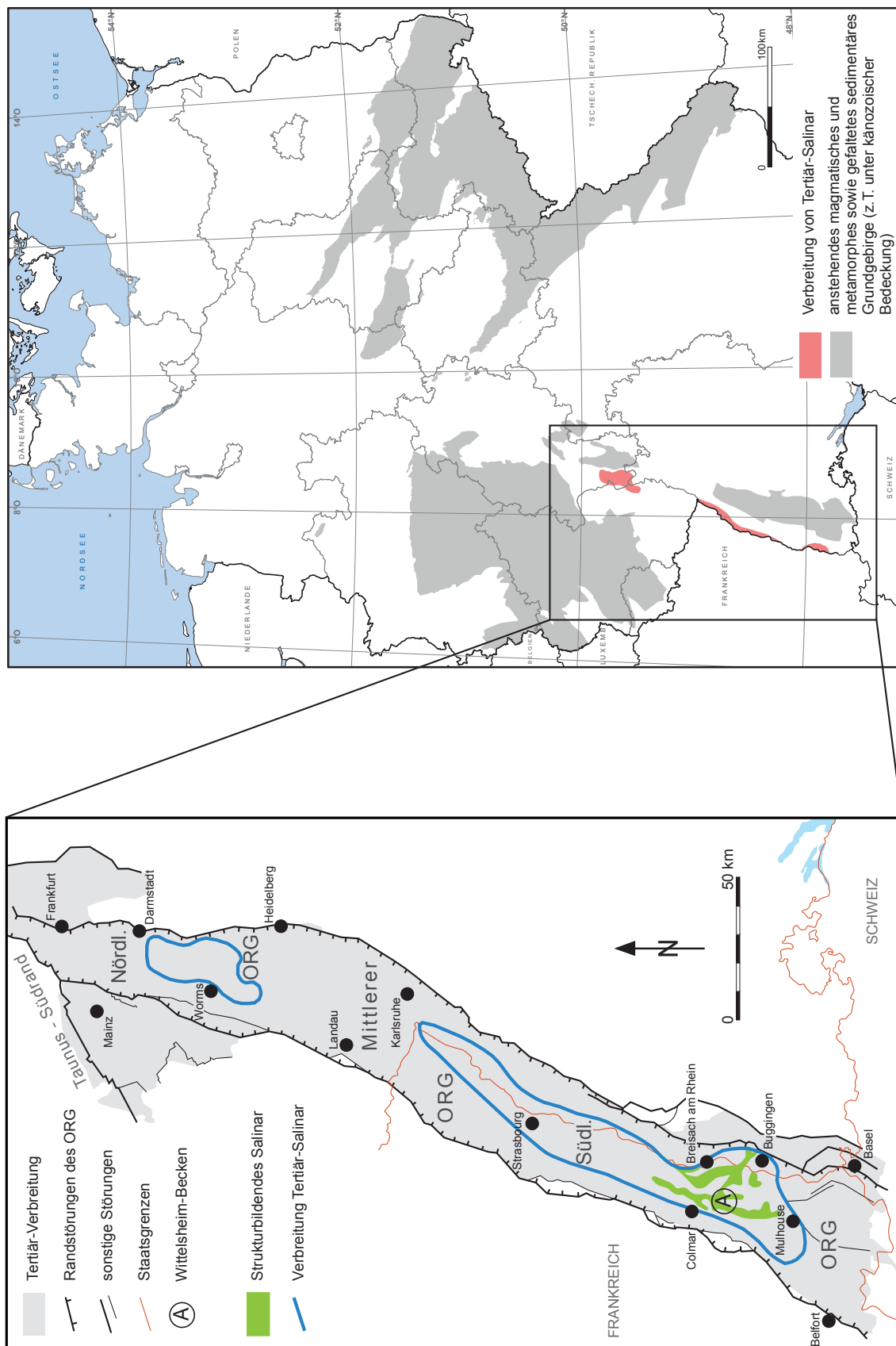


Abb. 28: Schematische Verbreitung der Halit-führenden Tertiär-Salinare im Oberrheingraben (nach: LUTZ & CLEINTUAR 1999, KRULL et al. 2004, GEYER & GWINNER 2011, GRIMM et al. 2011).

Die ältesten paläogenen Sedimente, inklusive der Steinsalzlager des Eozän, sind vorwiegend im Gebiet des südlichen Oberrheingrabens verbreitet (z. B. im Wittelsheim Becken, Abb. 28). Ihre Fazies ist durch die Taphrogenese des Grabens bestimmt, wobei die Randregionen des Grabens durch grobklastische und die Ablagerungen im zentralen Teil vorwiegend durch tonig-mergelige Sedimente, z. T. auch Evaporite geprägt sind. GEYER & GWINNER (2011) sehen daher die lakustrinen Sedimente der Haguenau-Formation und die zeitlich darüber folgenden tonigen, mergelig-sandigen Ablagerungen der Pechelbronn-Formation als lateral angrenzende, zeitlich äquivalente Ablagerungen der Wittelsheim-Formation (Abb. 27). Die Sedimente der Pechelbronn-Formation weisen u. a. salinar geprägte Schichtenfolgen auf (Anhydrit- und Gipsknollen, z. T. Bänke aus Sulfatgesteinen), die bis in den Mittleren Oberrheingraben verbreitet sind (GEYER & GWINNER 2011, GRIMM et al. 2011).

Die gesamte salinare Schichtenfolge der Wittelsheim-Formation erreicht bei Buggingen mehr als 1000 m Mächtigkeit. Im Bergwerk Buggingen liegen die Steinsalzvorkommen in über 800 m Teufe, westlich von Breisach am Rhein kommen Steinsalzschiefer, im Bereich einer Salzstruktur, schon in 80 m Teufe vor (WAGNER 1955, LUTZ & CLEINTUAR 1999, BOHNENBERGER & PAUSE 2003, GEYER & GWINNER 2011).

Die Halit-führende Schichtenfolge der Wittelsheim-Formation wird traditionell in „Untere“, „Mittlere“ und „Obere Salzfolge“ (Salzzone) gegliedert, wobei die „Untere Salzfolge“ und die „Mittlere Salzfolge“ im Becken bis etwa 300 m mächtig sind. Der Hauptanteil der Formation ist durch die „Obere Salzfolge“ bestimmt, in die zwei, bis zu mehrere Meter mächtige Horizonte eingeschaltet sind, in denen Steinsalzschiefer mit Kalisalzen (Sylvinit, Carnallit) wechsellagern (GEYER & GWINNER 2011, GRIMM et al. 2011). Die „Salzfolgen“ der Wittelsheim-Formation erreichen im Bereich von Buggingen das Gebiet von Baden-Württemberg und sind ein östlicher Ausläufer der salinaren Beckenfazies des Grabeninneren. Sie bestehen aus Wechsellagerungen von vorrangig Halit-führenden Schichten und Tonmergelgesteinen, die Anhydritlagen und -knollen enthalten. Die Mächtigkeitsangaben variieren deutlich und werden auf synsedimentär aktive, durch Störungen begrenzte Senken zurückgeführt. Außerdem veränderten Mobilisierungen des Salzes die Mächtigkeit der Steinsalzlager im Wittelsheim-Becken sekundär (Abb. 28). Entlang von Störungen sind Salz-Diapire entstanden, die bis an die Basis der quartären Ablagerungen reichen (WAGNER 1955, LUTZ & CLEINTUAR 1999, GEYER & GWINNER 2011). Im Wittelsheim-Becken beschreibt WAGNER (1955) die drei „Salzfolgen“ wie folgt:

- In der „Unteren Salzfolge“ sind einzelne Steinsalzbänke in kompakte Mergel eingeschaltet. Insgesamt erreichen die Steinsalzbänke der 250 m mächtigen Schichtenfolge eine summarische Mächtigkeit von 185 m.

- Die „Mittlere Salzfolge“ ist im liegenden Teil durch Ton- und Dolomitmergel dominiert, in die zahlreiche geringmächtige Steinsalzlagen eingeschaltet sind. Die gesamte Schichtfolge ist etwa 150 m mächtig, die Mächtigkeit der Steinsalzlagen beträgt insgesamt etwa 70 m. Im hangenden Teil folgt eine etwa 220 m mächtige Schichtenfolge, in der zahlreiche, meist bituminöse Steinsalzbänke vorkommen. Diese sind insgesamt etwa 85 m mächtig.
- In der „Oberen Salzfolge“ sind mit einer Mächtigkeit von insgesamt etwa 60 m mehrere Steinsalzbänke und einzelne Kalisalzlager in eine etwa 120 m mächtige bituminöse Schichtenfolge eingeschaltet.

Das Steinsalzlager der Bruchsal-Formation ist nur im nördlichen Oberrheingraben, in der Umgebung von Worms und Darmstadt verbreitet (Abb. 28). Die Mächtigkeit dieser Formation nimmt von über 400 m (westlich vom Odenwald) auf wenige zehner Meter im Raum Karlsruhe ab (GEYER & GWINNER 2011). Innerhalb der Bruchsal-Formation steigt der Gehalt evaporitischer Einlagerungen in der Schichtenfolge vom Liegenden bis einschließlich zum mittleren Abschnitt („Mittlere Cerithienschichten“) an. Die Sedimente der „Mittleren Cerithienschichten“ deuten auf brackisch-salinare Bildungsbedingungen hin, bei denen bituminöse, z. T. Halit-führende Mergel entstanden sind, die eine Feinstschichtung durch eingeschaltete helle Kalklamellen aufweisen. Anhydritbänke und -knollen sind weit verbreitet. Bei Worms kommen mehrere Steinsalzbänke vor. In der Bohrung Worms 1 wurde 1936 eine erste, etwa 1 m mächtige Steinsalzbank in 1600 m Teufe angetroffen. Weitere 5 Steinsalzbänke mit insgesamt 7 m Mächtigkeit folgen im Teufenabschnitt zwischen 1700 m und 1770 m (WAGNER 1955, GRIMM et al. 2011).

3 Zusammenfassung

Im BGR-Projekt BASAL (Verbreitung und Eigenschaften flach lagernder Salzschichten in Deutschland) werden endlagerrelevante Informationen zum Wirtsgestein Steinsalz in flacher Lagerung aktualisiert und neu erfasst. Der vorliegende Bericht basiert auf den bisherigen BGR-Studien zum Wirtsgestein Steinsalz und fasst bundesweit den aktuellen Kenntnisstand über die räumliche Verbreitung, die lithologische Ausprägung und die geologischen Lagerungsverhältnisse der flach lagernden salinaren Schichtenfolgen zusammen.

In Deutschland kommen Steinsalzfolgen in flacher Lagerung in den stratigraphischen Einheiten Rotliegend, Zechstein, Röt, Muschelkalk, Keuper, Malm und Tertiär vor und konzentrieren sich auf Gebiete, die im Laufe der geologischen Entwicklung eine Absenkung erfahren haben (Abb. 29). Die ebenfalls im Bericht dargestellten Steinsalzvorkommen in den Alpen von SE-Bayern kommen in einer stark tektonisch beeinflussten permotriassischen

Schichtenfolge vor und sind aufgrund ihrer Genese sowie der Lagerungsverhältnisse als eine Sonderform von Steinsalzschiechten in Deutschland zu betrachten.

Die Steinsalzlager der Alpinen Salinare weisen sehr heterogene sowie lithologisch stark variierende Ausprägungen auf und sind nur sehr kleinräumig verbreitet. Die Steinsalzvorkommen befinden sich in einem Gebiet mit Hebungsraten von über 1 mm/a. Auch die Steinsalzlager des Tertiär haben nur eine geringe Verbreitung und können aufgrund ihrer Lage im seismisch aktiven Oberrheingraben aus weitergehenden Betrachtungen von potenziellen Endlagerwirtsgesteinen ausgeschlossen werden.

Die ältesten Steinsalzlager kommen in der Schichtenfolge des Rotliegend vor. Die einzelnen Steinsalzlager zeigen unterschiedliche Ausdehnungen und regional wechselnde Mächtigkeiten. Die Steinsalzlager sind in die meist feinkörnigen und tonreichen Schichtenfolgen der Dethlingen- und Hannover-Formationen eingeschaltet. Die Mächtigkeit der Steinsalzlager erreicht in der Steinsalz-Tonstein-Wechselfolge meist nur wenige Meter. Nur im Bereich der Elbmündung und in Schleswig-Holstein sind in mehreren tausend Metern Teufe einzelne, nur wenige zehner Meter mächtige flach lagernde Rotliegend-Steinsalzfolgen verbreitet.

Die Steinsalzlager der evaporitisch geprägten Zechstein-, Röt- und Muschelkalk-Ablagerungen sind in Deutschland am weitesten verbreitet (Abb. 29) und werden i. d. R. im Hangenden und Liegenden durch sulfatische Schichtenfolgen begrenzt (Basal- und Deckanhydrite). In den Ablagerungen des Zechstein erreichen die Steinsalzfolgen in den Werra-, Staßfurt- und Leine-Formationen z. T. große Mächtigkeiten, wohingegen die Steinsalzlager der Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formationen meist nur wenige Meter mächtig sind und nur im Beckenzentrum vorkommen. Die Basis der Zechstein-Steinsalzlager kann am Südrand des Norddeutschen Beckens in wenigen hundert Metern liegen, zum Beckenzentrum sinkt sie in Tiefen von über 5000 m ab. Mächtige, flach lagernde Steinsalzfolgen sind entweder auf Senken im südlichen Randbereich des Norddeutschen Beckens beschränkt oder kommen in Regionen vor, in denen nur unbedeutende halokinetische Fließvorgänge abgelaufen sind.

Insbesondere im Werra-Fulda-Becken, im Niederrhein-Gebiet, im Thüringer Becken sowie in SE-Brandenburg kann das Steinsalzlager in der Werra-Formation lokal über 400 m mächtig werden. In der Regel wird es jedoch durch ein bis zwei Kaliflöze aufgeteilt, so dass zusammenhängende Steinsalzschiechten selten über 200 m mächtig werden. Im Niederrhein-Gebiet ist das Steinsalzlager durch große Mächtigkeitsschwankungen gekennzeichnet. Im südlichen Emsland bis nach Süddoldenburg befinden sich die flach lagernden Steinsalzfolgen in sehr großen Tiefen.

Aufgrund weitverbreiteter und intensiver halokinetischer Prozesse sind flach lagernde Steinsalzfolgen der Staßfurt-Formation heute nur noch in wenigen Gebieten verbreitet. Insbesondere in SE-Brandenburg, im Thüringer Becken, im Solling-Becken und im Gebiet der Calvörde-Scholle sind die Steinsalzlager durch mehrere hundert Meter Mächtigkeit und eine geringe Tiefenlage gekennzeichnet. Kalisalze kommen auf der Calvörde-Scholle in der Staßfurt-Formation mit dem überwiegend carnallitisch ausgebildeten Kaliflöz Staßfurt vor. Das Steinsalzlager der Leine-Formation ist inklusive des eingeschalteten, überwiegend sylvinitisch ausgebildeten Kaliflözes Ronnenberg maximal etwa 145 m mächtig. Das Steinsalzlager in der Aller-Formation ist dort etwa 50 m mächtig.

