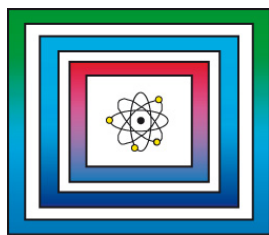


F+E Endlagerung

9Y2015010000

Entwicklung generischer
geologischer Modelle für flach
lagernde Salzformationen

Ergebnisse aus dem
Vorhaben KOSINA



Ergebnisbericht

Hannover, Oktober 2017

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

F+E Endlagerung

Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde
Salzformationen

Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA

Ergebnisbericht

Autoren:	Völkner, Eike Kühnlenz, Tatjana Hammer, Jörg, Dr. Gast, Sascha
Auftraggeber:	BMWi
Auftragsnummer:	9Y2015010000
Geschäftszeichen:	B3.2/B50112-49/2017-0007/001
Datum:	12.10.2017

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste

Stellvertretende Abteilungsleitung B3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	3
1 Einleitung	4
2 Rahmenbedingungen für die generischen geologischen Standortmodelle	5
2.1 Anforderungen nach AkEnd	5
2.2 Anforderungen nach StandAG	6
2.3 Projektspezifische Anforderungen	7
3 Geologische Beschreibung	9
3.1 Flach lagernde Salinarformationen in Deutschland	10
3.1.1 Rotliegend-Salinar	13
3.1.2 Zechstein-Salinar	15
3.1.3 Röt-Salinar	18
3.1.4 Muschelkalk-Salinar	20
3.1.5 Keuper-Salinar	22
3.1.6 Malm-Salinar	24
3.1.7 Tertiär-Salinar	26
3.2 Salzkissen in Deutschland	27
3.3 Vorgabedaten für die generischen geologischen Standortmodelle	28
3.3.1 Daten zur Ausbildung der Zechstein-Salinare	28
3.3.2 Daten zur Ausbildung des Deck- und Grundgebirges	38
4 Geologische Modellierung	45
4.1 Modelleinheiten	46
4.2 Referenzprofile	48
4.2.1 Referenzprofil für den Typ „flache Lagerung“	49
4.2.2 Referenzprofil für den Typ „Salzkissen“	52
4.3 Modellbeschreibung	55
4.3.1 Modelltyp A „flache Lagerung“	56
4.3.2 Modelltyp B „Salzkissen“	58
5 Zusammenfassung	61
Literaturverzeichnis	63
Tabellenverzeichnis	74
Abbildungsverzeichnis	75
Anhangverzeichnis	77

Gesamtblattzahl: 80

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Völkner, Eike Kühnlenz, Tatjana Hammer, Jörg, Dr. Gast, Sascha
Titel:	Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen (KOSINA)
Schlagwörter:	Endlagerstandortmodell, flache Lagerung, geologische 3D-Modelle, Salzkissen, Steinsalz, Wirtsgestein

Im Rahmen des Vorhabens KOSINA „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“ werden mit diesem Ergebnisbericht die geologischen Grundlagen für die Erstellung der generischen Standortmodelle „flache Lagerung“ und „Salzkissen“ dokumentiert sowie deren Aufbau beschrieben. Flach lagernde Salzformationen kommen in Deutschland in den stratigraphischen Einheiten Rotliegend, Zechstein, Röt, Muschelkalk, Keuper, Malm und Tertiär vor. Als Referenz für die beiden generischen geologischen Standortmodelle dienten sechs Gebiete am Südrand des Zechsteinbeckens. Die generischen geologischen 3D-Modelle beinhalten jeweils 18 Modelleinheiten vom Rotliegend bis zum Quartär. Als Einlagerungshorizont wurde das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation (z2NA) festgelegt. Die Standortmodelle stellen die Basis für die numerischen Integritätsberechnungen und für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes sowie des Sicherheits- bzw. Nachweiskonzeptes dar.

1 Einleitung

Das Projekt KOSINA „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschiechten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“ hat zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept sowie ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente auf der Grundlage generischer geologischer Modelle für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Damit wird ein Teilbeitrag für den im Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (StandAG 2013, 2017) implizit vorgesehenen Vergleich von Endlagersystemen geschaffen, insbesondere zu denen in steil lagernden Salzformationen (BERTRAMS et al. 2015, KÜHNLENZ 2016).

Der Erstellung von computergestützten geologischen 3D-Modellen wird in der Endlagerforschung stetig wachsende Bedeutung zuteil. Anwendung finden sie bei allen Aufgaben, bei denen geologische Karten oder Profile nicht ausreichend Informationen über die Geometrie und die Lagerungsverhältnisse der Gesteine im Untergrund liefern. Im Gegensatz zu Darstellungen, welche nur eine zweidimensionale Ansicht ermöglichen, erlaubt die 3D-Modellierung eine vollständige Visualisierung und Beschreibung der geologischen Besonderheiten eines Standortes. Geowissenschaftlern wird somit erleichtert, alle Informationen in ein Gesamtkonzept zu integrieren und zu aussagekräftigen Untersuchungsergebnissen zu gelangen. Zudem vermittelt sie auch Laien einen verständlichen Einblick in den z. T. komplexen geologischen Aufbau von Endlagerstandorten. Die 3D-Modellierung beruht auf unterschiedlichen Datenquellen, die u. a. Bohrungen, geophysikalische Messungen und strukturgeologische Messdaten umfassen können.

In diesem Bericht wird die Entwicklung generischer geologischer 3D-Modelle im Projekt KOSINA dokumentiert. Auf der Grundlage eines Abgleichs ausgewählter Standortauswahlkriterien mit den geologischen Gegebenheiten flach lagernder Salinarformationen in Deutschland, wurde eine generische saline Schichtenfolge einschließlich des Grund- und Deckgebirges erarbeitet. Diese diente schließlich als Grundlage für die Erstellung der zwei generischen 3D-Modelle „flache Lagerung“ und „Salzkissen“. Im Unterschied zu halotektonisch gebildeten Salzstrukturen (Salzstöcke, Salzmauern) spiegelt der Strukturtyp „flache Lagerung“ in seiner lateralen Erstreckung, abgesehen von diagenetisch bedingten Veränderungen, weitgehend sedimentationsbedingte und konkordante Lagerungsverhältnisse wider (bedded salt). Der Strukturtyp „Salzkissen“ repräsentiert ein intermediäres Stadium zwischen der „flachen Lagerung“ und den Salzdiapiren, indem es durch Salzwanderung und Akkumulation zur Aufwölbung der salinaren Schichtenfolge kam, die Deckgebirgsschichten jedoch nicht durchbrochen wurden.

2 Rahmenbedingungen für die generischen geologischen Standortmodelle

Die Erarbeitung der generischen geologischen 3D-Modelle erfordert Festlegungen zu den geologischen Rahmenbedingungen für die potenziellen Wirtsgesteinsformationen. Als Grundlage dafür dienen geologische Kriterien für die Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle in Deutschland (AkEnd 2002, StandAG 2017).

2.1 Anforderungen nach AkEnd

Der AkEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte) war ein unabhängiger Arbeitskreis des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit mit dem Auftrag, wissenschaftlich fundierte Kriterien für die Suche nach einem Endlagerstandort für radioaktiven Abfall aufzustellen. Im Ergebnis eines mehrere Jahre andauernden Abstimmungsprozesses wurden Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen sowie Abwägungskriterien erarbeitet, welche die Grundlage für einen Neustart der Endlagersuche in Deutschland bilden sollten (AkEnd 2002). Die Ausschlusskriterien dienen dazu, Gebiete mit besonders ungünstigen geologischen Voraussetzungen auszuschließen, „in denen das Barriersystem eines in einer Tiefe von etwa 1.000 m befindlichen Endlagers während des Isolationszeitraumes wesentlich beeinträchtigt oder dessen Entwicklung nach Maßstäben der praktischen Vernunft nicht prognostiziert werden kann“ (AkEnd 2002). Im Einzelnen wurden fünf Ausschlusskriterien festgelegt:

- Der Standort darf keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr im zu prognostizierenden Zeitraum aufweisen.
- Im Bereich des Standortes dürfen keine aktiven Störungen vorhanden sein.
- Im Bereich des Standortes dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 sein.
- Am Standort dürfen keine quartären vulkanischen Aktivitäten vorhanden bzw. im Nachweiszeitraum zu erwarten sein.
- Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich dürfen keine jungen Grundwässer vorliegen, in den Grundwässern dürfen kein Tritium und/oder C-14 enthalten sein.

Endlagerstandorte, welche nach den o.g. Kriterien als günstig gelten, müssen ferner eine Reihe von Mindestanforderungen erfüllen. Im AkEnd (2002) werden folgende Mindestanforderungen genannt:

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.
- Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1.500 m liegen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (z. B. mindestens 3 km² im Salzgestein).
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgschlaggefährdet sein.
- Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

In den BGR-Studien, die sich mit der Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelemente in Salzstöcken auseinandergesetzt haben, wird eine Mindestsalzschwebe von 300 m Mächtigkeit über dem Einlagerungsbereich als notwendig angesehen (vgl. KRULL et al. 2004). Aufgrund der im Vergleich zu Salzstöcken deutlich geringeren Mächtigkeiten der flach lagernden Steinsalzfolgen ist eine Übertragung dieser Empfehlungen auf flach lagernde Steinsalzfolgen nicht möglich. Die im Vorhaben KOSINA vorgesehenen numerischen THM-Modellrechnungen zu den Auswirkungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Steinsalzfolgen dienen zur Überprüfung dieser Empfehlungen.

2.2 Anforderungen nach StandAG

Das Standortauswahlgesetz („Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle“; in Kraft getreten am 27.07.2013, letzte Änderung vom 05.05.2017) regelt das mehrstufige Verfahren für die Suche nach einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in Deutschland. Im Gesetz ist

ein technisch-wissenschaftliches, transparentes und vergleichendes deutschlandweites Standortauswahlverfahren für das bestmögliche Endlager mit umfassender Erkundung und Untersuchung unterschiedlicher potenzieller Wirtsgesteine und Standorte vorgesehen. Vor Einleitung des Standortauswahlverfahrens wurde die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (Endlagerkommission) beim Deutschen Bundestag zwecks Erörterung und Klärung von Grundsatzfragen, insbesondere auch zu Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien sowie zu den Anforderungen an das Verfahren des Auswahlprozesses und die Prüfung von Alternativen, eingesetzt.

Im StandAG (2013) werden keine spezifischen Kriterien genannt. Aus diesem Grund mussten zu Beginn des KOSINA-Projektes im Jahr 2015 eigene projektspezifische Anforderungen formuliert werden (BERTRAMS et al. 2015, siehe Kap. 2.3). Die 2017 gesetzlich festgelegten Kriterien des Standortauswahlgesetzes konnten diesbezüglich noch keine Grundlage bilden, sollen im Folgenden aber kurz zum Vergleich dargestellt werden. Neben den fünf Ausschlusskriterien des AkEnd (2002) werden im StandAG (2017) im Range eines Ausschlusskriteriums zusätzlich Regionen mit gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit ausgeschlossen, sofern dadurch Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Endlagerbereich auftreten können. Des Weiteren dürfen bereits vorhandene Bohrungen die Barrieren des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) nicht beeinträchtigen. Folgen von Maßnahmen zur Erkundung potenzieller Endlagerstandorte bleiben davon unberührt. Im § 23 des StandAG (2017) stehen fünf der sieben vom AkEnd (2002) aufgestellten Mindestanforderungen. Die maximale Teufe des Endlagerbergwerkes von 1.500 m u. GOK sowie die Gefährdung des Wirtsgesteins durch Gebirgsschlag werden nicht mehr genannt. Die minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wird im StandAG (2017) dahingehend präzisiert, dass in Regionen, in denen im Nachweiszeitraum mit exogenen Prozessen wie Erosion zu rechnen ist, deren direkte oder indirekte Auswirkungen zur Beeinträchtigung der Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches führen können, die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkungen liegen soll. Im § 27 des StandAG (2017) wird vorsorglich eine Grenztemperatur von 100 °C am Behälter bestimmt, solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind.

2.3 Projektspezifische Anforderungen

Für das Forschungsprojekt KOSINA wurde eine Teufe der oberen Begrenzung des Endlagerbergwerkes von mehr als 500 m u. GOK als günstig für die Robustheit des Langzeitsicherheitsnachweises und hinsichtlich einer Sicherheitsreserve bezüglich des Abstandes zur Biosphäre beurteilt. Damit werden die Anforderungen von AkEnd (2002) und

StandAG (2017) bezüglich einer Minimalteufe von 300 m u. GOK erfüllt. In den Kali- und Steinsalzrevieren Mitteldeutschlands, wo die flach lagernden Salzlagerstätten bergmännisch erschlossen sind, treten Hauptzuflüsse von Lösungen aus dem Deck- und Nebengebirge in den Bergwerken in Teufen oberhalb von 500 m u. GOK auf (SCHWANDT 1991). Mit der vorhabensspezifischen Teufenlage des Einlagerungsbereiches von mehr als 500 m u. GOK wird zudem die Wahrscheinlichkeit von Subrosionserscheinungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich minimiert (vgl. Minimalteufe in StandAG 2017). Subrosionsprozesse von leicht löslichen stein- und kalisalzgeprägten salinaren Schichtenfolgen wurden in Mitteldeutschland in Teufen von maximal 450 m u. GOK festgestellt (ALTHEN et al. 1980, RÖHLING 2002, LANGBEIN & SEIDEL 2003).

Die Basis des Endlagerbergwerkes soll nach AkEnd (2002) höher als 1.500 m u. GOK liegen. Als Begründung dafür werden die mit zunehmender Tiefe höhere Hohlraumkonvergenz, sowie die steigende Gebirgstemperatur genannt, welche im Endlagerungsbereich 50 °C nicht überschreiten sollte (HAMMER et al. 2009). Da nach JUNG et al. (2002) die Temperaturen im Norddeutschen Becken in 1.000 m Tiefe zwischen 40 °C und 50 °C schwanken, wurde diese Teufe im KOSINA-Projekt als Maximalteufe festgelegt.

Zusammenfassend werden für die Erstellung der generischen geologischen 3D-Modelle im KOSINA-Projekt folgende vorhabensspezifischen Teufenlagen als Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Minimalteufe des Endlagerbergwerkes > 500 m u. GOK
- Maximalteufe des Endlagerbergwerkes < 1.000 m u. GOK

Weitere Anforderungen an den generischen Endlagerstandort ergeben sich aus dem Sicherheitskonzept der VSG (MÖNIG et al. 2012), das dem in KOSINA zu entwickelnden Sicherheitskonzept für flach lagernde Salzformationen zugrunde gelegt wurde. Im Sicherheitskonzept der VSG wurde von „großer Mächtigkeit der hangenden Salzschieften“, von „großen Abständen zu den Salzstockflanken“ oder von „ausreichenden Sicherheitsabständen zu Salzbereichen wie z. B. Carnallit“ gesprochen. Diese qualitativen Vorgaben wurden bei der Planung der Endlagerkonzepte bzw. bei der Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) im VSG-Projekt in konkrete Zahlenwerte umgesetzt. Im Ergebnis wurde festgehalten, dass ein Abstand von 50 m zu Schichten außerhalb der Steinsalzfolge allseitig um die Grubenbaue ausreichend ist und dass die Einlagerungsgrubenbaue mindestens 300 m von den Tagesschächten entfernt sein sollen (FISCHER-APPELT et al. 2013). Auf dieser Grundlage werden im Vorhaben KOSINA folgende Sicherheitsabstände für das Endlagerbergwerk (siehe Abb. 2-1) festgelegt:

- 50 m zu Top und Basis des Steinsalzlagers (Mächtigkeit Einlagerungshorizont > 100 m)
- 150 m zum Top des Salinars
- 500 m lateraler Sicherheitspfeiler (um Beeinflussungen durch ggf. vorhandene Salzhänge auszuschließen, unter Berücksichtigung des Einfallens der Schichten)
- 300 m lateraler Abstand der Einlagerungsgrubenbaue zu den Tagesschächten

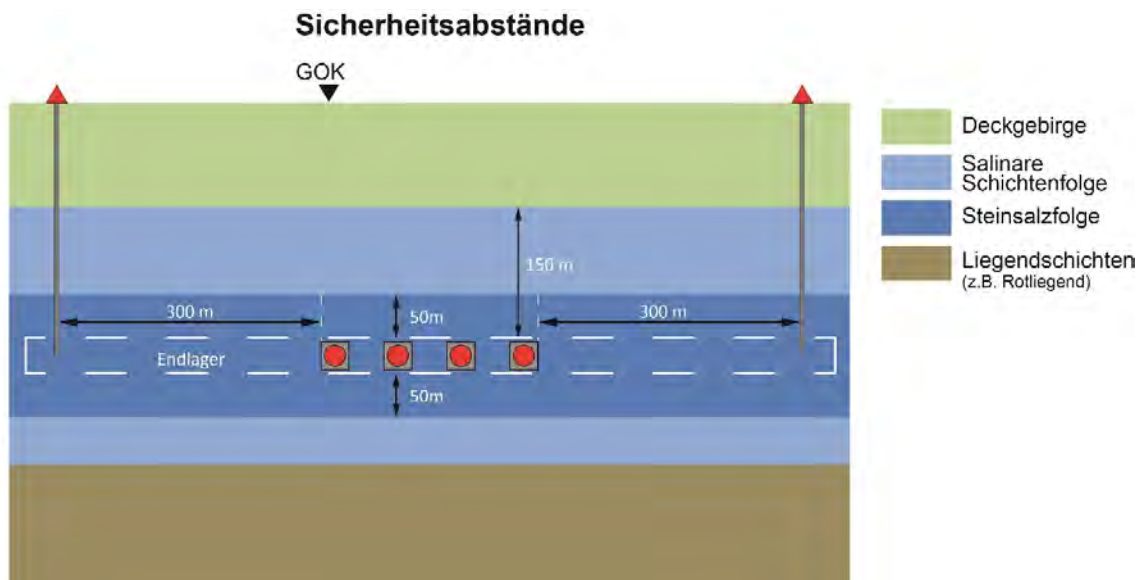


Abb. 2-1: Schematische Darstellung der Sicherheitsabstände im KOSINA-Projekt (aus: BERTRAMS et al. 2015).

Des Weiteren wurde im Forschungsprojekt KOSINA eine maximale Auslegungstemperatur von 200 °C am Behälter vorgegeben. Dies erlaubt die Berechnung von Mindestabständen zwischen den Abfallgebänden und zwischen den Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungsbohrlöchern (BERTRAMS et al. 2015).

3 Geologische Beschreibung

Im KOSINA-Projekt sind flach lagernde Salzschichten („bedded salt“) als Wirtsgestein vorgesehen. Im Gegensatz zu Salzdiapiren (Salzstöcken, Salzmauern), wo die Salinarschichten infolge des Salzaufstiegs Einheiten des Deckgebirges durchbrochen haben, sind flach lagernde Salzschichten innerhalb der sedimentären Schichtenfolge durch großräumige konkordante (subparallele) Lagerungsverhältnisse gekennzeichnet (siehe Abb. 3-1 A). In flach lagernden, steinsalzführenden Schichtenfolgen können lokal begrenzt flachwellige Deformationsstrukturen (Intrasalinarstrukturen mit Schichtneigung und Mächtigkeitsschwankungen des Steinsalzes) und z. T. intensiv verfaltete Salinarschichten

(z. B. Kaliflöze) vorkommen. Meist handelt es sich dabei nur um kleinräumige Schichtverstellungen oder lokal verfaltete Salzsichten sowie um Flexurbildungen, die überwiegend auf das „Abpuffern“ von Störungszonen im Liegenden und/oder Hangenden der Salzlager oder auf halokinetische Salzumverteilungen in benachbarte Salzstrukturen zurückzuführen sind. Eine flach lagernde salinare Schichtenfolge weist trotz dieser intrasalinaren Strukturen insgesamt eine deckgebirgskonforme Lagerung auf.

Als eine Sonderform flach lagernder Salinarschichten werden im KOSINA-Projekt die Salzkissen betrachtet. Salzkissen sind durch Salzzuwanderungen entstandene domförmige Strukturen (Brachyantiklinalen). Wesentlich für die Strukturgenese ist die Akkumulation des Steinsalzes durch das laterale Zusammenfließen der am leichtesten mobilisierbaren Salzpartien (häufig das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation). Durch die Akkumulation kommt es zur Aufwölbung der jüngeren, weniger kriechfähigen Salzgesteine der salinaren Schichtenfolge und des Deckgebirges (siehe Abb. 3-1 B). Die Lagerung der Deckgebirgsschichten, d. h. der postsalinaren Sedimentschichten, ist konform mit dem Streichen und Fallen der äußeren Kontur des Salzkissens. In der konkordanten Schichtenfolge des Deckgebirges treten insbesondere im Scheitelpbereich häufig reduzierte Sedimentmächtigkeiten auf, z. T. sogar Schichtlücken. In den die Salzstruktur umgebenden Randsenken ist dagegen eine verstärkte Sedimentation zu beobachten. Salzkissen, die durch eine hohe Aufwölbung und steile Flanken charakterisiert sind, werden reife Salzkissen genannt. Oft werden solche Salzkissen im Scheitelpbereich der Struktur von Störungen im Deckgebirge begleitet.

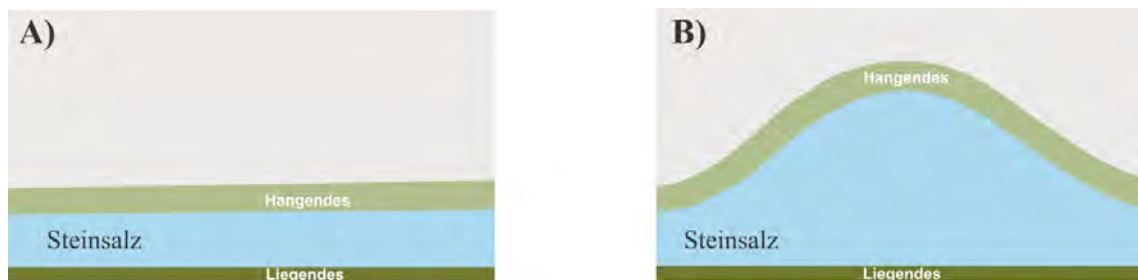


Abb. 3-1: Schematische Darstellung der Lagerungsformen im Modell A (Typ „flache Lagerung“) und Modell B (Typ „Salzkissen“) (aus: BERTRAMS et al. 2015).

3.1 Flach lagernde Salinarformationen in Deutschland

Der Kenntnisstand zur räumlichen Verbreitung von flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland und zu ihrer lithologischen Zusammensetzung wurde im Rahmen des BGR-Projektes BASAL zusammengefasst (REINHOLD et al. 2014, REINHOLD & HAMMER 2016). Im Fokus dieses Projektes stehen salinare Formationen, in denen regional verbreitete flach lagernde, mindestens mehrere zehner Meter mächtige Steinsalzsichten vorkommen.

Eine Abfolge derartiger Steinsalzschiechten innerhalb einer Salinar-Formation wird als Steinsalzlager oder Steinsalzfolge bezeichnet. Sie kommen in Deutschland in den stratigraphischen Einheiten Rotliegend, Zechstein (beide Perm), Röt, Muschelkalk, Keuper (alle Trias), Malm (Oberjura) und Tertiär (Paläogen) vor (siehe Abb. 3-2).

Während sich die Verbreitung der Rotliegend-, Röt-, Keuper- und Malm-Salinare auf das Norddeutsche Becken bzw. Teilbereiche dieses im Mesozoikum aktiven Senkungsgebietes beschränkt, kommen Steinsalzlager des Zechstein, Muschelkalk und Tertiär auch in Süddeutschland vor (siehe Kap. 3.1.1 bis 3.1.7). Die Differenzierung des Ablagerungsraums in einzelne Teilbecken sowie synsedimentäre tektonische und halokinetische Bewegungen im Untergrund führten dazu, dass sich die Verbreitung der Steinsalzlager der Keuper- und Malm-Salinare im Vergleich zu den Zechstein-, Röt- und Muschelkalk-Salinaren deutlich verringerte und dass die Mächtigkeit sowie Zusammensetzung der Salinare kleinräumig stark variieren. Viele flach lagernde Steinsalzlager kommen in Teufenbereichen von mehr als 1.000 m u. GOK vor und sind damit nur eingeschränkt wirtschaftlich nutzbar. In Gebieten, in denen die flach lagernden Steinsalzfolgen in geringeren Teufen vorkommen (z. B. Salinarformationen in einigen Randbecken des Zechstein-Verbreitungsgebietes oder in den Muschelkalk- und Tertiärsedimenten Süddeutschlands), werden die Salzablagerungen z. T. intensiv für die Steinsalz- bzw. Kalisalzgewinnung oder für den Kavernenbau genutzt.

