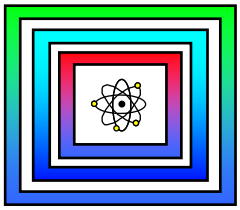
Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland

9Y3321010000

Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen



Zwischenbericht

Berlin / Hannover, Oktober 2004

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN
UND ROHSTOFFE

Hannover/Dienstbereich Berlin

Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland

Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen

1. Autor(en): Krull, P., Hoth, P., Bräuer, V., Wirth, H.

2. Auftraggeber: BMWA
3. Auftragsnummer: 9Y3321010000
4. Datum: Oktober 2004
5. Tagebuch-Nr.: 11843/04

Inhaltsverzeichnis

		Blatt
Verkürzte Zusammenfassung		4
1	Einleitung	5
2	Auftrag	7
3	Endlagerkonzept in Deutschland	7
3.1	Bedeutung der Geologie in der Endlagerung	8
3.2	Vergleich der Eigenschaften potentieller Wirtsgesteine	10
4	Kriterien für die Auswahl potentieller Wirtsgesteine	13
4.1	Ausschlusskriterien	15
4.1.1	Großräumige Vertikalbewegungen	15
4.1.2	Seismische Aktivitäten	18
4.1.3	Aktive Störungszonen	19
4.1.4	Vulkanische Aktivität	21
4.1.5	Grundwasseralter	22
4.2	Mindestanforderungen	22
4.2.1	Gesteinsdurchlässigkeit	23
4.2.2	Mindestmächtigkeit	24
4.2.3	Mindestteufe	25
4.2.4	Maximalteufe	25
4.2.5	Flächenbedarf	26
4.2.6	Gebirgsschlaggefährdung	26
4.2.7	Langzeitsicherheit	27
5	Anwendung der Kriterien für die Auswahl untersuchungs-würdiger Strukturen und Regionen in Deutschland	28
5.1	Salzformationen	28
5.1.1	Rotliegend-Salinar	30
5.1.2	Zechstein-Salinar	32
5.1.2.1	Werra-Folge	32
5.1.2.2	Staßfurt-Folge	35
5.1.2.3	Leine-Folge	37
5.1.2.4	Aller-Folge	39
5.1.2.5	Ohre bis Mölln-Folge	39

5.1.3	Röt-Salinar	42
5.1.4	Muschelkalk-Salinar	43
5.1.5	Keuper-Salinar	45
5.1.6	Malm-Salinar	46
5.1.7	Tertiär-Salinar	47
5.2	Ton-/Tonsteinformationen	50
5.2.1.	Bedeutung toniger Gesteinsformationen für die Endlagerung	50
5.2.2	Tonige Gesteinsformationen in Deutschland	54
5.2.2.1	Ton-/Tonsteinformationen des Tertiär	60
5.2.2.2	Ton-/Tonsteinformationen der Kreide	63
5.2.2.3	Tonsteine des Jura	65
5.2.3	Detaillierte Charakterisierung von Tonen und Tonsteinen	69
5.3	Andere Wirtsgesteine unter mächtigen Barrieregesteinen (Ton/Salz)	72
6	Untersuchungswürdige Strukturen und Regionen in Deutschland	73
7	Zusammenfassung	77
8	Literaturverzeichnis	79
9	Anlagenverzeichnis	89
10	Abbildungsverzeichnis	90
11	Tabellenverzeichnis	91

Gesamtblattzahl: 91

Verkürzte Zusammenfassung

Autor: Bräuer, V., Hoth, P., Krull, P., Wirth, H.

Titel: Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen

Stichwörter: Endlagerauswahlkriterien, Endlagerkonzept, Wirtsgesteinseigenschaften, Salzformationen, Tonformationen, Kristallingesteine, Mindestanforderungen, Ausschlusskriterien, Sedimentbecken, vertikale Krustenbewegungen, seismische Aktivitäten, vulkanische Aktivitäten, aktive Störungszonen, Gesteinsdurchlässigkeit, untersuchungswürdige Regionen

Ausgehend von einer kritischen Betrachtung der Anwendbarkeit der vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte vorgeschlagenen Auswahlkriterien auf die sedimentären Wirtsgesteine Salz und Ton/Tonstein wird ein Überblick über die Verbreitung der in Deutschland vorkommenden Salz- und Tonformationen gegeben. Da es für die Salzformationen seit der BGR-Studie von 1995 keine nennenswerten neuen Erkenntnisse gibt, sind die Aussagen von 1995 nach wie vor aktuell.

Für die Tonformationen, die vor dem Jahre 2000 hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerwirtsgesteine nicht umfassend untersucht wurden, wird der in den letzten vier Jahren erzielte Kenntnisstand dokumentiert. Entsprechend der international üblichen Praxis ist die Bewertung der verschiedenen Ton-/Tonsteinformationen in Deutschland breit angelegt. Anhand der angewendeten Auswahlkriterien werden die potentiell in frage kommenden Regionen Schritt für Schritt eingeengt. Unter konsequenter Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen können einzelne Regionen als ungeeignet ausgeschlossen werden, andere werden nach Abwägung verschiedener Kriterien als Reserveoptionen zurückgestellt. Alle Entscheidungen werden nachvollziehbar begründet.

1 Einleitung

In Deutschland sind fast alle bekannten Gesteinsvarietäten an der Oberfläche anstehend oder in unterschiedlicher Tiefe durch Bohrungen nachgewiesen. Entsprechend vielfältig sind die prinzipiellen Möglichkeiten für die Auswahl geeigneter Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Für eine detailliertere Gliederung der Gesteine muss zunächst zwischen dem außeralpinen Gebiet und dem Teil unterschieden werden, der zu den nördlichen Alpen gehört. Im außeralpinen Deutschland bestehen die ältesten Einheiten aus stark verfalteten bis geschieferten, sedimentären, vulkanischen und metamorphen bzw. ausschließlich aus metamorphen Gesteinen, in die in unterschiedlichem Ausmaß magmatische Tiefengesteine eingedrungen sind. Altersmäßig umfassen diese Gesteine des **Grundgebirges** den Zeitraum vom Präkambrium (>550 Mio. Jahre) bis teilweise Oberkarbon (295 Mio. Jahre).

Von den Gesteinen des Grundgebirges sind als Wirtsgesteine besonders die oft massigen kristallinen Komplexe (hochmetamorphe und magmatische Gesteine) interessant. Die Sedimentgesteine mit geringerer metamorpher Überprägung haben durch Faltung und Schieferung ihre primären und oft günstigeren Wirtsgesteinseigenschaften sehr oft eingebüßt.

Über dem Grundgebirge folgt diskordant das **Deckgebirge**, das aus wenig deformierten und kaum verstellten Gesteinseinheiten besteht. Im südlichen und mittleren Deutschland, wo das Grundgebirge ein variszisches Alter von ca. 330 – 305 Mio. Jahren besitzt, beginnt das Deckgebirge teilweise schon mit Unterkarbon, großflächig aber mit Oberkarbon und Rotliegend und reicht bis zum Tertiär. Im nordostdeutschen Küstengebiet, auf Rügen, Usedom und dem Festland, wo durch Tiefbohrungen kaledonisches Grundgebirge (420 Mio. Jahre) erschlossen wurde, beginnt das Deckgebirge bereits mit dem Mitteldevon, und im Untergrund der Ostsee nordöstlich Rügen setzt das Deckgebirge bereits über dem erbohrten Kristallin des baltischen Schildes mit Ablagerungen des Kambrium ein.

Das weitgehend undeformierte Deckgebirge enthält die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle potentiell günstigen Wirtsgesteine wie Ton/Tonstein- und Salz-Formationen. Allerdings sind der Nutzung dieser Wirtsgesteine durch die

z. T. enorme Tiefenlage des Deckgebirges – nördlich Hamburg liegt die Basis in Tiefen von über 12 km – erhebliche Grenzen gesetzt (Anl. 1.1).
Die jüngste geologische Einheit wird von den quartären **Lockersedimenten** gebildet, die vor allem im Norddeutschen Tiefland und im Alpenvorland verbreitet sind.
Der geologische Aufbau Deutschlands, der Verformungsgrad und die Zusammensetzung der Gesteine, die geologischen und physikalischen Eigenschaften und ihre Nutzungsmöglichkeiten sind in ca. 500-jähriger Geologiegeschichte Deutschlands intensiv untersucht. Zahlreiche Schächte und mehrere Tausend Bohrungen auf unterschiedliche Rohstoffe sowie für Forschung und Kartierung gestatten heute kombiniert mit geophysikalischen Messergebnissen gesicherte Aussagen über den geologischen Tiefenbau Deutschlands (Anl. 1.2).Trotz dieses enormen Kenntnisstandes erfordert jede neue Fragestellung ihre spezifischen Antworten. Aufbauend auf dem vorhandenen Wissen müssen dazu gegebenenfalls neue Daten erhoben und Auswertemethoden entwickelt werden.

Die BGR hat bereits 1977 in einer Studie einen ersten Überblick über potentielle Wirtsgesteine in Deutschland vorgelegt (KOCKEL & ROLAND 1977). In den Folgejahren folgten getrennte Übersichtsbewertungen der Salzformationen in Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie der Kristallingesteine (BEST et al. 1982, JARITZ 1983, KOSINOWSKI & BANCHET 1983, BORNHORST et al. 1984, BRÄUER 1984). Unmittelbar nach der Wiedervereinigung Deutschlands wurden diese Untersuchungen auf die neuen Bundesländer ausgedehnt (KRULL 1991, BRÄUER et al. 1991).
Eine letztmalige Analyse der Salz- und Kristallinformationen mit der Ausweisung potentiell untersuchungswürdiger Strukturen und Regionen wurde 1994 bzw. 1995 vorgelegt (KOCKEL & KRULL 1995, BRÄUER et al. 1994). Da in der Zwischenzeit keine grundlegend neuen regional geologischen Erkenntnisse gewonnen wurden, sind die 1995 vorgelegten Ergebnisse nach wie vor aktuell. Sie werden in diesem Bericht der Vollständigkeit halber zusammenfassend mit dargestellt.
Bei der Betrachtung der potentiellen Wirtsgesteine bestand bisher ein Defizit im Kenntnisstand und in der Bewertung der nicht salinaren Sedimentgesteine, ins-

besondere der Tongesteine. Ihre Einschätzung bildet deshalb den Schwerpunkt dieses Berichtes, in dem das stufenweise Vorgehen bei der Erstellung der kartenmäßigen Übersichtsdarstellung beschrieben und die dabei verwendeten Ausschluss- und Abwägungskriterien aufgeführt sind. Der Bericht stellt dabei weder den Beginn noch den Ersatz eines Auswahlverfahrens, wie z. B. im Sinne der Empfehlungen des AkEnd, dar, sondern ist als erster grober Überblick für die Darstellung untersuchungswürdiger Regionen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland zu sehen.