In der Röt-Formation kommen Steinsalzlager in den Vitzenburg- und Glockenseck-Subformationen vor. Die zwischengeschaltete Göschwitz-Subformation ist im Beckenzentrum vor allem von pelitischen Sedimenten geprägt. Das im Norddeutschen Becken maximal 150 m mächtige Vitzenburg-Steinsalzlager ist teilweise durch toniges oder anhydritisches Material gebändert, im oberen Teil des Steinsalzlagers treten drei horizontbeständige Anhydrit-/Ton-Mittel auf. Das Steinsalzlager der Glockenseck-Subformation ist vor allem in NW-Deutschland flächenhaft verbreitet und erreicht maximale Mächtigkeiten zwischen 10 m und 20 m. In Gebieten, in denen eine Intrusion von Zechstein-Salzen in die salinar geprägte Röt-Formation erfolgte (z. B. Süd-Niedersachsen), sind die Angaben zur Mächtigkeit sehr unsicher. Die Steinsalzfolgen der Röt-Formation weisen dort eine deutliche Mächtigkeitszunahme auf und es haben sich sogenannte „Salzkeile“ herausgebildet. Die salinaren Schichtenfolgen der Röt-Formation liegen in Norddeutschland flächig in mehreren tausend Metern Tiefe. Im Thüringer Becken treten die, wenige zehner Meter mächtigen Steinsalzlager oberhalb von 700 m u. GOK auf. Das Steinsalzlager in der Thüringer Senke ist ein fein- bis grobkörniges, von Anhydritfasern sowie -lagen und vereinzelt von Tonflocken durchsetztes Steinsalz und wird durch ein etwa 2 m bis 7 m mächtiges anhydritisches, tonig-mergeliges Zwischenmittel zweigeteilt. Auch im Subherzyn wird das etwa 80 m bis 100 m mächtige Steinsalzlager der Röt-Formation durch zwei bis drei Tonmittel gegliedert und liegt in Tiefen zwischen 1500 m und weniger 100 m.

Im Muschelkalk kommen Steinsalzlager in der Heilbronn-Formation vor und in Abhängigkeit von der paläogeographischen Position im Salinar-Becken können bis zu 6 Halit-führende Salinar-Zyklen ausgebildet sein. Am weitesten verbreitet sind die Steinsalzlager der Salinar-Zyklen 3 und 4, die auch die größte Mächtigkeit aufweisen. In Baden-Württemberg und in NW-Bayern erreicht die Mächtigkeit der Muschelkalk-Steinsalzsichten einige Meter bis wenige zehner Meter und sie liegen dort meist in Tiefen von 100 m bis 300 m. Im Thüringer Becken, in Sachsen-Anhalt sowie in den nordöstlichen Verbreitungsgebieten von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern beträgt die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzlager des Muschelkalk ebenfalls nur wenige zehner Meter. Höhere Gesamtmächtigkeiten sind in NW-Deutschland verbreitet, z. B. im Raum Hannover mit etwa 70 m bis 80 m und in

NW-Niedersachsen mit über 100 m. Die Steinsalzlager liegen dort allerdings tiefer als 2000 m u. GOK.

Die Differenzierung des Ablagerungsraums in einzelne Teilbecken sowie synsedimentäre tektonische und halokinetische Bewegungen im Untergrund führten dazu, dass sich die Verbreitung der Steinsalzlager in den Schichtenfolgen des Keuper und Malm im Vergleich zur Verbreitung der Salinare im Zechstein, Röt und Muschelkalk deutlich verringerten (Abb. 29) und dass die Mächtigkeit und Zusammensetzung der Salinare kleinräumig stark variieren. In den Ablagerungen des Keuper sind insgesamt acht Steinsalzlager enthalten, die oft durch Ton- und Anhydritschichten gegliedert sind und in der Grabfeld- sowie in der Weser-Formation vorkommen. Die Steinsalzlager sind eingeschaltet in sulfatisch dominierte Schichtenfolgen. Zwischen diesen salinaren Schichtenfolgen kommt die durch terrigene Sedimente mit deutlichen Merkmalen einer fluviatilen und lakustrinen Fazies gekennzeichnete Schichtenfolge der Stuttgart-Formation vor. Die Verbreitungsgebiete der Steinsalzlager der Grabfeld- und der Weser-Formationen sind annähernd identisch, wobei sich ihre Ausprägungen regional verändern. Insbesondere das Steinsalzlager A der Grabfeld-Formation und das Steinsalzlager H der Weser-Formation erreichen im Unterelberaum und im südlichen Schleswig-Holstein mehrere hundert Meter Mächtigkeit. In den Gebieten hoher primärer Mächtigkeit neigen die Salze des Steinsalzlagers H zu sekundärer, halokinetisch verursachter Akkumulation. Die Steinsalzlager des Keuper befinden sich in über 1200 m Tiefe. Im Gebiet von Ostdeutschland sind die Steinsalzlager des Keuper wesentlich geringmächtiger (wenige zehner Meter).

Im Malm (Oberjura) sind unterschiedlich mächtige und lithologisch verschieden ausgeprägte Steinsalzlager in die tonig-mergelige und anhydritische Schichtenfolge der Münder Mergel-Formation eingeschaltet. Die Steinsalzlager sind z. T. durch erhöhte Tonstein- und Anhydritgehalte gekennzeichnet. In Richtung der jeweiligen Beckenzentren dominieren die Steinsalzlager zunehmend die salinare Schichtenfolge des Malm und in den Gebieten mit den größten Mächtigkeiten besteht die Tendenz zu sekundären, halokinetisch bedingten Akkumulationen der Steinsalzsichten in Form von Salzkissen. Die Mächtigkeit der Steinsalzlager kann dort mehrere hundert Meter erreichen. Die Topflächen dieser Salzkissen liegen heute in einer Tiefe von etwa 300 m u. GOK bis 800 m u. GOK.

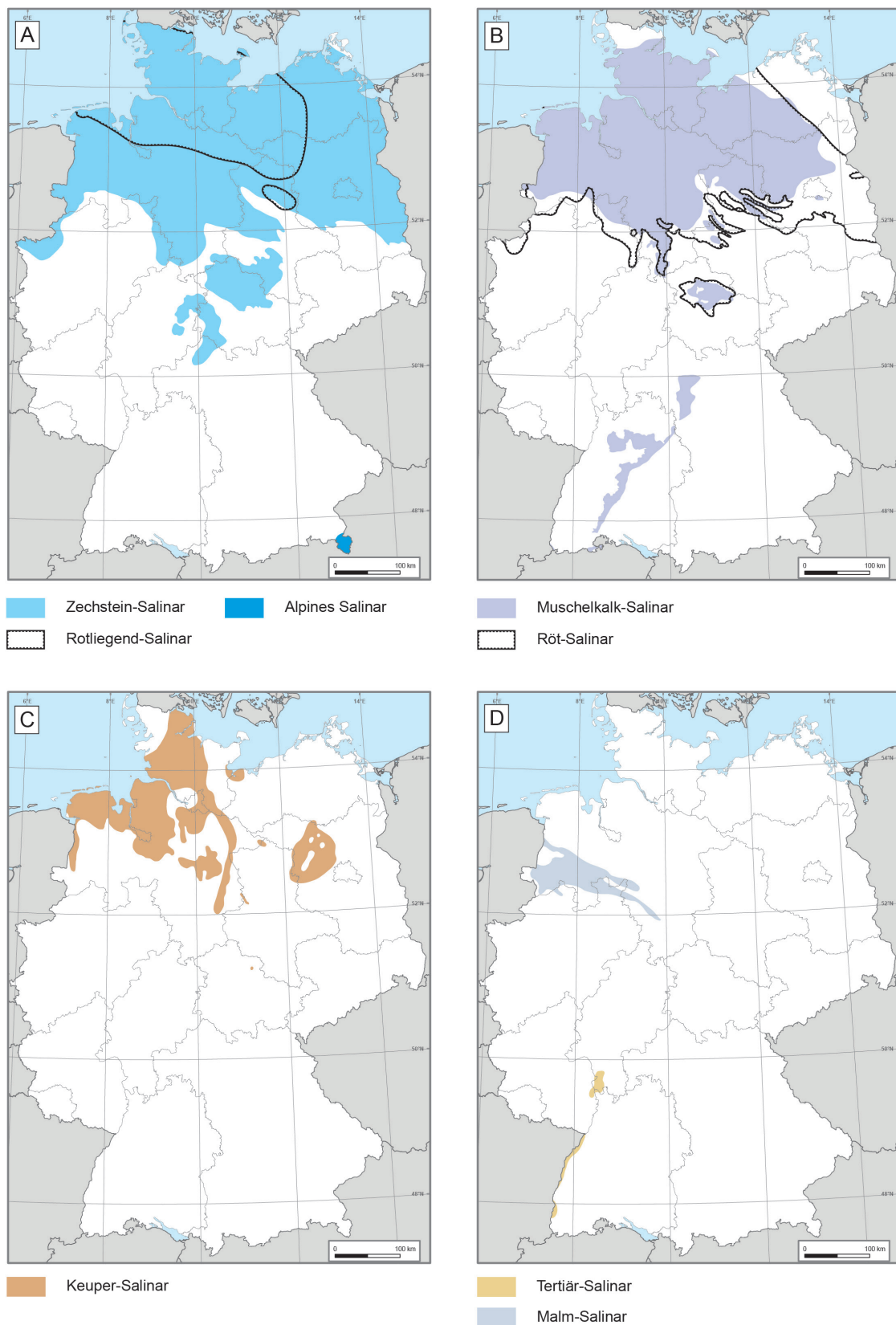


Abb. 29: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Schichtenfolgen in Deutschland.

Diese bundesweite Zusammenstellung der Informationen über die flach lagernden Steinsalzfolgen ermöglicht vergleichende Darstellungen zu ihren räumlichen Verbreitungen, den lithologischen Ausprägungen und den geologischen Lagerungsverhältnissen. Anhand des Berichtes sind die bereits existierenden Bewertungen von Steinsalz in flacher Lagerung im Rahmen der BGR-Wirtsgesteinsstudien besser nachvollziehbar. Für zukünftige Anwendungen von gesamtgesellschaftlich akzeptierten Standortauswahlkriterien kann der Bericht als eine aktualisierte Grundlage für das Wirtsgestein Steinsalz in Deutschland dienen.

In der Gesamtbetrachtung aller flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland sind aufgrund der Mächtigkeit und Tiefenlage Steinsalzlager des Zechstein in den Werra- und Staßfurt-Formationen für weitergehende endlagerspezifische Untersuchungen interessant. Dies gilt insbesondere für die folgenden Gebiete, in denen flach lagernde Steinsalzfolgen des Zechstein in größerer Mächtigkeit vorkommen:

- Niederrhein-Ems-Gebiet
- Werra-Fulda-Becken (inklusive Fränkisches Becken)
- Thüringer Becken
- Calvörde-Scholle
- SE-Brandenburg
- Solling-Becken

Außerdem sollten die Steinsalzlager des Malm (Oberjura) insbesondere im Bereich der erhöhten Akkumulation in Salzkissen regionalgeologisch und lithologisch weitergehend charakterisiert werden. Im Gegensatz zu den Steinsalzfolgen des Malm in flacher Lagerung liegt die Oberfläche der Steinsalzfolgen in den Salzkissen meist deutlich höher als 1000 m u. GOK.

4 Grenzen der Studie

Die vorliegende bundesweite Zusammenfassung des Kenntnisstandes zu den flach lagernden salinaren Schichtenfolgen berücksichtigt ausschließlich geowissenschaftliche Informationen über die Verbreitung, die lithologische Ausprägung und die geologischen Lagerungsverhältnisse. Neue regionalgeologische Untersuchungen im Gelände oder Analysen von Bohrkernmaterial wurden nicht durchgeführt. Bei der Darstellung der Verbreitung der Salinare sind keine raumordnerischen Kriterien (z. B. Schutzgebiete), soziologischen Überlegungen oder ökonomischen Faktoren (z. B. konkurrierende Nutzung durch Lagerstätten) eingeflossen.

Die geologischen Kenntnisse und Daten über die Steinsalzlager des tieferen Untergrundes in Deutschland sind regional sehr heterogen. Aufgrund der Vielzahl von Faktoren, welche die Verbreitung und Ausprägung der Steinsalzlager beeinflussen, sind die altersverschiedenen salinaren Schichtenfolgen bundesweit in kleinmaßstäblichen Abbildungen schematisch dargestellt. Diese Übersichtsabbildungen berücksichtigen insbesondere Informationen über die großräumige Verbreitung und Fazies der Salinare. Lokale Entwicklungen, wie z. B. Schichtausfall oberhalb von Salzstöcken oder Mächtigkeitsschwankungen infolge halokinetischer Salzmobilisierungen, blieben dabei meist unberücksichtigt und sind großmaßstäblicheren bzw. detaillierten regionalen Studien vorbehalten.

Differenzierte Darstellungen der einzelnen Steinsalzlager in den jeweiligen salinaren Formationen wurden nicht erarbeitet. Die im Bericht enthaltenen Bohrprofile (siehe Anlagen) sollen vor allem die Ausprägung der Steinsalzlager in den salinaren Schichtenfolgen verdeutlichen, stellen aber keine geologischen Profile sensu stricto dar.

Basierend auf Publikationen und internen Berichten der BGR wurden in der vorliegenden Studie zahlreiche charakteristische Merkmale der altersverschiedenen salinaren Schichtenfolgen dokumentiert. Eine Einschätzung der Eignung von Steinsalzlagern auf der Grundlage endlagerspezifischer Kriterien erfolgte nicht, da die für diese Bewertung erforderlichen Kriterien derzeit in der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ im gesellschaftlichen Konsens erarbeitet werden. Eine Anwendung früher formulierter Auswahlkriterien wurde von den Autoren dieser Studie als nicht zielführend angesehen, zumal sich die Ergebnisse der Anwendung dieser Kriterien bereits in früheren Studien zum Wirtsgestein Steinsalz wiederfinden.

Der Bericht liefert als Ergebnis keine Auswahl von potenziellen Endlagerstandorten. Die tatsächliche Eignung von flach lagernden Steinsalzfolgen als Wirts- und Barrieregestein für die Endlagerung radioaktiver Abfälle kann erst durch standortspezifische Erkundungen unter Zugrundelegung von entsprechenden Auswahlkriterien festgestellt werden.