System	Serie / Gruppe	internationale Stufe / Subgruppe / Formation		
Quartär				
Neogen	Pliozän	ca. 1,8 Ma		
			Ober	
	Miozän		Unter	
			Ober	
Paläogen	Oligozän		Mittel	
			Unter	
	Eozän		Chattium	
			Rupelium	
			Priabonium	
			Bartonium	
	Paläozän		Lutetium	
			Ypresium	
			Thanetium	
			ca. 65 Ma	Seelandium
Kreide	Oberkreide		Danium	
			Maastrichtium	
			Campanium	
			Santonium	
			Coniacium	
	Unterkreide		Turonium	
			Cenomanium	
			Albium	
			Aptium	
			Barremium	
Jura	Oberjura (Malm)		Hauterivium	
			Valanginium	
			Berriasium	
	Mitteljura (Dogger)		Tithonium	
			Kimmeridgium	
			Oxfordium	
			Callovium	
	Unteljura (Lias)		Bathonium	
			Bajocium	
			Aalenium	
Trias	Keuper		Toarcium	
			Pliensbachium	
			Sinemunium	
			Hettangium	
			ca. 200 Ma	Exter-Formation
	Muschelkalk		Arnstadt-Formation	
			Weser-Formation	
			Stuttgart-Formation	
	Buntsandstein		Grabfeld-Formation	
			Erfurt-Formation	
		Oberer Muschelkalk		
		Mittlerer Muschelkalk		
		Unterer Muschelkalk		
		Röt-Formation		
		Solling-Formation		
Perm	Zechstein		Hardegsen-Formation	
			Detfurth-Formation	
			Volpriehausen-Formation	
			Quickborn-Formation	
			Bernburg-Formation	
	Rotliegend		ca. 251 Ma	Calvörde-Formation
			Fulda-Formation	
			Friesland-Formation	
			Ohre-Formation	
			Aller-Formation	
	Leine-Formation			
	Stäufurt-Formation			
	Werra-Formation			
	Eibe-Subgruppe			
	Havel-Subgruppe			
	Müritz-Subgruppe			
	Altmark-Subgruppe			

 Vorkommen von Steinsalzlagern

Abb. 3-2: Stratigraphische Position und Bezeichnung der salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlagern in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.1.1 Rotliegend-Salinar

Die ältesten Steinsalzlager in Deutschland wurden in den meist feinkörnigen und tonreichen Schichtenfolgen des Oberrotliegend nachgewiesen. Im primären Schichtverband handelt es sich um bis zu 15 Steinsalzhorizonte unterschiedlicher Mächtigkeit und regionaler Verbreitung innerhalb der Havel- und Elbe-Subgruppe (PLEIN 1995, SCHRÖDER et al. 1995). Die überwiegend terrestrischen Ablagerungen zeichnen ein großräumiges, ESE-WNW streichendes und in dieser Zeit expandierendes, intrakontinentales Becken nach. In der lokal bis zu über 1.500 m mächtigen Steinsalz-Tonstein-Wechselfolge ist die Mächtigkeit der Steinsalzlager meist auf wenige Meter beschränkt, nur im Bereich der Elbmündung und in Schleswig-Holstein wurden konkordant lagernde Rotliegend-Steinsalzfolgen mit wenigen zehner Meter Mächtigkeit nachgewiesen (GRALLA 1988, SCHRÖDER et al. 1995, GAUPP et al. 2000, BEST et al. 1982, KATZUNG 1991).

Im gesamten Verbreitungsgebiet der Rotliegend-Salinare (siehe Abb. 3-3) liegen die konkordanten Steinsalzlager deutlich tiefer als 3.000 m u. NN, meist sogar tiefer als 5.000 m u. NN (DOORNENBAL & STEVENSON 2010). Verursacht durch halotektonische Salzaufstiegsprozesse werden Rotliegend-Salinarschichten im Bereich von Doppelsalinarstrukturen gemeinsam mit Zechstein-Salzen in deutlich geringeren Teufen nachgewiesen, wo sie in Form eines Salz-Tongemisches (Haselgebirge) zumeist als Kern in den Diapiren vorliegen und vereinzelt für den Speicherkavernenbau genutzt werden.

Aufgrund der geringen Mächtigkeiten sowie der mehrere Kilometer betragenden Teufenlage, werden die flach lagernden Rotliegend-Salinare für ein HAW-Endlager als ungeeignet angesehen und im KOSINA-Projekt nicht eingehender betrachtet.

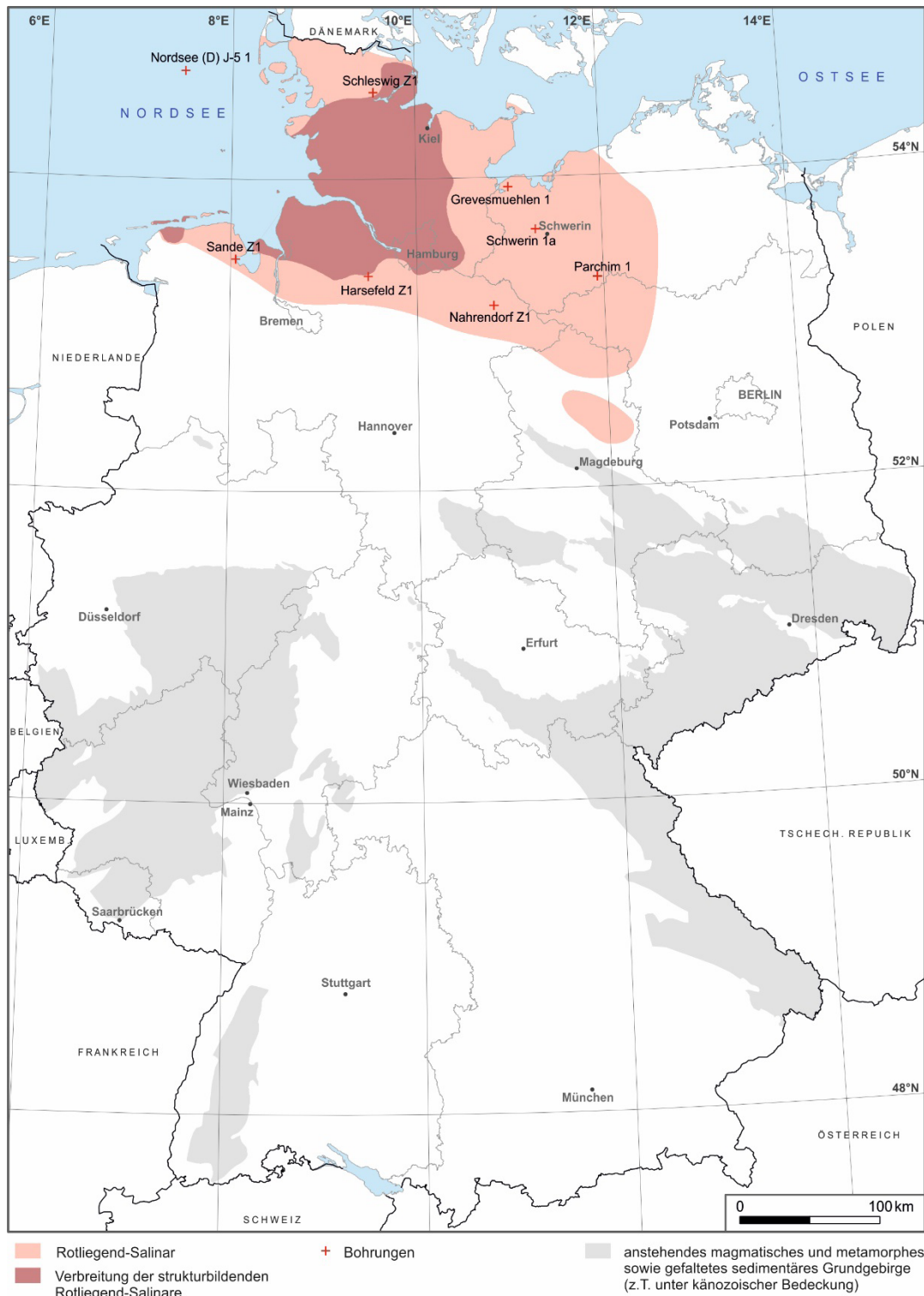


Abb. 3-3: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Rotliegend-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.1.2 Zechstein-Salinar

Die Steinsalzlager des Zechstein sind Teil einer salinaren Schichtenfolge, die in sieben Formationen unterteilt wird: Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formation (KÄDING 2005, McCANN 2008, DOORNENBAL & STEVENSON 2010). Es handelt sich dabei um zyklische Abfolgen, bestehend aus basalen feinklastischen Ablagerungen gefolgt von Karbonaten, die durch Evaporite überlagert werden. Die Abscheidung der Evaporitminerale erfolgte in der Reihenfolge zunehmender Löslichkeit (Anhydrit, Steinsalz, z. T. Kali- und Magnesiumsalze). In Abhängigkeit von ihrer paläogeographischen Lage und den lokalen Sedimentationsbedingungen sind in den sieben Formationen des Zechstein Steinsalzfolgen unterschiedlicher Mächtigkeit und Verbreitung entstanden (FRISCH & KOCKEL 2003), die in Norddeutschland sowie teilweise bis nach Thüringen, Hessen und Franken nachgewiesen wurden. Die Verbreitung der Halit-führenden Schichtenfolgen des Zechstein wurde durch die Ausdehnung des NW-SE streichenden Norddeutschen Beckens bestimmt, das sich durch Schwellen in mehrere Subbecken gliederte. Die südliche Verbreitungsgrenze der salinaren Fazies verlief etwa vom südöstlichen Brandenburg mit dem Niederlausitz-Subbecken über die weit nach Süden reichenden Subbecken Thüringer Becken und Werra-Fulda-Becken. Letztere wurden durch mehrere Schwellenregionen voneinander separiert, die vom Thüringer Wald über die Eichsfeld-Schwelle bis nördlich des Harzes reichten. Im NW Deutschlands bildeten die Münsterland-Scholle und nördlich davon die Hunte-Schwelle eine nach Norden ins Becken reichende Schwellenregion. Westlich davon, im Emsland und in der Niederrheinischen Bucht (Niederrhein-Subbecken), sind die marinen Ablagerungen des Zechsteinmeeres bis weit nach Süden verbreitet (FRISCH & KOCKEL 2003, PAUL 2006, siehe Abb. 3-4).

Die Basis der Steinsalzlager kann am Südrand des Norddeutschen Beckens (z. B. in Mitteldeutschland) in wenigen hundert Metern Tiefe liegen, zum Beckenzentrum sinkt sie in Tiefen von über 5.000 m u. GOK ab (KRULL et al. 2004). In Abhängigkeit von der paläogeographischen Position des Ablagerungsraums variieren Lithologie und Mächtigkeit der Steinsalzlager. Die Steinsalzlager der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formation weisen die größten Mächtigkeiten auf, wohingegen die Steinsalzlager der Aller-, Ohre-, Friesland- und Fulda-Formation meist nur wenige zehner Meter mächtig sind und heute häufig nur in den großen Tiefen des Beckenzentrums vorkommen.

Insbesondere im Niederrhein-Becken, im Werra-Fulda-Becken, im Thüringer Becken sowie in SE-Brandenburg können die Steinsalzsichten in der Werra-Formation lokal über 400 m mächtig werden. Durch eingeschaltete Kaliflöze werden sie meist weiter untergliedert. Im Niederrhein-Gebiet ist das Steinsalzlager durch große Mächtigkeitsschwankungen gekennzeichnet. Im benachbarten südlichen Emsland bis nach Süddoldenburg befinden sich die flach lagernden Steinsalzfolgen der Werra-Formation in sehr großen, nicht Endlager-relevanten Tiefen (deutlich > 1.000 m u. GOK) .

In SE-Brandenburg, im Thüringer Becken, im Solling-Becken und im Gebiet der Calvörde-Scholle sind die Steinsalzlager der Staßfurt-Formation durch mehrere hundert Meter Mächtigkeit und eine vergleichsweise geringe Tiefenlage gekennzeichnet. In der Staßfurt-Formation kommen Kalisalze in Form des überwiegend carnallitisch ausgebildeten Kaliflözes Staßfurt vor. Das Steinsalzlager der Leine-Formation ist inklusive des eingeschalteten, überwiegend sylvinitisch ausgebildeten Kaliflözes Ronnenberg in den Randsenken des Zechsteinmeeres z. T. über 100 m mächtig. Das Steinsalzlager in der Aller-Formation ist meist nicht mehr als etwa 50 m mächtig.

Die Steinsalzvorkommen des Alpen Salinars in SE-Bayern sind aufgrund ihrer Genese und der Lagerungsverhältnisse als eine Sonderform von Zechstein-Steinsalzlager in Deutschland zu betrachten. Sie sind Teil einer unregelmäßigen Kette von einzelnen Salz- und Gipsvorkommen, die innerhalb des Deckenkomplexes der Nördlichen Kalkalpen vorkommen (SCHAUBERGER 1986, EXLER 1987, KELLERBAUER 1996). Die heutige lithologische Zusammensetzung des evaporitreichen Alpen Salinars („Haselgebirge“) ist generell durch eine 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). Der Halit-führende Teil der Haselgebirgsformation besteht 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).

Ausführlichere Informationen zur Tiefenlage und zur Mächtigkeit der Steinsalzlager in den Zechstein-Formationen sind in REINHOLD et al. (2014) sowie exemplarisch für die Werra- und Staßfurt-Formation im Kapitel 3.3.1 enthalten.

Regional begrenzt können die flach lagernden Steinsalzlager des Zechstein die im Kapitel 2 zusammengefassten Anforderungen für HAW-Endlager erfüllen.

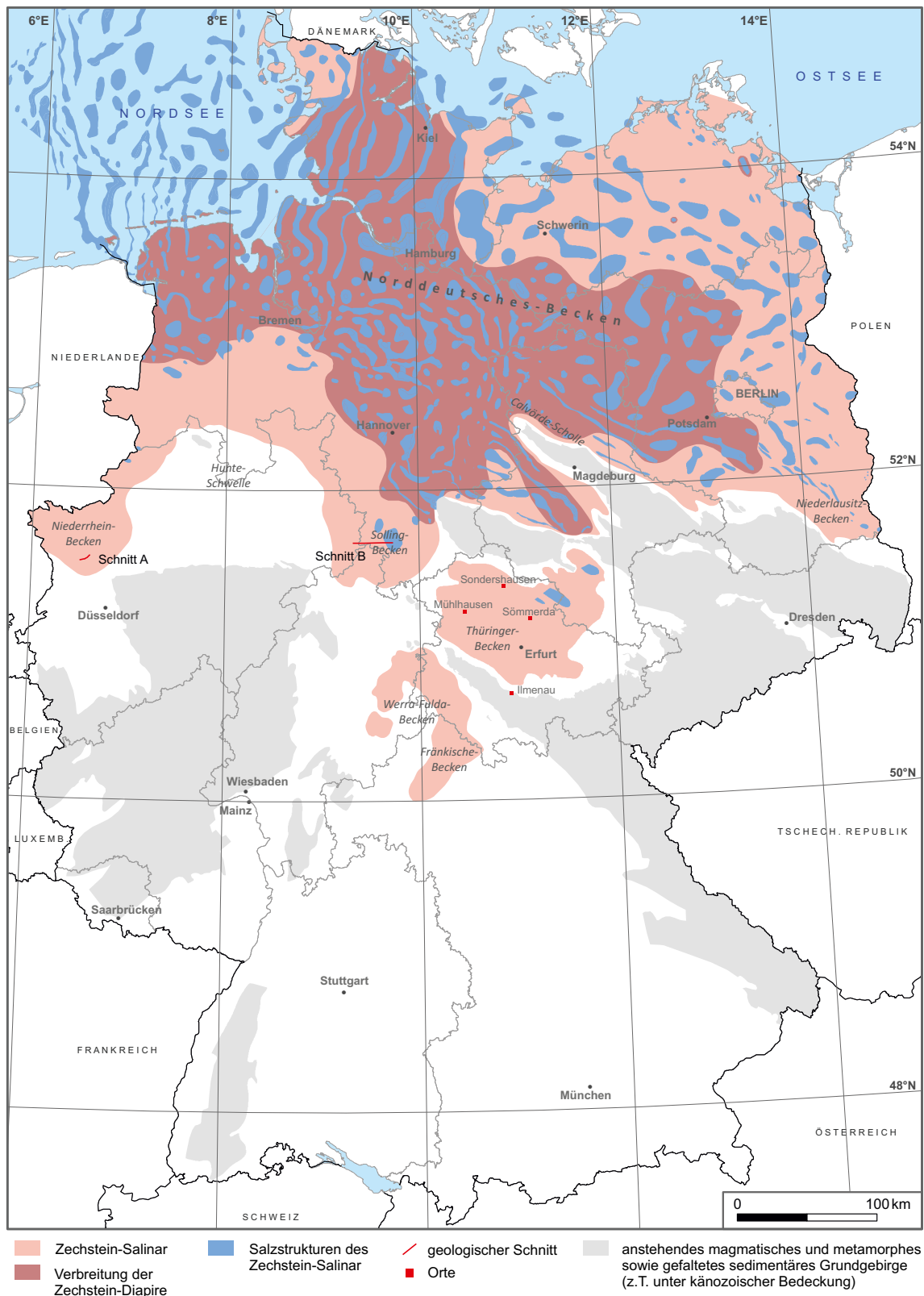


Abb. 3-4: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Zechstein-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.1.3 Röt-Salinar

In der Röt-Formation (Oberer Buntsandstein) kommen Steinsalzlager weitverbreitet im Norddeutschen und im Thüringer Becken vor (siehe Abb. 3-5). Sie sind im Liegenden und Hangenden durch sulfatische Schichtenfolgen begrenzt (Basal- und Deckanhydrit). Eine maximale Steinsalzmächtigkeit der Röt-Formation von insgesamt etwa 150 m bis 170 m kommt im nordwestlichen Norddeutschen Becken vor, wobei sich diese Ablagerungen heute in mehr als 2.000 m Tiefe befinden (FRISCH & KOCKEL 2003, FEIST-BURCKHARDT et al. 2008, DOORNENBAL & STEVENSON 2010, RÖHLING 2013). In Mecklenburg und Brandenburg liegen die etwa 100 m mächtigen Röt-Steinsalzlager in den Randsenken der Zechstein-Salzstrukturen z. T. sogar etwa 4.000 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 Röt-Steinsalzlager in mehreren 1.000 m Tiefe (BENOX et al. 1997, RADZINSKI 2008a, BRANDES 2011). Das Röt-Steinsalzlager des Thüringer Beckens ist ein fein- bis grobkörniges, von Anhydritfasern sowie -lagen und vereinzelt von Tonflocken durchsetztes Steinsalz (SEIDEL 1964). Es befindet sich aktuell in einer maximalen Tiefenlage von 700 m u. GOK und 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, LANGBEIN & SEIDEL 1997, HUCKRIEDE & ZANDER 2011, RÖHLING 2013).

Die flach lagernden Röt-Steinsalzlager mit einer für HAW-Endlager günstigen Mächtigkeit (> 100 m) liegen ausschließlich in Teufenlagen des Norddeutschen Beckens von mehreren Kilometern und sind für das KOSINA-Projekt nicht relevant.

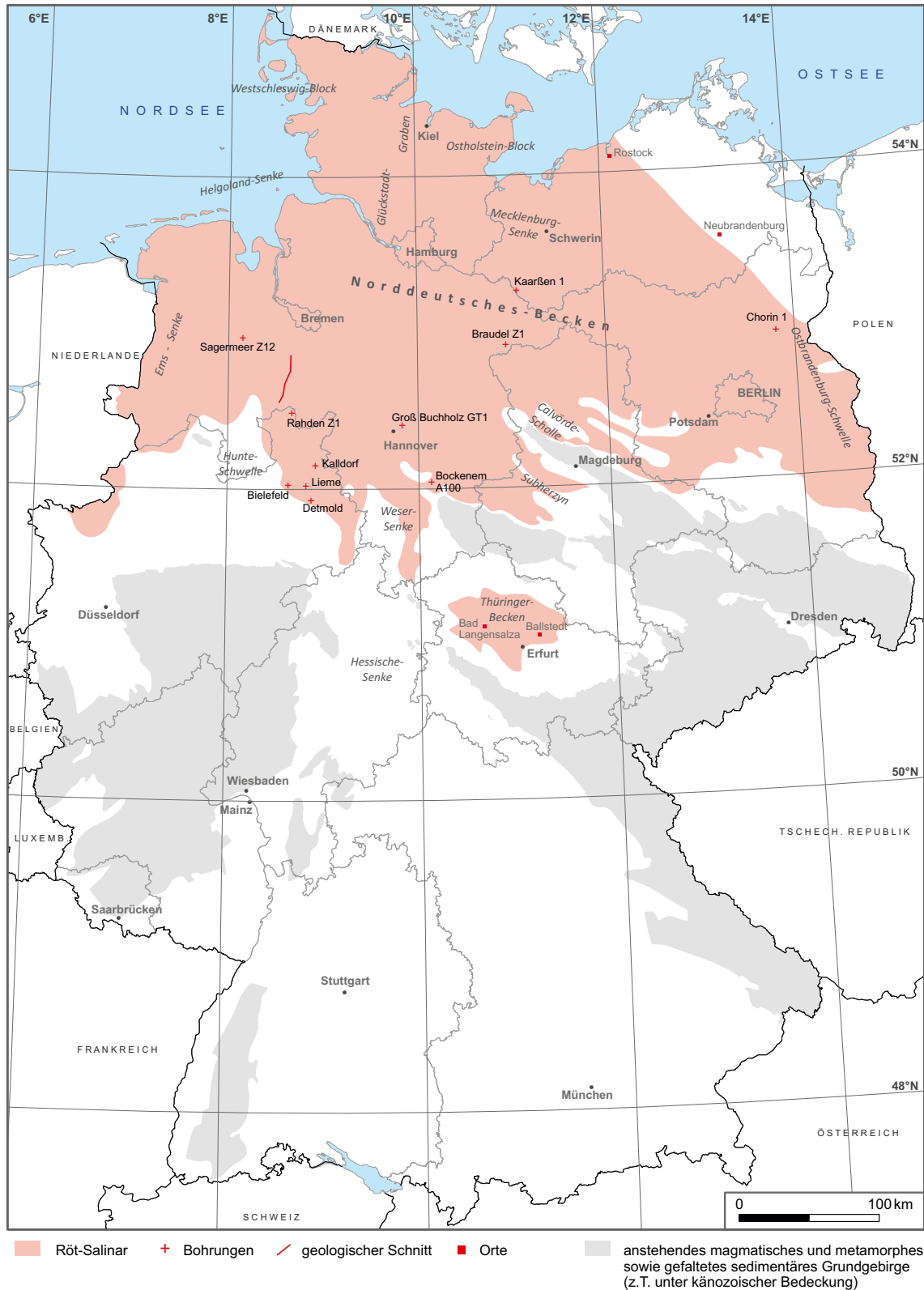


Abb. 3-5: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Röt-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.1.4 Muschelkalk-Salinar

In Abhängigkeit von der paläogeographischen Position können im Muschelkalk-Salinar bis zu 9 Halit-führende Salinar-Zyklen ausgebildet sein (GAERTNER & RÖHLING 1993, RÖHLING 2002). Heute sind die Steinsalzvorkommen noch in Norddeutschland, im Thüringer Becken sowie südlich des Main (Kitzingen, Burgbernheim, Schwäbisch Hall, Heilbronn, Stuttgart, Stetten und Rottweil bis Rheinfeldern) erhalten (siehe Abb. 3-6). In Baden-Württemberg und in NW-Bayern erreichen die Muschelkalk-Steinsalzlager eine Mächtigkeit von einigen Metern bis wenigen Dekametern und liegen dort meist in Tiefen von 100 m bis 300 m u. GOK (CRAMER 1965, FREUDENBERGER & SCHWERD 1996, GEYER & GWINNER 2011). Im Thüringer Becken, in Sachsen-Anhalt sowie in den nordöstlichen Verbreitungsgebieten von Brandenburg und Mecklenburg beträgt die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzlager des Muschelkalk-Salinars ebenfalls nur wenige zehner Meter (10 m bis 40 m; vgl. LANGBEIN & SEIDEL 1997, ALTHEN et al. 1980, RÖHLING 2002, RADZINSKI 2008b). 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 2.000 m u. GOK.

In weiten Teilen des Verbreitungsgebietes erreichen die Muschelkalk-Salinare keine für ein HAW-Endlager geeigneten Mächtigkeiten. Nur in NW-Niedersachsen sind Mächtigkeiten über 100 m nachgewiesen, die Muschelkalk-Salinare in dieser Region liegen jedoch in über 2 km Tiefe und sind deshalb für das KOSINA-Projekt ungeeignet.