2 Auftrag

Die BGR wurde 2003 vom BMWA beauftragt, in einer Übersichtsdarstellung und unter Berücksichtigung der vorgegebenen, oben erwähnten Anforderungen untersuchungswürdige Regionen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland auszuweisen. Dabei sollten die von der BGR 1994 und 1995 für die Wirtsgesteine Salz und Kristallin formulierten Ausschluss- und Abwägungskriterien sowie die im Jahr 2002 vom AkEnd aufgestellten Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen als Grundlage dienen AkEnd 2002). Zusätzlich sollten von der BGR aus geowissenschaftlicher Sicht als maßgeblich erachtete Abwägungskriterien bei der Auswahl der Regionen herangezogen werden.

3 Endlagerkonzept in Deutschland

In ihrer Koalitionsvereinbarung von 1998 stellten SPD und Bündnis 90/Die Grünen fest, dass das bisherige Konzept zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle inhaltlich gescheitert ist (Koalitionsvereinbarung 1998). Als Folge dieser Feststellung wurde im Jahr 2000 im Einvernehmen mit den Energieversorgungsunternehmen vereinbart, die Erkundung des Standortes Gorleben für mindestens drei bis maximal zehn Jahre zu unterbrechen (BMU 2000). Zusätzlich zur Einstellung der Arbeiten in Gorleben sollte ein neuer nationaler Entsorgungsplan die Beseitigung der radioaktiven Abfälle neu regeln.

Als eine der grundsätzlichen Voraussetzungen bei der Entwicklung eines neuen Entsorgungskonzeptes wird von der Bundesregierung die Endlagerung in geologischen Formationen als die einzige langfristig verantwortbare Option betrach-

tet. Für die Umsetzung der Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden dementsprechend vom dafür verantwortlichen BMU neue wesentliche Zielsetzungen formuliert (NIES 2003):

1. Für die Endlagerung aller radioaktiven Abfälle reicht ein einziges Endlager in tiefen Formationen aus, wobei zeitlich zielführend die Beseitigung hochaktiver Abfälle etwa im Jahr 2030 ist.
2. Weitere Standorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen sollen in Deutschland auf ihre Eignung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht werden.

Im Unterschied zu einigen ausländischen Konzepten sieht das deutsche Konzept die Endlagerung sämtlicher Arten radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk in tiefen geologischen Formationen vor. Dabei sollen die Abfälle im Hinblick auf die zu erreichende langfristige Sicherheit eines Endlagers konzentriert und isoliert und nicht verdünnt und verteilt werden.

Trägt man dieser Anforderung Rechnung, kommt der Geologie, also der geologischen Gesamtsituation mit dem Barriere- und Wirtsgestein, eine besondere Bedeutung zu. Dies gilt sowohl für den Vorgang der Standortsuche, als auch für die darauf folgende spätere Erkundung und den Betrieb eines Endlagers.

Für die Standortsuche folgt daraus, dass zunächst eine günstige geologische Gesamtsituation mit geologischen Barrieren gesucht werden soll, deren Wirkung durch an sie angepasste technische und geotechnische Komponenten im Gesamtbarrieresystem ergänzt wird. Demzufolge muss die in erster Linie sicherheitlich ausgerichtete Standortsuche zunächst auf die Suche geeigneter geologischer Barrieren abzielen und dabei unter Anwendung von geowissenschaftlichen Mindestanforderungen und Kriterien erfolgen.

3.1 Bedeutung der Geologie in der Endlagerung

Der Einschluss der radioaktiven Abfälle im Endlager und ihre Isolation von der Biosphäre wird nach dem deutschen Endlagerkonzept durch ein Multibarrierensystem gewährleistet, das aus einem System geotechnischer und geologischer

Barrieren besteht. Die geologischen Barrieren müssen die folgenden zwei wesentlichen Schutzfunktionen erfüllen:

- Schutz des Endlagers mit den Abfallbehältern und geotechnischen Barrieren vor äußeren Einwirkungen
- Rückhaltung der Radionuklide und gegebenenfalls extreme Verzögerung ihres Transportes durch die Geosphäre bei gleichzeitiger Verdünnung im tiefen Formationswasserstockwerk.

Diese Schutzziele werden am ehesten durch eine *günstige geologische Gesamtsituation* gewährleistet, die eine möglichst langfristige Isolation der Abfälle zum Schutz von Mensch und Umwelt sicherstellt.

Eine hinreichende *Mächtigkeit der Überdeckung* und damit ausreichende *Tiefenlage* schützt die Einlagerungsbehälter und deren geotechnische Umhüllung vor menschlichen Eingriffen und geologischen Einflüssen der Erosion durch Wasser und/oder Eis. Die Anlage des Endlagers in einer *tektonisch inaktiven* Region bietet die Gewähr für eine mechanische Langzeitintegrität der geotechnischen und eine Langzeitstabilität der geologischen Barriere.

Während die Mächtigkeit und Tiefenlage eindeutig definiert werden können, ist die tektonische Aktivität oder Inaktivität einer Region wesentlich schwieriger zu fassen, da hierbei der Zeitfaktor und die geologischen Erkennungsmerkmale eine wesentliche Rolle spielen.

Noch wesentlich schwieriger sind die Mechanismen der *Radionuklidrückhaltung* und der *Verzögerung ihres Transportes* zu beschreiben, da sie durch die verschiedensten Eigenschaften der geologischen Formation beeinflusst werden. Eine hinreichende Beurteilung und Modellierung ist nur durch eine komplexe Betrachtung der geologischen Gesamtsituation möglich. Die Freisetzungsrate wird wesentlich durch den Grundwasserfluss im Endlagerbereich beeinflusst und dieser ist wiederum abhängig von der *Durchlässigkeit* des Wirtsgesteins. Auch für diesen Parameter lassen sich wiederum exakte Grenzbedingungen definieren.

Vor dem Hintergrund dieser komplexen Fragestellung können im Rahmen dieses Berichtes zur Übersichtsbewertung potentieller Wirtsgesteine lediglich großregional anwendbare und kartierbare Kriterien berücksichtigt werden. Die Vielzahl der übrigen Faktoren, die eine mögliche Radionuklidfreisetzung und deren

Transport in der Geosphäre beeinflussen können, wie Wärmeleitfähigkeit, Grundwasserzusammensetzung, geochemische Verhältnisse etc. bleiben unberücksichtigt, da sie nur für kleinere Regionen bzw. für konkrete Standorte exakt analysierbar bzw. einzuschätzbar sind.

3.2 Vergleich der Eigenschaften potentieller Wirtsgesteine

In den internationalen Endlagerkonzepten werden Tongesteine, Kristallingesteine und Steinsalz am häufigsten als geologische Barriere aufgeführt. Bei der Wahl der potentiellen Wirtsgesteine werden neben dem Vorkommen und den Kenntnissen über die geologischen Formationen im Wesentlichen die endlagerrelevanten Eigenschaften der Gesteine berücksichtigt (Tab. 1).

Tab. 1: Endlagerrelevante Eigenschaften potentieller Wirtsgesteine

Eigenschaft	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	bruchhaft
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) gering (geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	unlöslich	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperatur-- empfindlichkeit	gering	hoch	gering

Aufgrund jahrzehntelanger anwendungsbezogener Forschung wurde in Deutschland ein umfangreiches Wissen zu allen endlagerrelevanten Eigen-

schaften der **Salzgesteine** und der Salzformationen erarbeitet. Unter natürlichen Lagerungsbedingungen besitzt Steinsalz eine sehr geringe Durchlässigkeit gegenüber Gasen und Flüssigkeiten, eine hohe Wärmeleitfähigkeit sowie viskoplastische Eigenschaften, wodurch Hohlräume im Gebirge geschlossen werden können. Aufgrund dieser günstigen Eigenschaften ist Steinsalz besonders als Wirtsgestein für wärmeentwickelnde hochaktive Abfälle (HAW) sehr gut geeignet.

Tonformationen haben als abdeckende, dichte Schichten z.B. für KW-Vorkommen ihre langfristige Wirksamkeit als geologische Barriere nachgewiesen. In der Natur existieren unterschiedliche Typen, vom plastischen Ton bis stark verfestigtem Tonstein mit z. T. erheblichen Unterschieden im Verformungsverhalten, der Temperaturempfindlichkeit und der Gebirgsstabilität. Grundlagenorientierte Forschung sowie endlagerrelevante mineralogische, geochemische und geotechnische Untersuchungen an Tonsteinen stehen jedoch erst am Anfang. Die bisher bekannten endlagerrelevanten günstigen Eigenschaften von Ton und Tongesteinen sind Sorptionsfähigkeit, Wasseraufnahme- und Quellvermögen, Plastizität und geringe Durchlässigkeit. Ton/Tonsteine können zudem homogen ausgebildet und gut prognostizierbar sein.

Kristallingesteine (hochmetamorphe und magmatische Gesteine) zeichnen sich besonders durch ihre hohe Festigkeit und Hohlraumstabilität sowie durch ihre geringe Temperaturempfindlichkeit aus. In ungeklüftetem Zustand sind kristalline Gesteine nahezu undurchlässig. Auch das Lösungsverhalten ist für die Endlagerung günstig. In geklüftetem Zustand können Kristallingesteine jedoch oft stark wasserführend sein. In diesem Fall können sie allein keinen vollständigen und dichten Einschluss der Abfälle gewährleisten.