5 Ausblick

Weiterführende, im Projekt BASAL vorgesehene Arbeiten zur detaillierten stofflich-strukturellen Charakterisierung von flach lagernden Steinsalzfolgen sollten sich vorrangig auf die Steinsalzlager der Werra- und der Staßfurt-Formation im Zechstein konzentrieren. Diese weisen die höchsten Mächtigkeiten unter den flach lagernden Steinsalzfolgen auf und kommen regional in Tiefenlagen von wenigen hundert Metern bis etwa 2000 m vor. Ausgehend von den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen gilt dies für die Vorkommen im Niederrhein-Ems-Gebiet, im Werra-Fulda-Becken (inklusive Fränkisches Becken) und im Thüringer Becken sowie auf der Calvörde-Scholle, in SE-Brandenburg und im Solling-Becken. Damit für diese Gebiete die erforderliche Regionalisierung der gesteinspezifischen Eigenschaften (z. B. lokale Ausprägung der Steinsalzschiechten) sowie eine strukturgeologische Charakterisierung erfolgen können, sind in einem nächsten, auf den bisherigen Arbeiten logisch aufbauenden Schritt die horizontbezogenen Daten und Messungen aus Bohrungen auszuwerten und zusammen mit strukturgeologischen Kenntnissen in geowissenschaftliche Modelle (z. B. Faziesverteilung) zu integrieren. Die gegenwärtig von mehreren Geologischen Landesämtern entwickelten geologischen 3D-Landesmodelle des tieferen Untergrundes unterstützen die, für die Fortführung der Arbeiten im Projekt BASAL erforderliche komplexe Erfassung und Auswertung regionaler geologischer und geophysikalischer Daten. Diese 3D-Modelle dienen der Visualisierung des aktuellen geowissenschaftlichen Kenntnisstandes und sind deshalb eine nützliche Grundlage für zukünftige regionalgeologische Bewertungen von Wirts- und Barrieregesteinen.

Aufgrund ihrer Zuständigkeit für den tieferen Untergrund ist bei der Fortsetzung der Arbeiten eine Kooperation zwischen den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe notwendig, um die verfügbaren endlagerrelevanten Informationen über die potenziellen Wirtsgesteine in Deutschland weitergehend zu aktualisieren. Dazu zählen auch Informationen zum geologischen Bau der prä- und postsalinaren Gesteinsschichten. Nur so kann die Konsistenz zwischen klein- und großmaßstäblichen Modellvorstellungen über flach lagernde Steinsalzfolgen gewährleistet werden.

Literaturverzeichnis

- 2011/70/EURATOM (2011): Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. – Amtsblatt der Europäischen Union, L 199/48(DE): 48-56.
- AHORNER, L. & SOBISCH, H.-G. (1988): Ein untertägliches Überwachungssystem im Kali-bergwerk Hattorf zur Langzeiterfassung von seismischen Ereignissen im Werra-Kaligebiet. – Kali und Steinsalz, 10(2): 39-49.
- AKEND - ARBEITSKREIS ENDLAGERSTANDORTE (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd-Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. – Abschlußbericht: 272 S.; Hannover.
- ALBRECHT, H., HUNSCHKE, U. & SCHULZE, O. (1993): Results from the application of the laboratory test program for mapping homogeneous parts in the Gorleben salt dome. – Glückauf - die Fachzeitschrift für Rohstoff, Bergbau und Energie, Geotechnik Sonderheft: 155-158; Essen.
- ALBRECHT, H. & LANGER, M. (1974): The rheological behavior of rock salt and related stability problems of storage caverns. – In: NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (Hrsg.): Advances in rock mechanics: 967-972; Washington, DC (U.S. National Committee for Rock Mechanics).
- ALT, W. & WASILEWSKI, M. (1994): Schwierigkeiten bei der Sanierung der Soleförderanlage Bohrloch 10 in Bad Duerndorf. – Heilbad und Kurort, 46(8): 238-242; Federal Republic of Germany. ISSN 0343-768X.
- ALTHEN, G.W., RUSBÜLT, J. & SEEGER, J. (1980): Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalkes der DDR. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 8(8): 985-999, 7 Abb., 1 Tab.; Berlin.
- ATG - ATOMGESETZ (2013): Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz); zuletzt geändert durch Art. 5 G v. 28.8.2013.
- BACHMANN, G.H. & SCHWAB, M. (2008): Stratigraphie. – In: BACHMANN, G. H., EHLING, B.-C., EICHNER, R. & SCHWAB, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt: 51-57; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

- BALDSCHUHN, R., BINOT, F., FLEIG, S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordee-Sektor. – Geologisches Jahrbuch, A 153: 88 S., mit 3 CD-ROM's; Hannover. ISSN 0341-6399.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1998): Der Salzkeil, ein strukturelles Requisit der saxonischen Tektonik. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 149(1): 59-69; Stuttgart.
- BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1999): Strukturen im Untergrund NW-Deutschlands 1 : 500 000. – Bericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BALDSCHUHN, R. & KOCKEL, F. (1998): Der Untergrund von Hannover und seiner Umgebung. – In: DANIELS, C. H. v. & KNOLL, J. (Hrsg.): Bericht der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover: 140: 5-98; Hannover.
- BARNASCH, J. (2009): Der Keuper im Westteil des Zentraleuropäischen Beckens (Deutschland, Niederlande, England, Dänemark) - Diskontinuierliche Sedimentation, Litho-, Zylo- und Sequenzstratigraphie. – PhD: 225 S.; Martin-Luther-Universität, Institut für Geowissenschaften, Halle.
- BAURIEGEL, A. (2004): Das rezente Subrosionsgeschehen am Salzhang des Werra-Salinars bei Bad Salzungen und dessen Auswirkungen auf die Erdoberfläche. – In: WUNDERLICH, J. (Hrsg.): Subrosion und Baugrund in Thüringen: 79-94; Jena (Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie).
- BEBIOLKA, A., GÖTHEL, M. & HÖDING, T. (2011): Endbericht zum Projekt Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Brandenburg, Berlin und Teilgebiete in Sachsen. – Abschlussbericht: 53 S., 23 Abb., 2 Tab.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- BECKER, F. & BECHSTÄDT, T. (2006): Sequence stratigraphy of a carbonate-evaporite succession (Zechstein 1, Hessian Basin, Germany). – Sedimentology: Journal of the International Association of Sedimentologists, 53(5): 1083-1120.
- BEER, W. (1996): Kalilagerstätten in Deutschland. – Kali und Steinsalz, 12(1): 18-31.
- BENOX, D., LUDWIG, A.O., SCHULZE, W., SCHWAB, G., HARTMANN, H., KNEBEL, G. & JANUSZEWSKI, I. (1997): Struktur und Entwicklung mesozoischer Störungszonen in der Südwest-Altmark. – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, B 19: 83-114; Halle (Saale).

- BEST, G., LEYDECKER, G., BORNEMANN, O. & KOCKEL, F. (1982): Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern, 28.04.1982. – Bericht: 91 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BEST, G., RÖHLING, H.-G. & BRÜCKNER-RÖHLING, S. (1993): Synsedimentäre Tektonik und Salzkissenbildung während der Trias in Norddeutschland. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk - Schöntaler Symposium 1991: 37-37; Stuttgart (Goldschneck-Verlag).
- BETZ, D., FÜHRER, F., GREINER, G. & PLEIN, E. (1987): Evolution of the Lower Saxony Basin. – Tectonophysics, 137(1-4): 127-170. ISSN 0040-1951.
- BEUTLER, G. (1993): Der Muschelkalk zwischen Rügen und Grabfeld. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk - Schöntaler Symposium 1991: 47-56; Stuttgart (Goldschneck-Verlag).
- BEUTLER, G. (2004): Trias. – In: KATZUNG, G. (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern: 140-151; Stuttgart (E. Schweizerbart).
- BEUTLER, G. (2008): Keuper. – In: BACHMANN, G. H., EHLING, B.-C., EICHNER, R. & SCHWAB, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt: 213-230; Stuttgart.
- BEUTLER, G., HAUSCHKE, N. & NITSCH, E. (1999): Faziesentwicklung des Keupers im Germanischen Becken. – In: HAUSCHKE, N. & WILDE, V. (Hrsg.): Trias - Eine ganz andere Welt: 129-174; München (Pfeil).
- BEUTLER, G. & TESSIN, R. (2005): Der Keuper im Norddeutschen Becken. – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper: 1-296, 64 Abb., 50 Tab., 2 Taf.; Frankfurt a. M. (Courier Forschungsinstitut Senckenberg).
- BEYWL, T., GLANDER, H., HESSMANN, W., KÄBEL, H., LANGE, M., PUTSCHER, S., SCHIRRMEISTER, W., VOIGT, H.-J. & ZIESCHANG, J. (1974): Höffigkeitseinschätzung UGS - Zechstein- und Triassalinare - Stauer und Speicher des Rät bis Unterkreide. – Bericht: 50 S.; Zentrales Geologisches Institut, Berlin.
- BLASIG, W. (1993): Der Kalibergbau an der Werra. – In: DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (Hrsg.): Salz in Werra und Weser - Ursachen, Folgen, Abhilfe - Ergebnisse einer Fachtagung der ARGE Weser am 22. März 1993 in Kassel: 11-19; Kassel (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau).

- BMU - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. – 22 S.; Berlin (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit).
- BMWi - BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (2008): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Das Endlagerprojekt Gorleben. – 62 S.; Berlin (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie).
- BOCK, H., WERNER, W. & SIMON, T. (2009): Die Verbreitung der steinsalzführenden Schichten in Baden-Württemberg - eine Aktualisierung des Wissenstandes. – LGRB-Nachrichten, 08/2009: 2.
- BOHNENBERGER, G. & PAUSE, R. (2003): Salzbergbau im Neckertal. – Exkurs. f. Veröfftl. GW, 222: 53-56.
- BOHNENBERGER, G. & RÜTHER, W. (2011): Die neue Verbindungsstrecke Heilbronn-Kochendorf. – Kali und Steinsalz, 2: 40-47.
- BOIGK, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland - Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik. – 330 S.; Stuttgart (Enke).
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., FISCHBECK, R., HAMMER, J., JARITZ, W., KELLER, S., MINGERZAHN, G. & SCHRAMM, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben - Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. – Geologisches Jahrbuch, C 73: 211, 50 Abb., 7 Tab., 5 Anl.; Hannover. ISSN 978-3-510-95964-8.
- BRADSHAW, R.L., BOEGLY JR., W.J., EMPSON, F.M., KUBOTA, H., PARKER, F.L., PERONA, J.J. & STRUXNESS, E.G. (1963): Ultimate storage of high-level waste solids and liquids in salt formations. – Proceedings of a Symposium, Vienna, Austria 1962: 153-175; Wien (International Atomic Energy Agency).
- BRANDES, J. (2011): Mesozoische Speicher- und Barrierekomplexe der Altmark-Fläming-Scholle (Sachsen-Anhalt) - Abschlussbericht zum Projekt „Speicher-Kataster Deutschland“: 49 S., 8 Abb., 2 Tab.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin / Hannover.
- BRANDES, J. & OBST, K. (2011): Speicher- und Barrierekomplexe in Mecklenburg-Vorpommern. – Abschlussbericht zum Projekt „Speicher-Kataster Deutschland“: 34 S., 16 Abb., 3 Tab.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.

- BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P., SCHUSTER, P. & SPRADO, K.-H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. – Bericht: 147 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BRINKMANN, R. (1977): Brinkmanns Abriß der Geologie - Bd. II. Historische Geologie (10./11. Auflage, neubearbeitet von Karl Krömmlein 1976). – 400 S., 70 Abb., 63 Taf., 21 Tab.; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag). ISBN 3-432-80600-0.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S. & LANGBEIN, R. (1993): Lithostratigraphie des Mittleren Muschelkalks in der Bohrung Hakeborn-211 (Subherzynes Becken) und Logkorrelation zwischen Thüringer Becken, Subherzyn und Norddeutschem Becken. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk - Schöntaler Symposium 1991: 105-110; Stuttgart (Goldschneck-Verlag).
- BURCHARDT, I., DÖLZ, F. & GABRIEL, W. (1980): Ergebnisbericht Kalisalzvorerkundung Scholle von Calvörde (Mittel- und Westteil). – Bericht, Archiv 4103562: 321 S.; VEB Geologische Forschung und Erkundung Halle, Halle.
- CARTER, N.L., HORSEMAN, S.T., RUSSELL, J.E. & HANDIN, J. (1993): Rheology of rocksalt. – Journal of Structural Geologie, 15(9/10): 1257-1291.
- CRAMER, P. (1965): Zur Geologie der Gegend von Bad Windsheim/Mfr. unter besonderer Berücksichtigung neuer Tiefenaufschlüsse. – Geologica Bavarica, 55: 105-118.
- DAK - DEUTSCHE ATOMKOMMISSION (1961). – Protokoll der 23. Sitzung des Deutschen Atomkommission-Arbeitskreises III/IV-1 vom 7.07.1961.
- DOBEN, K. & RISCH, H. (1996): Nördliche Kalkalpen (Oberostalpin). – In: FREUDENBERGER, W. & SCHWERD, K. (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 - 4. Aufl.: 220-231; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- DOCKTER, J. & LANGBEIN, R. (2003): Keuper. – In: SEIDEL, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen, 2. neubearbeitete Auflage: 357-391; Stuttgart (Schweizerbart).
- DÖLLING, M. & LINDER, B. (2010): Potenzialkarten und Charakterisierung von CO₂-Speicherstrukturen in Nordrhein-Westfalen. – Abschlussbericht: 148 S., 84 Abb., 7 Tab., 1 CD; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.

- DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (Hrsg.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (SPBA). – 342 S.; Houten (EAGE Publications b.v.).
- DSK - DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2011): Stratigraphie von Deutschland IX. Tertiär, Teil 1 - Oberrheingraben und benachbarte Tertiärgebiete. – 464 S.; Hannover (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften). ISBN 579 9-783-510-49223-7.
- DSK - DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2013): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. – 657 S., 275 Abb., 45 Tab., 1 Taf.; Stuttgart (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften). ISBN 978-3-510-49229-9.
- EXLER, H.J. (1987): Salz und Sole. – Geologica Bavarica, 91: 47-63, 3 Abb., 5 Tab. 2 Fotos.
- FEIST-BURKHARDT, S., GÖTZ, A.E., SZULC, J., BORKHATARIA, R., GELUK, M., HAAS, J., HORNING, J., JORDAN, P., KEMPF, O., MICHALIK, J., NAWROCKI, J., REINHARDT, L., RICKEN, W., RÖHLING, H., RÜFFER, T., TÖRÖK, A. & ZÜHLKE, R. (2008): Triassic. – In: McCANN, T. (Hrsg.): The Geology of Central Europe - Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic: 749-821; London (The Geological Society). ISBN 9781862392649.
- FISCHBECK, R., WERNER, W. & BORNEMANN, O. (2003): Die Zusammensetzung der Salzgesteine des Muschelkalks in Südwestdeutschland. – In: HANSCH, W. & SIMON, T. (Hrsg.): Das Steinsalz aus dem Mittleren Muschelkalk Südwestdeutschlands: 76-93; Heilbronn (museum).
- FÖRSTER, A., NORDEN, B., ZINCK-JØRGENSEN, K., FRYKMAN, P., KULENKAMPFF, J., SPANGENBERG, E., ERZINGER, J., ZIMMER, M., KOPP, J., BORM, G., JUHLIN, C., COSMA, C.-G. & HURTER, S. (2006): Baseline characterization of the CO2SINK geological storage site at Ketzin, Germany. – Environmental Geosciences, 13(3): 145-161.
- FRANZ, M. (2008): Litho- und Leitflächenstratigraphie, Chronostratigraphie, Zyklus- und Sequenzstratigraphie des Keupers im östlichen Zentraleuropäischen Becken (Deutschland, Polen) und Dänischen Becken (Dänemark, Schweden). – Dissertation; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg - Institut für Geowissenschaften, Halle.
- FREUDENBERGER, W. & SCHWERD, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 - 4. neubearbeitete Auflage. – 329 S.; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).