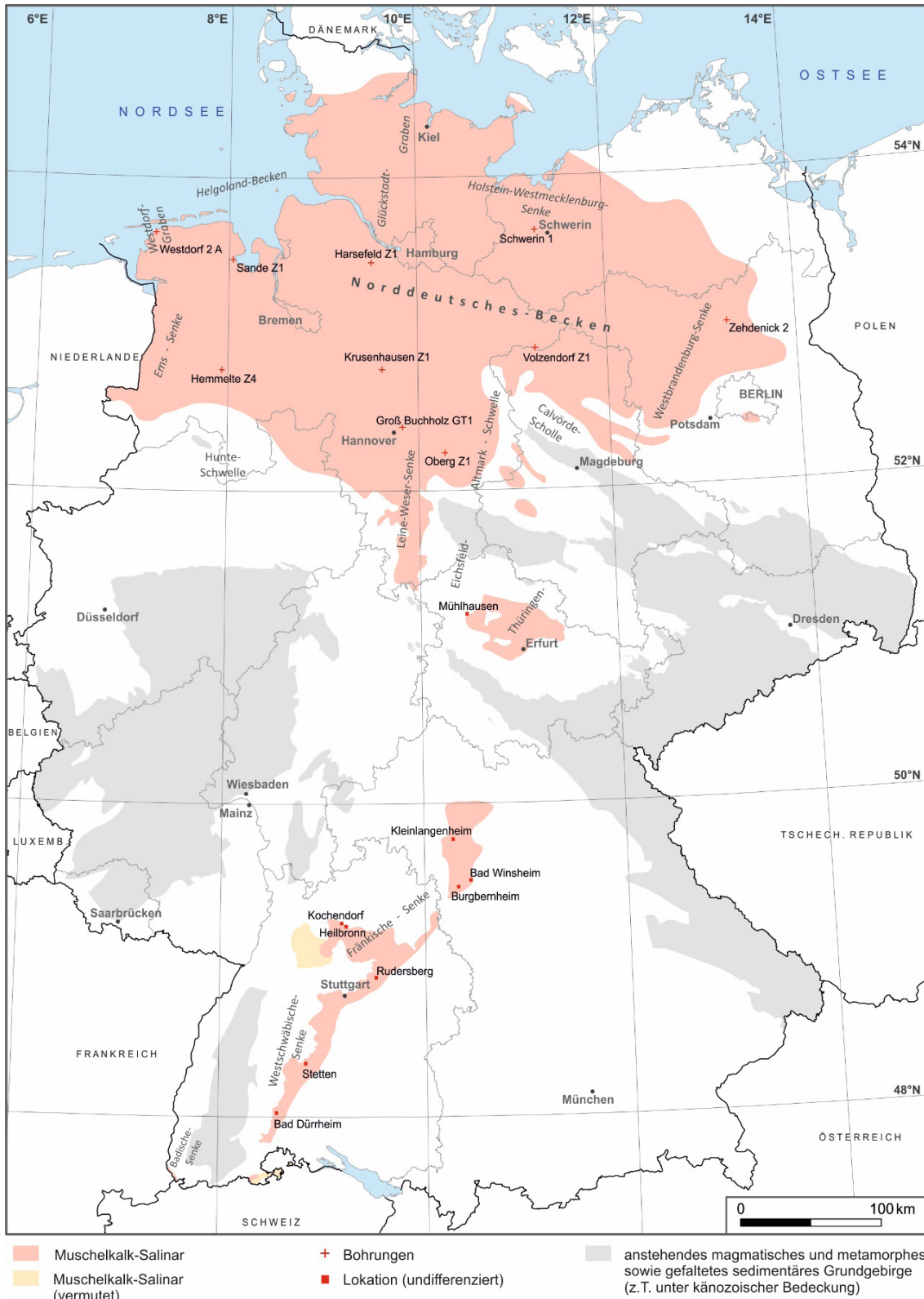


Abb. 3-6: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Muschelkalk-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.1.5 Keuper-Salinar

Das Keuper-Salinar enthält insgesamt bis zu 8 Steinsalzlager, die oft durch Ton- und Anhydritschichten gegliedert sind. Die Steinsalzlager sind eingeschaltet in sulfatisch dominierte Schichtenfolgen. Die Verbreitungsgebiete der Keuper-Steinsalzlager ähneln denen der Rotliegend-Salinare und sind auf tiefe Lagen in Norddeutschland beschränkt (siehe Abb. 3-7). Insbesondere in Schleswig-Holstein und im angrenzenden Untereifelraum erreichen die Keuper-Steinsalzlager mehrere hundert Meter Mächtigkeit. In diesen Gebieten hoher primärer Mächtigkeit neigen die Keuper-Salze zu sekundärer, halokinetisch verursachter Akkumulation (weitere Informationen hierzu in Kapitel 3.2). Die Steinsalzlager des Keuper-Salinars sind ebenfalls in Ostdeutschland verbreitet, aber mit wenigen Metern wesentlich geringmächtiger (BEUTLER et al. 1999, KOCKEL et al. 1999, FRISCH & KOCKEL 2003, KRULL et al. 2004, BEUTLER & TESSIN 2005, BARNASCH 2009).

Die Keuper-Salinare mit einer ausreichenden Mächtigkeit für HAW-Endlager liegen in Teufen unterhalb 1.000 m u. GOK und erfüllen deshalb nicht die im Kapitel 2.3 genannten Mindestanforderungen für das KOSINA-Projekt.

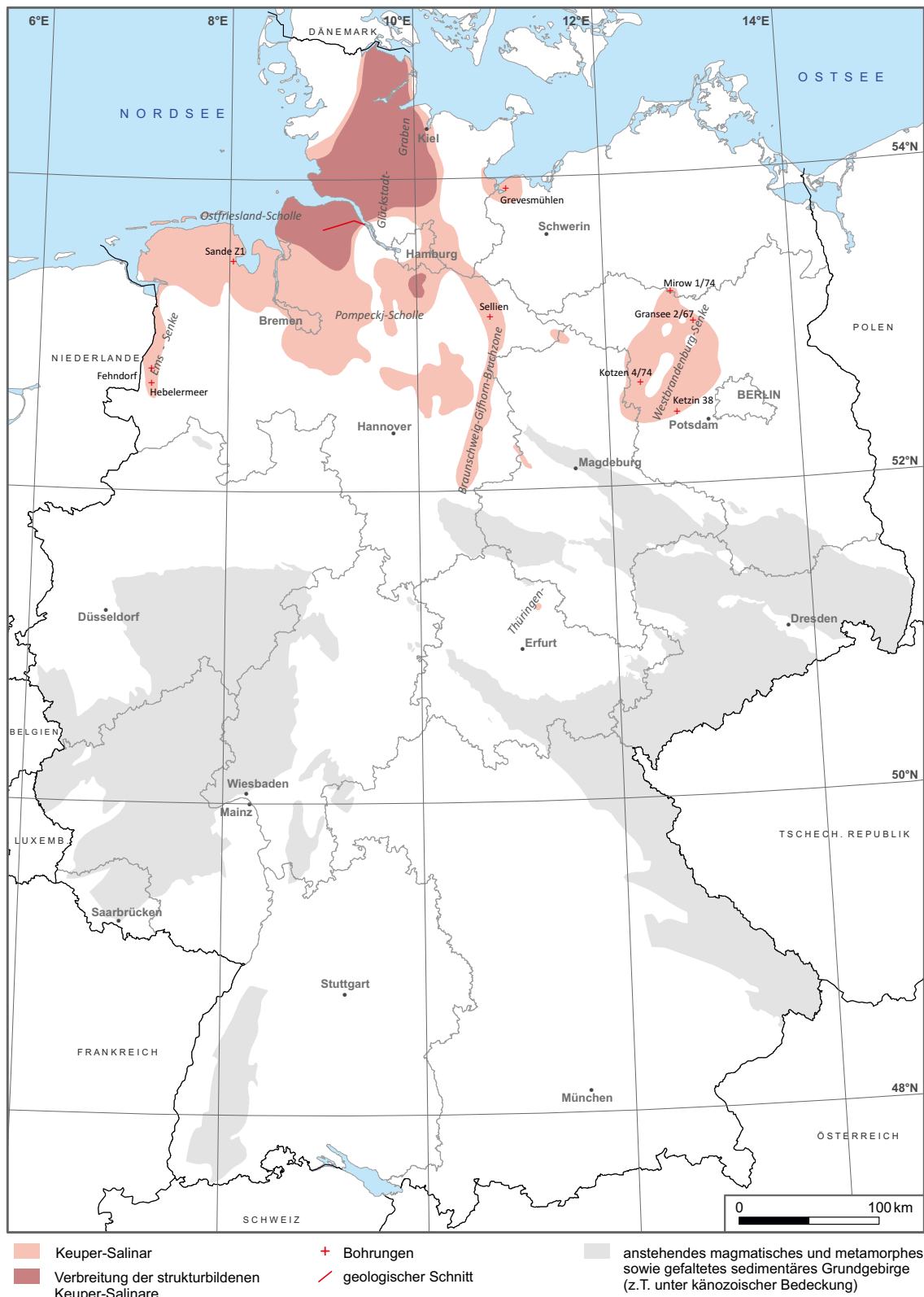


Abb. 3-7: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Keuper-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.1.6 Malm-Salinar

Im Malm-Salinar 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 Ton- und Anhydritgehalte gekennzeichnet. Das Verbreitungsgebiet erstreckt sich vornehmlich auf das westliche Niedersachsen, an der Grenze zu Westfalen (siehe Abb. 3-8). In Richtung der jeweiligen kleinräumigen Beckenzentren dominieren die Steinsalzlager zunehmend die salinare Schichtenfolge und in den Gebieten mit den größten Mächtigkeiten des Malm-Salinars besteht die Tendenz zu sekundären, halokinetisch bedingten Akkumulationen der Steinsalzsichten in Form von Salzkissen (weitere Informationen hierzu in Kapitel 3.2). Generell liegen die flach lagernden Steinsalzlager des Malm in Tiefen > 1.000 m u. GOK. Die Wirtsgesteinszusammensetzung ist durch die enge Salz-Tonstein-Anhydrit-Wechselagerung ebenfalls ungünstig für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle (BOIGK 1981, GARMANN et al. 1997, FRISCH & KOCKEL 2003).

Aufgrund der ungünstigen Wirtsgesteinszusammensetzung und einer Teufenlage > 1.000 m u. GOK, werden die flach lagernden Malm-Salinare im KOSINA-Projekt als ungeeignet für ein HAW-Endlager angesehen.



Abb. 3-8: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Malm-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.1.7 Tertiär-Salinar

Stratiforme Steinsalzlager innerhalb der tertiären Schichtenfolge sind in Deutschland ausschließlich im Oberrheingraben verbreitet. Die salinar geprägten ältesten paläogenen Sedimente, inklusive der Steinsalzlager des Eozän, sind vorwiegend im Gebiet des südlichen Oberrheingrabens verbreitet (z. B. im Wittelsheim-Becken, siehe Abb. 3-9). 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 bis dolomitisch-anhydritische Mergel und Steinsalz geprägt sind (GEYER & GWINNER 2011, GRIMM et al. 2011).

Eine Betrachtung der z. T. mehrere hundert Meter mächtigen und in für die Endlagerung geeigneten Teufenbereichen vorkommenden tertiären Salzvorkommen als potenzielles Endlagerwirtsgestein im KOSINA-Projekt erübrigt sich aufgrund der Zugehörigkeit dieser Salinarschichten zum neotektonisch aktiven Oberrheingraben.

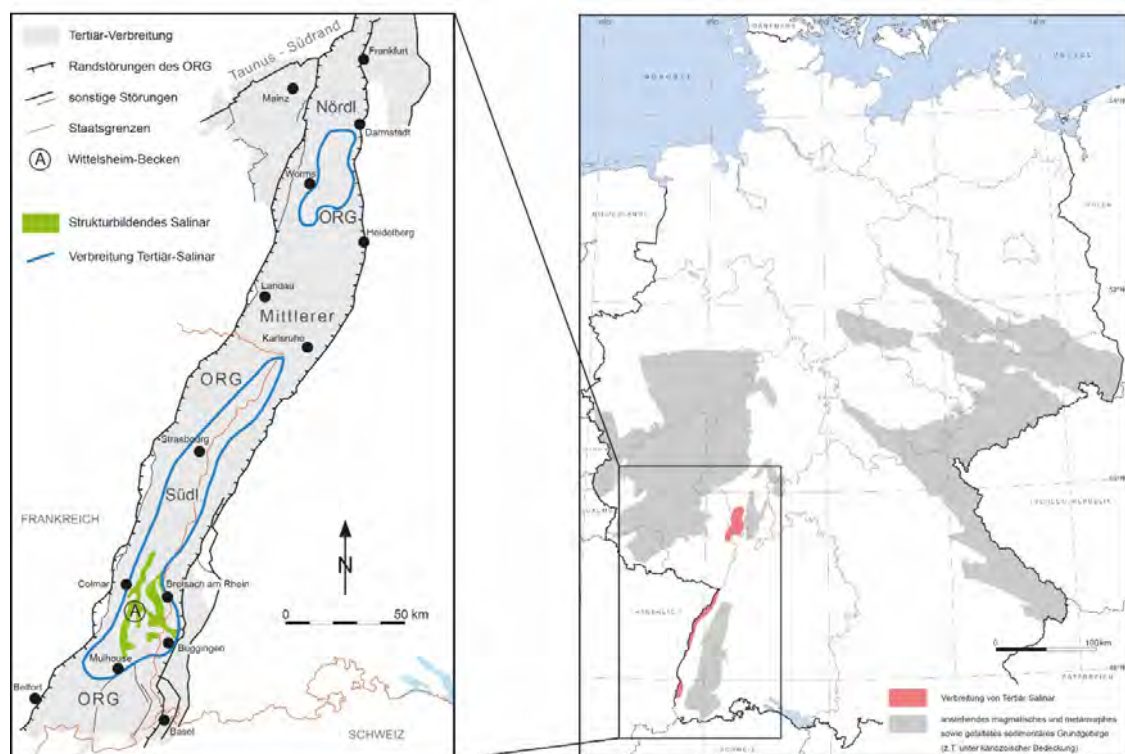


Abb. 3-9: Schematische on-shore Verbreitung des Halit-führenden Tertiär-Salinars im Oberrheingraben (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.2 Salzkissen in Deutschland

Als eine Sonderform flach lagernder Salzschieben werden im KOSINA-Projekt Salzkissen betrachtet. Unter Salzkissen werden hier domförmige Strukturen innerhalb von salinaren Schichtenfolgen verstanden, die infolge einer halokinetischen Salzakkumulation entstanden sind. Bei flach lagernden Steinsalzfolgen mit hoher Mächtigkeit und großer Überlagerung können die Salzgesteine zum Fließen („Kriechen“) angeregt werden. In der Frühphase der Strukturgenese kommt es zur Bildung gering aufgebeulter Strukturen, die als „unreife“ Salzkissen bezeichnet werden. Diese sind durch ein flaches Einfallen der Salzkissenflanken sowie ein weitgehend intaktes Deckgebirge gekennzeichnet. Mit fortschreitender Salzakkumulation entwickelt sich eine Salzkissenform mit steilen Flanken und einer hohen Firste. Oberhalb des Salzkissens kann es zur verringerten Sedimentation kommen oder die Erosion kann auf das gehobene Deckgebirge stärker nivellierend einwirken. Infolge dessen kommen reduzierte Schichtmächtigkeiten und z. T. Schichtlücken im Deckgebirge von Salzkissenstrukturen vor. Während der fortschreitenden Strukturgenese wird das überlagernde Deckgebirge durch Dehnung beansprucht. Ist das Deckgebirge soweit geschwächt, dass ein Durchbruch des Salzes durch das Deckgebirge erfolgt, entstehen Salzstock-Strukturen (z. B. Salzdiapire).

Der aktuelle Kenntnisstand zur Verbreitung und den geologischen Merkmalen von den in Deutschland vorkommenden Salzstrukturen wurde im Projekt InSpEE im Zeitraum 2012 bis 2016 erarbeitet (GAST & RIESENBERG 2016, POLLOK et al. 2016). Danach ist die Strukturgenese der meisten Salzkissen durch Steinsalzlager eines stratigraphischen Alters geprägt. In Ausnahmefällen können an der Salzkissenentstehung auch zwei unterschiedlich alte saline Schichtenfolgen beteiligt sein, wie im Falle der strukturbildenden Rotliegendesalinare. Als Beispiele wären hier die Salzkissen Karla, Helgoland oder Hahnöfersand zu nennen, die Anteile von Zechstein- und Rotliegend-Salinar enthalten. Diese Strukturen liegen meist tiefer als 2.000 m u. NN (InSpEE Geoviewer-BGR) und erfüllen daher nicht die im Kapitel 2.3 formulierten Mindestanforderungen des KOSINA-Projektes.

Die größte Verbreitung besitzen Salzkissen, die sich innerhalb der Schichtenfolge des salinaren Zechstein entwickelt haben. In den meisten Fällen kann davon ausgegangen werden, dass die strukturbildenden Steinsalzlager Teil der Werra-, Staßfurt- oder Leineformation sind. Dies ist abhängig von der regionalen Verbreitung und Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlager (POLLOK et al. im Druck). Die Werte der maximalen Mächtigkeit von Salzkissenstrukturen des Zechstein liegen im Bereich von etwa 350 m bis mehr als 3.400 m. Die Kulminationswerte der Salzkissenstrukturen reichen von 134 m u. NN (Salzkissen Teutschenthal) bis über 5.100 m u. NN (Salzkissen Ahe). Nach den vorliegenden Informationen könnten mehrere Salzkissen, die den projektspezifischen Anforderungen entsprechen (siehe Kap. 2.3) u. a. in Brandenburg, Sachsen-Anhalt und dem südlichen Niedersachsen vorkommen.

Salzkissen, die aus Röt- oder Muschelkalk-Salinar aufgebaut sind, sind im Norddeutschen Raum nicht bekannt. Mächtige Salzanstauungen aus Keuper-Salinar konzentrieren sich auf den Nordwesten Niedersachsens und gesamt Schleswig-Holstein. Die Topflächen der dabei gebildeten Salzkissen reichen bis in Tiefen von ca. 1.200 m u. NN und erfüllen daher nicht die im Kapitel 2.3 formulierten Mindestanforderungen des KOSINA-Projektes. Anzumerken ist hierbei, dass diese Keuper-Salinare in dem nach AkEnd (2002) noch als günstig angesehenen Teufenbereich < 1.500 m u. GOK liegen und in weiterführenden Projekten genauer charakterisiert werden sollten (FRISCH & KOCKEL 1998, REINHOLD et al. 2014, GAST & RIESENBERG 2016, POLLOK et al. 2016).

Die Verbreitung von Salzkissen-Strukturen in der Schichtenfolge des Malm-Salinars sind räumlich sehr eng begrenzt und bestehen aus einer Wechselfolge von Salz-Ton und Anhydrit. Es handelt sich um halokinetisch gebildete Strukturen mit zum Teil mehreren hundert Metern Steinsalz-Mächtigkeit. Die Topflächen dieser Malm-Salzkissen liegen heute in einer Tiefe von etwa 300 m bis 800 m u. GOK und erfüllen die Mindestanforderungen für HAW-Endlager im KOSINA-Projekt (KOCKEL & KRULL 1995, REINHOLD et al. 2014).

Eine detaillierte Übersichtskarte zu den o.g. Salzkissen des Perm (Rotliegend und Zechstein), Keuper und Oberjura (Malm) befindet sich im Anhangverzeichnis (siehe Anhang 1).

3.3 Vorgabedaten für die generischen geologischen Standortmodelle

3.3.1 Daten zur Ausbildung der Zechstein-Salinare

In der Gesamtbetrachtung aller flach lagernden Steinsalzfolgen und Salzkissen in Deutschland sind aufgrund der Mächtigkeit und Tiefenlage insbesondere die Steinsalzlager des Zechstein für weitergehende endlagerspezifische Untersuchungen interessant. Außerdem sollten die Steinsalzlager des Malm (Oberjura) im Bereich der erhöhten Akkumulation in Salzkissen regionalgeologisch und lithologisch genauer charakterisiert werden. Im Gegensatz zu den Steinsalzfolgen des Malm in flacher Lagerung liegt die Oberfläche der Steinsalzfolgen in den Malm-Salzkissen meist deutlich < 1.000 m u. GOK (REINHOLD et al. 2014). Alle anderen flach lagernden Steinsalzlager bzw. Salzkissen (des Rotliegend, Röt, Muschelkalk, Keuper und Tertiär) erfüllen in Deutschland nicht die im Kapitel 2.3. genannten Mindestanforderungen für Endlager, haben also u. a. eine Mächtigkeit < 100 m oder eine Tiefenlage > 1.000 m u. GOK.

REINHOLD et al. (2014) benannten folgende sechs Gebiete, in denen flach lagernde Steinsalzfolgen des Zechstein in größerer Mächtigkeit und in der erforderlichen Teufenlage vorkommen:

- Niederrheinisches Becken
- Solling-Becken
- Werra-Fulda-Becken (inklusive Fränkisches Becken)
- Thüringer Becken
- Calvörde-Scholle
- Niederlausitz-Becken (SE-Brandenburg)

Die Steinsalzfolgen in diesen Gebieten kamen im südlichen Bereich des Zechsteinbeckens (bzw. seiner Subbecken) zur Ablagerung und sind durch ein relativ geringmächtiges Deckgebirge < 1.000 m gekennzeichnet. Im Niederrhein-, Niederlausitz- und im Werra-Fulda-Becken sind insbesondere Steinsalzlager der Werra-Formation (z1) verbreitet. Im Thüringer Becken wurden mächtige Steinsalzlager der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formationen (z1 bis z3) nachgewiesen. Auf der Calvörde-Scholle ist das Staßfurt-Steinsalzlager über 100 m mächtig, die Steinsalzlager der Leine-Formation erreichen mehrere Dekameter Mächtigkeit. Im Solling-Becken kommen mächtige Steinsalzlager in den Staßfurt-, Leine- und Aller-Formationen (z2 bis z4) vor (KRULL et al. 2004, REINHOLD & HAMMER 2016). Die Lage dieser sechs Gebiete ist in Abb. 3-10 dargestellt. Detaillierte Mächtigkeitsangaben für die Werra- und Staßfurt-Formation in diesen Gebieten finden sich am Ende dieses Kapitels (siehe Abb. 3-17 und 3-18).

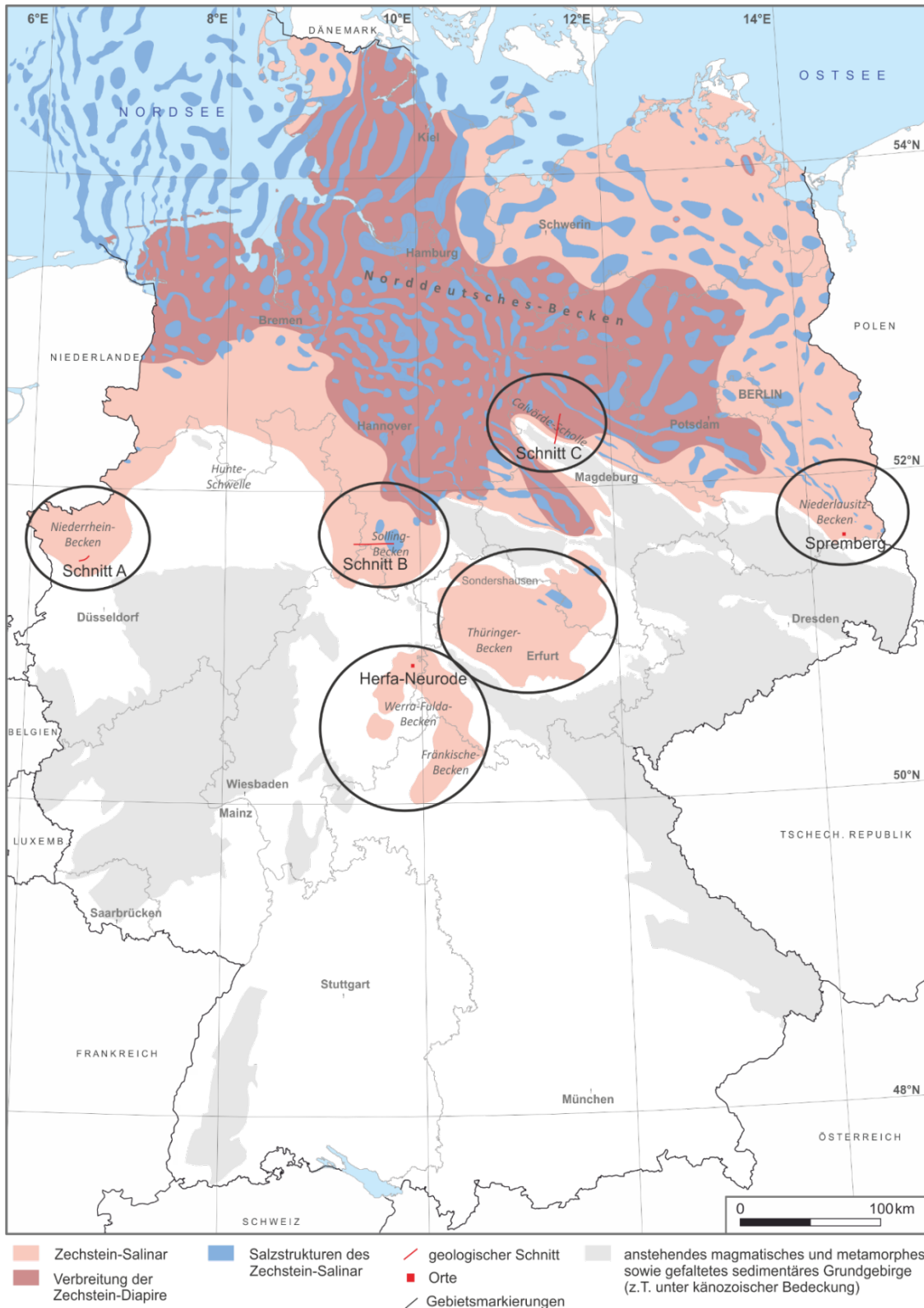


Abb. 3-10: Verbreitung der Zechstein-Salinare in Deutschland (modifiziert nach Abb. 3-4) sowie in schwarz umrandet sechs Gebiete, in denen diese hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage für die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle geeignet sein könnten (aus: REINHOLD et al. 2014, modifiziert).

Im Niederrhein-Becken sind auf einem bis zu 5.000 km² großen Gebiet flach lagernde Steinsalzschiechten der Werra-Formation verbreitet (TEICHMÜLLER 1957). Die tektonisch starke Zergliederung des Niederrhein-Beckens in Horst- und Graben-Strukturen führte dazu, dass die Tiefenlage der Steinsalzlager über kurze Distanzen z. T. um mehrere hundert Meter variiert. Generell nimmt die Tiefenlage der Steinsalzlager von SE mit etwa 450 m u. GOK nach N und NW mit Teufen von > 1.000 m u. GOK zu. In Grabenpositionen kann die Mächtigkeit des Steinsalzes der Werra-Formation Werte zwischen ca. 200 m und 400 m erreichen (siehe Abb. 3-11). In den Horst-Strukturen liegt die Mächtigkeit des Steinsalzes meist deutlich unter 100 m, z. T. fehlt es gänzlich (TEICHMÜLLER 1957, WOLF 1985, ALBERTS et al. 1988).