Die Endlagerkonzepte im Salz, Tonstein und in Kristallinformationen sind aufgrund der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften ebenfalls unterschiedlich (Tab. 2). Das Endlagerkonzept für **Salzgesteine** basiert auf dem vollständigen Einschluss der Abfälle aufgrund der Undurchlässigkeit und der Kriecheigenschaft des Salzes. Dabei liegen Erkenntnisse aus jahrzehntelangen umfangreichen For-

schungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Bergbauerfahrungen vor. Eine umfassende Wissensbasis der Eigenschaften der Salzgesteine sowie erprobte Erkundungsmethoden und -verfahren sind vorhanden.

Im Vergleich zum Salz sind die Kenntnisse über **Tonformationen** gering. Beim Endlagerkonzept mit Tonformationen als Wirtsgestein darf die maximale Gebirgstemperatur 100°C nicht überschreiten, da sich bei höheren Temperaturen die günstigen physikalischen Eigenschaften der Tonminerale verschlechtern (Vergleich Salz: 200°C). Dies hat eine längere Zwischenlagerzeit, ein anderes Endlagerdesign mit erhöhtem Platzbedarf sowie ein anderes Behälterkonzept zur Folge. Bereits in moderater Tiefe sind Sicherungsmaßnahmen (Spritzbeton + Ankerung) für die untertägigen Hohlräume notwendig.

Tab. 2: Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

Endlagerkonzept	Steinsalz	Ton/Tonstein	Kristallingestein
Einlagerungssohle	900 m	500 m	500 -1200 m
Lagerungstechnik	Strecken und tiefe Bohrlöcher	Strecken bzw. kurze Bohrlöcher	Bohrlöcher
Auslegungs-temperatur	max. 200°C	max. 100°C	max. 100°C
Versatzmatrial	Salzgrus	Bentonit	Bentonit
Zwischenlagerzeit (BE u. HAW-Kokillen)	min. 15 Jahre	min. 30-40 Jahre	min. 30-40 Jahre
Streckenausbau	nicht erforderlich	erforderlich, ggf. sehr aufwändig	nur z. T. erforderlich
Behälterkonzept	vorhanden	neu zu entwickeln	Für Skandinavien vorhanden
Bergbauerfahrung	sehr groß (Salzbergbau)	kaum	sehr groß (Erzbergbau)

Bei der Endlagerung in **Kristallingesteinen** ist aufgrund des geklüfteten und gegebenenfalls wasserführenden Wirtsgesteins der Nachweis der Funktionstauglichkeit der technischen und geotechnischen Barriere konzeptführend. Die geologische Barriere bildet dabei die geologisch, gebirgsmechanisch und geochemisch stabile Umgebung. Aufgrund des Einsatzes von Bentonit als Versatzmaterial darf die Temperatur auch beim Kristallinkonzept 100°C nicht überschreiten. Einlagerungsräume und Strecken im Kristallingestein sind im Allgemeinen standsicher und müssen nur in geklüfteten und gestörten Bereichen zum Teil ausgebaut werden.

Generell gilt, dass der Kenntnisstand über die Salzvorkommen im Vergleich zu dem der Ton- und Kristallinvorkommen in Deutschland erheblich größer ist. Um eine Angleichung des Kenntnisstandes zu erreichen, müssen noch viele Jahre an Forschungsarbeit investiert werden. Davon unabhängig können Salzgesteine jedoch als die beste Option eingestuft werden, wenn das Gewicht auf den vollständigen Einschluss der Abfälle (Nullfreisetzung) und die Unabhängigkeit von aufwändigen technischen Lösungen gelegt wird.

4 Kriterien für die Auswahl potentieller Wirtsgesteine

In zahlreichen Ländern wurden inzwischen Endlagerkonzepte erarbeitet, die aufgrund der stark unterschiedlichen geologischen Verhältnisse länderspezifische Züge tragen und stark voneinander abweichen können. Allen gemein ist das angestrebte Ziel einer langzeitlich sicheren Endlagerung.

Schon in den frühen siebziger Jahren begann eine intensive Debatte über Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten. Von den Ländern der Europäischen Gemeinschaft [EG] (heute Europäische Union [EU]) wurden bereits 1976 Richtlinien erarbeitet, die als Grundlage für eine homogene Darstellung der potentiellen Lagerungsmöglichkeiten radioaktiver Abfälle im Gesamtbereich der EG dienen sollten.

1977 wurden von der International Atomic Energy Agency (IAEA) die Ergebnisse dieser Diskussion zusammengefasst und publiziert. Die wichtigsten in diesem Bericht aufgeführten geologischen Rahmenbedingungen sind:

- Räumliche Verteilung des Gesteins (Geometrie, Struktur, Homogenität)
- Bedeutung der Hydrogeologie (Gesteinsparameter wie Porosität und Permeabilität, Dispersivität sowie die hydrogeologische Situation)
- Langzeitstabilität des Gesteins (einschließlich felsmechanischer und seismischer Aspekte)
- Geomechanische Parameter

Diese Grundanforderungen sind bis heute gültig, jedoch sind im Laufe der Zeit Ergänzungen hinzugekommen. 1979 (MATHER et al. 1979, BONNE et al. 1979) wurden diesen mehr qualitativen Kriterien einige quantitative Angaben hinzugefügt. Z. B. wurde als vernünftige Tiefe der Wert 500 m vorgeschlagen, der einen ausreichenden Erosionsschutz bietet. Für die Mächtigkeit des Wirtsgesteins wird als Minimalwert 100 m genannt.
In zahlreichen internationalen Publikationen wurden die von der IAEA formulierten Kriterien präzisiert, erweitert und den nationalen Gegebenheiten angepasst. Dabei wurden zunehmend standortspezifische Faktoren berücksichtigt und die entsprechenden Kriterien für die Standortsuche in den jeweiligen Ländern genutzt.
Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe hat im Rahmen des EG-Programms „Bewirtschaftung und Lagerung radioaktiver Abfallstoffe“ auf der Grundlage des Studienvertrages 025-76-9 WASD mit Wirkung vom 31. 12. 1976 einen Katalog geologischer Formationen erstellt, die sich für die Endlagerung radioaktiver, insbesondere hochaktiver Abfälle eignen könnten (KOCKEL & ROLAND 1977).

Im folgenden werden die Kriterien aufgeführt und bewertet, die aus Sicht der BGR für eine Auswahl von potentiellen geologischen Strukturen herangezogen werden müssen.

4.1 Ausschlusskriterien

4.1.1 Großräumige Vertikalbewegungen

Die Endlagerregion darf keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter im Mittel pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum aufweisen.

Großräumige Hebungen zählen zu den vertikalen Krustenbewegungen, die ebenso wie die endogene Störungstektonik durch die Dynamik des Erdinnern gesteuert werden. Sie unterscheiden sich von den engräumigen anthropogenen Bewegungen, deren Ursachen in der Regel bekannt sind. Die vertikalen Krustenbewegungen können wegen ihrer Weitspannigkeit bruchlos erfolgen oder an tektonische Schollen (Gräben und Horste) gebunden sein. Aus diesem Grunde weisen die Untersuchungsmethoden der rezenten vertikalen Krustenbewegung sowie der rezenten Störungstektonik viele Gemeinsamkeiten auf.

Die Kenntnis der rezenten, d. h. in der Gegenwart ablaufenden tektonischen Bewegungen ist für die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers von entscheidender Bedeutung. Da die geologischen Prozesse in der Regel sehr langsam ablaufen und sehr geringe Geschwindigkeiten aufweisen (< 5 mm/Jahr bis <1 mm/Jahr) müssen die Beobachtungszeiträume ausreichend lang sein, um überhaupt signifikante Aussagen treffen zu können. Neben den traditionellen geologisch-geomorphologischen Geländeuntersuchungen kommen heute verstärkt geophysikalische und geodätische Messmethoden zum Einsatz. Dennoch sind unzweifelhafte Belege für rezente tektonische Bewegungen z. B. in quartären Lockersedimenten sehr selten. In der Regel werden die Spuren neotektonischer Bewegungen in unserem Klima an der Oberfläche sofort wieder überprägt.

Relativ brauchbare Ergebnisse liefern die Gewässernetzanalyse sowie die Untersuchung der Erosions- und Akkumulationsformen (Terrassen) einzelner Flussabschnitte. Es lassen sich daraus großräumige Vertikalbewegungen und Schollenkippungen sowie Verstellungen an konkreten Störungsflächen ableiten. Seit Mitte der 60er Jahre wurden geodätische Nivellementsmessungen vor allem in Ostdeutschland (BANKWITZ 1965) durchgeführt und hinsichtlich der rezenten vertikalen Krustenbewegungen ausgewertet. Inzwischen gibt es von nahezu allen europäischen Ländern nationale Karten der rezenten vertikalen Krustenbewegungen, die jedoch auf sehr heterogener Datenbasis (unterschiedliche

Dichte der geodätischen Messpunkte und unterschiedliche Bezugsniveaus) beruhen. Der qualitative Aussagewert der Karten ist deshalb sehr unterschiedlich und erschwert das Zusammenfügen zu einer überregionalen Karte (FRISCHBUTTER & SCHWAB 1995, FRISCHBUTTER 2001). In Deutschland existieren für Teilregionen Berechnungen und Karten der rezenten vertikalen Krustenbewegungen, die als Bezugsniveaus teils terrestrische Fixpunkte und teils das mittlere Meeresniveau benutzen (IHDE et al. 1987, LEONHARD 1988, MÄLZER 1990, GUBLER et al. 1992). Für den Raum Niedersachsens wurden bisher keine Daten publiziert.

Über den Aussagewert der Messergebnisse wird in der Fachwelt häufig diskutiert. Als Argumente werden die geringe Geschwindigkeit der Bewegungen, ihr nicht-linearer Ablauf, die Kürze der Beobachtungszeit und die Überlagerung durch andere Ursachen angeführt.

Trotz dieser Einschränkungen werden die Nivellements im Allgemeinen als unverzichtbare Notwendigkeit für die Beurteilung neogeodynamischer Aspekte betrachtet.