- FRISCH, U. (1990): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:100000, Blatt Elmshorn, C 2322. – Bericht: 128 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (2003): Der Bremen-“Knoten“ im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands - Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. – Bericht: 379 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- FULDA, E. (1938): Die Lagerstätten der nutzbaren Mineralien und Gesteine nach Form, Inhalt und Entstehung - III. Band: Kohle, Salz, Erdöl - 2. Teil: Steinsalz und Kalisalz. – 240 S., 94 Abb.; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).
- GAERTNER, H. (1993): Zur Gliederung des Muschelkalks in Nordwestdeutschland in Tiefbohrungen anhand von Bohrlochmessungen. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk - Schöntaler Symposium 1991: 57-64; Stuttgart (Goldschneck-Verlag).
- GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. – In: HAGDORN, H. & SEILACHER, A. (Hrsg.): Muschelkalk - Schöntaler Symposium 1991: 85-103; Stuttgart (Goldschneck-Verlag).
- GAST, R.E. (1991): The Perennial Rotliegend Saline Lake in NW Germany. – Geologisches Jahrbuch, 119: 25-59.
- GAST, R.E., PASTERNAK, G., PISKE, J. & RASCH, H.-J. (1998): Das Rotliegend im nordost-deutschen Raum - Regionale Übersicht, Stratigraphie, Fazies und Diagenese. – Geologisches Jahrbuch, A 149: 59-79.
- GAST, S. & RÖHLING, H.-G. (2012): Lithostratigraphische Gliederung des Muschelkalks in der Bohrung Groß Buchholz GT1 (GeneSys-Projekt Hannover) anhand geophysikalischer Bohrlochmessungen. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 80: 519.
- GAUPP, R., GAST, R.E. & FORSTER, C. (2000): Late Permian Playa Lake deposits of the Southern Permian Basin (Central Europe). – In: GIERLOWSKI-KORDESCH, E. H. & KELTS, K. R. (Hrsg.): Lake Basins Through Space and Time: 75–86; Tulsa, Oklahoma (American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology).
- GEBHARDT, U. (1994): Zur Genese der Rotliegend-Salinare in der Norddeutschen Senke (Oberrotliegend II, Perm). – Freiburger Forschungshefte, C 452: 3-22; Leipzig.

- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (2011): Geologie von Baden-Württemberg - 5., völlig neu bearbeitete Auflage, herausgegeben von Matthias Geyer, Edgar Nitsch und Theo Simon. – 627 S., 185 Abb., 4 Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GÖTHEL, M. (2006): Fortschritte bei der Unterscheidung von Aquiferen in der Trias und im Jura von Brandenburg unter spezieller Berücksichtigung der Sequenzstratigraphie. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 13(1/2): 91-115, 5 Abb., 5 Tab., 30 Lit.
- GÖTHEL, M. (2012): Aktuelle Informationen zur stratigraphischen Zuordnung eustatisch und tektonisch kontrollierter Ablagerungssequenzen des Zechsteins im Rahmen der plattentektonischen und paläogeographischen Situation zwischen Gondwana und dem geotektonischen Puzzle Europas. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 19(1): 29-42, 4 Abb., 2 Taf. 58 Zit.; Cottbus.
- GRALLA, P. (1988): Das Oberrotliegend in NW-Deutschland - Lithostratigraphie und Faziesanalyse. – Geologisches Jahrbuch, A 106: 3-59, 34 Abb., 3 Taf.
- GRAMANN, F., HEUNISCH, C., KLASSEN, H., KOCKEL, F., DULCE, G., HARMS, F.-J., KATSCHOREK, T., MOENNIG, E., SCHUDACK, M., SCHUDACK, U., THIES, D., WEISS, M. & HINZE, C. (1997): Das Niedersächsische Oberjura-Becken - Ergebnisse interdisziplinärer Zusammenarbeit. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 148(2): 165-236; Federal Republic of Germany. ISSN 0012-0189.
- GRIMM, M.C., WIELANDT-SCHUSTER, U., HOTTENROTT, M., GRIMM, K.I. & RADTKE, G. (2011): 5. Regionalgeologische Darstellungen. – In: DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IX - Tertiär, Teil 1: 57-132; Hannover (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften). ISBN 9783510492237.
- HAASE, G. (1976): Beitrag zur Kenntnis der Salzlagerstätte im thüringischen Werra-Kaligebiet. – Jahrbuch der Geologie, 7/8: 211-261, 9 Abb., 8 Tab., 1 Taf.; Berlin (Akademie Verlag).
- HABLE, R., KAUFHOLD, H., LIEBSCH-DÖRSCHNER, T. & THOMSEN, C. (2011): Endbericht Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Hamburg und Schleswig-Holstein. – Abschlussbericht: 73 S., 23 Abb., 7 Tab.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.

- HAGDORN, H., HICKETHIER, H., HORN, M. & SIMON, T. (1987): Profile durch den hessischen, unterfränkischen und baden-württembergischen Muschelkalk. – Geologisches Jahrbuch Hessen, 115: 131-160, 2 Abb., 2 Tab., 3 Taf.; Wiesbaden.
- HAGDORN, H. & SIMON, T. (2005): Der Muschelkalk in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – Newsletters on Stratigraphy, 41(1-3): 143-158; Berlin / Stuttgart.
- HAMMER, J., MERTINEIT, M., BEHLAU, J., MINGERZAHN, G., KÜHNLENZ, T., SCHRAMM, M., ZULAUF, G. & ZULAUF, J. (2014): Deformation and geometry of anhydrite rocks in domal salt structures - results of field studies, mineralogical analyses and thermomechanical experiments. – In: RADIOAKTIVE WASTE MANAGEMENT COMMITTEE (Hrsg.): Natural Analogues for Safety Cases of Repositories in Rock Salt - "Salt Club" Workshop Proceedings: 147-175; Braunschweig, 5.-7. September 2012 (NEA/OECD).
- HAMMER, J., SÖNNKE, J. & MINGERZAHN, G. (2009): Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen. – Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA Teil I): 161 S., 62 Abb.; Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- HERRMANN, R. & KUNZ, R. (1999): Stratigraphie und Fazies der Salinar-Folge (Münder Mergel / Ober-Malm) der SE- und SW-Hilsmulde / S-Niedersachsen. – Philippia, 9(2): 103-114; Federal Republic of Germany. ISSN 0343-7620.
- HEUNISCH, C., CASPERS, G., ELBRACHT, J., LANGER, A., RÖHLING, H.-G., SCHWARZ, C. & STREIF, H. (2007): Erdgeschichte von Niedersachsen - Geologie und Landschaftsentwicklung. – GeoBerichte, 6: 3-85.
- HISS, M. & MILBERT, G. (1983): Geologische Untersuchungen von Anhydritstrukturen im Steinsalzbergwerk Borth der Deutschen Solvay-Werke. – Dissertation (unveröffentlicht): 43 S., 9 Abb., 44 Anl.; Krefeld.
- HÖDING, T. (2014): Nutzung und Potenziale des tiefen Untergrundes in Brandenburg, Teil 1: Kohlenwasserstoffe, tiefliegende feste mineralische Rohstoffe, Speicherpotenziale. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 21(1/2): 105-128.
- HOFRICHTER, E. (1966): Bericht zur Tagung „Endbeseitigung und Tieflagerung radioaktiver Rückstände“ am 28.06.1966 in Essen. – Bericht: 7 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

- HOPPE, W. (1960): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der Deutschen Demokratischen Republik - Teil 1 - Das Werra-Gebiet. – Freiburger Forschungshefte, C 97: 1-166; Berlin.
- HOTH, K., HUEBSCHER, H.D., KORICH, D., GABRIEL, W. & ENDERLEIN, F. (1993a): Die Lithostratigraphie der permokarbonischen Effusiva im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke. – Geologisches Jahrbuch, A 131: 179-196.
- HOTH, K., RUSBÜLT, J., ZAGORA, K., BEER, H. & HARTMANN, O. (1993b): Die tiefen Bohrungen im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke - Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962-1990. – Schriftenreihe für Geowissenschaften, 2: 145 S., 1 Abb., 2 Tab.; Berlin (Gesellschaft für Geowissenschaften).
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen - Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. – 118 S., 44. Abb., 5 Tab.; Berlin / Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- HUCKRIEDE, H. & ZANDER, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tieferen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). – In: MÜLLER, C. & REINHOLD, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland: Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 74: 188-204; Hannover (Schweizerbart).
- HUNSCHÉ, U., MINGERZAHN, G. & SCHULZE, O. (1993): The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of rock salt. – In: GHOREYCHI, M., BÉREST, P., HARDY JR., H.-R. & LANGER, M. (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt: Proceedings of the 3rd Conference: 247-248; Ecole Polytechnique Palaiseau, France, 14.-16. September 1993 (Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld).
- HUNSCHÉ, U., PLISCHKE, I. & SCHULZE, O. (1998): Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in-situ. - Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen. – Bericht, I 62; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- HUNSCHÉ, U., SCHULZE, O., WALTER, F. & PLISCHKE, I. (2003): Projekt Gorleben. Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. – Abschlussbericht: 157 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

- JÄHNE, F., BEBIOLKA, A., ARFAI, J. & LUTZ, R. (2012): Deformation of Rotliegend salt formations and their influence on the structural pattern in the German North Sea. – In: KÜMPEL, H.-J., RÖHLING, H.-G. & STEINBACH, V. (Hrsg.): GeoHannover 2012 - GeoRohstoffe für das 21. Jahrhundert: 521 S.; Hannover, 1. bis 3. Oktober 2012 (Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften).
- JAHNE, H. (1988): Geologische Gesetzmäßigkeiten des Werra-Salinars im Bereich des Grubenfeldes „Marx-Engels“ (Werra-Kaligebiet) - eine Grundlage für die Erkundung, Erschließung und effektive Nutzung der Kaliflöze „Thüringen“ und „Hessen“. – Dissertation: 117 S.; TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Freiberg.
- JARITZ, W. (1972): Eine Übersichtskarte der Tiefenlage der Salzstöcke in Nordwestdeutschland. – Geologisches Jahrbuch, 90: 241-244, 1 Taf.; Hannover.
- JARITZ, W. (1973): Zur Entstehung der Salzstrukturen Nordwestdeutschlands. – Geologisches Jahrbuch, A 10: 77, 5 Abb., 1 Tab.; Hannover. ISSN 0341-6399.
- JARITZ, W. (1983): Eignung von Salzstöcken in Niedersachsen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. – Bericht: 105 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- JUBITZ, K.-B. (1969): Oberer Buntsandstein (Röt). – In: DICKENSTEIN, G. C., SÖLLIG, A. & NÖLDEKE, W. (Hrsg.): Lithofazielle Besonderheiten, Paläogeographie, Tektonik und Erdöl-Erdgas-Höflichkeit DDR N-Teil (Siles bis Tertiär) - Kapitel IV: Erläuterungen zu den lithologisch-paläogeographischen Karten für den N-Teil der DDR im Maßstab 1 : 500 000 und 1 : 200 000: 57-60; Berlin (EE Gommern).
- KÄDING, K.-C. (1978): Stratigraphische Gliederung des Zechsteins im Werra-Fulda-Becken. – Geologisches Jahrbuch Hessen, 106: 123-130; Wiesbaden.
- KÄDING, K.-C. (1987): Kali- und Steinsalzbergwerk Hattorf der Kali und Salz AG Schachtanlage Hera - Befahrung von Bohrkernen aus dem Zechstein des Werra-Fulda-Beckens und des Solling-Beckens. – Internationales Symposium Zechstein 87 - Exkursionsführer I: 57-68, 7 Abb.; Kassel / Hannover (Hessisches Landesamt für Bodenforschung).
- KÄDING, K.-C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – Newsletters on Stratigraphy, 41(1-3): 123-127; Berlin / Stuttgart.

- KÄSTNER, H. (1972): Der Zechstein in Süd- und Südwestthüringen - Zusammenfassung und Diskussion des Kenntnisstandes. – Berichte der Deutschen Gesellschaft für Geologische Wissenschaften, A 17(6): 897-910.
- KÄSTNER, H. (1996): Zur Ausbildung des Zechsteins, insbesondere des Kalisalzflözes Staßfurt, am SE-Rand der Thüringischen Senke. – In: HOPPE, W., GESANG, H., GÜNTHER, M. A., JUDERSLEBEN, G., SCHUBERT, J. & SEIDEL, G. (Hrsg.): Gedenkschrift zum 100. Geburtstag von Walter Hoppe 57-84, 1 Tab., 4 Taf.; Weimar (Thüringer Landesanstalt für Geologie).
- KATZUNG, G. (1991): Zu Auftreten, Ausbildung und Genese des Salinars in der mitteleuropäischen Saxon II-Senke (Oberperm). – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I, 1990(11): 1565-1585; Federal Republic of Germany. ISSN 03405109.
- KBB - KAVERNENBAU- UND BETRIEBSGESELLSCHAFT (1974): Geologisch-topographische Vorstudie zur Standortvorauswahl für ein Speicherprojekt der KEWA - Zusammenstellung und Bewertung geologischer und topographischer Daten von Salzstöcken in Norddeutschland für den Bau von Kavernen. – 44 S., 1 Anl; Hannover (Kavernenbau- und Betriebsgesellschaft mbH).
- KELLERBAUER, S. (1996): Geologie und Geomechanik der Salzlagerstätte Berchtesgaden. – Münchner Geologische Hefte, B 2: 101, 56 Abb., 11 Tab., 2 Taf.
- KELLERBAUER, S. (2003): Geologie und Bergbau im alpinen Salinar von Berchtesgaden. – Exkurs. f. Veröfftl. GGW, 222: 105-110.
- KERN, H. & FRANKE, J.-H. (1986): Carnallit - thermisches und thermomechanisches Verhalten in Endlager-Salzstöcken. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 137(1): 1-27, 7 Abb., 1 Tab., 4 Taf., 11 Zit.
- KEWA-STUDIE (1974): Ermittlung mehrerer alternativer Standorte in der Bundesrepublik Deutschland für eine industrielle Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungsanlage (vom BMFT gefördert). – KEWA-Zwischenbericht über den Berichtszeitraum vom 1.1. – 31.12.1976; Kernbrennstoff-Wiederaufbereitungs-Gesellschaft, Frankfurt / M.-Höchst.
- KIMMIG, B., BOCK, H., LEIBER, J. & WERNER, W. (1999): Karte der mineralischen Rohstoffe von Baden-Württemberg 1 : 50 000 - Erläuterungen zu Blatt L 7718 Balingen. – 1 S.; Freiburg (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg).