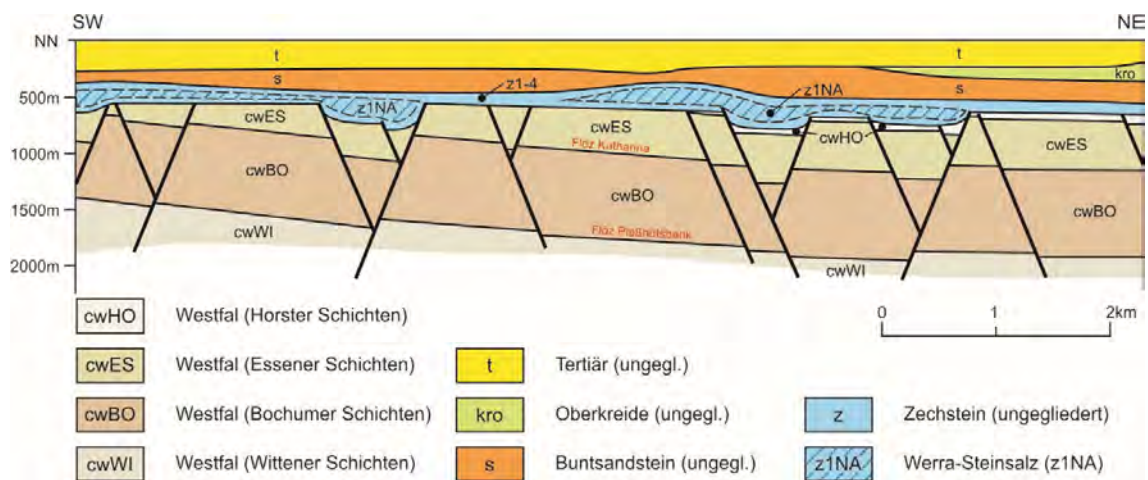


Abb. 3-11: Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine im Niederrhein-Becken; Schnitt A in Abb. 3-10 (aus: REINHOLD et al. 2014).

Im Solling-Becken wurde eine 700 m bis 800 m mächtige saline Schichtenfolge des Zechstein erbohrt, in der Steinsalzlager insbesondere in der Staßfurt-Formation vorkommen. 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. Die Schichtenfolgen der Ohre- und Friesland-Formationen sind durch pelitische Ablagerungen dominiert. Die Steinsalzlager der Leine-Formation sind im Vergleich zu denen der Staßfurt-Formation oft durch höhere Sulfat- und Tonanteile charakterisiert. Die regional flach lagernden Steinsalzlager liegen in Tiefen um die 1.000 m (siehe Abb. 3-12). Lokal wurden die Lagerungsverhältnisse und die Mächtigkeit der Steinsalzlager durch halokinetisch entstandene Salzkissen (z. B. Volpriehausen, Silberborn) verändert.

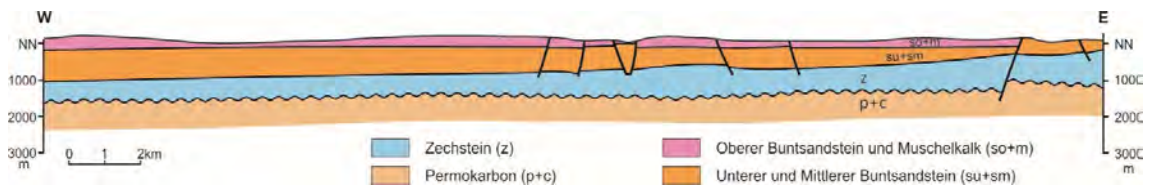


Abb. 3-12: Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine im Solling-Becken; Schnitt B in Abb. 3-10 (aus: REINHOLD et al. 2014).

Das Werra-Fulda-Becken ist ein rheinisch streichendes Senkungsgebiet, in dem Steinsalzlager der Werra-Formation vorkommen, welche durch den Bergbau intensiv untersucht und beschrieben wurden. Die Steinsalzlager der Werra-Formation werden in weiten Teilen des Werra-Fulda-Beckens durch die Kaliflöze Thüringen und Hessen dreigeteilt und erreichen Gesamtmächtigkeiten von etwa 300 m (siehe Abb. 3-13). Die Tiefenlage der Zechstein-Ablagerungen schwankt zwischen wenigen hundert Meter Tiefe südöstlich von Kassel und Werten zwischen 600 m und 1.000 m u. GOK östlich von Bad Hersfeld (BLASIG 1993, BEER 1996, AHORNER & SOBISCH 1988).

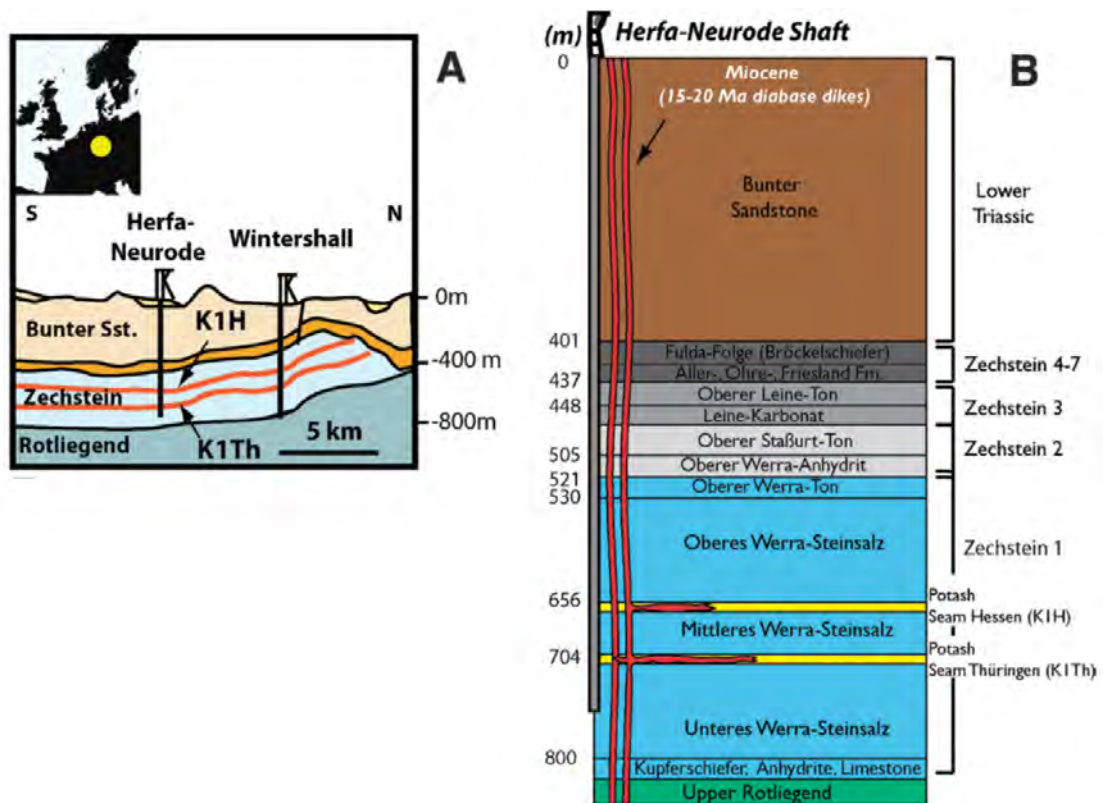


Abb. 3-13: Schematischer Schnitt (A) und stratigraphisches Säulenprofil (B) der Untertagedeponie Herfa-Neurode im Werra-Fulda-Becken; der Ort Herfa-Neurode ist in Abb. 3-10 markiert (aus: SCHOFIELD et al. 2014).

Das Thüringer Becken ist durch den Thüringer Wald vom Werra-Fulda-Gebiet getrennt. Die Basis der Ablagerungen des Zechstein befindet sich am Beckenrand nahe der Oberfläche und im Beckenzentrum in Tiefen bis etwa 2.000 m u. GOK. Die Steinsalzlager der Werra-Formation sind im Thüringer Becken hauptsächlich zwischen Mühlhausen und Ilmenau verbreitet und erreichen eine Mächtigkeit von etwa 200 m bis 300 m. Nach NE nimmt ihre Mächtigkeit bis auf wenige zehner Meter ab. Das häufig reinere Steinsalz der Staßfurt-Formation weist im NE der Thüringischen Senke Mächtigkeiten zwischen 100 m und 500 m auf. Die Basis des Zechstein liegt im Zentralteil des Thüringer Beckens in Tiefen von etwa 800 m bis 1.000 m u. GOK (siehe Abb. 3-14). Die jüngeren Steinsalzlager des Zechstein sind deutlich geringmächtiger (ZANDER & HUCKRIEDE 2011).

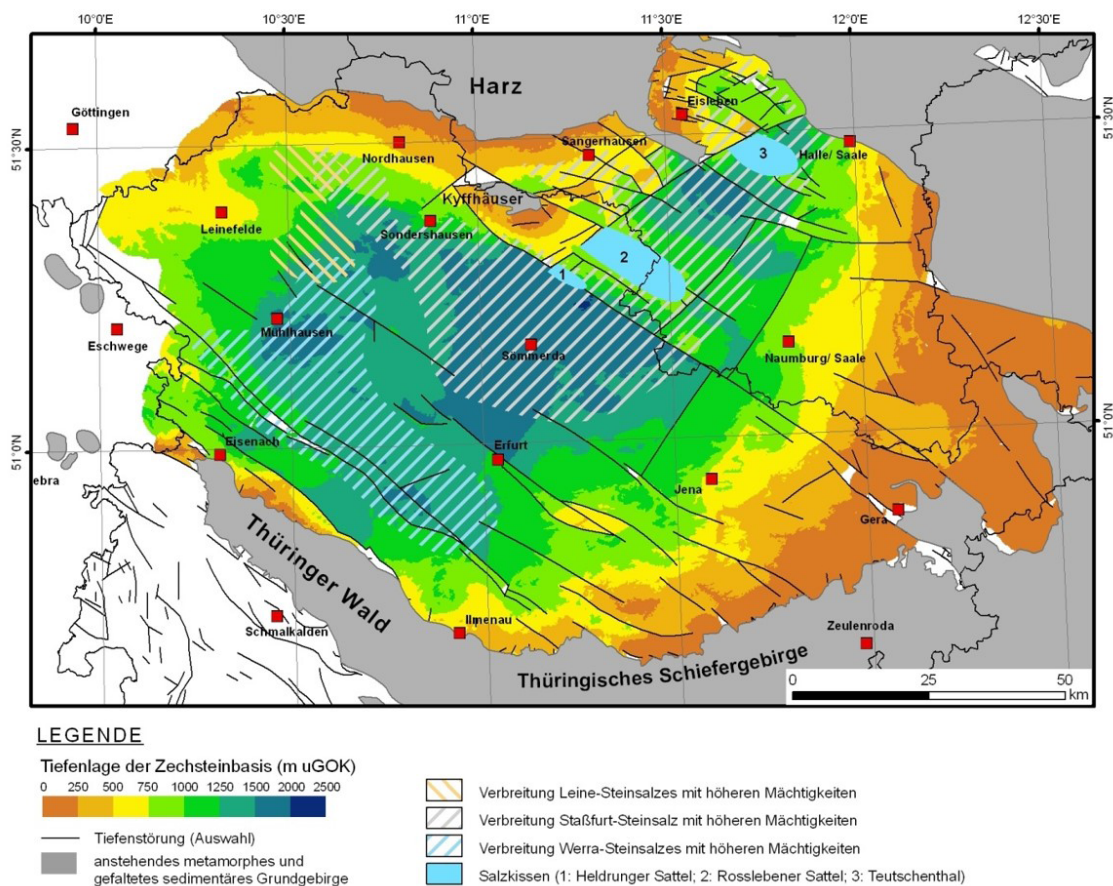


Abb. 3-14: Tiefenlage der Zechsteinbasis und Verbreitungsgebiete erhöhter Steinsalzmächtigkeiten im Thüringer Becken (nach: SEIDEL 2003, HASCHÉ & REINHARDT 1978 und ZANDER & HUCKRIEDE 2011).

Die Calvörde-Scholle hat eine Ausdehnung in WNW-ESE-Richtung von etwa 63 km und in SSW-NNE-Richtung von etwa 20 km. Begrenzungen sind der Flechtinger Höhenzug im Süden und die Altmarksenke im Norden. Die salinaren Zechstein-Ablagerungen sind in typischer Ausbildung der zentralen Beckenfazies entwickelt, Steinsalzlager der Werra-Formation fehlen. Die höchste Mächtigkeit bis zu 600 m weist das Steinsalzlager in der

Staßfurt-Formation auf. In der Leine-Formation mit maximal 145 m und in der Aller-Formation mit etwa 50 m sind die Steinsalzlager bereits deutlich weniger mächtig und die noch jüngeren Formationen des Zechstein erreichen insgesamt nur wenige Meter. Geringere Mächtigkeiten bedingt durch Subrosion und Salzabwanderung werden für das Gebiet des Wannefelder Sattels und des Haldenslebener Abbruchs sowie lokal in den Umrundungen der Salinarstrukturen Colbitz, Zobbenitz und Dannefeld beschrieben (REICHENBACH 1966, BURCHARDT et al. 1980). Die Basis der Steinsalzlager der Staßfurt-Formation liegt im SW in Tiefen von maximal 1.500 m bis 1.800 m u. GOK sowie im NW großflächig in Tiefen zwischen 1.000 m und 1.200 m u. GOK. Im NE, im Bereich des Wannefelder Sattels, treten mit 300 m bis 400 m u. GOK die geringsten Tiefenlagen auf (siehe Abb. 3-15). Kalisalze kommen mit dem überwiegend carnallitisch ausgebildeten Kaliflöz Staßfurt in der Staßfurt-Formation und dem überwiegend sylvinitisch ausgebildeten Kaliflöz Ronnenberg in der Leine-Formation vor (BURCHARDT et al. 1980, BEER 1996).

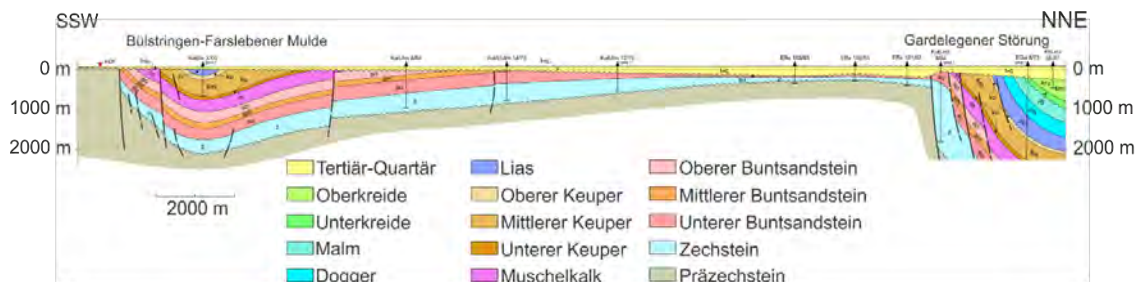


Abb. 3-15: Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine auf der Calvörde-Scholle; Schnitt C in Abb. 3-10 (nach: Autorenkollektiv 1980).

Das Niederlausitz-Becken im SE von Brandenburg war im Zechstein ein beckenrandliches Ablagerungsgebiet, in dem es zur Entstehung von Steinsalzlagern der Werra- und Staßfurt-Formationen kam. Im Vergleich zu den Steinsalzlagern 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 (siehe Abb. 3-16) und liegen in Richtung SE in immer geringeren Tiefen, mindestens aber in mehreren hundert Metern (KRULL et al. 2004, BEBIOLKA et al. 2011, GÖTHEL 2012, HÖDING 2014).

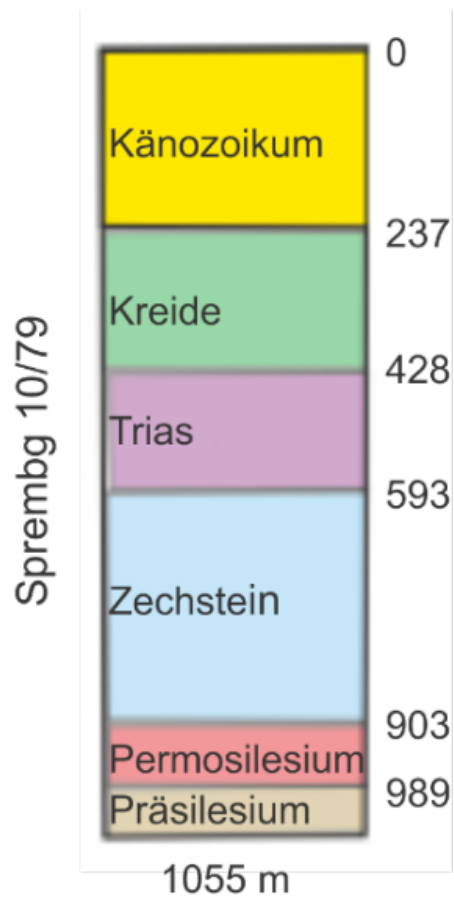


Abb. 3-16: Geologisches Bohrprofil der Bohrung Spremberg 10/79 im Niederlausitz-Becken, Ort ist in Abb. 3-10 markiert (aus: STACKEBRANDT & FRANKE 2015, ergänzt durch Teufenangaben).

Gruppe	Formation	Lithostratigraphische Bezeichnung	Werra-Fulda-Becken				Niederrheinisches Becken		Thüringer Becken		SE-Brandenburg			
			Mächtigkeit [m]	Werra-Gebiet		Fulda-Gebiet		Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]		
				Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	Ausbildung							
Hangendes		Staßfurt-Karbonat	10	10	Staßfurt-Ton (Braunroter Salztön)	8 - 12	Staßfurt-Ton (Braunroter Salztön)	0 - 3	Staßfurt-Ton (Braunroter Salztön)	Staßfurt-Ton	Staßfurt-Karbonat			
		Staßfurt-Ton												
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 Camallitit	40 (Camallit-Zone) 0,4 - 1 (2. Hartsalzflöz)	Kaliflöz-Zone: nur regional begrenzte Vorkommen (Camallitit, 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 Trümmerscamallitit	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 Anhydritknotenschiefer	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	Comberg-Sandstein	0 - 20	Comberger-Sandstein	Oberkarbon		Oberrotliegend		Oberrotliegend		

Abb. 3-17: Gliederung und Mächtigkeit der Werra-Formation in einigen Randbecken des Zechstein-Meereres (aus: REINHOLD et al. 2014).

Gruppe	Formation	Lithostratigraphische Bezeichnung	Calvörde-Scholle		Raum Gorleben	Thüringer Becken		Solling-Becken
			Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	
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 Carnallit	0 - 70 15 (z.T. bis 70)	Trümmercarnallit	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						
Liegendes	Oberer Werra-Anhydrit	Werra-Anhydrit (Oberer Werra-Anhydrit (21 m), Steinsalz (> 1 m) Untere Werra-Anhydrit (26 m))	47	–	Oberer Werra-Anhydrit	Oberer Werra-Anhydrit	Oberer Werra-Anhydrit	
		Zechsteinkalk	3	–				
		Kupferschiefer	> 1	–				

Abb. 3-18: Gliederung und Mächtigkeit der Staßfurt-Formation in einigen Randbecken des Zechstein-Meeress (aus: REINHOLD et al. 2014).

3.3.2 Daten zur Ausbildung des Deck- und Grundgebirges

Dieses Kapitel dient der geologischen Beschreibung der den Zechstein überlagernden Deckgebirgseinheiten sowie, in kleinerem Umfang, des sich seitlich bzw. im Liegenden anschließenden Neben- und Grundgebirges. Auf jedes der im Kapitel 3.3.1 genannten Gebiete (Niederrhein-Becken, Solling-Becken, Werra-Fulda-Becken, Thüringer Becken, Calvörde-Scholle und Niederlausitz-Becken) wird einzeln eingegangen. Schwerpunktmäßig wird hierbei der die Zechstein-Salinare direkt überlagernde Buntsandstein, insbesondere dessen stratigraphische Gliederung und endlagerrelevanten geomechanischen Parameter (u. a. Klüftigkeit, Permeabilität, Porosität), beschrieben. Insbesondere die zusammengestellten Angaben zur Klüftigkeit sind wichtig für die Bewertungen der Ergebnisse der numerischen Berechnungen zu den thermo-mechanischen Auswirkungen der Endlagerung. Detaillierte Mächtigkeitsangaben für das Deckgebirge in jedem der Gebiete finden sich am Ende dieses Kapitels (siehe Abb. 3-19 und 3-20).

Im Niederrheingebiet beginnt das postpermische Deckgebirge mit dem bis zu 250 m mächtigen Unteren Buntsandstein, welcher sich aus nur schwach verfestigten Sandsteinen wechselnder Korngröße zusammensetzt und als „Niederrheinsandstein“ bezeichnet wird. Der Mittlere Buntsandstein, bestehend aus fluviatilen Konglomeraten und Sandsteinen, erreicht Mächtigkeiten zwischen 100 m und 250 m. Nach Norden hin nimmt die Korngröße der Sedimente ab. Der Obere Buntsandstein zeichnet sich durch vorwiegend feinsandig-tonige, zwischen 120 m und 180 m mächtige Schichtenfolgen aus. Der bis zu 170 m mächtige Muschelkalk des Niederrheingebietes besteht aus Kalksteinen in Wechsellagerung mit Ton- und Mergelsteinen. Der Keuper, bestehend aus Ton- und Mergelsteinen, ist mit Mächtigkeiten von unter 100 m schwach ausgebildet. Jurassische und kretazische Ablagerungen sind nur in Restarealen flächenhaft erhalten. Im Mitteloligozän begann im Niederrheingebiet eine Zeit intensiver Absenkung und Beckenbildung. Infolgedessen entstanden im Tertiär bis zu 1.200 m mächtige Ablagerungen (siehe Abb. 3-11), welche durch charakteristische Abfolgen von feinkörnigen Sanden, festländischen Tonen und Schluffen mit Braunkohlenlagen gekennzeichnet sind. Der Anteil grobkörniger Sande und Kiese erhöhte sich zwischen jüngerem Miozän und Pliozän. Quartäre Ablagerungen erreichen im Niederrhein-Becken Mächtigkeiten von bis zu über 100 m (ALBERTS et al. 1988).

Das Solling-Becken, auch als „Solling-Trog“ bezeichnet, weist die größten Sedimentmächtigkeiten innerhalb der Hessischen Senke auf. Die Abfolge beginnt mit Sand-Ton-Wechselfolgen des Unteren Buntsandstein, welcher im südlichen Solling und Reinhardswald Gesamtmächtigkeiten von etwa 320 m erreicht. Der Mittlere Buntsandstein setzt im Vergleich zum Unteren Buntsandstein mit deutlich gröberen siliziklastischen Sedimenten ein und erreicht Mächtigkeiten von über 500 m (DERSCH-HANSMANN et al. 2013). Jüngere Deckgebirgseinheiten als der Mittlere Buntsandstein sind im Hauptteil des Solling-Beckens nicht erhalten, nur an den Beckenrändern (östlich der Linie Mackensen-Fredelsloh-Hardeggen

und westlich von Höxter) sind auch Röt, Muschelkalk und Keuper erhalten geblieben (siehe Abb. 3-12). PHILIPP et al. (2006, 2010) führten im Solling-Becken eine ausführliche Charakterisierung und Untersuchung der Kluftsysteme des Mittleren Buntsandstein durch. Die Ergebnisse zeigten, dass in allen Aufschlüssen zwei Kluftgruppen mit annähernd N-S und W-E streichenden Klüften zu erkennen sind, die senkrecht zu den schieflagernden Schichtflächen orientiert sind. Die N-S streichenden Klüfte setzen sich oft durch mehrere Schichten fort, während hingegen die W-E streichenden Klüfte eher schichtgebunden sind und eine weit größere Richtungsstreuung aufweisen. Weiterhin konnte in hydraulischen Modellrechnungen festgestellt werden, dass die Ausbildung des Kluftsystems zu einer deutlichen Durchlässigkeitsanisotropie führt und einen wesentlichen Einfluss auf die Fließrichtung des Grundwassers besitzt. Die Sandsteine des Eichsfeldes weisen die größten Durchlässigkeiten auf (10^{-5} m/s), während die gering porösen Wilhelmhausener Schichten (Mittlerer Buntsandstein) des Reinhardswaldes die geringsten Durchlässigkeiten haben ($< 10^{-9}$ m/s). Die Proben aus dem Solling liegen mit Durchlässigkeiten von 10^{-9} m/s bis 10^{-8} m/s dazwischen. Bei einer Durchströmung parallel zur Schichtung sind bei allen Sandsteinen größere Werte gemessen worden. Deutlich ist außerdem eine Verknüpfung zwischen Porosität und Permeabilität zu beobachten (MÜLLER 2009). Im NE des Solling-Beckens angrenzenden Subherzyn führte VOIGT (1996) mittels akustischer Bohrlochmessungen eine Kluftauswertung in der Umgebung von Morsleben, insbesondere auf der Lappwald-Scholle, durch. Das postpermische Deckgebirge in diesem Gebiet ist vom Unteren Buntsandstein bis zum Lias (Unterer Jura) erhalten, während jungmesozoische Schichten abgetragen wurden. In allen untersuchten Messprofilen konnte, wie auch im Solling-Becken, eine deutliche Aufteilung der Klüfte in zwei Kluftgruppen (NW-SE und NE-SW) beobachtet werden (VOIGT 1996, BEST & ZIRNGAST 2002).

Im Werra-Fulda-Becken beginnt das postpermische Deckgebirge mit den über 300 m mächtigen Feinsanden des Unteren Buntsandstein (siehe Abb. 3-13). Der als „Hessische Senke“ bekannte Subsidenzraum bildete mit dem Solling-Becken im NW eine Einheit. Der Mittlere Buntsandstein beginnt im Werra-Fulda-Becken mit der grobklastischen und etwa 100 m mächtigen Volpriehausen-Formation, die darüber liegende fluviatil geprägte Detfurth-Formation hat gegenüber der Entwicklung im Solling- bzw. Reinhardswald-Trog eine erheblich reduzierte Gesamtmächtigkeit (im Raum Bad Hersfeld etwa 30 m bis 40 m). Auch die nachfolgenden Formationen des Buntsandstein sind eher geringmächtig (DERSCH-HANSMANN et al. 2013). Im Werratal bei Meiningen ist der ca. 245 m mächtige Muschelkalk aufgeschlossen, welcher sich vorwiegend aus marinen Kalksteinen und Dolomiten mit Einlagerungen von Tonsteinen, Gips, Anhydrit und Steinsalz zusammensetzt. Im Fränkischen Becken, einem südlichen Teilbecken des Werra-Fulda-Beckens, folgt auf den Muschelkalk der tonig-mergelige Lettenkeuper und vereinzelt noch der Gipskeuper. Auch im angrenzenden thüringischen Gebiet zwischen Rentwertshausen und Heldburg ist Keuper aufgeschlossen, bestehend aus etwa 50 m mächtigem Lettenkeuper und 140 m

mächtigem Gipskeuper (SEIDEL 2003). Jüngere Sedimente sind im Werra-Fulda-Gebiet nur in Restarealen flächenhaft vorhanden.