Die jüngste publizierte Karte der rezenten vertikalen Krustenbewegung wurde im Rahmen des IGCP-Projektes Nr. 346 „Neogeodynamica Baltica“ generiert (FRISCHBUTTER 2001). Danach gehört Deutschland zu einem ausgedehnten Senkungsfeld, das zwischen dem durch glazialisostatischem Aufstieg mit Hebungsraten von >+8 mm/a charakterisierten Fennoskandischen Block und dem Hebungsgebiet der jungen, noch im Aufstieg befindlichen Orogengebiete der Alpen und Karpaten mit Hebungsraten von >+1,5 mm/a liegt (Anl. 2). Die isostatische Null-Linie quert derzeit das südliche Ostseegebiet von Nord-Jütland über Schonen in Richtung Süd-Lettland. Südlich folgt ein weites Areal differenzierter rezenter Vertikalbewegungen, in dem offensichtlich Absenkung vorherrscht. Lediglich in einer schmalen SSW – NNE streichenden Zone zwischen dem deutsch-belgisch-luxemburgischen Ländereck und dem nordwestlichen Teutoburger Wald werden Werte zwischen ±0 und + 0,5mm/a erreicht. Für das Feldberggebiet des sich aktiv heraushebenden Schwarzwaldes ergaben Präzisionsnivellements Hebungsgeschwindigkeiten von + 0,1 – +0,2 mm/a. Für die Hochalpen und Teile des Vorlandes, die in Anlage 2 nicht dargestellt sind, finden

heute Hebungen mit maximalen Geschwindigkeiten bis +1,5 mm/a statt (NAGRA 1988).

Betrachtet man jedoch kleinräumige Regionen, so ergeben sich differenziertere Bilder, die in dieser geglätteten Karte nicht abgebildet werden.

So setzt sich die junge Heraushebung der Mittelgebirge offenbar nicht überall bis in die Gegenwart hinein fort. Z. B. hebt sich das Rheinische Schiefergebirge nicht einheitlich als Block, sondern örtlich unterschiedlich heraus. Hebungszonen sind nach MÄLZER et al. (1983) u. a. die nördliche und südöstliche Eifel, das Bergische Land und die Umgebung von Koblenz. Die Hebungsbeträge erreichen bis zu +0,5 – +1 mm/a.

Die anhand hydrographischer, geomorphologischer und geologischer Beobachtungen ermittelten Werte der vertikalen Krustenbewegungen beziehen sich in der Regel auf einzelne regionale geologische Einheiten. Ihre Genauigkeit hängt in entscheidendem Maße von der Datierbarkeit der geologischen Bezugshorizonte ab. Meistens ergeben sich Mittelwerte über längere geologische Zeiträume, die nicht mit den „Momentaufnahmen“ der geodätischen Nivellementsmessungen vergleichbar sind.

So ermittelten MEYER & STETS (1998) aus Höhenanalysen bestimmter Terrassen des Rheins und seiner Nebenflüsse epirogene Hebungen des Rheinischen Schiefergebirges in den letzten 800 000 Jahren von ca. 200 m (+0,25 mm/a). Die Hebungen der Mittelgebirge seit dem Oligozän haben LUDWIG & SCHWAB (1995) in einer Karte dargestellt und quantifiziert. Sie kommen dabei auf Werte von bis zu 900 m Hebung im Erzgebirge seit Beginn des Rupel (+0,027 mm/a). Für das Hohe Venn geben BLESS et al. (1990) eine Hebung seit dem Maastricht von insgesamt 675 m (+0,009 mm/a) bzw. 500 m seit dem Oligozän (+0,015 mm/a) an. Für den Harz wird für die letzten 20 000 Jahre eine Hebung von 20 m (+1 mm/a) angenommen, mit der die Tiefenerosion der Flüsse am Harznordrand Schritt halten konnte (HÖVERMANN 1950).

Aufgrund der Datenlage über die rezenten vertikalen Krustenbewegungen können außerhalb des Hochalpengebietes in Deutschland keine Regionen für die Errichtung eines Endlagers ausgeschlossen werden. Es muss jedoch versucht werden, diese Karte weiter zu präzisieren.

4.1.2 Seismische Aktivitäten

Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149.

Die Beurteilung der seismischen Gefährdungen oder des seismischen Risikos für Deutschland basiert auf einer Analyse der Erdbeben, die in den letzten 500 bis 1000 Jahren hier sowie in den benachbarten Ländern in einem Umkreis von mindestens 300 km außerhalb der Grenzen Deutschlands aufgetreten sind. Die Daten sind in Erdbebenkatalogen und Karten zusammengefasst (LEYDECKER & HARJES 1978, LEYDECKER 1980, LEYDECKER 1986, GRÜNTHAL 1988). Sie bilden die Grundlage für die DIN 4149 bzw. für eine probabilistische Gefährdungskarte (GRÜNTHAL et al. 1998), in der die Gebiete dargestellt sind, in denen die angegebenen Intensitäten innerhalb von 50 Jahren mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% erreicht oder überschritten werden.

Nach den rezenten seismischen Beobachtungen und Auswertung der historischen Erdbeben in Deutschland wurden in der „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands“ (DIN 4149) Zonen entsprechend der in einem Zeitraum von ca. 500 Jahren maximal zu erwartenden Intensitäten abgegrenzt (Anl. 3). Danach sind Erdbeben der Zone 1 besonders in SW-Deutschland, im Oberrhein-Graben sowie östlich des Schwarzwaldes zwischen Bodensee, Stuttgart und Frankfurt a. M. mit der Region Hohenzollern- und Lauchertgraben, in der Niederrheinischen Bucht, wo mit dem Beben von Roermond am 13.04.1992 mit einer Magnitude von 5,8 und einer Herdtiefe von 14 – 18 km das stärkste Beben der jüngsten Zeit auftrat, sowie im Bereich des Geraer Vorsprungs zu erwarten.

Das gesamte Norddeutsche Tiefland ist das Areal mit der geringsten seismischen Aktivität Deutschlands. Dennoch zeigen neben einigen unsicheren historischen Beben das Beben von Soltau am 02.06.1977 mit einer Magnitude von 3,7 und einem Hypozentrum in ca. 8 km Tiefe, das Beben von Wittenburg (SW Schwerin) am 19.05.2000 mit einer Magnitude von 3,1 und einer Herdtiefe von 20 km sowie das Beben von Rostock am 21.07.2001 mit einer Magnitude von 3,5 und einer Herdtiefe in 9 km Tiefe, dass diese Region keinesfalls als aseismisch anzusehen ist und auch stärkere Beben erwartet werden müssen. Sie werden aber mit hoher Wahrscheinlichkeit für den zu betrachtenden Zeitraum keine Relevanz für die Anlage eines Endlagers erreichen.

4.1.3 Aktive Störungszonen

Im Endlagerbereich dürfen keine aktiven Störungszonen vorliegen.

Aussagen über Aktivitäten an Störungszonen sind entweder über die mit geologischen Methoden ermittelten Letztbewegungen oder über geodätische Messungen möglich.

Altersangaben von Störungen sind in der Regel problematisch, da sie von den Datierungsmöglichkeiten abhängen. Ebenso wie die älteste datierbare Bewegung eine noch ältere Erstanlage nicht ausschließt, stellen die ermittelten Letztbewegungen lediglich die jüngsten Datierungsmarken dar, aber nicht zwangsläufig die tatsächlich jüngste Bewegung. Je näher die Datierung allerdings an die Jetztzeit heranreicht, umso sicherer kann auch von rezenten Aktivitäten ausgegangen werden.

Um mit geodätischen Methoden Aussagen zur rezenten Störungsaktivität machen zu können, sind im Nahfeld von Störungen Wiederholungsnivellements und –triangulationen mit einem sehr dichten Messnetz für die Ermittlung möglicher rezenter vertikaler und horizontaler Krustenbewegungen erforderlich. Aber auch hier werden die Ergebnisse konträr diskutiert. Unstrittig ist, dass endogen verursachte rezente vertikale und horizontale Krustenbewegungen auch in relativen Stabilgebieten auftreten und mit den genannten Methoden messbar sind (ELLENBERG 1988, BANKWITZ et al. 1993). Dabei können im Störungsbereich höhere Geschwindigkeiten gemessen werden, als im regionalen Umfeld. So liegen beispielhaft detaillierte Kenntnisse zu den rezenten Bewegungsaktivitäten der Finnestörung im Thüringer Becken vor (BANKWITZ et al. 1993). Die sichersten Aussagen können dann getroffen werden, wenn das gesamte Spektrum der methodischen Möglichkeiten an einer Störung abgearbeitet wird. Dies ist jedoch nur in Ausnahmefällen der Fall.

Für den nordwestdeutschen Raum mit Teilen der deutschen Nordsee zwischen 6° 40’ östl. Länge im W und 12° östl. Länge im E und von der deutsch-dänischen Grenze im N und 52° nördlicher Breite im S wurde eine detaillierte Analyse aller kartierten Sockelstörungen hinsichtlich ihrer Letztbewegungen im Tertiär durchgeführt (BRÜCKNER-RÖHLING et al. 2002). Dabei konnte festgestellt werden, dass sich in den vergangenen 65 Mio. Jahren nur ca. 10% aller im Sockel ausgebildeter Störungszonen bewegte. Die Störungen, auf die sich die

Bewegungen während des gesamten Tertiär oder einzelner Teilstufen konzentrierten, waren bereits vor dem Tertiär angelegt. Da in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes jedoch die jüngsten Tertiärstufen (Obermiozän und Pliozän) und das Altpleistozän als Indikatorablagerungen fehlen, können für diesen von ca. 5 Mio. Jahre bis 0,8 Mio. Jahre vor jetzt reichenden Zeitabschnitt keine Aussagen getroffen werden. Für den jüngsten Zeitabschnitt, das Mittelpleistozän und Holozän sind sockelinduzierte Störungen im festländischen Teil des Untersuchungsgebietes bisher in keinem Fall mit Sicherheit nachgewiesen worden.

Auch wiederholte Versuche, aus der Interpretation von Luft- oder Satellitenbildern beweisbare tektonische Bewegungen im Quartär abzuleiten, führten nicht zu eindeutigen Aussagen. Dies ist in der Niederrheinischen Bucht sowohl auf deutschem wie auf niederländischem und belgischem Territorium ganz anders. Hier gelang zu wiederholten Malen der Nachweis quartärer Bewegungen an Hauptstörungen wie der Peelhorst-Randstörung. Auch aus der deutschen und niederländischen Nordsee sind Störungen bekannt, die als sockelinduziert angesehen werden müssen und die außer dem hohen Tertiär auch noch das Quartär durchsetzen.