- KLEY, J., FRANZKE, H.-J., JÄHNE, F., KRAWCZYK, C., M., LOHR, T., REICHERTER, K., SCHECK-WENDEROTH, M., SIPPEL, J., TANNER, D., VAN GENT, H., MÜLLER, R., URAI, J., L. & VOIGT, T. (2008): Strain and stress. – In: LITKE, R., BAYER, U., GAJEWSKI, D. & NELSAMP, S. (Hrsg.): Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin system: 97-124; Berlin (Springer Verlag). ISBN 9783540850847.
- KOCKEL, F., BRÜCKNER-RÖHLING, S., RÖHLING, H.-G. & FRISCH, U. (1999): Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland 1 : 300 000 - Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands - Bd. 3: Der Zechstein, die Trias. – Bericht: 133 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- KOCKEL, F., KRULL, P., FISCHER, M., FRISCH, U., HESSMANN, W. & STIEWE, H. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – Bericht: 48 S., 4 + 1 Anl., 5 Abb., 16 Tab.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Berlin.
- KOCKEL, F. & ROLAND, N.W. (1977): Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle. Katalog geeigneter geologischer Formationen in der Bundesrepublik Deutschland. – Bericht: 42 S., 13 Abb., 22 Tab.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- KRULL, P. (1991): Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. – Bericht: 133 S., 7 Abb., 7 Tab., 3 Anl.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- KRULL, P., HOTH, P., BRÄUER, V. & WIRTH, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen. – Bericht: 91 S.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- KUHLMANN, G. (2014): GEOPOLD - Transborder Geology between Poland and Germany (Grenzüberschreitende Geologie zwischen Polen und Deutschland). – Bericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- KULICK, J., LEIFELD, D., MEISL, S., PÖSCHL, W., STELLMACHER, R., STRECKER, G., THEUERJAHR, A.-K. & WOLF, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupferschiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. – Geologisches Jahrbuch, D 68: 3-223, 37 Abb., 15 Tab., 34 Taf.; Hannover.

- LANDGRAEBER, F.W. (1935): Die unverritzten Kali- und Kohlelagerstätten am unteren Niederrhein und ihre wirtschaftliche Bedeutung. – Technik und Wirtschaft, 28. Jahrgang: 101-106; VDI-Verlag GmbH, Berlin.
- LANGBEIN, R. & SEIDEL, G. (1976): Zur Ausbildung des oberen Teils des Buntsandsteins im Thüringer Becken. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 4(5): 751-769; Berlin.
- LANGBEIN, R. & SEIDEL, G. (1997): Zechstein, Buntsandstein und Muschelkalk im östlichen Thüringer Becken. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 3: 101-114; Hannover.
- LANGBEIN, R. & SEIDEL, G. (2003): Zechstein. – In: SEIDEL, G. (Hrsg.): Geologie von Thüringen: 601, 138 Abb., 34 Tab., 5 Taf.; Stuttgart (Schweizerbart). ISBN 3-510-65205-3
- LANGER, M. (1972): Ingenieurgeologische Probleme bei der Speicherung von Öl und Gas. – Geologisches Jahrbuch, C 90: 315-358, 14 Abb., 6 Tab., 3 Taf.; Hannover.
- LANGER, M. & HOFRICHTER, E. (1971): Gutachten über die Eignung von Salzstöcken des Rotliegenden zur Anlegung von Gas-Speicherkavernen. – Bericht, Tgb. Nr. 3050/70: 20 S., 1 Anl.; Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover.
- LEGLER, B. (2006): Faziesentwicklung im Südlichen Permbecken in Abhängigkeit von Tektonik, eustatischen Meeresspiegelschwankungen des Proto-Atlantiks und Klimavariabilität (Oberrotliegend, Nordwesteuropa). – 108 S., 1 CD; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- LEGLER, B., SCHNEIDER, J.W., GEBHARDT, U., MERTEN, D. & GAUPP, R. (2011): Lake deposits of moderate salinity as sensitive indicators of lake level fluctuations - Example from the Upper Rotliegend saline lake (Middle-Late Permian, Northeast Germany). – Sedimentary Geology, 234(1-4): 56-69.
- LEITNER, C., FRIEDL, G., BAUMANN, S. & BIENIOK, A. (2014): Excavation and humidity induced extension veins of mudrock clasts in a ductile rock salt matrix, filled with secondary halite deposits (Northern Calcareous Alps, Austria, Bavaria). – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 165(1): 77-90.
- LEITNER, C. & NEUBAUER, F. (2011): Tectonic significance of structures within the salt deposits Altaussee and Berchtesgaden-Bad Duernnberg, Northern Calcareous Alps. – Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft (Austrian Journal of Earth Sciences), 104(2): 2-21. ISSN 02517493.

- LEITNER, C., NEUBAUER, F., MARSCHALLINGER, R., GENSER, J. & BERNROIDER, M. (2013): Origin of deformed halite hopper crystals, pseudomorphic anhydrite cubes and polyhalite in Alpine evaporates (Austria, Germany). – International Journal of Earth Science (Geologische Rundschau), 102: 813-829.
- LEITNER, C., NEUBAUER, F., URAI, J.L. & SCHOENHERR, J. (2011): Structure and evolution of a rocksalt-mudrock-tectonite; the haselgebirge in the Northern Calcareous Alps. – Journal of Structural Geology, 33(5): 970-984. ISSN 01918141.
- LEPPER, J., RAMBOW, D. & RÖHLING, H.-G. (2013): Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland. – In: LEPPER, J. & RÖHLING, H.-G. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein: 69-149; Stuttgart (Deutsche Stratigraphische Kommission).
- LEWANDOWSKI, J. (1988): Sedimentpetrographische Untersuchungen im Keuper Nordwestdeutschlands. – Dissertation: 356 S.; Universität Bochum, Bochum.
- LIANG, W., YANG, C., ZHAO, Y., DUSSEAU, M.B. & LIU, J. (2007): Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. – International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44: 400-411.
- LINDERT, W., WARNCKE, D. & STUMM, M. (1990): Probleme der lithostratigraphischen Korrelation des Oberrotliegenden (Saxon) im Norden der DDR. – Zeitschrift für Angewandte Geologie, 36(10): 368-375.
- LOHKÄMPER, T., JORDAN, G., RÖLLER, K., STÖCKERT, B. & SCHMAHL, W.W. (2004): On the influence of fluids on deformation process of halite crystals. – Geochimica et Cosmochimica Acta, 68(11): A-173.
- LÜTTIG, G.W. & WAGER, R. (1974): Feasibility-Studie über präsumtive Standorte einer Wiederaufbereitungsanlage für Kernbrennstoffe. – Bericht: 40 S., 18 Anl.; Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- LUTZ, M. & CLEINTUAR, M. (1999): Geological results of a hydrocarbon exploration campaign in the Southern Upper Rhine Graben. – Bulletin für angewandten Geologie, 4: 3-80.
- MCCANN, T. (Hrsg.) (2008a): The Geology of Central Europe - Vol. 1: Precambrian and Palaeozoic. – 748 S.; London (The Geological Society). ISBN 978-1-86239-246-5.

- McCANN, T. (Hrsg.) (2008b): The Geology of Central Europe - Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic. – 1500 S.; London (The Geological Society). ISBN 978-1862392656.
- MENNING, M., BENEK, R., BOY, J., EHLING, B.-C., FISCHER, F., GAITZSCH, B., GAST, R.E., KOWALCZYK, G., LÜTZNER, H., REICHEL, W. & SCHNEIDER, J.W. (2005): Das Rotliegend in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002 - „Paternoster-Stratigraphie“ auf dem Rückzug. – Newsletter on Stratigraphy, 41(1-3): 91-122.
- MERTINEIT, M., BEHLAU, J., HAMMER, J., SCHRAMM, M. & ZULAUF, G. (2012): Mechanical behavior of anhydrite rocks - results of field investigations, mineralogical-geochemical studies and thermomechanical experiments. – In: BÉREST, P., GHOREYCHI, M., HADJ-HASSEN, F. & TIJANI, M. (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt VII: Proceedings of the 7th conference: 123-129; Paris, France (Taylor & Francis Ltd., London).
- MERTINEIT, M., HAMMER, J., SCHRAMM, M. & ZULAUF, G. (2014): Deformation of anhydrite rocks (Gorleben-Bank, z3OSM) in a high-strain domain of the Gorleben salt dome, Germany. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 165(1): 49-62.
- MERZ, G. (1987): Muschelkalk im Thüringer Becken. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 15(4): 457-474.
- MÖNNIG, E. (2005): Der Jura von Norddeutschland in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – Newsletter on Stratigraphy, 41(1-3): 253-261; Stuttgart.
- NITSCH, E. (2005): Der Keuper in der in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002 - Formationen und Folgen. – Newsletter on Stratigraphy, 41(1-3): 159-171; Stuttgart.
- PEACH, C.J. (1993): Deformation, dilatancy and permeability development in halite/anhydrite composites. – In: GHOREYCHI, M., BÉREST, P., HARDY, H. R., JR. & LANGER, M. (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt: Proceedings of the 3rd Conference: 153-166; Ecole Polytechnique Palaiseau, France, 14.-16. September 1993 (Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld).
- PLEIN, E. (1993): Bemerkungen zum Ablauf der paläogeographischen Entwicklung im Stefan und Rotliegend des Norddeutschen Beckens. – Geologisches Jahrbuch, A 131: 99-116; Hannover.

- PLEIN, E. (1995): Stratigraphie von Norddeutschland I - Norddeutsches Rotliegend-Becken - Rotliegend-Monographie Teil II. – 193 S., 81 Abb., 10 Tab., 8 Taf.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung). ISBN 978-3-510-61062-4.
- PLISCHKE, I. (2007): Determination of mechanical homogeneous areas in the rock salt mass using creep properties for a classification scheme. – In: WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W. & HARDY JR., H.-R. (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt VI: Proceedings of the 6th conference mechanical behavior of salt: 321-325; Hannover (Germany), 16.-19. April 2012 (Taylor & Francis Ltd., London). ISBN 978-0-415-44398-2.
- PLÖCHINGER, B. (1990): Geologische Karte der Republik Österreich 1 : 50 000 - Erläuterungen zu Blatt 94 Hallein. – 76 S., 8 Abb., 2 Taf.; Wien, Österreich (Geologische Bundesanstalt). ISBN 3900312699.
- PLÖCHINGER, B. (1996): Das Halleiner Salinargebiet (Salzburg) im Geotopschutz-Projekt. – Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 139(4): 497-504; Wien, Österreich.
- POHL, W.L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe: Eine Einführung zur Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten. W. und W. E. Petrascheck's Lagerstättenlehre (5. Auflage). – 527 S.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung). ISBN 978-3510652129.
- RADZINSKI, K.-H. (2008): Buntsandstein. – In: BACHMANN, G. H., EHLING, B.-C., EICHNER, R. & SCHWAB, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt: 180-201; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- REICHENBACH, W. (1970): Die lithologische Gliederung der rezessiven Folgen von Zechstein 2-5 in ihrer Beckenausbildung - Probleme der Grenzziehung und Parallelisierung. – Berichte der Deutschen Gesellschaft für Geologische Wissenschaften, 15(4): 555-563; Berlin.
- REICHENBACH, W. & EICHNER, R. (1967): Ergebnisbericht Kalisalzsucharbeiten Scholle von Calvörde 1964-1967. – Abschlußbericht: 2 Bd.; VEB Geologische Forschung und Erkundung West, Halle.
- REINHOLD, K., KRULL, P. & KOCKEL, F. (2008): Salzstrukturen Norddeutschlands 1 : 500 000. – 2 S.; Berlin / Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).

- RICHTER-BERNBURG, G. & HOFRICHTER, E. (1964): Projekte zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in ausgesolten Kavernen. – Bericht: 14 S., 7 Einzeldarst., 12 Anl.; Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover.
- RICHTER-BERNBURG, G. & HOFRICHTER, E. (1966): Vermerk zur Frage der unterirdischen Einlagerungsmöglichkeiten von Energie-trägern oder Abfallstoffen im Bereich der unteren Weser. – Bericht: 2 S., 1 Anl.; Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover.
- ROGOWSKI, E. & SIMON, T. (2005): Salzerkundungsbohrung Stetten (Zollernalbkreis, Baden-Württemberg). – In: FRANZ, M., BOCK, H., ETZOLD, A., ROGOWSKI, E., SIMON, T. & VILLINGER, E. (Hrsg.): Ergebnisse neuer Forschungsbohrungen in Baden-Württemberg: 136-150; Freiburg i. Br. (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau).
- RÖHLING, H.-G. (2013): Der Buntsandstein im Norddeutschen Becken - Regionale Besonderheiten. – In: LEPPER, J. & RÖHLING, H.-G. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein: 269-384; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- RÖHLING, H.-G. & LEPPER, J. (2013): Paläogeographie des Mitteleuropäischen Beckens während der tieferen Trias (Buntsandstein). – In: LEPPER, J. & RÖHLING, H.-G. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein: 43-67; Stuttgart (E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung).
- RÖHLING, S. (2002): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands - Fazies, Geochemie, Zylo- und Sequenzstratigraphie. – Dissertation: 289 S.; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, Halle a. d. Saale.
- RÜHL, W. (1992): Bodenschätze in Schleswig-Holstein - Von Salzkavernen, Heilquellen und Erdölfeldern. – 175 S.; Husum (Husum Verlag). ISBN 978-3880425552.
- RUPF, I. & NITSCH, E. (2008): Das geologische Landesmodell von Baden-Württemberg - Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – 82 S., 36 Abb., 3 Tab., 10 Beil.; Freiburg i. Br. (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau).

- SCHARBRODT, T., BAUMANN, L. & KOCH, K. (1986): Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Beckenentwicklung und der Halitit-Sedimentation im Werra-Kaligebiet. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 14(4): 427-435, 3 Abb.; Berlin.
- SCHAUBERGER, O. (1955): Zur Genese des alpinen Haselgebirges. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 105: 736-751.
- SCHAUBERGER, O. (1986): Bau und Bildung der Salzlagerstätten des ostalpinen Salinars. – Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, 7: 217-254, 18 Tab; Wien.
- SCHAUBERGER, O. & ZANKL, H. (1976): Die geologischen Ergebnisse der Salzbohrungen im Talbecken von Bad Reichenhall. – Geologische Rundschau, 65(1): 558-579, 6 Abb., 4 Tab.
- SCHORN, A., NEUBAUER, F. & BERNROIDER, M. (2013a): Polyhalite microfabrics in an Alpine evaporite melange; Hallstatt, Eastern Alps. – Journal of Structural Geology, 46: 57-75. ISSN 01918141.
- SCHORN, A., NEUBAUER, F., GENSER, J. & BERNROIDER, M. (2013b): The Haselgebirge evaporitic melange in central Northern Calcareous Alps (Austria); part of the Permian to Lower Triassic rift of the Meliata Ocean? – Tectonophysics, 583: 28-48; Amsterdam, Netherlands. ISSN 00401951.
- SCHRÖDER, L., PLEIN, E., BACHMANN, G.H., GAST, R.E., GEBHARDT, U., GRAF, R., HELMUTH, H.-J., PASTERNAK, M., PORTH, H. & SÜSSMUTH, S. (1995): Stratigraphische Neugliederung des Rotliegend im Norddeutschen Becken. – Geologisches Jahrbuch, A 148: 3-21, 5 Skz., 1 Tab., 7 Taf.
- SCHULZE, G. (1964): Erste Ergebnisse geologischer Untersuchungsarbeiten im Gebiet der Scholle von Calvörde. – Zeitschrift für Angewandte Geologie, 10: 338-348.
- SCHULZE, O. (1996): Mechanische und thermodynamische Stabilität von Carnallit. – In: MARESCH, W. (Hrsg.): Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft – Referate der Vorträge und Poster: 74. Jahrestagung der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft: S. 251; Kiel, 9.-12. September (Deutsche Mineralogische Gesellschaft: Berichte).
- SEIDEL, G. (1964): Aufbau und Eignung der Steinsalzlagerstätten des Thüringer Beckens. – Zeitschrift für Angewandte Geologie, 10(4): 182-189.