Das Thüringer Becken ist eine ca. 2.700 km² große Triasmulde. Von den Außenrändern bis zur Beckenmitte sind Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper aufgeschlossen (SEIDEL 2003). Der Untere Buntsandstein besitzt eine Mächtigkeit von 200 m bis 310 m und ist durch mehrere „coarsening upward“-Sequenzen von gröberklastischem zu feinklastischem Material charakterisiert. Da in der Bernburg-Folge keine mächtigen Tonsteinlagen existieren, kommt es nicht zur Ausbildung eines Grundwasserstauers. Die Mächtigkeit des Mittleren Buntsandsteins schwankt zwischen 140 m und 240 m und zeigt den gleichen zyklischen Aufbau wie der Untere Buntsandstein (PUFF & RADZINSKI 2013a, RÖDIGER 2005). Die Bernburg-Folge und der gesamte Mittlere Buntsandstein im östlichen Thüringer Becken verfügen aufgrund ihrer hohen Klüftigkeit und Porosität über ideale Eigenschaften als Grundwasserleiter. Für das lokale Kluftsystem im Buntsandstein werden Durchlässigkeiten zwischen $2,5 \cdot 10^{-4}$ und $7 \cdot 10^{-7}$ m/s angegeben (LANGBEIN & SEIDEL 1997, RÖDIGER 2005, RÖDIGER et al. 2009). Im Hangenden folgt die Salinarröt-Folge des bis zu 190 m mächtigen Oberen Buntsandstein mit zwei Steinsalzhorizonten. Die tonig-mergeligen Pelitröt- und Myophorien-Folgen des Oberen Buntsandstein gelten als Grundwasserstauer (RÖDIGER 2005). Im Gegensatz zum Buntsandstein bildet der Muschelkalk im Thüringer Becken Schichtstufen und erreicht Gesamtmächtigkeiten zwischen 220 m und 300 m. Markanteste Großform ist die durch sponartige Vorsprünge gegliederte Wellenkalkstufe. Der darüber liegende Keuper erreicht Mächtigkeiten zwischen 470 m und 640 m. Neben klastischen Sedimenten aus vorwiegend Ton- bzw. Schluffsteinen und karbonatischen Mergelgesteinen sowie Sandsteinen sind im thüringischen Keuper chemische Abfolgen von Kalksteinen mit mariner Fauna über Dolomitsteine bis Kalziumsulfat (Anhydrit) vertreten. Vom Jura sind nur der Lias (bis 200 m) z. B. bei Gotha und von der Kreide nur die Oberkreide (bis 55 m) bei Worbis in sehr kleinen Vorkommen erhalten geblieben. Känozoische Sedimente sind auf lokale Tieflagen beschränkt und ebenfalls geringmächtig (SEIDEL 2003).

Die Scholle von Calvörde verfügt oberhalb der Zechstein-Ablagerungen über ein bis zu 800 m mächtiges Deckgebirge aus sandig-tonigem Buntsandstein. In der Bülstringen-Farslebener Mulde im Süden und an der Gardelegener Störung im Norden schließen sich triassische und jurassische Ablagerungen bis zum Dogger an. Diskordant überdeckt wird diese Schichtenfolge vom etwa 150 m mächtigen Känozoikum (siehe Abb. 3-15). Die Grundwasserführung im mesozoischen Deckgebirge ist an geklüftete oder poröse Schichten gebunden. Als Beispiele für solche Schichten gelten auf der Calvörde-Scholle die stark geklüfteten Sandsteine des Mittleren Buntsandstein und die Rogensteinbänke des Unteren Buntsandstein. Den größten effektiven Porenanteil weisen die Sandsteine der Volpriehausen- und Detfurthfolge des Mittleren Buntsandstein mit Werten zwischen 9,0 und

15,6 Vol.-% auf, während die Permeabilität zwischen 6,3 mDarcy und 20,5 mDarcy variiert. Im Gegensatz dazu verfügen die Rogensteinbänke des Unteren Buntsandstein über keinen zusammenhängenden Porenraum, sind jedoch durch die zahlreichen Klüfte weitgehend permeabel. Die Tonsteinbereiche des Unteren Buntsandstein sind am intensivsten geklüftet. Die niedrigste Kluftdichte zeigen die Schluffsteine, wohingegen Kalk und Sandsteine unterschiedliche Klufthäufigkeiten aufweisen (REICHENBACH 1966, SCHULZE & SPARFELD 1980, BURCHARDT et al. 1980). Eine ausführliche Beschreibung der Klüfte im Buntsandstein der Calvörde-Scholle haben SCHULZE & SPARFELD (1980) ausgearbeitet. Demnach dominieren im Buntsandstein Klüfte mit steilem und flachem Einfallen. Mittleres Einfallen (zwischen 10° und 70°) tritt kaum auf. Die Länge der Klüfte schwankt im Buntsandstein zwischen 5 cm und 100 cm ohne auffallende Korrelationen zu anderen Kluffparametern. Die Breite der Klüfte beträgt durchschnittlich 0,5 mm bis 1 mm. Die Klufform ist vorwiegend glatt oder absetzig, lokal auch verzweigt oder gefiedert. Die Kluffmineralisation besteht im Buntsandstein aus Anhydrit bzw. Gips und teilweise Kalzit. Tonminerale und Chlorite lassen sich nur sporadisch nachweisen (SCHULZE & SPARFELD 1980).

Im Niederlausitz-Becken betragen die Mächtigkeiten des Deckgebirges oberhalb der Zechstein-Ablagerungen für den Unteren Buntsandstein regional über 325 m und für den Mittleren Buntsandstein 160 m bis 240 m. Die Röt-Formation ist ca. 150 m mächtig. Bezüglich der Mächtigkeiten und faziellen Ausbildung des Buntsandstein ähnelt das Niederlausitz-Becken stark dem Thüringer Becken (siehe oben, PUFF & RADZINSKI 2013b). Im Hangenden folgt der bis zu 275 m mächtige Muschelkalk. Vorherrschend sind kalkige und kalkmergelige Sedimente im Unteren und Oberen Muschelkalk, während im Mittleren Muschelkalk durch Eindampfung auch saline Sedimente bis zum Steinsalz entstanden sind. Der anschließende Keuper ist im Niederlausitz Becken meist nur schwach ausgebildet (STACKEBRANDT & MANHENKE 2010). Im Hangenden folgt eine Schichtlücke zwischen Trias und Oberkreide (siehe Abb. 3-16). Im Westteil des Niederlausitz Beckens sind bedingt durch die Hebung des Prignitz-Lausitzer Walls keine kreidezeitlichen Sedimente erhalten geblieben und die Schichtlücke erstreckt sich hier bis zum frühen Tertiär (STACKEBRANDT & FRANKE 2015). Die Mächtigkeit der känozoischen Deckschichten liegt insgesamt zwischen 150 m und 300 m. Von besonderer Bedeutung für die Suche nach einem potenziellen Endlagerstandort (evtl. Nutzungskonflikt) ist das „2. Miozäne Braunkohleflöz“. Es wird im Niederlausitzer Braunkohlenrevier seit Jahrzehnten abgebaut. Seine Mächtigkeit schwankt zwischen ca. 8 m und 14 m. In Richtung Norden spaltet es sich in mehrere Flözbänke auf (STACKEBRANDT & MANHENKE 2010).

Das Grundgebirge setzt sich in allen sechs betrachteten Gebieten aus vorpermischen, gefalteten und z. T. hochgradig metamorphen sowie magmatischen Gesteinen zusammen, hervorgegangen aus der variszischen Orogenese. Zwischen Grundgebirge und Zechstein sind häufig noch die rot bis dunkelrotbraun gefärbten Siliziklastika des Rotliegend

eingeschaltet. Diese in zahlreichen intramontanen Molassebecken am Ende der variszischen Gebirgsbildung abgelagerten Sedimente unterscheiden sich stark in ihrer faziellen Ausprägung und lassen sich lithologisch nur schwer miteinander korrelieren. Die Rotliegend-Sedimente des Werra-Fulda-Beckens werden einer einzigen Einheit, der Eisenach-Formation, zugeordnet. Diese umfasst sowohl die Randfazies der Schutt- und Schwemmfächer sowie auch die Playa-Fazies des zentralen Beckenbereiches. Äquivalente der Eisenach-Formation, z. B. die Rodenbach- und Bleichenbach-Formation des Wetterau-Beckens, sind darüber hinaus in allen nordöstlich anschließenden Becken verbreitet und bilden überwiegend die einzigen Einheiten des dortigen Rotliegend. Im Norddeutschen Becken werden die lokal bis zu über 3.000 m mächtigen Rotliegend-Sedimente in vier Subgruppen eingeteilt (PLEIN 1995, LÜTZNER & KOWALCZYK 2012).

System/Gruppe	Niederrhein-Becken		Solling-Becken		Werra-Fulda-Becken			
	Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	Ausbildung		
Quartär	100	-	0	-	0	-		
Tertiär	250 – 1.200	-	0	-	0	-		
Kreide	0 - 340	-	0	-	0	-		
Jura	0 - 400	Tonstein, Eisenerz	0	-	0	-		
Keuper	0 - 100	Ton- und Mergelstein	0 - 100	-	0 - 190	-		
Muschelkalk	0 - 170	Kalkstein, Mergelstein, Sandstein, Tonstein und Dolomitgestein	0 - 140	-	200 - 270	-		
Buntsandstein	Untergruppe	Formation						
	Oberer Buntsandstein	Röt	120 - 180	Sandstein, Tonstein	0 - 190	-	50 - 150	Schluffstein, Tonstein, Evaporite
	Mittlerer Buntsandstein	Solling	10 - 125	-	< 120	-	< 55	Sandstein
		Hardegsen	< 50	-	120	regional bis 230	< 50	Sandstein, Schluffstein
		Detfurth	< 50	-	50 – 116	Sandstein, Schluffstein, Tonstein	20 - 60	-
		Volpriehausen	50 - 60	-	100 - 230	Sandstein, Schluffstein	80 - 120	-
	Unterer Buntsandstein	Bernburg	100 - 250	„Niederrheinsandstein“	130 - 140	-	70 - 160	Basissandstein, Tonstein, Schluffstein
Calvörde				180 - 190	Tonstein, Schluffstein, Sandstein	90 - 180	-	

Abb. 3-19: Gliederung und Mächtigkeit des Deckgebirges oberhalb der Zechstein-Ablagerungen im Niederrhein-Becken, Solling-Becken und Werra-Fulda-Becken (nach: BALDSCHUN et al. 2001, ALBERTS et al. 1988, RÖHLING 2013, DERSCH-HANSMANN et al. 2013, MÜLLER 2009, SEIDEL 2003).

System/Gruppe		Thüringer Becken		Calvörde-Scholle		SE-Brandenburg		
		Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	Ausbildung	Mächtigkeit [m]	Ausbildung	
Quartär		0	-	50	-	50	-	
Tertiär		0	-	100	-	100 - 250	Wirtschaftlich am bedeutsamsten: Braunkohle des „2. Miozäne Braunkohleflözes“	
Kreide		0	regional bis 55 m Mächtigkeit in Worbis und Ida-Waldhaus	0	-	0 - 300	-	
Jura		0	regional bis 200 m Mächtigkeit	0	-	0	-	
Keuper		470 - 640	Tonstein, Schluffstein, Sandstein, Mergelgestein, Evaporite	0 - 140	regional bis 525 m Mächtigkeit in der Bülstringen-Farslebener Mulde	0 - 100	regional bis 590 m Mächtigkeit in der Vetschauer Keupermulde	
Muschelkalk		220 - 300	-	0 - 290	Kalkstein, Dolomit, Gips, Anhydrit, Tonmergelstein	0 - 275	Wellenkalk	
Buntsandstein	Untergruppe	Formation	100 - 190	Salinarröt mit zwei Steinsalzhorizonten	-	150	Schluffstein, Steinsalz, Anhydrit, Mergelgestein, Tonstein	
	Oberer Buntsandstein	Röt						
	Mittlerer Buntsandstein	Solling	< 50	Tonstein, Sandstein	50 - 60	Sandstein Schluffstein, Rogenstein	25 - 40	-
		Hardeggen	40 - 80	-	0	Hardeggen-Diskordanz	30 - 55	-
		Detfurth	30 - 50	-	0 - 53	Sandstein, Schluffstein	20 - 50	Basissandstein, Sandstein, Tonstein
		Volpriehausen	75 - 140	-	40 - 95	-	80 - 100	z.T. Gerölleinschlaltungen und karbonatisch
	Unterer Buntsandstein	Bernburg	50 - 150	Geröllsandstein, Rogenstein	106 - 115	-	100 - 140	-
Calvörde		80 - 160	-	182 - 200	Sandstein, Schluffstein, Tonstein, Rogenstein	140 - 190	Tonstein, Sandstein, Karbonatsandstein, Rogenstein	

Abb. 3-20: Gliederung und Mächtigkeit des Deckgebirges oberhalb der Zechstein-Ablagerungen im Thüringer-Becken, in der Calvörde-Scholle und in SE-Brandenburg (nach: SEIDEL 2003, PUFF & RADZINSKI 2013a, REICHENBACH 1966, SCHULZE & SPARFELD 1980, BURCHARDT et al. 1980, PUFF & RADZINSKI 2013b, STACKEBRANDT & MANHENKE 2010, STACKEBRANDT & FRANKE 2015).

4 Geologische Modellierung

Die generischen geologischen 3D-Modelle, die im Projekt KOSINA erstellt wurden, wurden von der BGR mit Hilfe des kommerziellen Programms openGEO (bicad) konstruiert. Das Programm arbeitet mit dem grafischen Kern von AutoCAD. Bei den mit Hilfe von openGEO erstellten 3D-Modellen handelt es sich um CAD-gestützte stationäre dreidimensionale geologische Lagerstättenmodelle mit einem hohen Detaillierungsgrad (bis zu 30 cm Auflösung in Natura). Sie dienen vor allem zur Aufklärung der räumlichen Erstreckung und Volumenbestimmung unterschiedlicher geologischer Einheiten einer Lagerstätte bzw. Region. Als Input dienen u. a. Erkundungsdaten aus der Geophysik sowie der geologischen Kartierung und Vermessung. Der anschließende Modellierungsprozess auf der Grundlage von horizontalen und vertikalen Konstruktionsebenen und einer speziell entwickelten liniengeführten Triangulation ermöglicht die Erstellung von Modellen komplexen Inhalts (z. B. Kluft- und Störungssysteme, polyphase überkippte Fließfaltungen auf engstem Raum und quartärgeologische Rinnenbildungen). Anschließend können die geologischen 3D-Modelle für die Planung der weiteren Erkundungsarbeiten, für Präsentationen, statistische Auswertungen oder numerische Modellberechnungen genutzt werden (siehe Abb. 4-1). Das Programm erlaubt weiterhin eine Kopplung von Strukturmodellen unterschiedlichster Auflösung und thematischen Inhalts. Die Bearbeitung ist gesteinsunabhängig (BEHLAU et al. 2007, WIECZOREK et al. 2014).

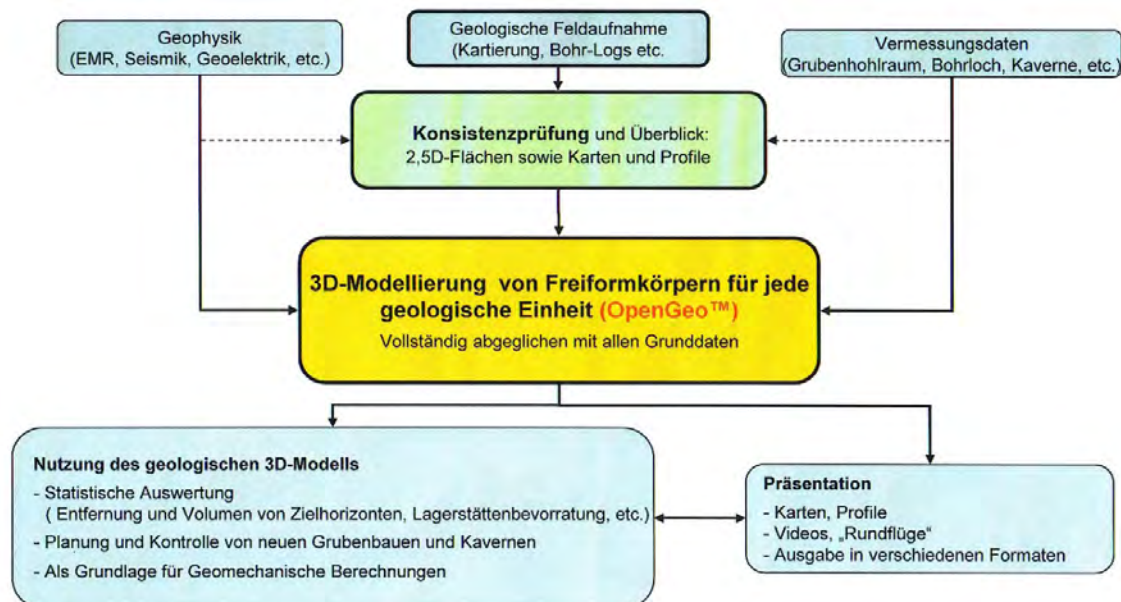


Abb. 4-1: Workflow für die Erarbeitung geologischer 3D-Modelle mit openGEO (aus: BEHLAU et al. 2007).

4.1 Modelleinheiten

Ein Vergleich der in Kapitel 2 für das KOSINA-Forschungsvorhaben formulierten Randbedingungen für die generischen geologischen 3D-Modelle mit den bisher vorliegenden Informationen zu den flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland ergab, dass insbesondere die Steinsalzlager in den Werra (z1)-, Staßfurt (z2)- und Leine-Formationen (z3) des Zechstein-Salinars für die Erstellung der Referenzprofile und generischen geologischen Standortmodelle von Interesse sind (vgl. Kap. 3.3.1).

Charakteristisch für das Zechstein-Salinar der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formationen sind die zyklischen Abfolgen von lithologisch unterschiedlich zusammengesetzten Sedimentgesteinen. Ein Zyklus besteht aus basalen feinklastischen Ablagerungen gefolgt von Karbonaten und einer salinar geprägten Schichtenfolge. Letztere beginnt mit anhydritischen Gesteinen, dann folgen Steinsalz und zuletzt die meist geringmächtigen Kali- und Magnesiumsalze. Danach folgt häufig eine rezessive Phase des Zyklus mit halitischen und anhydritisch-tonigen Ablagerungen. In Abhängigkeit von ihrer regionalgeologischen Position variieren Mächtigkeit und Ausprägung der einzelnen Schichtglieder (REINHOLD et al. 2014).

Aufgrund der heute vergleichsweise geringen Tiefenlage der Zechstein-Steinsalzlager oberhalb von 1.000 m u. NN wurden für die weiteren Betrachtungen geologische Erkundungsergebnisse aus dem südlichen Bereich des Zechsteinbeckens ausgewertet. Für die Darstellung der geologischen Verhältnisse wurde aus den Angaben von REINHOLD et al. (2014) eine synthetisierte Schichtenfolge für die Staßfurt- und Leine-Formationen des Zechstein-Salinars abgeleitet und durch regionalgeologische Kenntnisse zur Schichtenfolge ergänzt (siehe Abb. 4-2).

Im Ergebnis der Auswertungen wurden in den generischen geologischen 3D-Modellen 18 regional gut charakterisierbare lithostratigraphische Einheiten ausgehalten. Die Basis des schematischen Profils bildet eine Schicht, die durch eine sandige Zusammensetzung geprägt ist (ro), gefolgt von einer karbonatischen (z2SK) und einer anhydritischen Einheit (z2BA). Der Hauptteil der sich anschließend fortsetzenden Staßfurt-Formation besteht aus einem mächtigen Steinsalzlager (z2NA) und einer carnallitisch geprägten Schichtenfolge (z2SF). Die Leine-Formation setzt sich aus 6 lithologischen Einheiten zusammen, von tonig-anhydritischen, über halitische bis hin zu Kalisalzen. Im Hangenden der Leine-Formation folgen die Schichten der Aller-Formation (z4), beginnend mit einer tonig-anhydritischen (z4RT-z4PA) Schicht und einer darauffolgenden Steinsalzfolge (z4NA). Die Schichten der Ohre-Folge (z5) sind im generischen geologischen Profil nicht weiter aufgegliedert.

Das postpermische Deckgebirge beginnt mit den über einhundert Meter mächtigen Ablagerungen des Unteren Buntsandstein, gefolgt von Ablagerungen des Mittleren Buntsandstein. Der Untere Buntsandstein (su) des Norddeutschen Beckens besteht

vorwiegend aus feinklastischen Sedimenten, während z. B. im Hessischen und Thüringischen Becken noch mächtigere mittel- bis grobkörnige Sandsteine eingeschaltet sind. Seine größte Mächtigkeit erreicht er mit bis zu 420 m in den Subsidenzzentren der Helgoland- und Mecklenburg-Senke. Die Folge ist durch bankige Einlagerungen karbonatischer Sandsteine und Oolithe (Rogensteine) charakterisiert (LEPPER & RÖHLING 2013). Die Sedimente des Mittleren Buntsandstein (sm) werden aufgrund der Korngrößenverteilung in vier Sohlbank-Zyklen gegliedert. Die Sohlbank-Zyklen beginnen mit geringmächtigen Sandsteinen und gehen zum Hangenden in eine Wechselfolge von Ton- und Siltsteinen mit nur noch geringem Sandanteil über (BOIGK 1981).

Nach oben hin wird die generische geologische Schichtenfolge durch känozoische Ablagerungen abgeschlossen. Die Sande und tonigen Ablagerungen, z. T. auch Kiese können in tertiäre (t) und quartäre (q) Ablagerungen unterteilt werden. Innerhalb des Normalprofils (siehe Abb. 4-2) ist der Einlagerungshorizont und die Abgrenzung des Wirtsgesteins definiert.

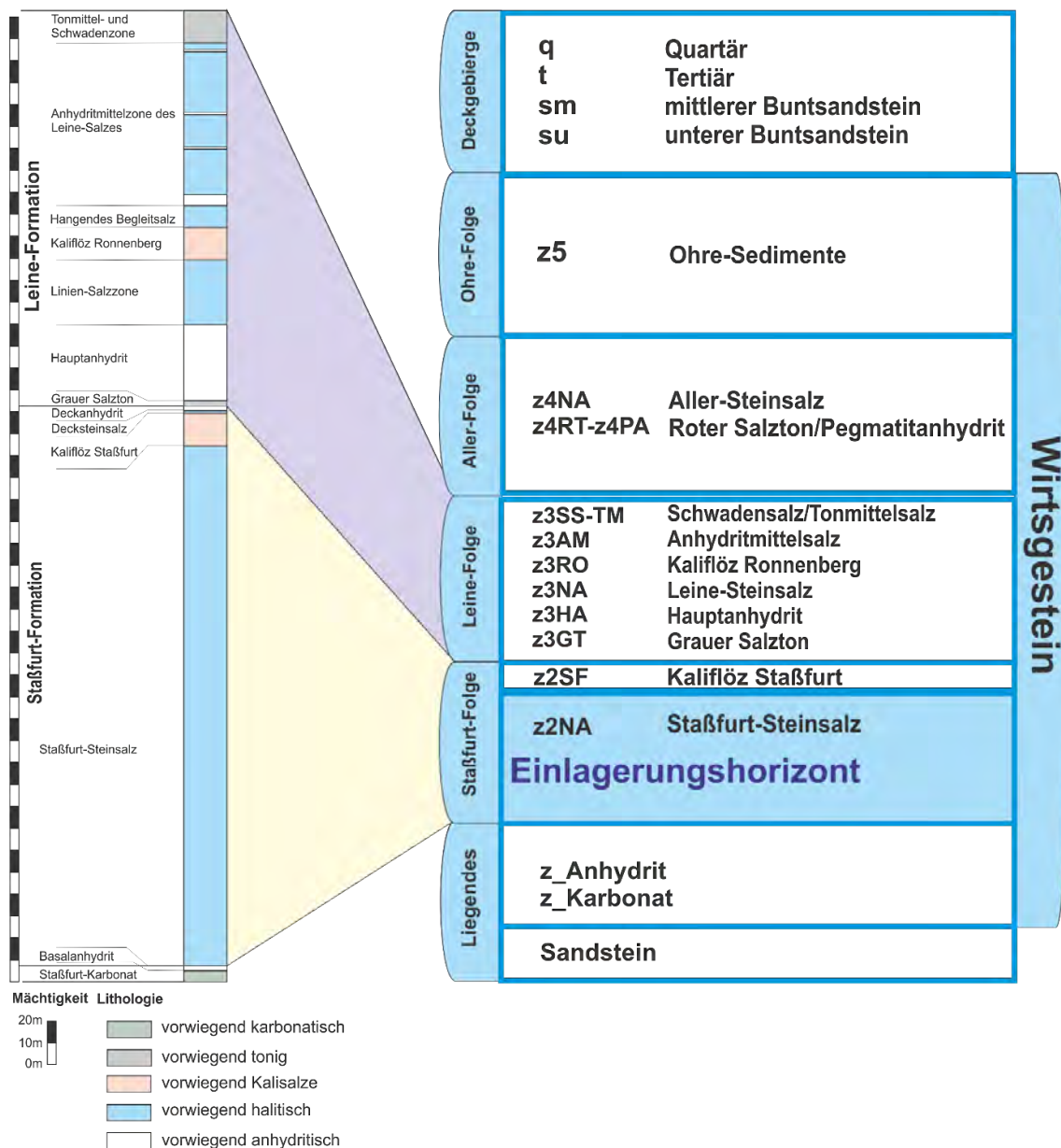


Abb. 4-2: Generalisiertes Normalprofil der Staßfurt- und Leine-Formation (links) sowie dessen Überführung in ein schematisches geologisches Referenzprofil für die 3D-Modellierung (rechts) (aus: BERTRAMS et al. 2015, modifiziert).