Von den markanten Störungen des Mitteldeutschen Hauptabbruches, die die känozoischen Ablagerungen der NE-Deutschen Senke gegen die Grundgebirgsschollen Mitteldeutschlands begrenzen, konnten trotz hervorragender Aufschlüsse in der Lausitz endogentektonische Bewegungen an Parallelstörungen des Lausitzer Hauptabbruches nur bis in das Unter Pliozän nachgewiesen werden (NOWEL et al. 1994). Die Schichtverstellungen in den quartären Ablagerungen werden als glazigene Lagerungsstörungen gedeutet.

Am Haldenslebener Abbruch im Nahfeld des Endlagerstandortes Morsleben, der ebenfalls zum System des Mitteldeutschen Hauptabbruches gehört, wurde nach ZIERMANN et al. (1998) für den Zeitraum Postoligozän bis zum Beginn der Ablagerung der präglazialen Kiese ein Bewegungsbetrag von 15 – 23 m und für den Zeitraum vom Präglazial bis zur Elstervereisung von 50 – 60 m ermittelt.

Die angeführten Beispiele sollen zeigen, dass es äußerst schwierig und nur in Ausnahmefällen möglich ist, für Störungszonen für den geforderten Sicherheits-

zeitraum von 1 Mio. Jahren belastbare Angaben über rezente Störungsaktivitäten zu finden. Da man aus den genannten Gründen im Umkehrschluß aus dem Fehlen von Hinweisen auf Störungsaktivität nicht unbedingt auf zukünftige Inaktivität schließen kann, sollte eine praktikable Lösung gefunden werden. Diese könnte so aussehen, dass generell ein festzulegender Sicherheitsabstand von einigen Kilometern zu einer potentiell aktiven Störungszone eingehalten wird.
Als potentiell aktiv sollten alle jene Störungszonen angesehen werden, für die es postunteroligozän, d. h. in neotektonischer Zeit Hinweise auf endogene Bewegungen gibt. Die wichtigsten Störungen dieser Kategorie sind in Anl.4 dargestellt.

4.1.4 Vulkanische Aktivität

In der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen.

Die Gebiete mit nachweislich quartärem Vulkanismus gehören zu den jungen Vulkangebieten, in denen der Vulkanismus bereits im älteren Tertiär bzw. der Oberkreide einsetzte. Sie nehmen deshalb eine weitaus größere Fläche ein, als die reliktischen Vorkommen, die im Pleistozän gefördert wurden und in denen die spätvulkanischen Aktivitäten heute noch andauern.
Während des Quartärs war der Vulkanismus nur noch in der Eifel, im westlichen Westerwald und im Neuwieder Becken aktiv (Anl. 3, Gebiet 2). Weitere quartäre Vulkanite findet man in Nordböhmen, im westlichen Egergraben bei Cheb [Eger], die bis in das Vogtland hineinreichen.
Von den Vulkaniten der Eifel nehmen die des Quartärs die größte Fläche ein. Sie sind besonders in der Osteifel, in der Umgebung des Laacher Sees und im Neuwieder Becken sowie im westlichen Westerwald zwischen Koblenz, Montabaur und Andernach verbreitet.
Die jüngsten Gesteine, die phonolithischen Bimstuffe des Laacher-See-Gebietes, wurden in mehreren Schüben vor ca. 11.200 Jahren gefördert.
Das Ausschlussgebiet liegt im Bereich des Rheinischen Schiefergebirges. Da der nördlichste Ausläufer des quartären Vulkanismus mit dem Schlackenvulkan des Rodderberges bis südlich Bonn reicht (HENNIGSEN & KATZUNG 2002), sollte der potentiell gefährdete Bereich etwas größer gefasst werden als in Abb. 4.2 des AKEND-Abschlußberichtes.

Das zweite Ausschlussgebiet liegt im Vogtland und gehört zu der erzgebirgisch streichenden nordböhmischen Vulkanprovinz. In ihrem Zentrum liegt der Eger-Graben, der vom Weidener Becken und südlichen Fichtelgebirge im SW bis in die Oberlausitz im NE reicht. Eruptionszentren waren der Stratovulkan des Duppauer Gebirges sowie das tschechische Mittelgebirge um Most und Teplice. Mit der Paläozän-Phase (65 – 60 Mio. Jahre) beginnend, war der Eger-Graben besonders im mittleren Tertiär (Oligozän-Phase 35 - 17 Mio. Jahre) Schauplatz eines heftigen basaltisch-phonolithischen Vulkanismus, der mit der Miozän-Phase (9 Mio. Jahre) im Tertiär ausklang. Nach einem fast 10 Mio. Jahre dauernden Zeitabschnitt der Inaktivität lebte der Vulkanismus im Quartär (2,8 – 0,8 Mio. Jahre) erneut auf, wenngleich hier das Ausmaß der jüngsten vulkanischen Tätigkeit gegenüber der Eifel sehr gering ist (DUDEK et al. 1984). In der Gegend von Eger wurden lediglich zwei kleine Vulkane aktiv.

Dass die vulkanischen „Herde“ in der Tiefe längst nicht ausgekühlt sind, belegen in der Gegenwart die rasche Zunahme der Wärme mit der Tiefe sowie zahlreiche postvulkanische Erscheinungen in Form von Gasaushauchungen (vorwiegend Kohlendioxid), von Thermalwasser bzw. Mineralquellen und sogar Geysire.

Beide Gebiete liegen – wie die weiteren Ausführungen zeigen werden – weit außerhalb der Verbreitungsgebiete der potentiellen sedimentären Wirtsgesteine. Lediglich bei einer Standortsuche im Kristallin des Fichtel- und Erzgebirges wäre das Vulkangebiet des südwestlichen Eger-Grabens zu berücksichtigen.

4.1.5 Grundwasseralter

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich dürfen keine jungen Grundwässer vorliegen. Die Grundwässer dürfen von daher kein Tritium und/oder C-14 enthalten.

Angaben zum Grundwasseralter liegen nur in Ausnahmefällen vor. Sie können deshalb in einer Übersichtsbewertung nicht berücksichtigt werden. Das Kriterium gilt jedoch für Daten, die während einer detaillierten Standortuntersuchung ermittelt werden.

4.2 Mindestanforderungen

Bei allen bisherigen Analysen der BGR, die das Ziel hatten, potentielle Endlagerstandorte oder Standortregionen im Salz und im Kristallin auszuweisen,

wurden Mindestanforderungen formuliert, ohne die eine Auswahl gar nicht möglich gewesen wäre. Da in der Vergangenheit kein verbindliches nationalen Regelwerk vorlag und ein solches auch gegenwärtig noch nicht existiert, orientierten sich die bisher verwendeten Mindestanforderungen an internationalen und nationalen Empfehlungen und berücksichtigten einen auf langjährige Erfahrungen beruhenden „vernünftigen„ geowissenschaftlichen Sachverstand.

Die z. Z. in Bearbeitung befindliche „Regionale Tonstudie“ orientiert sich weitgehend an die im Abschlußbericht des AKEND vorgeschlagenen Mindestanforderungen, die auf den früher verwendeten Kriterien basiert. Das angestrebte Ziel, Wirtsgesteine bzw. Wirtsgesteinsregionen auszuwählen, wird nach den Empfehlungen des AKEND lediglich über unterschiedliche Verfahrensschritte erreicht.

Im Folgenden werden deshalb die Definitionen aus dem AKEND-Abschlußbericht übernommen. Abweichungen zu den bei der Untersuchung der Salzformationen in Deutschland zu Grunde gelegten Mindestanforderungen werden gesondert begründet.

4.2.1 Gesteinsdurchlässigkeit

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10}m/s zugeordnet werden kann.

Dieser geringe Durchlässigkeitswert wird unabhängig vom Diagenesegrad von den Salzgesteinen, vom Ton/Tonstein sowie vom Tonmergel/Tonmergelstein erfüllt. Von den Kristallingesteinen können besonders homogene, ungestörte granitische Intrusivkörper ähnlich niedrige Durchlässigkeiten aufweisen. In den oberflächennahen Bereichen der meisten Granitkörper ist jedoch ein dichtes Abkühlungskluftsystem ausgebildet, auf dem Wasser zirkuliert. In größerer Tiefe können diese Klüfte zwar weitgehend geschlossen sein, sicher prognostizierbar sind die Bereiche geringer Durchlässigkeit jedoch nicht, da tektonisch entstandene Trennflächen als potentielle Fließwege für Wasser noch hinzukommen.

Auch andere Sedimentgesteine können bei extremer diagenetischer Verfestigung und Zementation des primären Porenraumes sehr geringe Durchlässigkeiten aufweisen. Diese erreichen sie allerdings in sehr großen Tiefen, die für die Errichtung eines Endlagers nicht in Frage kommen. Sind sie dagegen durch

spätere Hebung und Abtragung der Überdeckung in vertretbare Tiefen aufgestiegen, kommt es in der Regel zu sekundären Kluftbildungen, die die Durchlässigkeit wieder erhöhen und darüber hinaus schwer prognostizierbar sind. Berücksichtigt man die aufgeführten Gesteinseigenschaften, verbleiben also Salzgesteine sowie Ton/Tonsteine und Tonmergel/Tonmergelsteine mit potentiell ausreichend geringer Gesteinsdurchlässigkeit für die Endlagerung.

Von den Salzgesteinen erreicht in Deutschland erwiesenermaßen das Steinsalz der Staßfurt-Folge die erforderlichen Mächtigkeiten. Auch in den anderen Parametern wie Wärmeleitfähigkeit, Löslichkeit u. a. weist Steinsalz die besten Werte auf (vgl. Kap. 3.2).

Tonmergel bzw. Tonmergelsteine zeichnen sich gegenüber weitgehend reinen Tonen/Tonsteinen durch einen höheren Kalkgehalt aus. Dieser Kalkanteil mindert günstige Endlagereigenschaften des Tons, so dass dem reinen Ton/Tonstein der Vorzug zu geben ist.