- SEIDEL, G. (2009): Zur Fazies und Auslaugung des Zechsteins und Buntsandsteins auf der Eichsfeldschwelle. – In: THÜRINGISCHER GEOLOGISCHER VEREIN (Hrsg.): Beiträge zur Geologie von Thüringen, Neue Folge 16 (2009) - Gewidmet dem 150. Geburtstag des verdienten Erforschers der Geologie Thüringens Ernst Zimmermann (1860 - 1944): 85-97, 1 Skz., 2 Tab., 3 Taf.; Jena (Thüringischer Geologischer Verein).
- SESSLER, W. (1987a): Exkursion B 1/2 - Kaliwerk Neuhoof-Ellers der Kali und Salz AG Schachtanlage Ellers - Befahrung des Werra-Salinars mit dem Kaliflöz Hessen (KIH), des miozänen Vulkanismus im Bereich der 1. Sohle und einer Auslaugungssenke an der Straße von Neuhoof nach Giesel. – In: KULICK, J. & PAUL, J. (Hrsg.): Internationales Symposium Zechstein 1987 - Exkursionsführer I: 47-56, 4 Abb.; Kassel, Hannover (Hessisches Landesamt für Bodenforschung und Industriedienst, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung).
- SESSLER, W. (1987b): Feinstratigraphie des Werra-Salinars im Fulda-Becken - Ein Fotolog der Kernserie aus der Tiefbohrung Kerzell 2. – In: KLARE, B. & SCHRÖDER, B. (Hrsg.): International Symposium Zechstein 1987 - Abstracts/Posters Program: 146 S.; Kassel, Hannover, 28. April - 9. May 1987 (Hessisches Landesamt für Bodenforschung und Industriedienst, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung).
- SPOETL, C. (1989): The Alpine Haselgebirge Formation, Northern Calcareous Alps (Austria) - Permo-Scythian evaporites in an Alpine thrust system. – Sedimentary Geology, 65(1-2): 113-125. ISSN 00370738.
- STANDAG (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). – Bundesgesetzblatt , Teil I, Nr. 41 vom 23. Juli 2013: 2553-2564.
- STDK - DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (2012): Stratigraphische Tabelle von Deutschland Kompakt 2012 (STDK 2012). 2 Taf.; Potsdam (Deutsches GeoForschungsZentrum).
- STILLE, H. (1925): Rheinische Gebirgsbildung im Kristianiagebiet und in Westdeutschland. – Abhandlungen der Preußischen Geologischen Landesanstalt, Neue Folge, 95: 110-132; Berlin.

- STOLLHOFEN, H., BARNASCH, J., BAYER, U., BEUTLER, G., FRANZ, M., KÄSTNER, M., LEGLER, B., MUTTERLOSE, J. & RADIES, D. (2008): Upper Rotliegend to early Cretaceous basin development. – In: LITKE, R., BAYER, U., GAJEWSKI, D. & NELSKAMP, S. (Hrsg.): Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin system: 181-210; Berlin (Springer).
- STRUXNESS, E.G. (1963): Storage of radioactive waste in mine cavities. – In: BERSTICKER, A. C. (Hrsg.): First symposium on salt - Abstracts: 412 S.; Cleveland, Ohio (Northern Ohio Geological Society, Inc.).
- TEICHMÜLLER, R. (1957): Ein Querschnitt durch den Südteil des Niederrheinischen Zechsteinbeckens. – Geologisches Jahrbuch, E 73: 39-50, 38 Abb., 31 Taf.
- TER HEEGE, J.H., DE BRESSER, J.H.P. & SPIERS, C.J. (2005): Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain. – Tectonophysics, 396: 35-57.
- THEIS, C.V. (1956): Problems of ground disposal of nuclear wastes. – In: UNITED NATIONS NEW YORK (Hrsg.): Proceedings of the international conference on the peaceful uses of atomic energy, Vol. 9 - Reactor technology and chemical processing: 679-683; Genv, 8.-20. August 1955 (United Nations Publications).
- TRUSHEIM, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. - Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, Beiheft 112: 51 S., 10 Abb., 2 Tab., 6 Beil.; Hannover.
- WAGER, R. & RICHTER, W. (1960): Disposal of radioactive waste in the Federal Republic of Germany. Geological and hydrogeological problems. – Proceedings of the Scientific Conference on the disposal of radioactive wastes sponsored by the IAEA and the UN Educational, Scientific and Cultural Organisation with the cooperation of the Food and Agricultural Organisation of the UN. Monaco, Oceanographic Museum: 368-384; Wien, 16.-21. Dezember 1959.
- WAGNER, W. (1955): Die tertiären Salzlagerstätten im Oberrheingraben. – Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 105: 707-728.
- WARREN, J.K. (2006): Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. – xvi, 1035 S.; Berlin, Heidelberg (Springer-Verlag).
- WEBER, H. (1977): Übersichtskarten zur Geologie von Schleswig-Holstein 1 : 500 000 - Salzstrukturen, Erdöl und Kreidebasis in Schleswig-Holstein. – 106 S.; Kiel (Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein).

- WEISS, H.M. (1980): Möglichkeiten der Entstehung sowie Art, Umfang und tektonische Stellung von Rissen und Klüften im Salzgebirge. – GSF-Bericht, T-200: 95 S., 20 Abb., 6 Tab.; Gesellschaft für Strahlenforschung, Heidelberg.
- WOLF, R. (1985): Tiefentektonik des linksrheinischen Steinkohlengebietes. – In: DROZDEWSKI, G., ENGEL, H., WOLF, R. & WREDE, V. (Hrsg.): Beiträge zur Tiefentektonik west-deutscher Steinkohlenlagerstätten: 105-167, 37 Abb., 3 Tab., 9 Taf.; Krefeld (Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen).
- ZANDER, I. & HUCKRIEDE, H. (2011): Erstellung von Potenzialkarten und Charakterisierung von Speicherstrukturen in Thüringen für den Aufbau eines Informationssystems Speicher-Kataster für Deutschland. – Projektstudie „Speicher-Kataster Deutschland“: 108 S., 26 Abb., 17 Tab.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Berlin / Hannover
- ZIEGLER, P.A. (1992): European Cenozoic rift system. – Tectonophysics - International journal of geotectonics and the geology and physics of the interior of the earth, 208(1-3): 91-111.
- ZIMMERMANN, E. (1935): Das Niederrheingebiet. – In: PREUSSISCHE GEOLOGISCHE LANDESANSTALT (Hrsg.): Handbuch der vergleichenden Stratigraphie Deutschlands - Zechstein: 361-397; Berlin (Gebrüder Borntraeger).
- ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R., BORNEMANN, O., FLEIG, S., HOFFMANN, N., KÖTHE, A., KRULL, P. & WEISS, W. (2003): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. – Abschlussbericht: 565 S., 32 Tab., 42. Abb., 195 Anl.; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- ZULAUF, G., ZULAUF, J., BORNEMANN, O., BRENNER, F., HOFER, H.E., PEINL, M. & WOODLAND, A. (2010): Experimental deformation of a single-layer anhydrite in halite matrix under bulk constriction - Part 2: microfabrics and deformation mechanisms. – Journal of Structural Geology, 32: 264-277.
- ZULAUF, G., ZULAUF, J., MERTINEIT, M. & HAMMER, J. (2012): Boudinage of anhydrite in rock-salt matrix – The impact of bulk finite strain geometry. – In: BÉREST, P., GHOREYCHI, M., HADJ-HASSEN, F. & TIJANI, M. (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt VII: Proceedings of the 7th conference: 65-70; Paris, France, 16.-19. April 2012 (Taylor & Francis Ltd., London).

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Gegenüberstellung der mittleren gesteinsmechanischen Kennwerte für Steinsalz-gesteine der Zechstein-Salinare und für tonreiche Gesteine der Rotliegend-Salinare (aus: LANGER & HOFRICHTER 1971).....	17
Tab. 2: Lithologische Merkmale der Salzgebirgsarten in Oberbayern (aus: SCHAUBERGER & ZANKL 1976 (gekennzeichnet durch *), SCHAUBERGER 1986)....	37

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Gegenüberstellung typischer Ausbildungsformen von halotektonisch veränderten (links, Staßfurt-Hauptsalz, Salzstock Gorleben) und weitgehend flach lagernden Steinsalzschieben (rechts, Steinsalze der Staßfurt-Formation, Teutschenthal). Durchlichtphotos polierter Kernanschliffe. Höhe der Kerne ca. 1 m.....	12
Abb. 2: Häufigkeitsverteilung des Kriechvermögens von Steinsalzschieben der Staßfurt (z2)- und Leine (z3)-Formationen des Salzstocks Gorleben. Das Kriechvermögen (Kriechklasse) nimmt innerhalb der Zechstein-Formationen vom Liegenden zum Hangenden ab (aus: HUNSCHKE et al. 2003).....	14
Abb. 3: Ergebnisse uniaxialer Kriechversuche (T = 22 °C) an Steinsalzproben der Staßfurt-Formation (z2) aus der Bohrung Go 1002 (Salzstock Gorleben). Die stationären Kriechraten von Knäuelsalz (z2HS1) unterscheiden sich um mehr als eine Größenordnung von denen des jüngeren Hangendsalzes (z2HG) (aus: HUNSCHKE et al. 2003).....	15
Abb. 4: Korrelation des Kriechvermögens und einiger Gefügeeigenschaften von unterschiedlichen Steinsalzschieben aus dem Salzstock Gorleben (aus: HUNSCHKE et al. 2003).....	16
Abb. 5: Stratigraphische Position und Bezeichnung der salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlagerstätten in Deutschland (MENNING & HENDRICH 2002, verändert).....	20
Abb. 6: Verbreitung von Salzstrukturen in Norddeutschland (nach: REINHOLD et al. 2008).....	21
Abb. 7: Stratigraphische Gliederung des Rotliegend; Entstehungszeitraum von Steinsalzlagerstätten blau gekennzeichnet (nach: PLEIN 1995).....	22
Abb. 8: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Rotliegend-Salinar in Deutschland (nach: KATZUNG 1991, BALDSCHUHNE et al. 1999, KRULL et al. 2004).....	24
Abb. 9: Stratigraphische Gliederung des Zechstein; Entstehungszeitraum von Steinsalzlagerstätten blau gekennzeichnet (nach: KÄDING 2005, STDK 2012).....	27
Abb. 10: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Zechstein-Salinare in Deutschland (nach: KULICK et al. 1984, FREUDENBERGER & SCHWERD 1996, KRULL et al. 2004), Verbreitung der Zechstein-Salzstrukturen nach REINHOLD et al. (2008).....	29
Abb. 11: Beispiel für die Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine im Niederrhein-Becken; Schnitt A in Abb. 10 (WOLF 1985, verändert).....	30
Abb. 12: Lagerungsverhältnisse der salinaren Schichtenfolge des Zechstein (z) im Solling-Becken, Schnitt B in Abb. 10 (nach: BALDSCHUHNE et al. 2001).....	34
Abb. 13: Alpine Salzlagerstätten im Bereich der Zentralen Nördlichen Kalkalpen (nach: LEITNER & NEUBAUER 2011, SCHORN et al. 2013a).....	35

Seite

Abb. 14: Stratigraphische Gliederung des Oberen Buntsandstein; Entstehungszeitraum von Steinsalzlager blau gekennzeichnet (nach: LEPPER et al. 2013).....	38
Abb. 15: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Röt-Salinare in Deutschland (nach: BEYWL et al. 1974, BEUTLER 2004, KRULL et al. 2004, RÖHLING, H.-G. & LEPPER 2013).....	40
Abb. 16: Verdickung des Steinsalzlagers im Oberen Buntsandstein (so) infolge der Intrusion von Zechstein-Salzen (z), Lage des geologischen Schnitts in Abb. 15 (nach: BALDSCHUHN et al. 2001).....	42
Abb. 17: Stratigraphische Gliederung des Muschelkalk; Entstehungszeitraum von Steinsalzlager blau gekennzeichnet (nach: HAGDORN & SIMON 2005).....	44
Abb. 18: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Muschelkalk-Salinare in Deutschland (nach: SEIDEL 1964, CRAMER 1965, BEYWL et al. 1974, ALTHEN et al. 1980, EXLER 1987, MERZ 1987, GAERTNER & RÖHLING 1993, FREUDENBERGER & SCHWERD 1996, KRULL et al. 2004, BOCK et al. 2009).....	47
Abb. 19: Skizze zu den Schichtenfolgen im Bereich der Steinsalzlagerstätte Heilbronn/Kochendorf (siehe Abb. 18; aus: BOHNENBERGER & RÜTHER 2011, verändert).....	49
Abb. 20: Schematische Schichtenfolgen im salinar geprägtem Muschelkalk von Baden-Württemberg, Bayern und Thüringen (nach: CRAMER 1965, MERZ 1987, GEYER & GWINNER 2011).....	50
Abb. 21: Stratigraphische Gliederung des Keuper; Entstehungszeitraum von Steinsalzlager blau gekennzeichnet (nach: NITSCH 2005).....	52
Abb. 22: Geologischer Schnitt mit einer halokinetischen Akkumulation von Steinsalz innerhalb der Ablagerungen des Keuper (braun), gekennzeichnet durch eine erhöhte Mächtigkeit, Lage des Schnitts siehe Abb. 23 (nach: BALDSCHUHN et al. 2001). Im mittleren Teil der Abbildung befindet sich die Doppelsalinar-Struktur Krautsand, die sich aus Rotliegend- und Zechstein-Gesteinen aufbaut. Sowohl östlich als auch westlich dieser Struktur sind Kissenbildungen innerhalb des Keuper erkennbar.....	53
Abb. 23: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Keuper-Salinare in Deutschland (nach: KOCKEL et al. 1999, KRULL et al. 2004; verändert).....	55
Abb. 24: Stratigraphische Stellung der Malm-Subgruppe in Niedersachsen; Entstehungszeitraum von Steinsalzlager blau gekennzeichnet (nach: HEUNISCH et al. 2007).....	58
Abb. 25: Lagerungsverhältnisse und halokinetisch verursachte Mächtigkeitszunahmen in der salinaren Schichtenfolge des Oberjura (jo), Lage des geologischen Schnitts in Abb. 26 (nach: BALDSCHUHN et al. 2001).....	59
Abb. 26: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Malm-Salinare in Deutschland (nach: KOCKEL & ROLAND 1977, KRULL et al. 2004).....	60

Seite

Abb. 27: Schematische stratigraphische Gliederung des Paläogen für den Zeitraum der Entstehung von Steinsalzlager (blau gekennzeichnet) im Oberrheingraben (nach: GEYER & GWINNER 2011).....	61
Abb. 28: Schematische Verbreitung der Halit-führenden Tertiär-Salinare im Oberrheingraben (nach: LUTZ & CLEINTUAR 1999, KRULL et al. 2004, GEYER & GWINNER 2011, GRIMM et al. 2011).....	62
Abb. 29: Schematische on-shore-Verbreitung der Halit-führenden Schichtenfolgen in Deutschland.....	68

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:

Rotliegend-Salinar - Steinsalzlager in der Schichtenfolge des salinaren Ober-Rotliegend II (zentraler Ablagerungsraum)

Anlage 2:

Rotliegend-Salinar - Steinsalzlager in der Schichtenfolge des salinaren Ober-Rotliegend II (randlicher salinarer Ablagerungsraum)

Anlage 3:

Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Werra-Formation

Anlage 4:

Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Staßfurt-Formation

Anlage 5:

Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Leine-Formation

Anlage 6:

Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Aller-Formation

Anlage 7:

Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Ohre-, Friesland- und Fulda-Formationen

Anlage 8:

Zechstein-Salinar - Steinsalzlager in der Schichtenfolge der Werra-Formation (Niederrhein).