4.2 Referenzprofile

Basierend auf der in Kapitel 4.1 beschriebenen generischen geologischen Schichtenfolge und unter Berücksichtigung der im Kapitel 2.3 abgeleiteten Kriterien für Tiefenlage und Mächtigkeit des Einlagerungshorizontes, wurden Referenzprofile für den Typ „flache Lagerung“ und den Typ „Salzkissen“ erarbeitet. Diese stellen die Abfolge, Mächtigkeit und Lagerungsverhältnisse der Schichten dar und dienen als eine Grundlage für die

Erstellung der 3D-Modelle sowie für die räumliche Planung des Endlagers. Die darauf basierenden generischen geologischen 3D-Modelle stellen die Basis für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes und des Sicherheits- bzw. Nachweiskonzeptes sowie für die numerischen Integritätsberechnungen dar. Im Ergebnis der Auswertungen wurden 18 regional gut charakterisierbare lithostratigraphische Einheiten in den Referenzprofilen berücksichtigt. Jede Modell-Einheit ist lithologisch einheitlich definiert und wird für die im Projekt durchzuführenden THM-Simulationen mit geomechanischen, thermischen und hydraulischen Parametern hinterlegt. Da durch regionale Fazieswechsel oder aufgrund der Lagerungsverhältnisse eine Variation der Modellparameter im Rahmen natürlicher Schwankungen gegeben ist, werden für die einzelnen Modell-Einheiten gemittelte Parameter abgeleitet.

4.2.1 Referenzprofil für den Typ „flache Lagerung“

Der ca. 8,8 km lange generische geologische Schnitt AA´ wurde basierend auf den z. Zt. vorhandenen Kenntnissen zu flach lagernden Salinarschichten in Deutschland erarbeitet. Der Schnitt stellt eine charakteristische geologische Gesamtsituation in den Regionen mit flach lagernden Steinsalzfolgen des Zechstein in Deutschland dar. Die Mächtigkeiten und Tiefenlagen der 18 Modell-Einheiten sind dem generischen geologischen Schnitt („Referenzprofil“) und der dazugehörigen Tabelle zu entnehmen (siehe Abb. 4-3). Für die meisten salinaren Modellschichten werden die in den Abb. 3-17 und Abb. 3-18 durch REINHOLD et al. (2014) zusammengestellten Mächtigkeitsangaben angenommen.

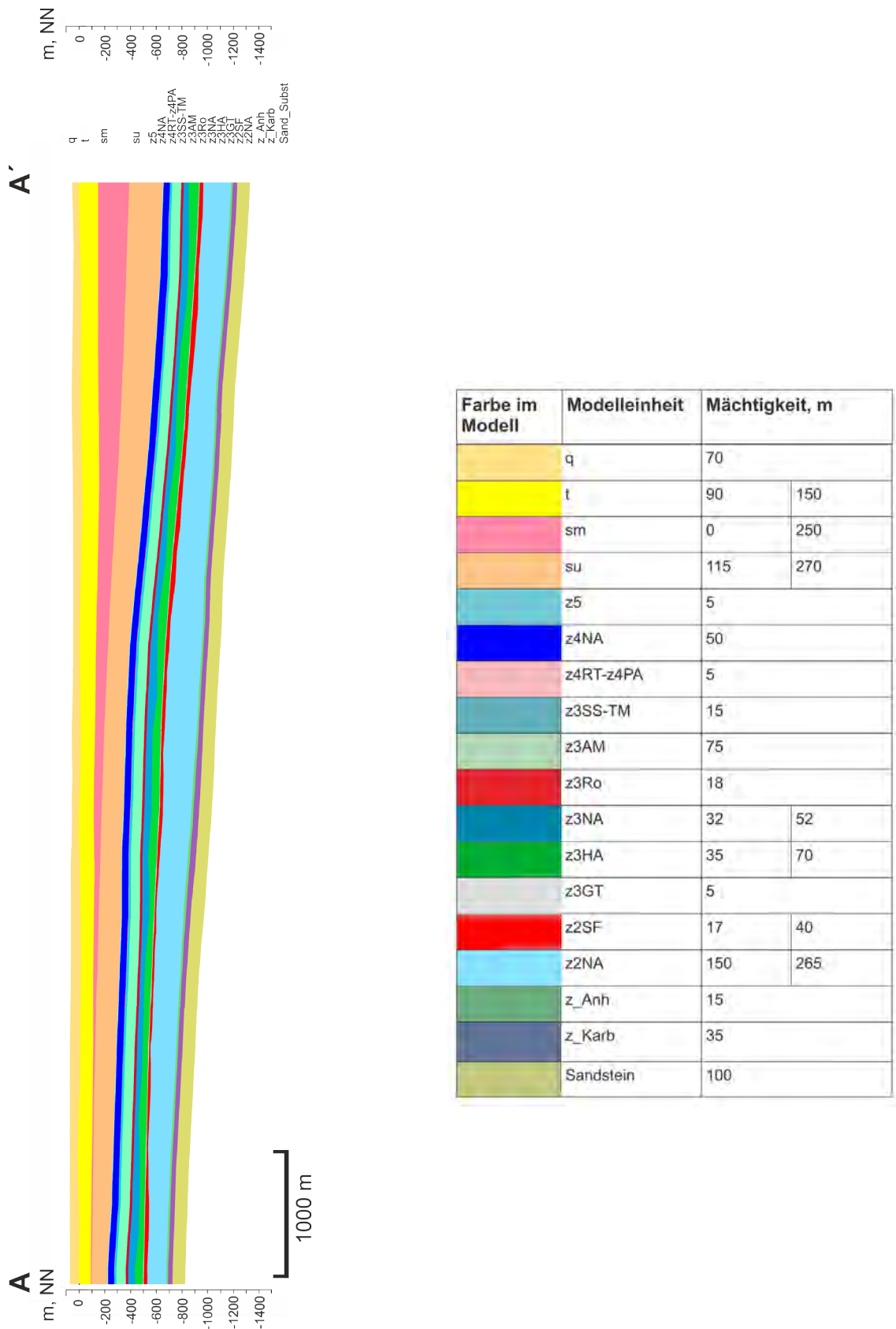


Abb. 4-3: Geologisches Referenzprofil für den Typ „flache Lagerung“.

Für den Typ „flache Lagerung“ wurde als Einlagerungshorizont das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation (z2NA) festgelegt. Dieses liegt in einem Tiefenbereich, der entsprechend den im Kapitel 2 beschriebenen Kriterien für die Errichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente als günstig angesehen wird und weist eine Mächtigkeit größer 100 m auf (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Tiefenlage und Mächtigkeit von z2NA im Referenzprofil „flache Lagerung“

	Minimalwert	Maximalwert
Tiefenlage des Tops	-540 m NN (610 m u. GOK)	-980 m NN (1.050 m u. GOK)
Tiefenlage der Basis	-700 m NN (770 m u. GOK)	-1.200 m NN (1.270 m u. GOK)
Mächtigkeit, ca.	150 m	265 m

Die Lagerungsverhältnisse im generischen geologischen Schnitt sind durch ein Einfallen der salinaren Schichtenfolge von 5° bis 7° gekennzeichnet. Ein leichtes Einfallen der Sedimentschichten ist für alle betrachteten Regionen mit flach lagernden Salzschichten in Deutschland charakteristisch und wird deswegen im generischen geologischen Schnitt wiedergespiegelt.

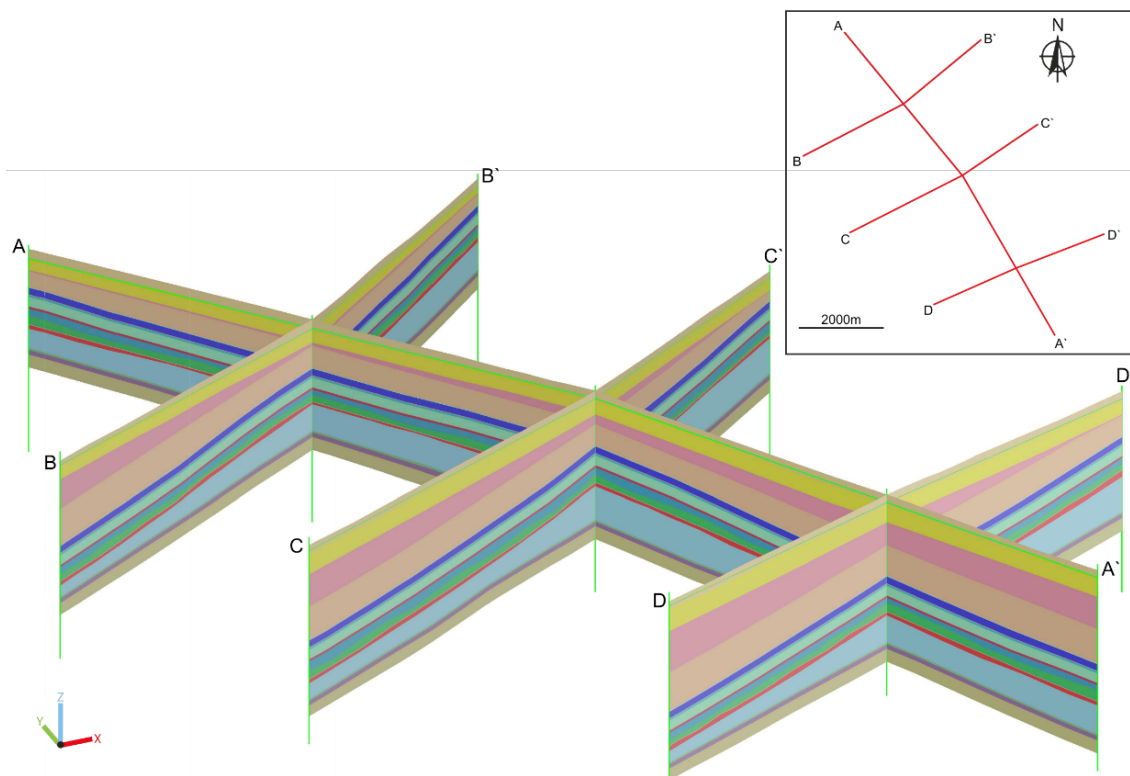


Abb. 4-4: Generische geologische Schnitte im Modellgebiet „flache Lagerung“.

Zwecks Verbesserung der räumlichen Vorstellungen zu Verbreitung, Einfallen und zu den Mächtigkeitsänderungen der Schichten, wurden senkrecht zu dem Schnitt AA´ (siehe Abb. 4-3) drei weitere Schnitte erstellt (siehe Abb. 4-4 und Anhang 2). Aus Abb. 4-4 ist ersichtlich, dass die saline Schichtenfolge im Modellgebiet eine südliche Haupteinfallrichtung aufweist. Die für flach lagernde Salinarfolgen z. T. charakteristischen Störungen in den präsalinaren Schichten sowie die Zerblockung des Hauptanhydrits sind nicht Bestandteil des Referenzprofils sowie des darauf aufbauenden 3D-Modells.

4.2.2 Referenzprofil für den Typ „Salzkissen“

Das ca. 12,5 km lange Referenzprofil für den Typ „Salzkissen“ (siehe Abb. 4-5) zeigt eine charakteristische Salzkissenstruktur der Zechstein-Steinsalzfolgen in Deutschland. Die 18 geologischen Modell-Einheiten sind identisch mit denen aus dem Referenzprofil für den Modelltyp „flache Lagerung“. Ihre Mächtigkeiten sind in der Tabelle in Abb. 4-5 vermerkt.

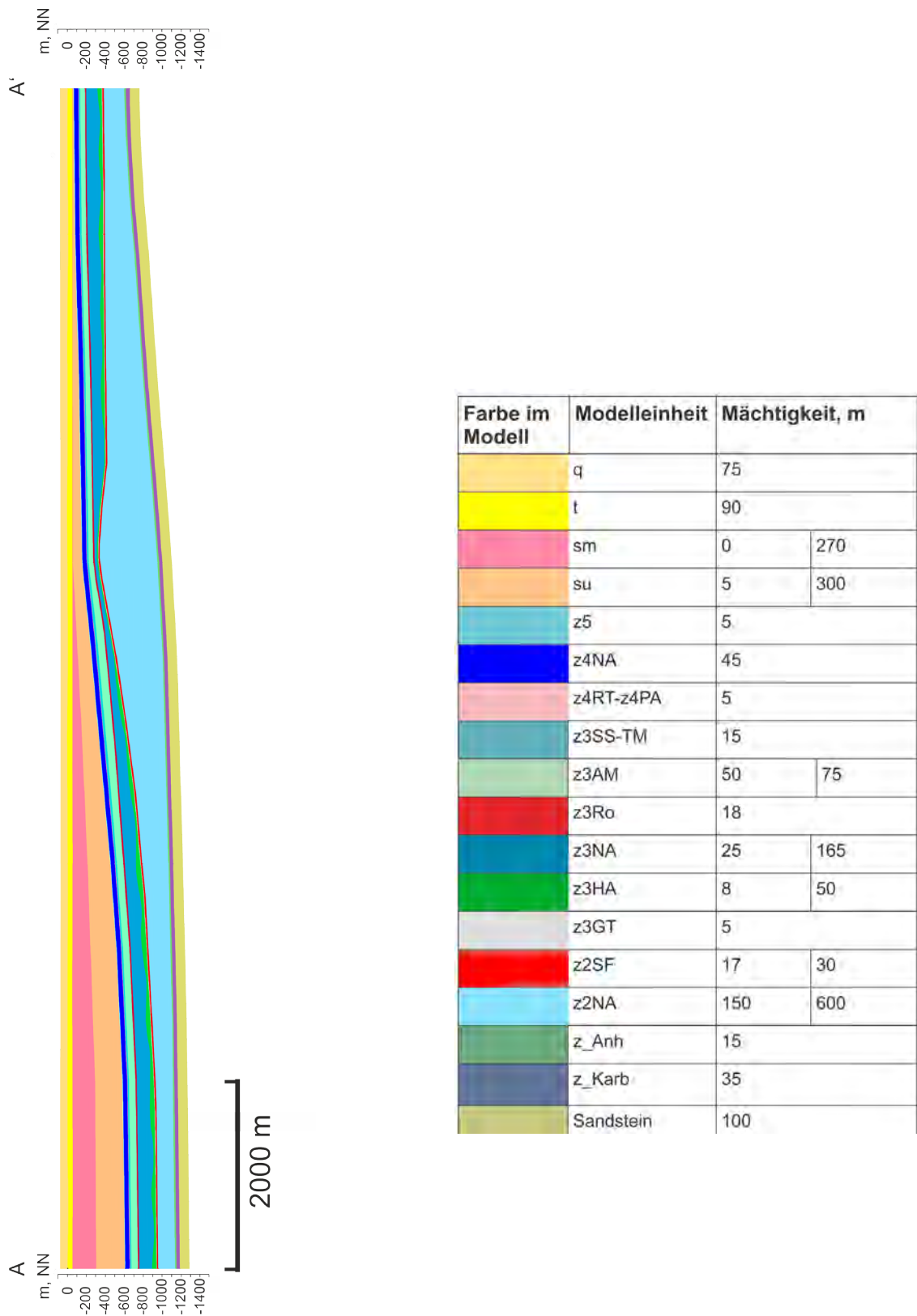


Abb. 4-5: Geologisches Referenzprofil für den Typ „Salzkissen“.

Wie für den Typ „flache Lagerung“ wurde auch für den Typ „Salzkissen“ das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation als Einlagerungshorizont festgelegt. Tiefenlage und Mächtigkeit des Einlagerungshorizontes sind in Tab. 2 festgehalten. Analog zum Typ „flache Lagerung“ wurden senkrecht zum Referenzprofil drei weitere Schnitte erstellt (siehe Abb. 4-6 und Anhang 3).

Tab. 2: Tiefenlage und Mächtigkeit von z2NA im Referenzprofil „Salzkissen“

	Minimalwert	Maximalwert
Tiefenlage des Tops	-390 m NN (460 m u. GOK)	-975 m NN (1.045 m u. GOK)
Tiefenlage der Basis	-600 m NN (670 m u. GOK)	-1.150 m NN (1.220 m u. GOK)
Mächtigkeit, ca.	150 m	600 m

Die Lagerungsverhältnisse im generischen geologischen Schnitt sind im Modelltyp „Salzkissen“ durch ein Einfallen der salinaren Schichtenfolge von 5° bis 7° gekennzeichnet. Die höchste Mächtigkeit (600 m) erreicht das Salzkissen im Schnittpunkt der Profile AA' und CC'. Im Gegensatz zum Modelltyp „flache Lagerung“ variiert die Mächtigkeit der Deckgebirgseinheiten relativ stark. Generell sind die Schichten über dem Salzkissen ausgedünnt und erreichen an den Modellrändern eine größere Mächtigkeit. Die in den präsalinaren Schichten charakteristischen Störungen sowie die Zerblockung des Hauptanhydrits sind nicht Bestandteil des Referenzprofils sowie des darauf aufbauenden 3D-Modells.

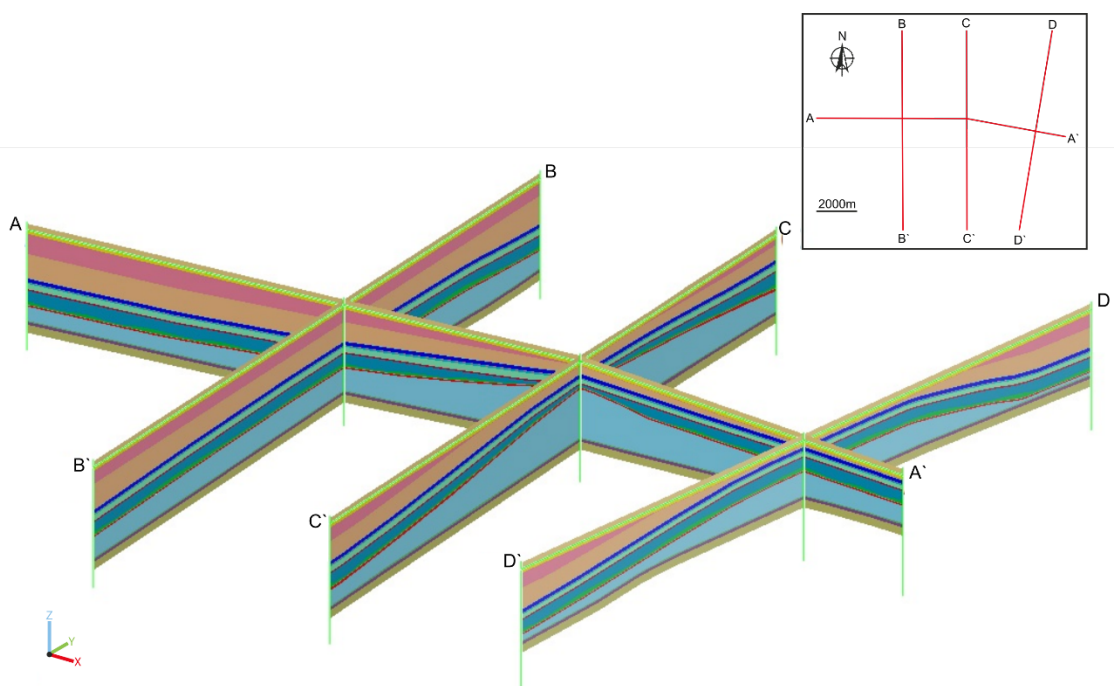


Abb. 4-6: Generische geologische Schnitte im Modellgebiet „Salzkissen“.

4.3 **Modellbeschreibung**

Beide Modelle bestehen aus 18 stratigraphischen Einheiten, welche dem generalisierten Normalprofil entnommen wurden. Vom Hangenden zum Liegenden sind dies:

- q (Quartär)
- t (Tertiär)
- sm (Mittlerer Buntsandstein)
- su (Unterer Buntsandstein)
- z5 (Ohre-Sedimente)
- z4NA (Aller-Steinsalz)
- z4RT-z4PA (Roter Salzton/Pegmatitanhydrit)
- z3SS-TM (Schwadensalz/Tonmittelsalz)
- z3AM (Anhydritmittelsalz)
- z3RO (Kaliflöz Ronnenberg)
- z3NA (Leine-Steinsalz)
- z3HA (Hauptanhydrit)
- z3GT (Grauer Salzton)
- z2SF (Kaliflöz Staßfurt)
- z2NA (Staßfurt-Steinsalz)
- z2BA (Basalanhydrit)
- z2SK (Staßfurt-Karbonat)
- ro (Rotliegend)

Bezüglich der Topographie orientieren sich die Verhältnisse in den beiden generischen 3D-Modellen am Südrand des Norddeutschen Beckens. Dieser ist geomorphologisch durch Grund- und Endmoränen der Elster- und Saale-Kaltzeit geprägt. Angelehnt an Gebiete in diesem Bereich, wurden in den 3D-Modellen topographische Höhen von etwa 45 m bis 75 m über NN festgelegt, wobei die Werte geringfügig darunter bzw. darüber liegen können. Folglich wurden auch keine markanten Reliefunterschiede modelliert. Die Topographie entspricht einer typischen Tieflandschaft.

Im Norddeutschen Becken sind in den Gesteinen des Deckgebirges und im Präsalinar zahlreiche geologische Störungszonen bekannt, die in NNE-SSW-Richtung verlaufen oder etwa der WNW-ESE- bis NW-SE-Richtung folgen (BALDSCHUN et al. 2001). In den generischen Endlagerstandortmodellen im Projekt KOSINA wurden keine Störungssysteme berücksichtigt. Die Schichtenfolgen der generischen geologischen Modelle sind daher nicht durch markante bruchtektonische oder salinartektonische Strukturen verstellt.

4.3.1 Modelltyp A „flache Lagerung“

Das im Kapitel 4.2.1 dargestellte Referenzprofil bildete die Grundlage für die Auswahl eines Teilgebietes für die räumliche Positionierung des Endlagers. Nach der Festlegung der Lage und Größe des Endlagerbereichs wurde die Größe des Modellgebietes definiert. Der entsprechende Abschnitt des Schnittes AA' wurde anschließend als Grundlage für die Erstellung des generischen geologischen 3D-Modells verwendet. Das Modellgebiet „flache Lagerung“ erstreckt sich in NW-SE-Richtung, parallel zum Referenzprofil AA', über eine Länge von ca. 5,0 km. Die Ausdehnung in NE-SW-Richtung, parallel zu den Seitenprofilen, liegt zwischen ca. 2,5 km und 3,0 km. Profil BB' bildet den NW-Rand und Profil DD' den SE-Rand des Modellgebietes (siehe Abb. 4-7).

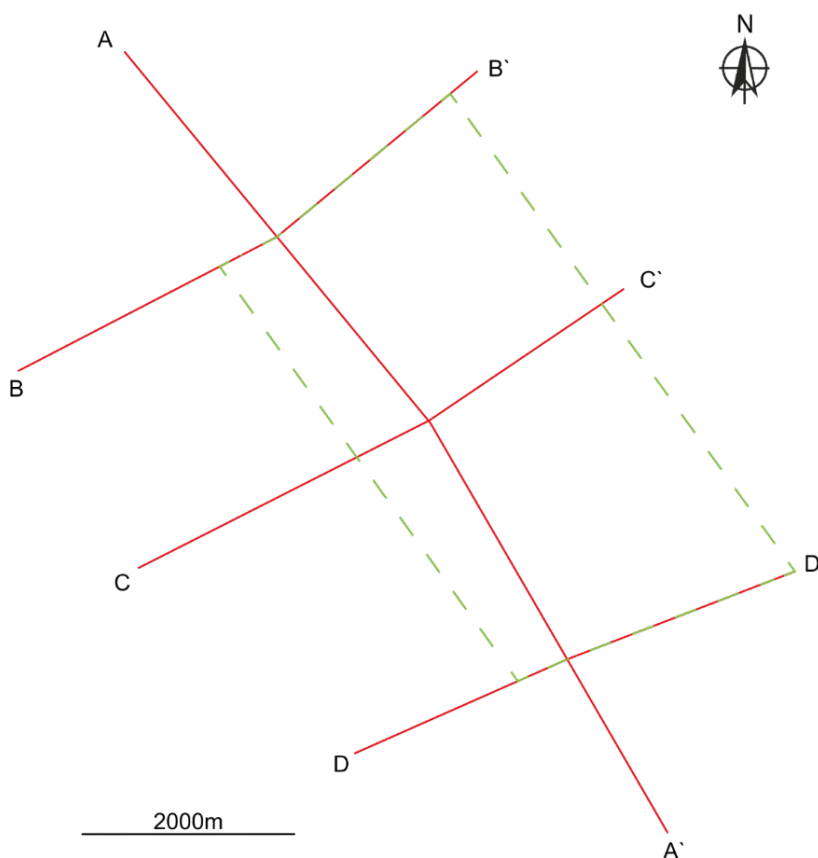


Abb. 4-7: Modellgebiet „flache Lagerung“ mit den Profilen AA', BB', CC' und DD' (rot) und Modellgrenzen (grün).

In Abb. 4-8 ist das 3D-Modell „flache Lagerung“ dargestellt. Die Mächtigkeit des Deckgebirges, bestehend aus den geologischen Einheiten q, t, sm und su, schwankt im Modellgebiet zwischen ca. 200 m im N und ca. 650 m im S. Das saline Wirtsgestein, bestehend aus Staßfurt-, Leine-, Aller- und Ohre-Formation, erreicht eine Mächtigkeit bis zu 650 m. Alle Schichten des Standortmodells fallen in S- bzw. SW-Richtung mit etwa 5° bis 7° ein.