4.2.2 Mindestmächtigkeit

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird hier entsprechend der Definition des AkEnd (2002) verstanden. Die Mindestmächtigkeit wird bei den in Deutschland in Frage kommenden Ton-/Tonstein-Formationen großflächig erreicht und überschritten. In den unterschiedlichen stratigraphischen Salzformationen in Deutschland wird 100 m mächtiges weitgehend reines Steinsalz in der Regel nur in der Staßfurt-Serie des Zechsteins in flacher Lagerung sowie in Salzstrukturen angetroffen (vgl. Kap. 5.1.2.2). In den Salzstrukturen ist es durch Salzzufluss zu erheblichen Mächtigkeitsanschwellungen gekommen. Unter Berücksichtigung des komplizierten Baus muss bei Salzstrukturen diese Mindestanforderung jedoch modifiziert werden. In der Studie von Kockel & Krull (1995) wurde daher von einer Mindestmächtigkeit von 500 m ausgegangen, die sich aus einer Mindestschwebe von 300 m, einer Mächtigkeit im Einlagerungsbereich von 100 m und einer Liegendmächtigkeit von ebenfalls 100 m errechnete.

4.2.3 Mindestteufe

Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.

Das Kriterium dieser Mindestanforderung kann in den Tonformationen problemlos angewendet werden. In Salzstrukturen ist es zweckmäßig, als Bezugsniveau für die Mindestteufe den Salzspiegel über der mindestens 300 m mächtigen Salzschwebe zu wählen. Da diese Salzschwebe sowohl die Funktion des Wirtsgesteins als auch die der geologischen Barriere erfüllt, reicht eine flächige Mindestüberdeckung von 200 m aus (Salzstudie BGR, KOCKEL & KRULL 1995). Diese flächig mindestens 200 m mächtigen Deckschichten sollten ausreichende wasserstauende Horizonte, wie Ton- oder Geschiebemergelschichten enthalten, die einen Zutritt von Süßwasser zum gesättigten Salzspiegel weitgehend behindern.

4.2.4 Maximalteufe

Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1500 m liegen.

Bei der Betrachtung der Maximalteufe eines Endlagerbergwerkes ist neben bergbautechnischen und damit felsmechanischen Aspekten vor allem die Temperatur im Einlagerungsbereich zu berücksichtigen. Als Maximaltemperatur im Einlagerungsbereich sollten 50° C nicht überschritten werden. Die nach JUNG et al. (2002) heute in Norddeutschland auftretenden Temperaturen in 1000 m Tiefe unter NN schwanken im Mittel zwischen 40° C und 50° C (Anl. 5). Lokal treten Abweichungen mit Werten zwischen 30°C und 40°C sowie 60°C und 70°C auf. In weiten Teilen der Süddeutschen Großscholle und des Oberrhein-Grabens liegen die Werte deutlich höher.

Nach der Temperaturbelastung wird ein Endlagerbergwerk daher in der Regel nicht in wesentlich größerer Tiefe als 1000 m errichtet werden.

Für Tonsteine stellen 1000 m allein schon aus felsmechanischer Sicht einen Maximalwert dar, der eher unterschritten werden sollte (vgl. Kap. 3.2).

4.2.5 Flächenbedarf

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (z. B. 3 km² im Salz bzw. 10 km² in Ton oder Granit).

Der geforderte Mindestflächenbedarf von 10 km² ist für Tonformationen akzeptabel. Allerdings sollte eine isolierte Tonlinse oder ein Erosionsrest von dieser Größe nach Möglichkeit gemieden werde, wenn größere geschlossene Verbreitungsgebiete zur Verfügung stehen.

Der geforderte Flächenbedarf im Salz scheint dagegen als erheblich zu niedrig angesetzt. Das benötigte maximale Bergwerksvolumen, das sich aus dem Bruttovolumen der radioaktiven Abfallmenge (einschließlich der Gebindevolumina) und den erforderlichen Bergwerksauffahrungen errechnet, muss in eine Aussage über eine in 300 m Tiefe unter dem Salzspiegel und 1000 m unter Flur benötigte Mindestfläche übersetzt werden. Hierfür wurden die in der KPE-Studie (KPE = Konsortium Planung Endlager) verwendeten Abmessungen zugrunde gelegt. Dort wurde – standortunabhängig – von einer Fläche von 900 x 6000 m = 5,4 km² ausgegangen. Da in jedem Salzstock mit Bereichen gerechnet werden muss, die bei der Auffahrung der Einlagerungsstrecken gemieden werden sollten – z. B. Hauptanhydrit, Kaliflöze, stark tektonisierte Bereiche etc. – und zu diesen Bereichen auch angrenzende Sicherheitsfesten einzuhalten sind, scheint ein Aufschlag von wenigstens 20 % erforderlich zu sein, was im Endlagerbereich einer Fläche von 6,5 km² entspricht. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Festen im Flankenbereich von 200 m ergibt sich ein Gesamtflächenbedarf von wenigstens 9 km². Mit diesem Wert wurde auch in der Salzstudie 1995 gearbeitet (KOCKEL & KRULL 1995).

4.2.6 Gebirgsschlaggefährdung

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgsschlaggefährdet sein.

Bergschlag oder Gebirgsschlag, bezeichnet das plötzliche Abplatzen von Gesteinsplatten in einem Hohlraum (z.B. Tunnel). Die abgelösten Platten nehmen typischerweise ein größeres Volumen ein als der Raum, aus dem sie heraus-

gebrochen sind, was auf eine beträchtliche Entspannungsdeformation schließen lässt.

Bei der Gebirgsschlaggefährdung spielt die Festigkeit, Gebirgsspannungszustand, das Spannungsverhalten und das Verformungsverhalten eine entscheidende Rolle (vgl. Kap. 3.2). Durch geeignete Gesteinsauswahl und Meidung von Regionen mit anormalen Spannungsbedingen (z.B. in Nähe aktiver Störungszonen) kann das Gebirgsschlagrisiko stark minimiert werden.

4.2.7 Langzeitsicherheit

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.

Zu den geologischen Ereignissen, die eine Langzeitsicherheit von einer Mio. Jahren gefährden könnten, zählen, Erdbeben, Vulkanismus, Erosion, Subrosion (im Salz) und Eis-Exaration. Durch den Ausschluss von Gebieten mit rezenten Hebungsraten von >1 mm/a (Anl. 2) sowie von potentiellen seismischen und vulkanischen Gefährdungsgebieten (Anl. 3) können die Ereignisse Erdbeben, Vulkanismus und Erosion als Gefährdungsmomente nach derzeitigem Ermessen ausgeschlossen werden.

Dem Phänomen der Subrosion wurde bei der Analyse der Salzformationen große Beachtung geschenkt. Die Ablaugung einer Salzlagerstätte bzw. eines Salzkörpers setzt ein, sobald die Salzgesteine mit dem Grundwasser in Berührung kommen. Die Ablösungsprozesse greifen je nach hydrogeologischer Position in unterschiedliche Teufen hinab. Über mächtigen Salzlagern bildet sich bei abnehmender Grundwasserzirkulation ein Gleichgewichtszustand der Ablaugung heraus. Hierbei sammelt sich über der Salzspiegeloberfläche konzentrierte Salzlösung an und vermindert eine weiter in die Tiefe greifende Ablaugung. Süßwasser bzw. ungesättigte Lösungen gelangen infolge ihres geringeren spezifischen Gewichtes nur noch bis an die morphologisch herausragenden Bereiche einer Salzlagerstätte, so dass eine progressive Nivellierung des Salzspiegelreliefs erzielt wird, bis die Ablaugung schließlich völlig zur Ruhe kommt.

5 Anwendung der Kriterien für die Auswahl untersuchungswürdiger Strukturen und Regionen in Deutschland

5.1 Salzformationen

Salzformationen sind lithostratigraphische Gesteinseinheiten, an deren Aufbau in unterschiedlichem Umfang Salzgesteine beteiligt sind. Sie sind in Deutschland in unterschiedlichen stratigraphischen Niveaus ausgebildet (Abb. 1). Das für die Endlagerung relevante Steinsalz kann in variierenden Mächtigkeiten am Aufbau einer Salzformation beteiligt sein.

Für die Auswahl untersuchungswürdiger Strukturen und Regionen in den Salzformationen Deutschlands liegen folgende Dokumentationen vor:

- Salzformationen außerhalb Niedersachsens (BEST et al. 1982)
- Salzstöcke in Niedersachsen (JARITZ 1983)
- Salzformationen in den Neuen Bundesländern (KRULL 1991)
- Salzformationen in den alten und neuen Bundesländern (KOCKEL et al. 1995)

Folgende Auswahlkriterien kamen zur Anwendung:

1. Sinngemäß mit den AKEND-Kriterien übereinstimmend:

- Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149.
- In der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss aus Gesteinstypen bestehen, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann.