Anlage 9:

Röt-Salinar - Steinsalzlager in der Schichtenfolge der salinaren Röt-Formation (Norddeutsches Becken)

Anlage 10:

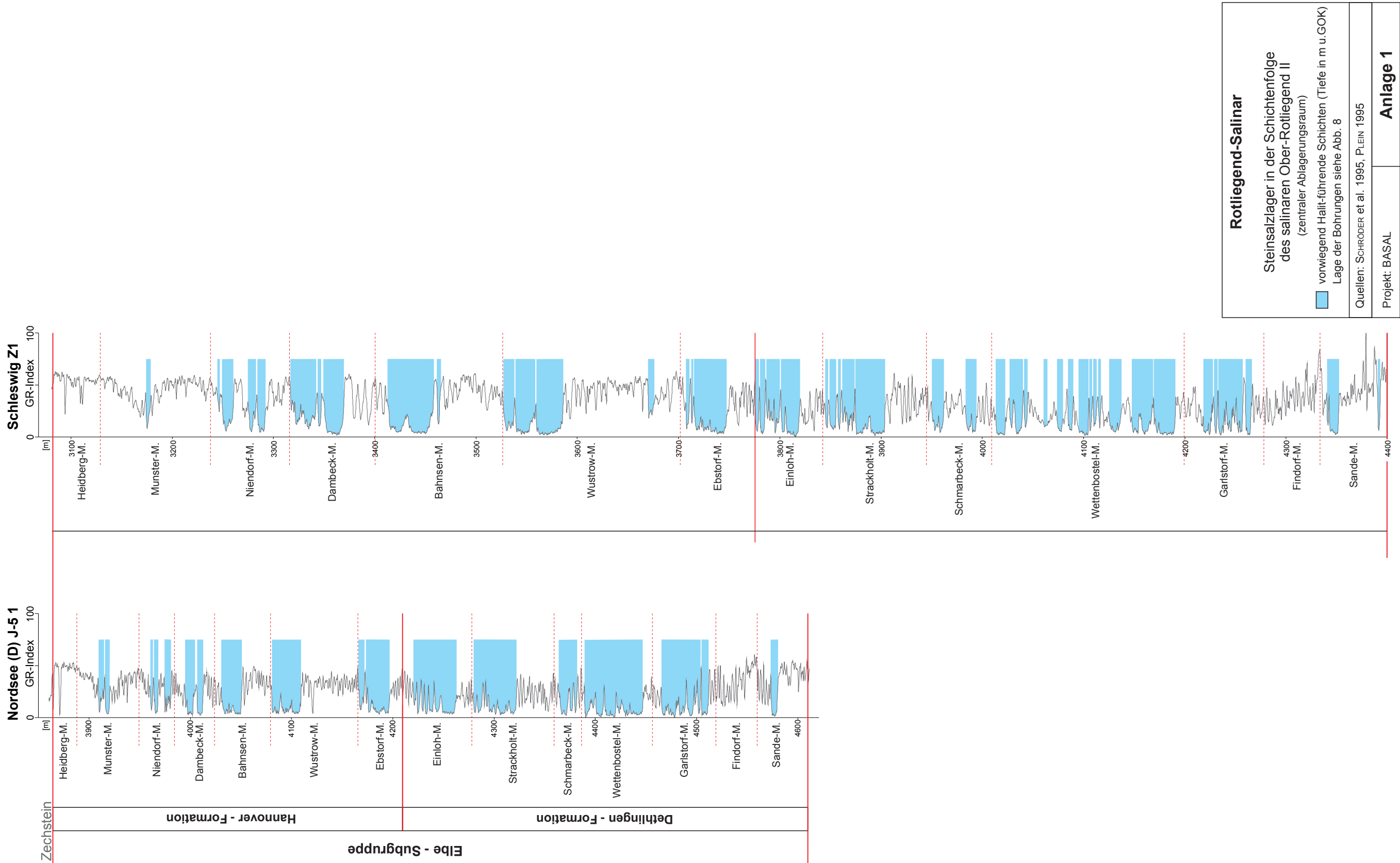
Muschelkalk-Salinar - Steinsalzlager in der Schichtenfolge der salinaren Heibronn-Formation (Norddeutsches Becken)

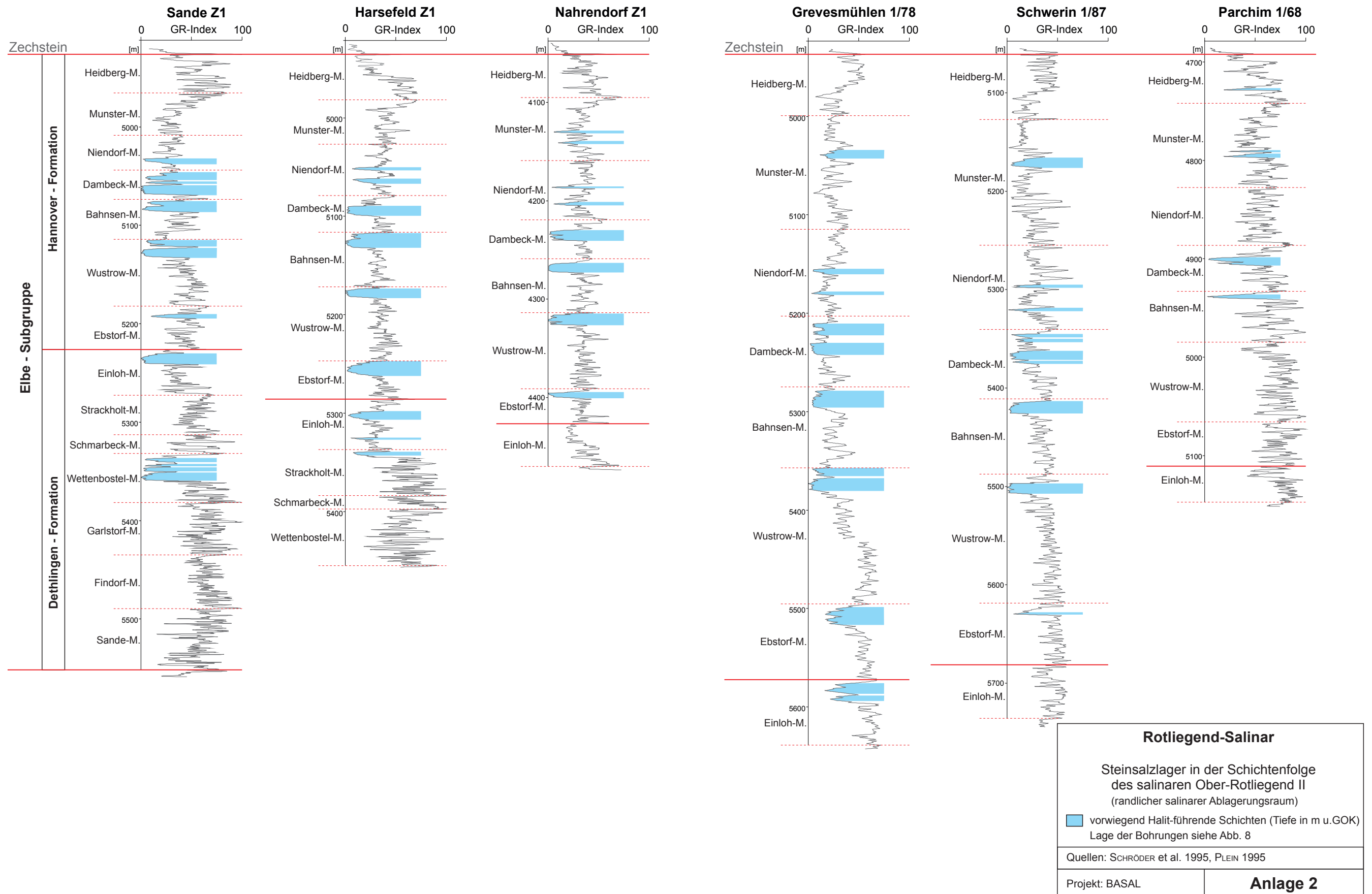
Anlage 11:

Keuper-Salinar - Steinsalzlager in der Schichtenfolge der Grabfeld- und Weser-Formation

Anlage 12:

Malm-Salinar - Steinsalzlager in der Schichtenfolge der Münder Mergel-Formation





Anlage 3: Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Werra-Formation

Gruppe	Formation	Lithostratigraphische Bezeichnung	Werra-Fulda-Becken ¹⁾				Niederrheinisches Becken ²⁾	Thüringer Becken ³⁾		SE-Branden- burg ⁴⁾		
			Mächtigkeit [m]	Werra-Gebiet ^{1a)}		Fulda-Gebiet ^{1b)}						
				Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]					Ausbildung	Mächtigkeit [m]
Hangendes		Staßfurt-Karbonat Staßfurt-Ton	10	10	Staßfurt-Ton (Braunroter Salzton)	8 - 12	Staßfurt-Ton (Braunroter Salzton)	0 - 3	Staßfurt-Ton (Braunroter Salzton)	Staßfurt-Ton		Staßfurt- Karbonat
Zechstein	Werra-Formation	Oberster Werra-Anhydrit	0 - 2	–	–	–	–	–	–	–	Oberes Werrakarbonat wenige Meter mächtiger Dolomit	–
		Oberstes Werra-Steinsalz	0 - 15	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		Oberer Werra-Anhydrit	5 - 7	–	–	–	–	0 - 13	–	0 - 130	Anhydrit (gebändert) mit dolomitischen und tonig-bituminösen Einlagerungen	40 - 70
		Oberer Werra-Ton	8 - 10	–	–	–	–	–	–	0 - 5	im südlichen Teil des Beckens ein geringmächtiger Tonstein (wenige Meter)	–
		Oberes Werra-Steinsalz	90 - 150	100 - 115	in Hessen bis 150 m	70	orange bis rötlich, unten mit Begleitflözen, oben mit Tonmitteln	bis 60	zusammen mit der Kaliflöz-Zone und dem "Unteren" Werra-Steinsalz können Mächtigkeiten bis 400 m vorkommen	–	–	–
		Kaliflöz Hessen	2 - 3	2 - 3	in Thüringen bis 20 m	2 - 3	Hartsalz, im Hangenden auch Carnallit	40 (Carnallit-Zone) 0,4 - 1 (2. Hartsalzflöz)	Kaliflöz-Zone: nur regional begrenzte Vorkommen (Carnallit, im Liegenden mit ca. 1 m Hartsalz), Steinsalz mit Kalisalzen	–	–	–
		Mittleres Werra-Steinsalz	50 - 60	50 - 80	–	35 - 55	grau	9 - 11		–	–	–
		Kaliflöz Thüringen	2 - 10	2 - 10	in Thüringen bis 40 m	2 - 3	Hartsalz und Trümmercarnallit	0,4 - 1 (1. Hartsalzflöz)		–	–	–
		Unteres Werra-Steinsalz	80 - 100	110 - 125	in Hessen 80 - 110 m	60 - 100	hellgrau bis blaßrötlich	50 - 70	regional stark schwankende Mächtigkeiten (in Gräben > 100 m), Steinsalz, grau, durchsetzt mit Anhydrit, tonig-anhydritisches Material; beim Vorkommen des Kaliflözes Unterteilung in "Oberes" und "Unteres" Werra- Steinsalz, an der Basis anhydritreich	0 - 200 / 300	Steinsalz, hellgrau, durchsetzt mit Anhydrit, Tonstein und Kalisalzen	0 - 400
		Unterer Werra-Anhydrit	3 - 25	5 - 25	in Hessen im Liegenden 6 - 9 m und in Thüringen max. 15 m Anhydritknoten- schiefer	5 - 11	Anhydritknotenschiefer	1 - 10	in Schwellenbereichen werden Mächtigkeiten von >50 m erreicht	0 - 150	Anhydrit mit dolomitischen und tonig-bituminösen Einlagerungen	50 - 300
		Anhydritknotenschiefer	6 - 9					–	–	–	–	
		Zechsteinkalk	6 - 15	5 - 15	Zechsteinkalk	6 - 20	Zechsteinkalk	1 - 10 (z1 Mergel)	im Randbereich des Zechsteinbeckens treten höhere Mächtigkeiten auf (z.T. als Mergel, dolom. Kalk- und Tonstein)	Unteres Werra-Karbonat 0 - 40	Dolomit, in Riffazies übergehend, z.T. mit Mittlerem Werra-Ton	0 -
		Kupferschiefer	0,3 - 0,5	0,3 - 0,5	Unterer Werra-Ton	0,2 - 0,5	Unterer Werra-Ton	0,3 - 1	–	0 - 1	Tonmergel, grauschwarz, z.T. stark bituminös	0 -
		Zechsteinkonglomerat	0 - 3	2 - 12	Grauliegendes	0 - 4	Werra-Konglomerat	0,1 - 2	–	0 - 10	Konglomerat, grau, stark sandig, z.T. übergehend in Sandstein	–
Liegendes	Rotliegend (Oberrotliegend)		0 - 20	0 - 20	Cornberg-Sandstein	0 - 20	Cornberger-Sandstein	Oberkarbon		Oberrotliegend		Oberrotliegend

¹⁾ nach KÄDING (1978); ^{1a)} verändert nach KÄDING (1978), JAHNE (1988) und HAASE (1976); ^{1b)} verändert nach KÄDING (2001), KÄDING (1978) und SESSLER (1987); ²⁾ nach HISS & MILBERT (1983), TEICHMÜLLER (1957, 1958) und WOLF (1985)

³⁾ verändert nach SEIDEL (1972, 1992) und KÄSTNER (1996); ⁴⁾ nach ZIEGENHARDT (1972); vergleiche auch KRULL (2004)