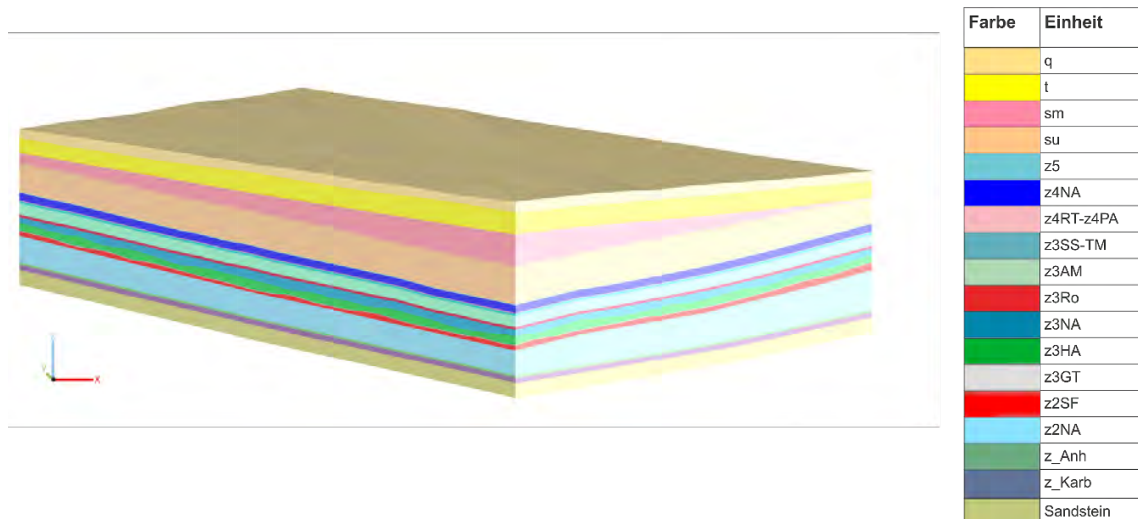


Abb. 4-8: Geologisches 3D-Modell „flache Lagerung“.

Die Mächtigkeit der als Einlagerungshorizont gewählten Steinsalzfolge der Staßfurt-Formation variiert im Modellgebiet „flache Lagerung“ zwischen 160 m im westlichen Bereich des Modellgebietes und 290 m im östlichen Bereich. Für die Platzierung des Endlagers ist der Modellbereich mit Mächtigkeiten von über 200 m zu bevorzugen. Dabei müssen die Kriterien bezüglich der Tiefenlage des Endlagerhorizontes berücksichtigt werden. Die Basis des Endlagerhorizontes (z2NA-Basis) liegt im südlichen Teil des Modellgebietes in Teufen um ca. 1.100 m u. NN und im Norden < 700 m u. NN, was für die Platzierung des Endlagers im nördlichen Teil des Modellgebietes spricht. Das Top des Endlagerhorizontes (z2SF-Basis) liegt in Teufenbereichen zwischen 900 m im Süden und 500 m u. NN (ca. 970 m und 570 m u. GOK) im Norden und entspricht der im Kapitel 2.3 für das Top des Endlagerhorizontes definierten Mindestteufe von > 500 m u. GOK (siehe Abb. 4-9).

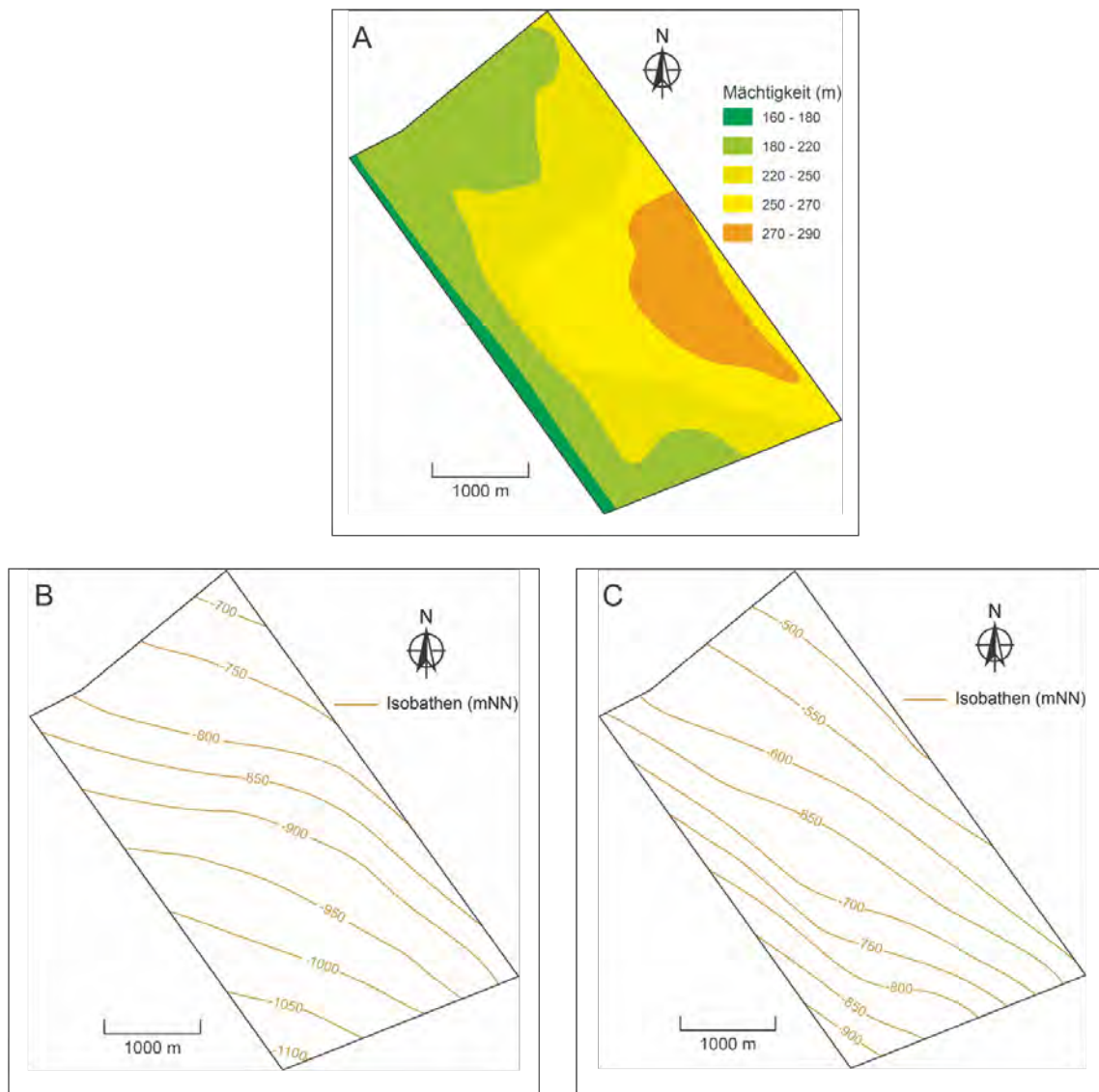


Abb. 4-9: Mächtigkeit (A) und Tiefenlinienpläne für Basis (B) und Top (C) der Modelleinheit z2NA im Modelltyp „flache Lagerung“.

4.3.2 Modelltyp B „Salzkissen“

Das Modellgebiet vom Typ „Salzkissen“ erstreckt sich in W-E-Richtung über eine Länge von ca. 12,5 km und in N-S-Richtung über eine Länge von ca. 10,0 km. Die Tiefe beträgt etwa 1,3 km. Das Modellgebiet ist damit wesentlich größer als das vom Typ „flache Lagerung“. Aus Gründen der komplexeren Struktur umfasst das Modellgebiet das gesamte Referenzprofil und nicht nur einen Teil wie im Modelltyp „flache Lagerung“. In Abb. 4-10 sind die Modellgrenzen des Modellgebiets „Salzkissen“ dargestellt.

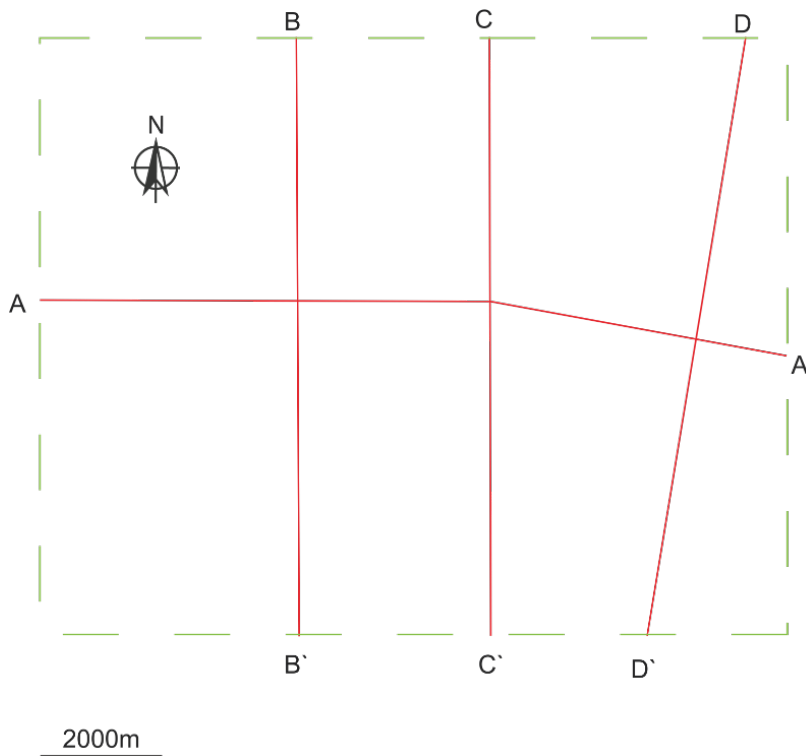


Abb. 4-10: Modellgebiet „Salzkissen“ mit den Profilen AA', BB', CC' und DD' (rot) und Modellgrenzen (grün).

Die Mächtigkeit des Deckgebirges, bestehend aus den geologischen Einheiten q, t, sm und su, schwankt im Modellgebiet zwischen ca. 800 m im Westen und ca. 140 m im Osten. Das saline Wirtsgestein, bestehend aus Staßfurt-, Leine-, Aller- und Ohre-Formation, erreicht im Zentrum des Salzkissens eine Mächtigkeit von über 800 m. Auf eine Modellierung von möglicherweise vorhandenen Hutgesteinen im Top des Salinars wurde verzichtet. Die geologischen Einheiten im Hangenden von z2NA sind im Zentrum des Salzkissens stark ausgedünnt, insbesondere der Mittlere Buntsandstein (sm) ist kaum vorhanden. Im Vergleich dazu erreicht sm am Westrand des Modellgebietes eine Mächtigkeit von über 300 m. Den Anforderungen der numerischen Modellrechnungen entsprechend, wurden im 3D-Modell „Salzkissen“ Homogenbereiche definiert. Dementsprechend wurden geologische Schichten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften zusammengefasst und auf eine Modellierung der einzelnen geologischen Einheiten zugunsten von 12 Homogenbereichen verzichtet (siehe Abb. 4-11).

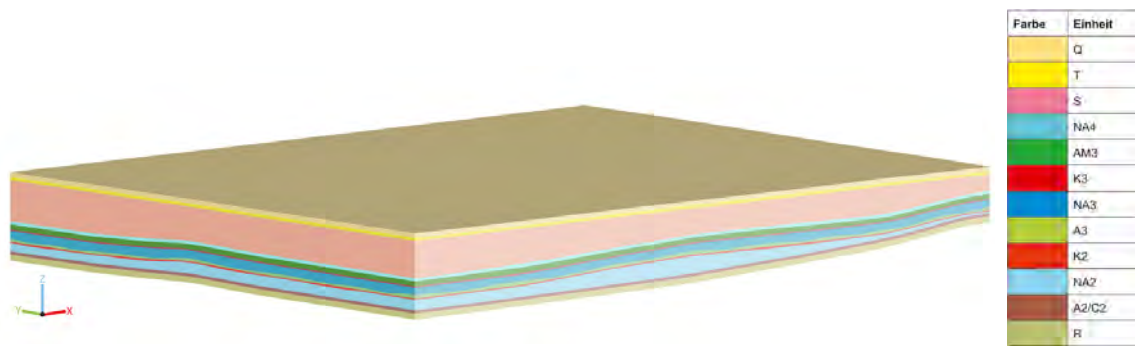


Abb. 4-11: Geologisches 3D-Modell „Salzkissen“.

Die Mächtigkeit der als Einlagerungshorizont gewählten Steinsalzfolge der Staßfurt-Formation erreicht im Zentrum des Salzkissens bis zu 600 m. In Richtung der Modellränder nimmt die Mächtigkeit stark ab (< 300 m) und fällt im NE und SE sogar unterhalb von 100 m. Für die Platzierung des Endlagers bietet sich das Zentrum des Salzkissens mit Mächtigkeiten > 500 m an. Die Basis des Endlagerhorizonts (z2NA-Basis) liegt im Osten bei ca. 600 m u. NN (ca. 670 m u. GOK) und fällt im NW auf über 1.200 m u. NN (> 1.270 m u. GOK) ab. Die Teufenlage des Tops (z2SF-Basis) fällt ebenfalls nach Westen ab (bis > 1.000 m u. NN) und wird maßgeblich durch die Symmetrie des Salzkissens bestimmt. Im Salzkissenzentrum liegt die Teufe des Tops bei < 400 m u. NN (siehe Abb. 4-12).

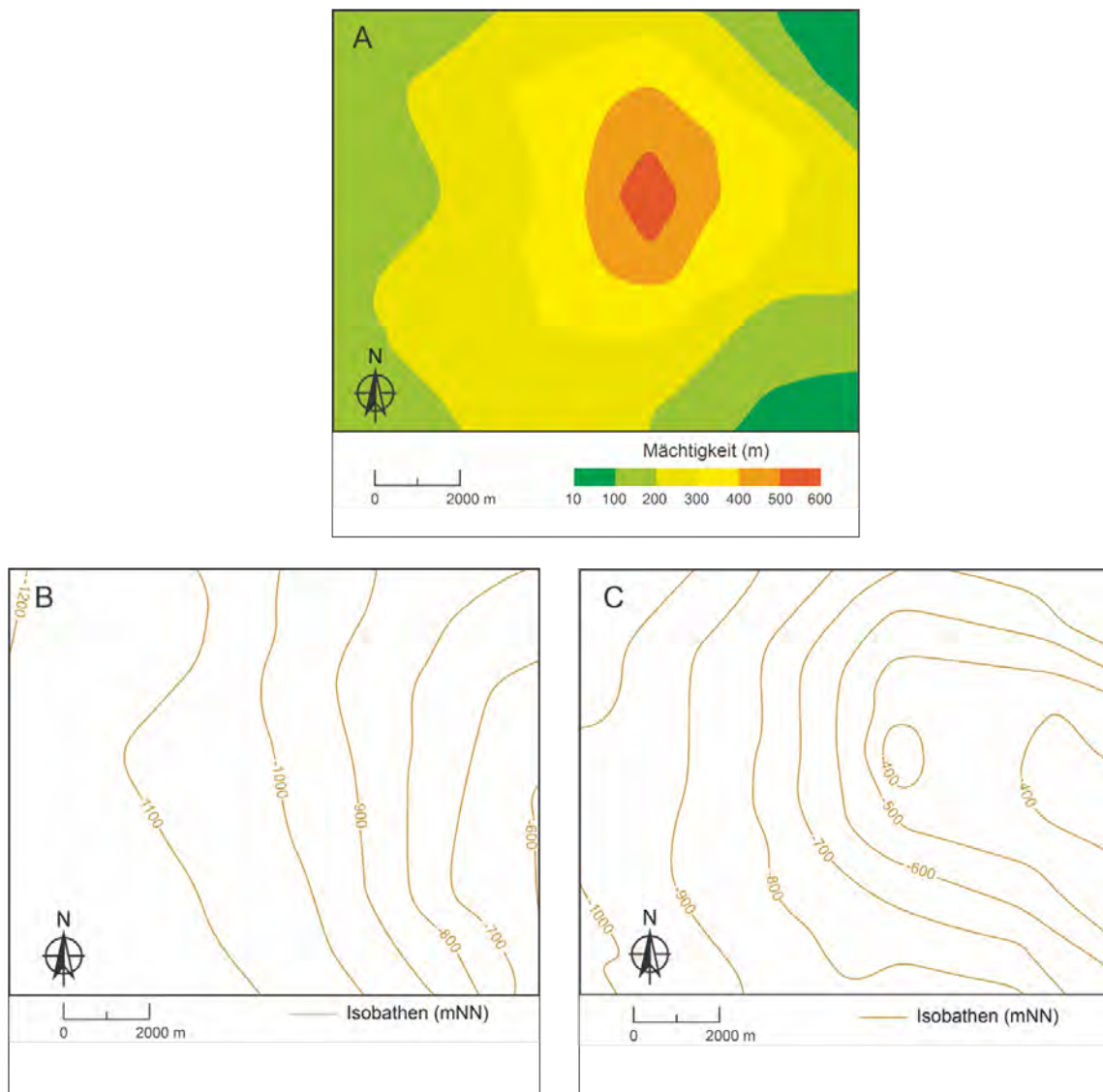


Abb. 4-12: Mächtigkeit (A) und Tiefenlinienpläne für Basis (B) und Top (C) der Modelleinheit z2NA im Modelltyp „Salzkissen“.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende, im Vorhaben KOSINA erarbeitete Bericht dokumentiert die Erstellung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salinarformationen in Deutschland. Zunächst wurden die Rahmenbedingungen eines Endlagerstandortes für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle in Deutschland zusammengestellt. Als Grundlage dienten hierfür die Ausschlusskriterien sowie die Mindestanforderungen des AkEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte) und des StandAG (Standortauswahlgesetz). Demnach sollen die Tiefe des Endlagerbergwerks 500 m bis 1.000 m u. GOK und die Mächtigkeit des Einlagerungshorizonts über 100 m betragen. Anschließend wurde

die Verbreitung von flach lagernden Salinarformationen in Deutschland beschrieben. Diese kommen in den stratigraphischen Einheiten Rotliegend, Zechstein (beide Perm), Röt, Muschelkalk, Keuper (alle Trias), Malm (Oberjura) und Tertiär (Paläogen) vor. Aufgrund der Mächtigkeit und Teufenlage sind hauptsächlich die Steinsalzlager des Zechstein für endlagerspezifische Untersuchungen interessant. Insbesondere Regionen in sechs Zechstein-Verbreitungsgebieten mit flach lagernden Salinarformationen (Nieder-rhein-Becken, Solling-Becken, Werra-Fulda-Becken, Thüringer Becken, Calvörde-Scholle und Niederlausitz-Becken) entsprechen nach derzeitigem Kenntnisstand den Mindestanforderungen nach AkEnd sowie StandAG und dienen deshalb als Referenz für die Erarbeitung der generischen geologischen Standortmodelle im KOSINA-Projekt. Das Deckgebirge in diesen Gebieten wird u. a. durch mehrere hundert Meter mächtige Buntsandstein-Sedimente gebildet, welche sich partiell durch hohe Klüftigkeit und Porosität auszeichnen.

Im KOSINA-Projekt wurden zwei generische geologische 3D-Modelle mithilfe des Programms openGEO erstellt. Modelltyp A stellt eine flache Lagerung und Modelltyp B ein Salzkissen dar. In beiden Modellen wurden 18 regional gut charakterisierbare lithostratigraphische Modelleinheiten vom Rotliegend bis zum Quartär ausgehalten und in jeweils einem Referenzprofil dargestellt. Diese Referenzprofile stellen die Abfolge, Mächtigkeit und Lagerungsverhältnisse der Schichten dar und dienen jeweils als Grundlage für die Erstellung der 3D-Modelle sowie für die räumliche Positionierung des Endlagers. Als Einlagerungshorizont wurde das Steinsalzlager der Staßfurt-Formation (z2NA) festgelegt, dessen Basis im Modell „flache Lagerung“ in einer Teufe zwischen ca. 700 m und 1.100 m u. NN bzw. dessen Top zwischen ca. 500 m und 900 m u. NN liegt. Die Mächtigkeit von z2NA schwankt im Modell „flache Lagerung“ zwischen 160 m und 290 m. Im Modell „Salzkissen“ liegt die z2NA-Basis in einer Teufe zwischen ca. 600 m und 1.200 m u. NN und die Topflächen des Salzkissens (z2NA-Top) erreichen eine Teufe von unter 400 m u. NN. Im Salzkissenzentrum erreicht z2NA eine Mächtigkeit von ca. 600 m.

Die generischen geologischen 3D-Modelle dienen im KOSINA-Projekt als Grundlage für die Erarbeitung des technischen Endlagerkonzepts sowie für die Entwicklung des Nachweis- und Sicherheitskonzeptes.

Literaturverzeichnis

- AHORNER, L. & SOBISCH, H.G. (1988): Ein untertägliches Überwachungssystem im Kalibergwerk Hattorf zur Langzeiterfassung von seismischen Ereignissen im Werra-Kaligebiet. – Kali und Steinsalz, 10(2): 39-49.
- AkEnd (2002): Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd. – Abschlussbericht; Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Hannover.
- ALBERTS, B., HAGER, H., HEIDE, G., HILDEN, H.D., KLOSTERMANN, J., KNAPP, G., PELZING, R., PRÜFERT, J., QUERFURTH, H., SCHLIMM, W., THIERMANN, A., WREDE, V., KNAUFF, W. & REICHMANN, C. (1988): Geologie am Niederrhein. – Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld.
- ALBRECHT, H. & BURCHARDT, I. (1998): Projekt Morsleben – Geologische Bearbeitung Trias und Jura. – Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- ALTHEN, G.W., RUSBÜLT, J. & SEEGER, J. (1980): Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalkes der DDR. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 8(8): 985-999.
- Autorenkollektiv (1980): Ergebnisbericht Kalisalzvorerkundung Scholle von Calvörde (Mittel- und Westteil). – Abschlussbericht; VEB Geologische Forschung und Erkundung Halle, Halle/Saale.
- BALDSCHUN, R., BINOT, F., FLEIG S. & KOCKEL, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. – Geologisches Jahrbuch, A 153, Hannover.
- BARNASCH, J. (2009): Der Keuper im Westteil des Zentraleuropäischen Beckens (Deutschland, Niederlande, England, Dänemark) - Diskontinuierliche Sedimentation, Litho-, Zyklo- und Sequenz-stratigraphie. – Dissertation; Martin-Luther-Universität, Institut für Geowissenschaften, Halle/Saale.
- BEBIOLKA, A., GÖTHEL, M. & HÖDING, T. (2011): Endbericht zum Projekt Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Brandenburg, Berlin und Teilgebiete in Sachsen. – Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.

- BEER, W. (1996): Kalilagerstätten in Deutschland. – Kali und Steinsalz, 12(1): 18-31.
- BEHLAU, J., FLEIG, S., HAMMER, J., HOFMANN, M. & MINGERZAHN, G. (2007): Erarbeitung von CAD-gestützten dreidimensionalen geologischen Lagerstättenmodellen: erweiterte Arbeitsmethoden in der 3D-Geologie. – Zwischenbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- 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.
- BERTRAMS, N., BOLLINGERFEHR, W., DÖRR, S., FILBERT, W., SIMO, E., FAHLAND, S., HAMMER, J., HEUSERMANN, S., KÜHNLENZ, T., MRUGALLA, G., REINHOLD, K., BUHMANN, D., KINDLEIN, J., MÖNIG, J., WOLF, J., MINKLEY, W. & POPP, T. (2015): Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA) – Zwischenbericht; DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- BEST, G., LEYDECKER, G., BORNEMANN, O. & KOCKEL, F. (1982): Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern, 28.04.1982. – Bericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BEST, G. & ZIRNGAST, M. (2002): Die strukturelle Entwicklung der exhumierten Salzstruktur „Oberes Allertal“. – Bericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BEUTLER, G., HAUSCHKE, N. & NITSCH, E. (1999): Faziesentwicklung des Keupers im Germanischen Becken. – Hauschke, N. & Wilde, V. (Hrsg.): Trias - Eine ganz andere Welt, 129-174, München.
- BEUTLER, G. & TESSIN, R. (2005): Der Keuper im Norddeutschen Becken. – Deutsche stratigraphische Kommission: Stratigraphie von Deutschland IV. Keuper, 1-296, Frankfurt/Main.
- BLASIG, W. (1993): Der Kalibergbau an der Werra. – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau: Salz in Werra und Weser - Ursachen, Folgen, Abhilfe - Ergebnisse einer Fachtagung der ARGE Weser am 22. März 1993 in Kassel: 11-19, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Kassel.

- BOIGK, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland. – Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik, Stuttgart.
- BRANDES, J. (2011): Mesozoische Speicher- und Barrierekomplexe der Altmark-Fläming-Scholle (Sachsen-Anhalt). – Abschlussbericht zum Projekt „Speicher-Kataster Deutschland“; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- BRANDES, J. & OBST, K. (2011): Speicher- und Barrierekomplexe in Mecklenburg-Vorpommern. – Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- BURCHARDT, I., DÖLZ, F. & GABRIEL, W. (1980): Ergebnisbericht Kalisalzvorerkundung Scholle von Calvörde (Mittel- und Westteil). – Bericht; VEB Geologische Forschung und Erkundung Halle, Halle/Saale.
- CRAMER, P. (1965): Zur Geologie der Gegend von Bad Windsheim/Mfr. unter besonderer Berücksichtigung neuer Tiefenaufschlüsse. – *Geologica Bavarica*, 55: 105-118.
- DERSCH-HANSMANN, M., LEPPER, J., RAMBOW, D., TIETZE, K.W. & WENZEL, B. (2013): Der Buntsandstein in der zentralen Hessischen Senke. – Deutsche Stratigraphische Kommission: Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 69: 385-419.
- DOBEN, K. & RISCH, H. (1996): Nördliche Kalkalpen (Oberostalpin). – Freudenberger, W. & Schwerd, K. (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 500 000 - 4. Aufl.: 220-231; Bayerisches Geologisches Landesamt, München.
- DOORNENBAL, J.C. & STEVENSON, A.G. (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area (SPBA). – EAGE Publications b.v., Houten.
- EXLER, H.J. (1987): Salz und Sole. – *Geologica Bavarica*, 91: 47-63.
- 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. – McCann, T. (Hrsg.): *The Geology of Central Europe - Vol. 2: Mesozoic and Cenozoic*: 749-821, London.