2. Von den AKEND-Kriterien abweichend:

- *Das Salz muss eine Mindestmächtigkeit von 500 m aufweisen. Diese setzt sich zusammen aus einer Mindestmächtigkeit der Schwebe von 300 m, 100 m für die Auffahrung des Bergwerkes sowie 100 m im Liegenden.*
- *Die über dem Salzspiegel lagernden Sedimente sollten flächig mindestens 200 m mächtig sein und wasserstauende Horizonte enthalten.*

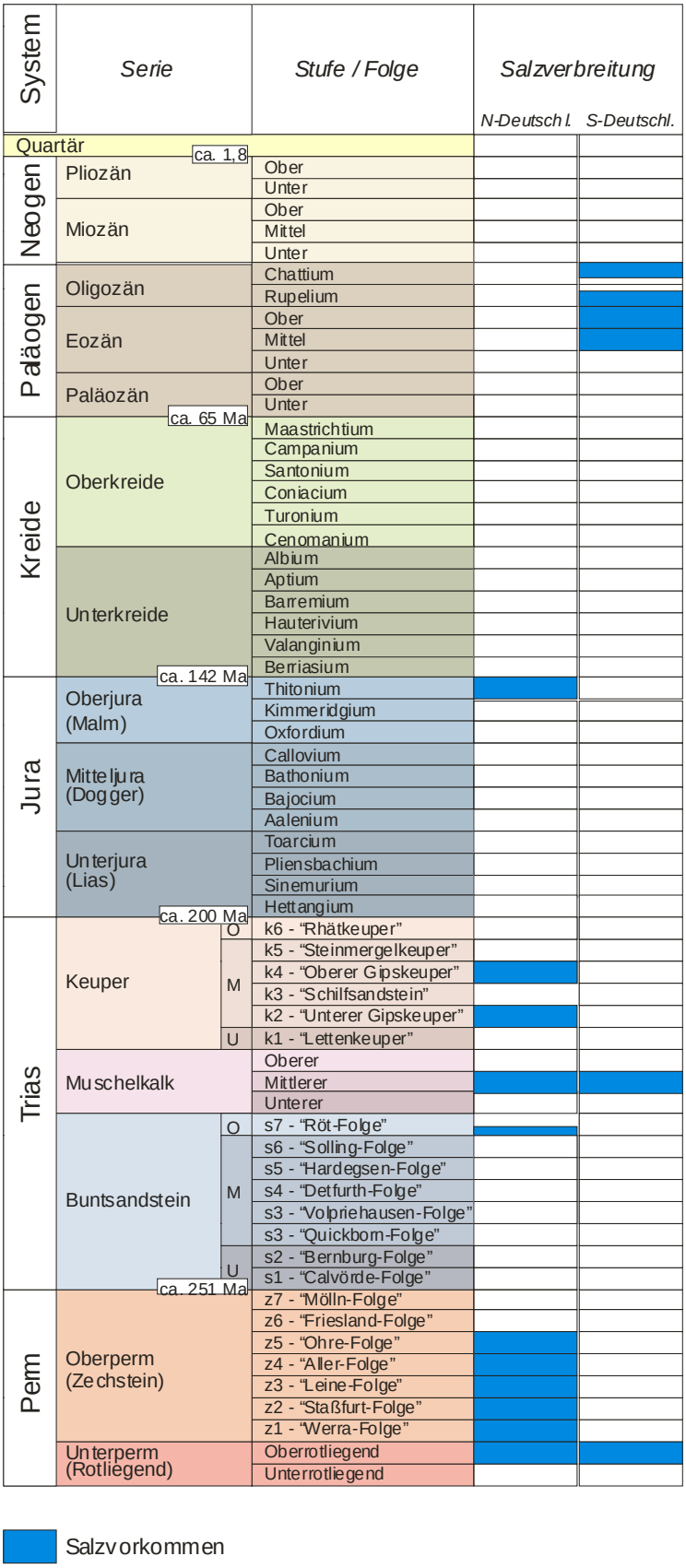


Abb. 1: Stratigraphische Position der Salzformationen in Deutschland

- *Die maximale Temperatur im Einlagerungsbereich sollte 50^{o} C nicht überschreiten. Da diese Temperatur in den meisten Regionen Norddeutschlands auf Grund der geothermischen Tiefenstufe und des regionalen Temperaturniveaus bei ca. 1000-1200 m erreicht wird, ist damit die Maximaltiefe des Einlagerungsbereiches definiert.*
- *Die Mindestfläche im Einlagerungsbereich sollte 9 km^{2} betragen. Hierbei wurden Festen im Flankenbereich von mindestens 200 m sowie ein Aufschlag von wenigstens 20 % berücksichtigt, um über Ausweichflächen sowie Sicherheitsabstände zu Einschaltungen von Anhydrit, Kaliflözen, Lösungseinschlüssen u. a. zu verfügen. Als zusätzliche Ausschlusskriterien für Salz wurden die Forderung nach*
- *Unverritzheit des Salzkörpers und*
- *Konkurrierende Nutzung aufgenommen.*

5.1.1 Rotliegend-Salinar

Rotliegendsalinare sind in Deutschland aus dem Norddeutschen Becken sowie aus den Alpen bekannt.

Das überwiegend durch Tiefbohrungen im Norddeutschen Becken nachgewiesene Rotliegendsalinar bildet eine Einschaltung in dem allgemein psammitisch-pelitisch entwickelten Oberrotliegend, das im zentralen Beckenbereich abgelagert wurde. Das Beckenzentrum reicht vom Westteil der südlichen Nordsee über das Elbmündungsgebiet, das südliche Schleswig-Holstein (südlich der Inseln Sylt und Fehmarn) bis in den Müritzbereich nach Mecklenburg (Anl. 6).

Die basalen Salinarschichten sind auf das relativ kleine Gebiet zwischen der Insel Helgoland und dem Elbmündungsgebiet beschränkt, während die jüngsten Salinarschichten entsprechend der expansiven Beckenentwicklung in ihrer maximalen E – W-Erstreckung vom britisch-niederländischen Beckenteil bis zur Müritz und in die Altmark reichen. Die zwischen 170 und über 300 m mächtige zyklisch aufgebaute Steinsalz-Tonstein-Wechselfolge ist am vollständigsten im Elbmündungsbereich und im südlichen Schleswig-Holstein ausgebildet. Das Salz kommt als feinverteilter Zement, nestartige Einlagerung sowie in Lagen

und Bänken bis 20 m Mächtigkeit vor (FISCHER et al. 1975, 1977, 1978). Im Durchschnitt sind die reinen Steinsalzbänke nur 2 – 4 m mächtig. Zu den Rändern nehmen Mächtigkeit und Anzahl der Haliteinschaltungen ab und keilen schließlich ganz aus. Anhydritausscheidungen kommen nur untergeordnet vor und sind in der Regel linsig ausgebildet (GRALLA 1988, LINDERT et al. 1990).
Die hohen Mächtigkeiten der Salinarzyklen führten im Gebiet zwischen Langeoog, Helgoland und Hamburg zur Mobilisation dieser Salze, die zusammen mit den Zechsteinsalzen als Doppeldiapire im Mesozoikum bis in Teufen von über 1000 m unter NN und über Tage aufgestiegen sind. Im Kernbereich der „Doppelsalinare“ ist das sog. „Haselgebirge“ entwickelt; ein ungeschichtetes Salz-Ton-Gemisch, das als Fluidal-Tektonit gedeutet wird. Die sekundäre Mächtigkeit des Oberrotliegendsalinars erreicht in den Strukturen 3000 – 4000 m, in Ausnahmefällen sogar 8000 m (BEST et al. 1982).

Aus dem Permoskyt der Nördlichen Kalkalpen sind ebenfalls Salzgesteine bekannt, die in einer E – W orientierten Riftzone in flachen Lagunen und abflusslosen Pfannen mit episodischen marinen Ingressionen entstanden sind. Auslaugung, Salztektonik und alpinotype Tektonik führten gemeinsam zu komplizierten Lagerungsverhältnissen mit den Nachbargesteinen und zur weitgehenden Zerstörung der internen Sedimentstrukturen. Diese alpine Haselgebirgsformation , bestehend aus Silt- und Tonsteinen, spärlichen Sandsteinen, Anhydriten, Karbonaten, Steinsalz mit reliktischen K-Mg-Salzen sowie vereinzelten Magmatiten, stellt den Hauptabscherungshorizont zwischen der nördlichen Grauwackenzone und den auflagernden Kalkalpen dar (SPÖTL 1988).
In Berchtesgaden-Hallein und dem Hallstatt-Gebiet sind Salzstöcke von mehr als 1000 m Durchmesser bekannt, an die bauwürdige Lagerstätten gebunden sind (DOBEN & RISCH 1996). Diapirismus und lokaler submariner Durchbruch sollen im Zeitraum Malm/Neokom erfolgt sein. Konkrete Mächtigkeitsangaben für die Salzlagen sind wegen der starken Deformation schwierig. Für die „Steinsalzzüge“ werden Höchstwerte bis zu 10 m angegeben (SCHAUBERGER 1955).

Fazit: Das z. T. sehr mächtige Rotliegend-Steinsalz, das in den Doppelsalzstrukturen NW-Deutschlands in einigen Salzstöcken in endlagerrelevanten Tiefen vorkommt, kann als mögliche Reserveoption angesehen werden. Der hohe

Tonanteil in dem Salz-Ton-Gemisch des sog. „Haselgebirges“ vermindert einerseits zwar die gute Wärmleitfähigkeit des reinen Steinsalzes, andererseits verbessert er die ansonsten sehr geringe Rückhaltekapazität für Schadstoffe und Radionuklide. Insgesamt sind der Kenntnisstand und die Bergbauerfahrung über diesen Gesteinstyp jedoch geringer als beim Steinsalz, was einen höheren Aufwand bei der Vorerkundung bedingt. Außerdem sind die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit schlechter. Die alpine Salzfolge ist aufgrund des heterogenen Aufbaus und der Position in einem Gebiet mit Hebungsraten >1 mm/a für die Endlagerung ungeeignet. Die Strukturen zeigen jedoch, dass intensivste tektonische Überprägung und orographische Heraushebung um mehr als 2000 m nicht zur Zerstörung der Lagerstätten führten.

5.1.2 Zechstein-Salinar

Der Zechstein wird nach den neuesten stratigraphischen Untersuchungen in 7 Salinar-Folgen gegliedert, die als Zechstein 1 – 7 bzw. als Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- und Mölln-Folgen bezeichnet werden. Die generalisierte zyklische Gliederung ist den Tabellen 3 - 7 zu entnehmen. Sie basiert auf der Vorstellung mehrmaliger mariner Ingressionen aus dem arktischen Bereich aufgrund wiederholter glazio-eustatischer Meeresspiegelschwankungen.
Die Salinarfolgen des Zechstein bedecken das gesamte Norddeutsche Becken sowie die Thüringische und Hessische Senke, wo sie zwischen den Grundgebirgsaufragungen des Rheinischen Schiefergebirges und Thüringer Waldes nach Süden bis an den Main reichen (Anl. 7). Während alle 7 Folgen im Beckenzentrum in Salinarfazies entwickelt sind, sind sie in den südlichen und östlichen Randbereichen des Beckens nur noch in klastischer Randfazies ausgebildet bzw. fehlen ganz.