Anlage 4: Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Staßfurt-Formation

Gruppe	Formation	Lithostratigraphische Bezeichnung	Calvörde-Scholle ¹⁾		Raum Gorleben ²⁾	Thüringer Becken ³⁾		Solling-Becken (Bhg. Solling 4+5) ⁴⁾
			Mächtigkeit [m]	Ausbildung		Mächtigkeit [m]	Ausbildung	
Hangendes		Unterer Leine-Ton	2 - 3	Grauer Salzton	Grauer Salzton	0 - 5	Grauer Salzton	Grauer Salzton
		Grauer Salzton						
Zechstein	Staßfurt-Formation	Oberer Staßfurt-Ton	–	–	–	0 - 30	Tonstein mit Anhydrit durchsetzt (unterer Teil des Grauen Salztons)	–
		Gebänderter Deckanhydrit	2	–	1,5	0 - 2	Anhydrit mit Tonzwischenlagen	2,5 - 3
		Decksteinsalz	1 - 2 (1,3)	–	0,3	–	–	
		Kaliflöz Staßfurt als Hartsalz und Carnallitit	0 - 70 15 (z.T. bis 70)	Trümmercarnallitit	17	0 - 20	–	4
		Kieseritische Übergangsschichten	–	–	2,5	–	–	–
		Hangendsalz	–	Staßfurt-Steinsalz (150 - 250 m)	10	–	Steinsalz, im nordöstlichen Thüringer Becken mit dem Kaliflöz Staßfurt (0 - 20 m)	200 - 500 Staßfurt-Steinsalz
		Hauptsalz	150 - 250 (10 - 600)	- Zone mit Anhydritflocken (1 - 30 m) - Zone mit zerrissenen Anhydritlagen (10 - 600 m)* - Zone mit undeutlichen Anhydritstreifen (5 m) - Zone mit deutlichen Anhydritstreifen (5 m)	700 - 800	0 - 500		
		Basissalz	–		20	–		
		Basalanhydrit (Unterer Staßfurt-Anhydrit)	2	–	19	0 - 30	Anhydrit mit karbonatischen und tonig-bituminösen Einlagerungen	2 - 4
		Hauptdolomit / Staßfurt-Karbonat	5	Stinkschiefer	5	0 - 60	Hauptdolomit, z. T. gestreift durch helle und dunkle Lagen, höchste Mächtigkeiten in einem Karbonatwall	20 - 40
		Stinkschiefer (Unterer Staßfurt-Ton)			–	0 - 2	sapropelitischer, stark kompakter Kalkstein	–
Liegendes	Oberer Werra-Anhydrit		47	Werra-Anhydrit (Oberer Werra-Anhydrit (21 m), Steinsalz (> 1 m) Unterr Werra-Anhydrit (26 m)	Oberer Werra-Anhydrit	Oberer Werra-Anhydrit		Oberer Werra-Anhydrit
			3	Zechsteinkalk				
			> 1	Kupferschiefer				

¹⁾ nach REICHENBACH (1970), REICHENBACH & EICHNER (1967); ²⁾ nach BORNEMANN (2003); ³⁾ nach SEIDEL (1972, 1992); ⁴⁾ nach KÄDING (1977); vergleiche auch KRULL (2004)

* Mächtigkeiten von 600 m werden in den Salzstrukturen erreicht

Anlage 5: Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Leine-Formation

Gruppe	Formation	Lithostratigraphische Bezeichnung		NW-deutsches Becken ¹⁾	Calvörde-Scholle ²⁾	Solling-Becken (Bhg. Solling 5) ³⁾	Thüringer Becken ⁴⁾			
		Mächtigkeit [m]								
Hangendes	Leine-Formation	Zechstein	Roter Salzton	Unterer Aller-Ton	Roter Salzton	Roter Salzton	Roter Salzton	0 - 40	Roter Salzton (unterer Teil)	
					Grenzsatz	Oberstes Leine-Steinsalz	40	–	–	–
			Tonmittelsatz (Zonen 1 - 3)		4 - 6	4	–	–	–	–
			Kaliflöze "Riedel" und "Albert"			–	–	–	–	–
			Schwadensatz (Zone 1 - 10)	Oberes Leine-Steinsalz	80	3	–	–	–	
			Anhydritmittel, Helgoland-Anhydrit		60	6	–	–	–	
			Anhydritmittelsatz	Mittleres Leine-Steinsalz	120	76	–	–	–	
			Bunter Salt			10	–	–	–	
			Bändersatz			–	–	–	–	
			Banksatz			–	–	–	–	
			Kaliflöz "Ronneburg"		2 - 4	15	–	–	–	
			Orangesatz	Unteres Leine-Steinsalz	120 - 150	–	48	0 - 130	Steinsalz mit Ton- und Anhydriteinlagerungen	
			Linienatz			25				–
			Basissatz			5				–
			Hauptanhydrit (Leine-Sulfat)		30 - 40	35	60	0 - 60	Anhydrit mit karbonatischen und tonig-bituminösen Einlagerungen	
			Plattendolomit		–	–	–	0 - 25	Dolomit mit Anhydritflocken, -knollen und -lagen	
			Grauer Salzton		5	2,6	2	0 - 5	Tonstein, grau mit Sandsteinflasern (oberer Teil des Grauen Salztons)	
			Liegendes		Gebänderter Deckanhydrit	Gebänderter Deckanhydrit	Gebänderter Deckanhydrit	Gebänderter Deckanhydrit	Gebänderter Deckanhydrit	Gebänderter Deckanhydrit
Oberer Staßfurt-Ton										

¹⁾ nach KOCKEL & ROLAND (1977); ²⁾ nach REICHENBACH (1970); ³⁾ nach KÄDING (1977); ⁴⁾ nach SEIDEL (1972); vergleiche auch KRULL (2004)

Anlage 6: Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Aller-Formation

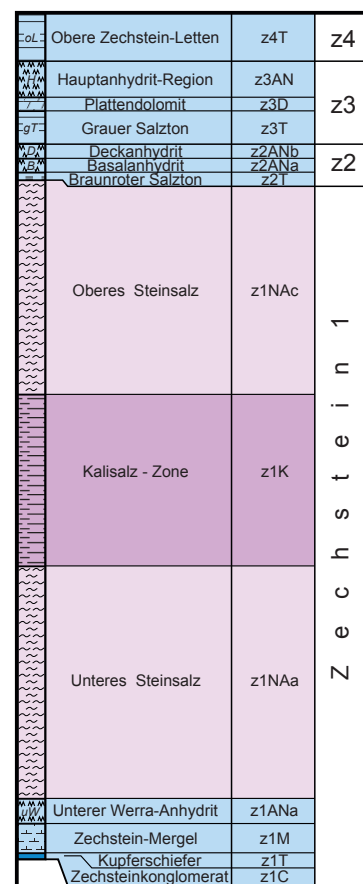
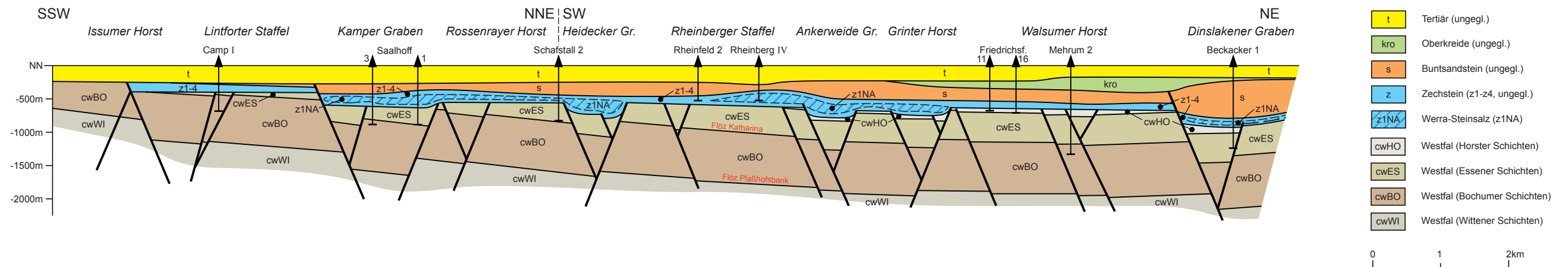
Gruppe	Formation	Lithostratigraphische Bezeichnung	Norddeutsches Becken (Untereibe-Becken) ¹⁾	Altmark, Calvörde-Scholle ²⁾	Solling-Becken ¹⁾	Ems-Becken ²⁾
			Mächtigkeit [m]			
Hangendes		Unterer Ohre-Ton	Unterer Ohre-Ton	Unterer Ohre-Ton	Unterer Ohre-Ton	Unterer Ohre-Ton
Zechstein	Aller-Formation	Grenzanhidrit	–	0 - 1	–	–
		Oberes Aller-Steinsalz	100 Aller-Steinsalz	5 - 15	68 Aller-Steinsalz	70 Aller-Steinsalz
		Oberer Aller-Ton		0,5 - 3		
		Mittleres Aller-Steinsalz		4 - 15		
		Aller-Kaliflöz		–		
		Unteres Aller-Steinsalz		7 - 35		
		Pegmatit-Anhydrit	1	0,5 - 1,5	1	1
		Roter Salzton	17	1 - 20	18	17
Liegendes		Oberes Leine-Steinsalz	Oberes Leine-Steinsalz	Oberes Leine-Steinsalz	Oberes Leine-Steinsalz	

¹⁾ nach BEST (1989); ²⁾ nach REICHENBACH (1970); vergleiche auch KRULL (2004)

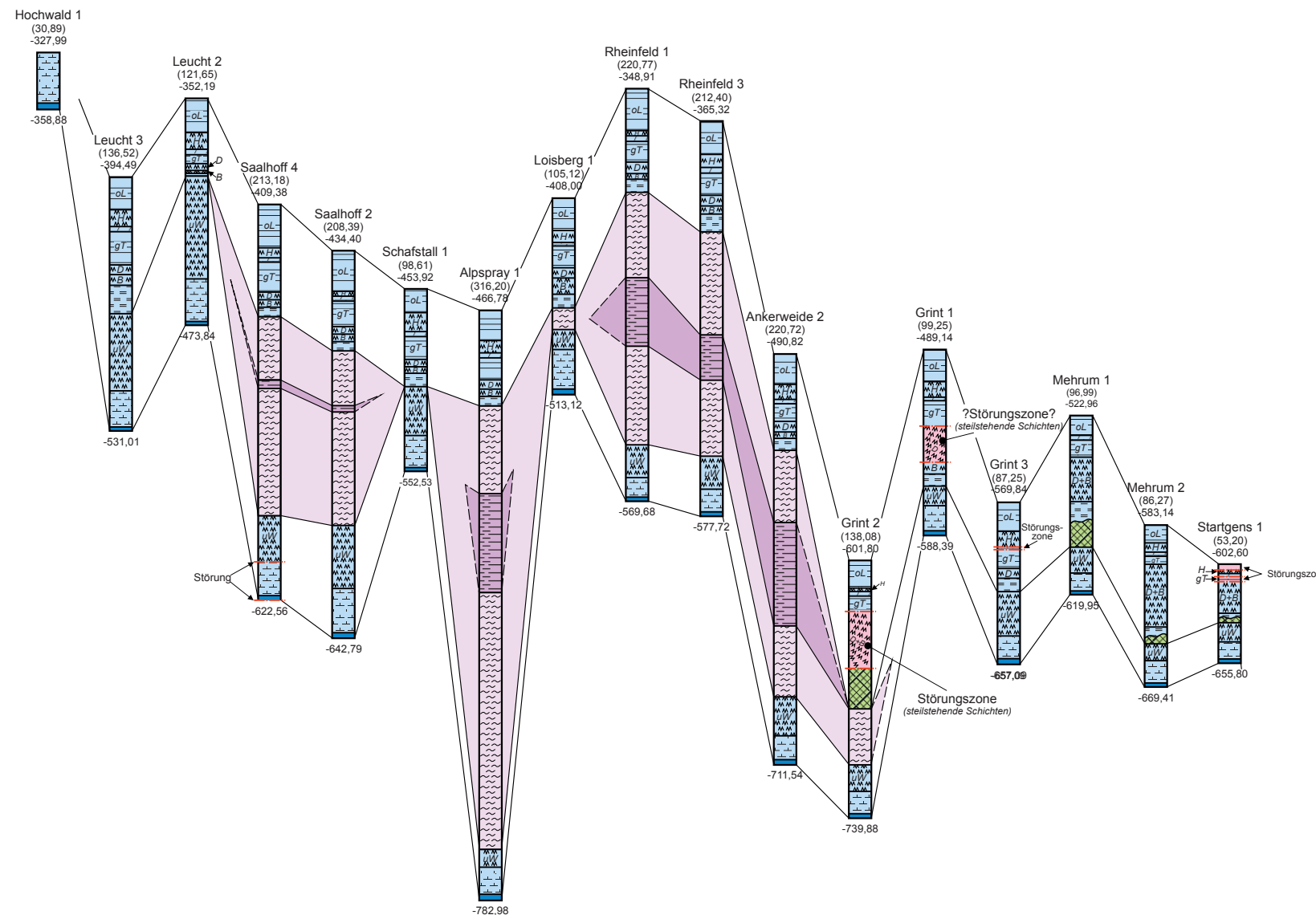
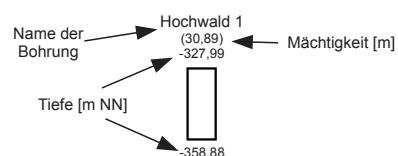
Anlage 7: Zechstein-Salinar - Gliederung und Mächtigkeit der Ohre-, Friesland- und Fulda-Formation

Gruppe	Formation	Lithostratigraphische Bezeichnung	Ems-Becken ¹⁾	Weser-Becken ¹⁾	Untereibe- Becken ¹⁾	Helgoland- Becken ¹⁾	Calvörde-Scholle ²⁾
			Mächtigkeit [m]				
Zechstein	Hangendes	Bröckelschiefer	Bröckelschiefer	Bröckelschiefer	Bröckelschiefer	Bröckelschiefer	Bröckelschiefer
		Mölln-Anhydrit	40 m anhydritische und tonige Sedimente sowie Sandlagen	–	1	1	–
	Mölln-Steinsalz	–		37	23	–	
	Mölln Anhydrit	–		–	–	–	
	Mölln-Ton	–		1	1	–	
	Friesland-Steinsalz	–		30	34	–	
	Friesland-Formation	Kaliflöz Friesland	20 m rote Ton- und Sandsteine	< 0,5	< 1	6	1,5 - 2 (schluffig)
		Friesland-Anhydrit					
		Friesland-Ton					
		Ohre-Anhydrit	1	1	–	–	0,5
Ohre-Formation	Ohre-Steinsalz	13	6	33	40	0,3 - 3	
	Ohre-Anhydrit	< 1	? 0,5	1	1	0,1	
	Ohre-Ton	6	8	15	10	5	
Liegendes	Aller-Steinsalz	Aller-Steinsalz	Aller-Steinsalz	Aller-Steinsalz	Aller-Steinsalz	Aller-Steinsalz	Aller-Steinsalz

¹⁾ nach BEST (1989); ²⁾ nach REICHENBACH (1970); vergleiche auch KRULL (2004)



 Auslaugungszonen



Zechstein-Salinar

Steinsalzlager in der Schichtenfolge der Werra-Formation (Niederrhein)

Lage geologischer Schnitt vgl. auch Abb. 10 (Schnitt A)

Quelle: WOLF 1985

Projekt: BASAL

Anlage 8

Nordwestdeutsches Becken

Nordostdeutsches Becken