- FISCHER-APPELT, K., BALTES, B., BUHMANN, D., LARUE, J., MÖNIG, J. (2013): Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Köln.
- FREUDENBERGER, W. & SCHWERD, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000 - 4. neubearbeitete Auflage. – Bayerisches Geologisches Landesamt, München.
- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1998): Quantifizierung altkimmerischer Bewegungen in Nordwestdeutschland - Teil 2: Tektonik und Epirogenese im Keuper. – Ergebnisbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- FRISCH, U. & KOCKEL, F. (2003): Der Bremen-“Knoten“ im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands - Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. – Bericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- GAERTNER, H. & RÖHLING, H.G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. – Hagdorn, H. & Seilacher, A. (Hrsg.): Muschelkalk - Schöntaler Symposium 1991: 85-103, Stuttgart.
- GAST, S. & RIESENBERG, C. (2016): AP1: Erstellung eines Informationssystems über Salzstrukturen sowie von geologischen Niveauschnittkarten. – In: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe (Hrsg.), KBB Underground Technologies, Inst. f. Geotechnik Leibniz Universität Hannover: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). – Sachbericht 03ESP323B: 30-52, Hannover.
- GAUPP, R., GAST, R.E. & FORSTER, C. (2000): Late Permian Playa Lake deposits of the Southern Permian Basin (Central Europe). – Gierlowski-Kordesch, E. H. & Kelts, K. R. (Hrsg.): Lake Basins Through Space and Time: 75-86; American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, Tulsa, Oklahoma.
- GEYER, O.F. & GWINNER, M.P. (2011): Geologie von Baden-Württemberg. – 5., völlig neu bearbeitete Auflage, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

- 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.
- GRALLA, P. (1988): Das Oberrotliegend in NW-Deutschland - Lithostratigraphie und Faziesanalyse. – Geologisches Jahrbuch, A 106: 3-5.
- 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.
- GRIMM, M.C., WIELANDT-SCHUSTER, U., HOTTENROTT, M., GRIMM, K.I. & RADTKE, G. (2011): 5. Regionalgeologische Darstellungen. – Deutsche Stratigraphische Kommission: Stratigraphie von Deutschland IX. Tertiär, Teil 1, 57-132, Hannover.
- 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); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- HARK, H.U. (1955): Ein Beitrag zur Tektonik am Westrand des Subherzynyen-Beckens. – Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Band 7: 46-65.
- HASCHE, W. & REINHARDT, H.G. (1978): Reflexionsseismik Regionales Kartenwerk - Thüringer Becken (Zechstein). – unveröffentlicht; VEB Geophysik Leipzig, Leipzig.
- 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.
- HUCKRIEDE, H. & ZANDER, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tieferen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). – Müller, C. & Reinhold, K. (Hrsg.): Geologische Charakterisierung tiefliegender Speicher- und Barrierehorizonte in Deutschland - Speicher-Kataster Deutschland: 188-204, Hannover.

- InSpEE Geoviewer-BGR (<https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=de>), Stand: 26.09.2017.
- JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, S., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potentials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraftwärmekopplung (KWK) in Deutschland. – Bericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- 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; Hessisches Landesamt für Bodenforschung, Kassel.
- KÄDING, K.C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – Newsletters on Stratigraphy, 41(1-3): 123-127, Berlin / Stuttgart.
- 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.
- KELLERBAUER, S. (1996): Geologie und Geomechanik der Salzlagerstätte Berchtesgaden. – Münchner Geologische Hefte, B 2: 101.
- KOCKEL, F. & KRULL, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. - Ergebnisbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- 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; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- KRULL, P., HOTH, P., BRÄUER, V. & WIRTH, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen. – Bericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- KÜHNLENZ, T. (2016): First results of the KOSINA-project: technical concepts and geological and numerical modeling. – 7th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation, Washington, D.C.

- LANGBEIN, R. & SEIDEL, G. (1976): Zur Ausbildung des oberen Teils des Buntsandsteins im Thüringer Becken. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 4(5): 751-769.
- LANGBEIN, R. & SEIDEL, G. (1997): Zechstein, Buntsandstein und Muschelkalk im östlichen Thüringer Becken. – Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 3: 101-114.
- LANGBEIN, R. & SEIDEL, G. (2003): Zechstein. – Geologie von Thüringen, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- 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 Geologischen Gesellschaft, 165(1): 77-90.
- LEPPER, J. & RÖHLING, H.G. (2013): Stratigraphie von Deutschland XI. – Buntsandstein. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 69, Stuttgart.
- LOTSCH, D. (1998): Projekt Morsleben – Geologische Bearbeitung von Kreide und Tertiär. – Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- LÜTZNER, H. & KOWALCZYK, G. (2012): Stratigraphie von Deutschland X. Rotliegend Teil I: Innerveriscische Becken. – Deutsche Stratigraphische Kommission; Frankfurt/Main.
- MCCANN, T. (2008): The Geology of Central Europe 1. Precambrian and Palaeozoic. – Geological Society of London, London.
- MÖNIG, J., BUHMANN, D., RÜBEL, A., WOLF, J., BALTES, B. & FISCHER-APPELT, K. (2012): Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln.
- MÜLLER, C. (2009): Charakterisierung des hydromechanischen Verhaltens der Gesteine des Mittleren Buntsandsteins im Hinblick auf eine geothermische Nutzung: Strukturgeologische Geländeaufnahmen, gesteinsmechanische Untersuchungen und numerische Modellierungen. – Dissertation; Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultäten der Georg-August-Universität, Göttingen.

- PAUL, J. (2006): Der Kupferschiefer: Lithologie, Stratigraphie, Fazies und Metallogenese eines Schwarzschiefers. – Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 157(1): 57-76.
- PHILIPP, S.L., OELRICH, A., MÜLLER, C., HOFFMANN, S., BARTELTSEN, T., THÄTER, D., GUDMUNDSSON, A. (2006): Strukturgeologische Studien als Beitrag zum Erfolg tiefegeothermischer Projekte. – 11. Symposium „Tektonik, Struktur- und Kristallingeologie“: Zusammenfassung der Tagungsbeiträge ; Geowissenschaftliches Zentrum der Georg-August-Universität, Göttingen.
- PHILIPP, S.L., REYER, D. & MEIER, S. (2010): Strukturgeologische Geländestudien in Aufschlussanaloga und Permeabilitätsentwicklung in geothermischen Reservoiren. – Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, 38 (1): 49-59.
- PLEIN, E. (1995): Norddeutsches Rotliegend-Becken. – Rotliegend-Monographie, Teil II.; Courier Forsch.-Inst. Senckenberg, Frankfurt/Main.
- POLLOK, L., HÖLZNER, M. & FLEIG, S. (2016): AP2: Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung. – In: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe (Hrsg.), KBB Underground Technologies, Inst. f. Geotechnik Leibniz Universität Hannover: Informationssystem Salzstrukturen : Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft). – Sachbericht 03ESP323B: 53-117, Hannover.
- POLLOK, L., HAMMER J., FLEIG, S., MUSMANN, P. (im Druck): Salinarstrukturen – Entstehung, Außenformen und Internbau. – In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.); Koordination/Redaktion: Paul J. & Heggemann, H.: Stratigraphie von Deutschland XII - Zechstein: in Druck (Schriftenr. dt. Ges. Geowiss.).
- PUFF, P. & RADZINSKI, K.H. (2013a): Der Buntsandstein in der Thüringischen Senke. – Deutsche Stratigraphische Kommission: Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein; Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 69: 421-449.
- PUFF, P. & RADZINSKI, K.H. (2013b): Der Buntsandstein in der Niederlausitz-Senke. – Deutsche Stratigraphische Kommission: Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein; Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 69: 449-455.

- RADZINSKI, K.H. (2008a): Buntsandstein. – Bachmann, G.H., Ehling, B.C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt, 180-201, Stuttgart.
- RADZINSKI, K.H. (2008b): Muschelkalk. – Bachmann, G.H., Ehling, B.C., Eichner, R. & Schwab, M. (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt, 201 ff., Stuttgart.
- REICHENBACH, W. (1996): Kalisalzsucharbeiten Scholle von Calvörde.. – Ergebnisbericht; VEB Geologische Forschung und Erkundung Halle, Halle/Saale.
- REINHOLD, K., HAMMER, J. & PUSCH, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland. – Zwischenbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.
- REINHOLD, K. & HAMMER, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. – Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 167(2-3): 167-190.
- RÖDIGER, T. (2005): Charakterisierung und Modellierung des Buntsandsteinfließsystems im Osten des Thüringer Beckens. – Dissertation; Friedrich-Schiller-Universität, Jena.
- RÖDIGER, T., SAUTER, M. & BÜCHEL, G. (2009): Infiltration und Grundwasserströmung in geklüftet-porösen Buntsandsteingrundwasserleitern im Osten des Thüringer Beckens. – Grundwasser. Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 14: 21-32.
- RÖHLING, S. (2002): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyko- und Sequenzstratigraphie. – Dissertation; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, Halle/Saale.
- RÖHLING, H.G. (2013): Der Buntsandstein im Norddeutschen Becken - Regionale Besonderheiten. – Lepper, J. & Röhling, H.-G. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI - Buntsandstein: 269-384, Stuttgart.
- 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.

- 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.
- SCHULZE, G. & SPARFELD, K.F. (1980): Kalisalzvorerkundung Scholle von Calvörde (Mittel- u. Westteil). – Ergebnisbericht; VEB Geologische Forschung und Erkundung Halle, Halle/Saale.
- SCHWANDT, A. (1991): Zur Hydrogeologie der Zechsteinsedimente in den Kali- und Steinsalzabbaugebieten Mitteldeutschlands. – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil 1 (H 4): 1263-1273, Stuttgart.
- SEIDEL, G. (1964): Aufbau und Eignung der Steinsalzlagerstätten des Thüringer Beckens. – Zeitschrift für Angewandte Geologie, 10(4): 182-189.
- SEIDEL, G. (2003): Geologie von Thüringen. – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- 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.
- STACKEBRANDT, W. & FRANKE, D. (2015): Geologie von Brandenburg. – Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- STACKEBRANDT, W. & MANHENKE, V. (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg. – Atlas, 4. Auflage, Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, Cottbus.
- StandAG (2013): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze. – BGBl. I 2013 S. 2553, Deutscher Bundestag, Berlin.
- StandAG (2017): Gesetz zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. – Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 BGBl. I 2017 S. 1074, Deutscher Bundestag, Berlin.
- TEICHMÜLLER, R. (1957): Ein Querschnitt durch den Südteil des Niederrheinischen Zechsteinbeckens. – Geologisches Jahrbuch, E 73: 39-50.

- VOIGT, E. (1996): Zusammenfassender Abschlussbericht der Struktur- und Kluftauswertung der CBIL-Imagedaten des Projektes Morsleben. – Western Atlas Logging Services, Bericht im Auftrag des BfS, London.
- WIECZOREK, K., BEHLAU, J., HEEMANN, U., MASIK, S., MÜLLER, C., RAAB, M. & SIMO, E. (2014): VIRTUS – Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. Bericht; GRS, Braunschweig.
- WOLF, R. (1985): Tiefentektonik des linksrheinischen Steinkohlengebietes. – Drodzdewski, G., Engel, H., Wolf, R. & Wrede, V. (Hrsg.): Beiträge zur Tiefentektonik westdeutscher Steinkohlenlagerstätten: 105-167, Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Köln.
- 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“; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin / Hannover.

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Tiefenlage und Mächtigkeit von z2NA im Referenzprofil „flache Lagerung“	51
Tab. 2: Tiefenlage und Mächtigkeit von z2NA im Referenzprofil „Salzkissen“	54

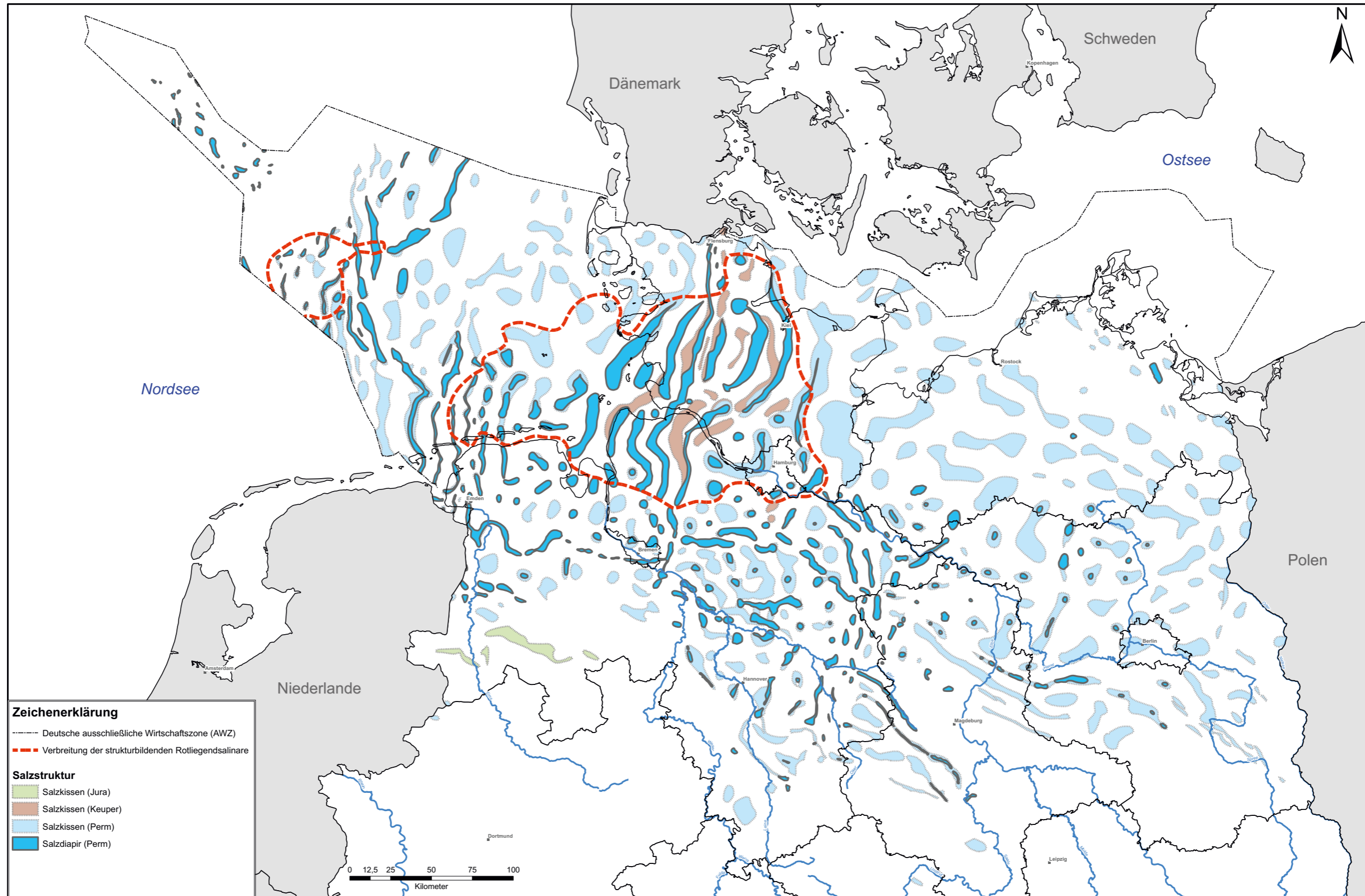
Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 2-1: Schematische Darstellung der Sicherheitsabstände im KOSINA-Projekt (aus: BERTRAMS et al. 2015).....	9
Abb. 3-1: Schematische Darstellung der Lagerungsformen im Modell A (Typ „flache Lagerung“) und Modell B (Typ „Salzkissen“) (aus: BERTRAMS et al. 2015).....	10
Abb. 3-2: Stratigraphische Position und Bezeichnung der salinaren Schichtenfolgen mit Steinsalzlagern in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).....	12
Abb. 3-3: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Rotliegend-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).....	14
Abb. 3-4: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Zechstein-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).....	17
Abb. 3-5: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Röt-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).....	19
Abb. 3-6: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Muschelkalk-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).....	21
Abb. 3-7: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Keuper-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).....	23
Abb. 3-8: Schematische on-shore-Verbreitung des Halit-führenden Malm-Salinars in Deutschland (aus: REINHOLD et al. 2014).....	25
Abb. 3-9: Schematische on-shore Verbreitung des Halit-führenden Tertiär-Salinars im Oberrheingraben (aus: REINHOLD et al. 2014).....	26
Abb. 3-10: Verbreitung der Zechstein-Salinare in Deutschland (modifiziert nach Abb. 3-4) sowie in schwarz umrandet sechs Gebiete, in denen diese hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage für die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle geeignet sein könnten (aus: REINHOLD et al. 2014, modifiziert).....	30
Abb. 3-11: Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine im Niederrhein-Becken; Schnitt A in Abb. 3-10 (aus: REINHOLD et al. 2014).....	31
Abb. 3-12: Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine im Solling-Becken; Schnitt B in Abb. 3-10 (aus: REINHOLD et al. 2014).....	32
Abb. 3-13: Schematischer Schnitt (A) und stratigraphisches Säulenprofil (B) der Untertagedeponie Herfa-Neurode im Werra-Fulda-Becken; der Ort Herfa-Neurode ist in Abb. 3-10 markiert (aus: SCHOFIELD et al. 2014).....	32
Abb. 3-14: Tiefenlage der Zechsteinbasis und Verbreitungsgebiete erhöhter Steinsalzmächtigkeiten im Thüringer Becken (nach: SEIDEL 2003, HASCHE & REINHARDT 1978 und ZANDER & HUCKRIEDE 2011).....	33
Abb. 3-15: Lagerungsverhältnisse der Sedimentgesteine auf der Calvörde-Scholle; Schnitt C in Abb. 3-10 (nach: Autorenkollektiv 1980).....	34
Abb. 3-16: Geologisches Bohrprofil der Bohrung Spremberg 10/79 im Niederlausitz-Becken, Ort ist in Abb. 3-10 markiert (aus: STACKEBRANDT & FRANKE 2015, ergänzt durch Teufenangaben).....	35

Abb. 3-17: Gliederung und Mächtigkeit der Werra-Formation in einigen Randbecken des Zechstein-Meeres (aus: REINHOLD et al. 2014).....	36
Abb. 3-18: Gliederung und Mächtigkeit der Staßfurt-Formation in einigen Randbecken des Zechstein-Meeres (aus: REINHOLD et al. 2014).....	37
Abb. 3-19: Gliederung und Mächtigkeit des Deckgebirges oberhalb der Zechstein-Ablagerungen im Niederrhein-Becken, Solling-Becken und Werra-Fulda-Becken (nach: BALDSCHUN et al. 2001, ALBERTS et al. 1988, RÖHLING 2013, DERSCH-HANSMANN et al. 2013, MÜLLER 2009, SEIDEL 2003).....	43
Abb. 3-20: Gliederung und Mächtigkeit des Deckgebirges oberhalb der Zechstein-Ablagerungen im Thüringer-Becken, in der Calvörde-Scholle und in SE-Brandenburg (nach: SEIDEL 2003, PUFF & RADZINSKI 2013a, REICHENBACH 1966, SCHULZE & SPARFELD 1980, BURCHARDT et al. 1980, PUFF & RADZINSKI 2013b, STACKEBRANDT & MANHENKE 2010, STACKEBRANDT & FRANKE 2015).....	44
Abb. 4-1: Workflow für die Erarbeitung geologischer 3D-Modelle mit openGEO (aus: BEHLAU et al. 2007).....	45
Abb. 4-2: Generalisiertes Normalprofil der Staßfurt- und Leine-Formation (links) sowie dessen Überführung in ein schematisches geologisches Referenzprofil für die 3D-Modellierung (rechts) (aus: BERTRAMS et al. 2015, modifiziert).....	48
Abb. 4-3: Geologisches Referenzprofil für den Typ „flache Lagerung“.....	50
Abb. 4-4: Generische geologische Schnitte im Modellgebiet „flache Lagerung“.....	51
Abb. 4-5: Geologisches Referenzprofil für den Typ „Salzkissen“.....	53
Abb. 4-6: Generische geologische Schnitte im Modellgebiet „Salzkissen“.....	54
Abb. 4-7: Modellgebiet „flache Lagerung“ mit den Profilen AA', BB', CC' und DD' (rot) und Modellgrenzen (grün).....	56
Abb. 4-8: Geologisches 3D-Modell „flache Lagerung“.....	57
Abb. 4-9: Mächtigkeit (A) und Tiefenlinienpläne für Basis (B) und Top (C) der Modelleinheit z2NA im Modelltyp „flache Lagerung“.....	58
Abb. 4-10: Modellgebiet „Salzkissen“ mit den Profilen AA', BB', CC' und DD' (rot) und Modellgrenzen (grün).....	59
Abb. 4-11: Geologisches 3D-Modell „Salzkissen“.....	60
Abb. 4-12: Mächtigkeit (A) und Tiefenlinienpläne für Basis (B) und Top (C) der Modelleinheit z2NA im Modelltyp „Salzkissen“.....	61

Anhangverzeichnis	Seite
Anhang 1:	78
Verbreitung von Salzdiapiren und Salzkissen in Norddeutschland (nach: POLLOK et al. 2016).	
Anhang 2:	79
Seitenprofile zum Referenzprofil „flache Lagerung“.	
Anhang 3:	80
Seitenprofile zum Referenzprofil „Salzkissen“.	

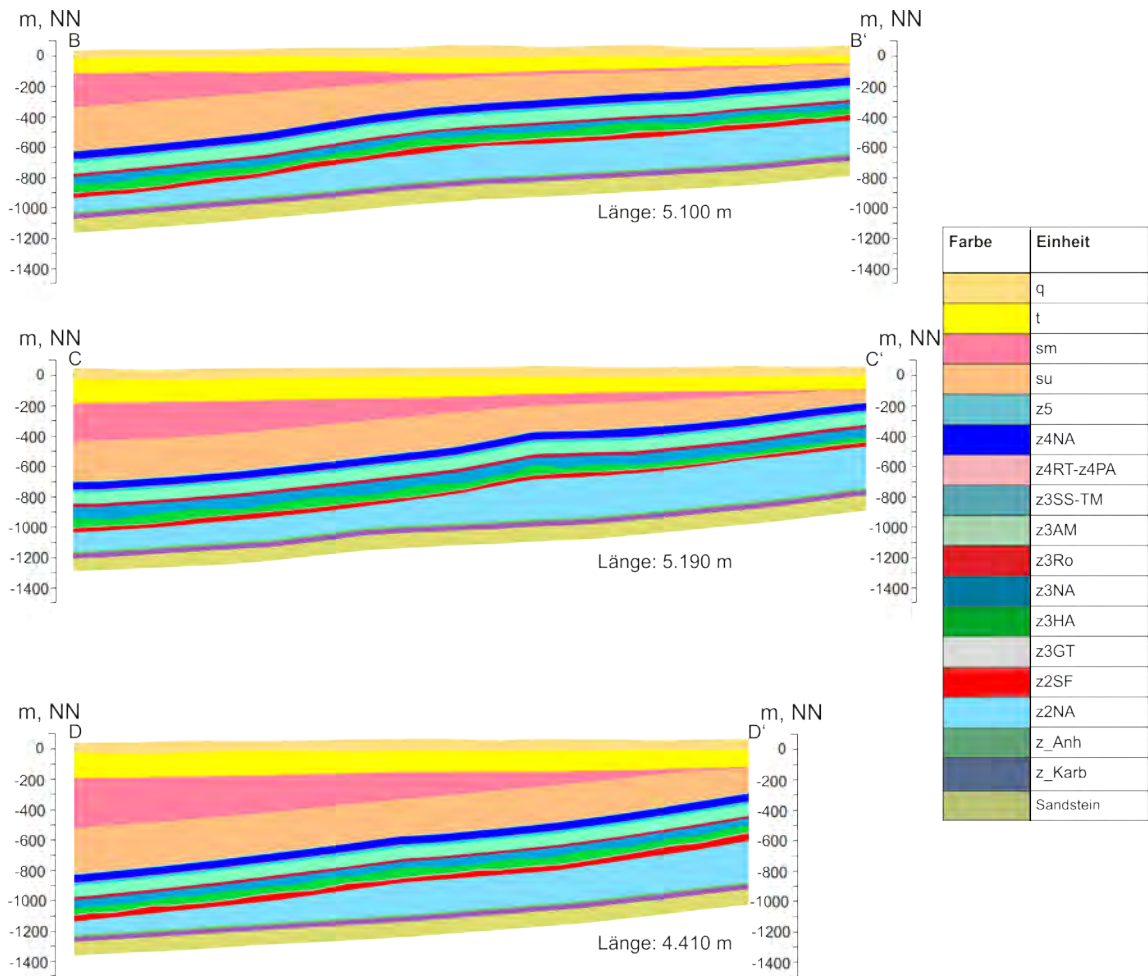
Anhang 1:

Verbreitung von Salzdiapiren und Salzkissen in Norddeutschland (nach: POLLOK et al. 2016).



Anhang 2:

Seitenprofile zum Referenzprofil „flache Lagerung“.



Anhang 3:

Seitenprofile zum Referenzprofil „Salzkissen“.