5.1.2.1 Werra-Folge

Innerhalb der Werra-Folge ist die typische Salinarfazies mit mächtigerem Werra-Steinsalz nur in wenigen isolierten Teilbecken auf den Plattformbereichen des Werra-Anhydrits ausgebildet. Ausgedehnte Salzpfannen finden sich:

- auf der südlichen Plattform von den zentralen und südlichen Niederlanden bis hinein in die Niederrheinische Bucht (Bohrungen Borth und Isselburg 1), im südlichen Emsland und Südoldenburg

- westlich der Weser südlich von Nienburg
- entlang der Weser zwischen Hameln und Hann. Münden
- bei Northeim
- im Werra-Fulda-Becken
- im Thüringer Becken
- in SE-Brandenburg

In diesen Teilbecken, insbesondere im Werra-Fulda-Becken, im Niederrhein- und Ems-Becken, im Thüringer Becken sowie in SE-Brandenburg, kann das Werra-Steinsalz lokal über 400 m mächtig werden (Tab.3). In der Regel wird es jedoch durch ein bis zwei Kaliflöze, die aus thermischen und löslichkeits- Gründen zu meiden sind, aufgeteilt, sodass das zusammenhängende Steinsalz selten über 200 mächtig wird.

Im Niederrheingebiet (WOLF 1985, HISS & MILBERT 1983) sind große Mächtigkeitsunterschiede zwischen 0 und > 400 m zu verzeichnen, die offensichtlich synsedimentär-tektonisch gesteuert wurden. Im Werra-Fulda-Becken sowie im Thüringer Becken ist die Abdeckung des Steinsalzes zum wasserführenden Plattendolomit durch den impermeablen Braunroten Salzton der Oberen Werra-Folge sowie durch den Staßfurt-Ton gegeben, die allerdings nicht überall intakt sind, wie die Ablaugungsbereiche belegen. Im Niederrhein-Becken, wo das Steinsalz in den Strukturen Ochtrup und Gronau diapirisch aufgepresst ist, und im Bereich der mittleren Weser erfolgt die Abdeckung gegen den wasserführenden Buntsandstein durch 30 – 40 m mächtige Tone des höheren Zechstein.

Fazit: Das Werra-Steinsalz ist nicht als Wirtsgestein für die Anlage eines Endlagers geeignet. In allen Verbreitungsgebieten entspricht die nachgewiesene Steinsalzmächtigkeit nicht den geforderten 500 m. Im südlichen Emsland und Südoldenburg liegt es außerdem zu tief. In den südlichen Randbecken haben z. T. unzureichende Abdeckung sowie intensive Bruchtektonik und Schollengliederung großflächig zur Subrosion geführt, die auch gegenwärtig noch anhält. Hinzu kommen Gefährdungen durch Gas- und Lösungseinbrüche. Durch intensiven Bergbau im Werra-Fulda- und Thüringer Becken erfüllen weite Bereiche nicht die Forderung nach Unverritztheit. Die unverritzten Bereiche besonders im Werra-Fulda- und Thüringer Becken sollten als potentielle Kaligewinnungsgebiete dem Bergbau vorbehalten bleiben.

Tab. 3: Gliederung und Mächtigkeit der Werra-Folge

Gruppe	Folge	Lithostratigraphische Bezeichnung		Mächtigkeit [m] Werra-Fulda-Becken [1]	Niederrhein-Becken [2]	Thüringer-Becken [3]	SE-Brandenburg [4]
Hangendes		Staßfurt-Karbonat / Staßfurt-Ton		Staßfurt-Ton	Staßfurt-Ton	Staßfurt-Ton	Staßfurt-Karbonat
Zechstein	Werra - Folge	Oberer Werra-Anhydrit	z1ANb	0 - 2	–	Ob. Werrakarbonat	–
		Oberstes Werra-Steinsalz	z1NA	0 - 15	–	–	–
		Oberer Werra-Anhydrit	z1 ANb	5 - 7	0 – 13	0 - 130	40 - 70
		Oberer Werraton	z1To	8 - 10	–	–	–
		Oberes Werra-Steinsalz	z1NAc	90 - 150	60	–	–
		Kaliflöz Hessen	z1KHe	2 - 3	40 (Carnallit-Zone) 0,4 – 1 (2. Hartsalz-flöz)	–	–
		Mittleres Werra Steinsalz	z1 NAb	50 - 60	9 – 11	–	–
		Kaliflöz Thüringen	z1KTh	2 - 10	0,4 – 1 (1. Hartsalz-flöz)	–	–
		Unteres Werra-Steinsalz	z1NAa	80 - 100	50 – 70	0 – 300	0 - 400
		Unterer Werra-Anhydrit	z1ANa	3 - 25	10	0 - 150	50 - 300
		Anhydritknotenschiefer	z1AN	6 - 9	–	–	–
		Zechsteinkalk	z1K	6 - 15	1 – 10 (z1-Mergel)	0 - 40	0 -
		Kupferschiefer	z1T	0,3 – 0,5	0,3 – 1	0 - 1	0 -
		Zechsteinkonglomerat	z1C	0 - 3	0,1 – 2	0 - 10	–
Liegendes		(Rotliegend)		Cornberg-Sandstein	Oberkarbon	Oberrotliegend	Oberrotliegend

[1] KÄDING 1977, [2] HISS & MILBERT 1983, TEICHMÜLLER 1958, WOLFF 1985, [3] SEIDEL 1972, [4] ZIEGENHARDT 1972

5.1.2.2 Staßfurt-Folge

Das Steinsalz der Staßfurt-Folge (z2Na), das in weiten Bereichen in sehr reiner Form vorkommt, besitzt die größte flächenhafte Verbreitung. Anders als das Werra-Steinsalz ist die Mächtigkeit auf der aus Werra-Anhydrit, Staßfurt-Karbonat und Basal-Anhydrit aufgebauten Plattform relativ gering (0 – 100 m). Sie schwillt über dem Staßfurt-Karbonat-Hang auf 200 m an und erreicht im Beckenzentrum 600 m. Diese primären Mächtigkeiten in ± horizontaler Lagerung sind aufgrund der Salzmigration kaum noch anzutreffen. Während die Salinarfolgen in den Abwanderungsgebieten stark ausgedünnt sind bzw. völlig fehlen, sind sie in den Akkumulationsgebieten in Salzkissen und Salzstöcken stark angestaut. In regelmäßig gebauten Diapiren bildet das Staßfurt-Steinsalz allgemein den zentralen Sattelkern, während sich die höheren Salinare randlich daran anschließen. Im Sattelkern können Mächtigkeiten von mehreren 1000 m auftreten. Die primären Mächtigkeiten des Hauptsalzes findet man heute nur noch in wenigen Bereichen, wo nur unbedeutende halokinetische Fließvorgänge abgelaufen sind (z. B. Westschleswig-Block). Auch am Südrand des Verbreitungsgebietes der Staßfurt-Folge, wo die Halokinese aufgrund der geringeren Überdeckung nicht mehr so intensiv war, können neben relativ flachen Salzkissen und embryonalen Salzstöcken auch Bereiche in ± horizontaler Lagerung als stratiforme Lagerstätte mit Mächtigkeiten >300 m auftreten (z. B. Solling-Scholle, Scholle von Calvörde) (Tab. 4).

Während die Basis des mobilisierten Staßfurt-Steinsalzes am Südrand des Norddeutschen Beckens nur wenige 100 m tief liegt, sinkt sie zum Beckenzentrum in Teufen von >5000 m ab. Allerdings erreicht das Staßfurt-Steinsalz in den Beckenrandbereichen nicht mehr die erforderliche Mindestmächtigkeit von 500 m. Ferner ist dieser Bereich durch intensive Bruchtektonik stark zerblockt und deshalb verstärkt der Subrosion ausgesetzt.

Die erforderliche Mindestmächtigkeiten von 500 m erreicht das Staßfurt-Steinsalz nur in den Salzstrukturen (Anl. 7).

Die konformen Salzkissenstrukturen, die nach dem tektonischen Innenaufbau günstige Voraussetzungen für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes auf-

Tab. 4.: Gliederung und Mächtigkeit der Staßfurt-Folge

Gruppe	Folge	Lithostratigraphische Bezeichnung		Mächtigkeit [m]				
				N-deutsches Becken (Bhg. Schwerin) [1]	**Scholle von Calvörde**[2]	**Raum Gorleben**[3]	**Thüringer Becken**[4]	**Solling – Becken** (Bhg. Solling 4+5) [5]
Hangendes		Grauer Salzton	z3T	z3T	z3T	z3T	z3T	z3T
Zechstein	Staßfurt - Folge	Gebänderter Deckanhydrit	z2ANb	1	2	1,5	0 - 2	2,5 – 3
		Decksteinsalz	z2NAd	0,5	1,3	0,3	–	
		Kaliflöz Staßfurt mit Hartsalz und Carnallitit	z2KSt	70	0 - 70	17	0 - 20	4
		Kieseritisches Übergangssalz	z2UE	–	–	2,5	–	–
		Hangendsalz	z2NAc	–	–	10	–	200 – 500 Staßfurt-Steinsalz
		Hauptsalz	z2NAb	1047	150 – 250 (10 – 600)	700 -800	0 - 500	
		Staßfurt-Basis-Salz	z2NAa	–	–	20	–	
		Basalanhydrit	z2ANa	3	2	19	0 - 30	2 – 4
		Hauptdolomit/ Staßfurt-Karbonat	z2D/ z2CA	57	–	5	0 - 60	20 – 40
		Stinkschiefer	z2S	–	5	–	0 - 2	–
Liegendes		Oberer Werra-Anhydrit	z1ANb	z1An	z1An	z1AN	z1AN	z1AN

[1] LANGE 1990, [2] REICHENBACH 1970, [3] BORNEMANN 2003, [4] SEIDEL 1972, [5] KÄDING 1977

weisen, liegen in der Mehrzahl zu tief oder werden bereits anderweitig genutzt.

Von den südlichen Teilsenken sind lediglich in den Salzstrukturen des Subherzynen und Thüringer Beckens Mächtigkeiten des Staßfurt-Steinsalzes von über 500 m bekannt.

Fazit: Aus der Vielzahl der Salzstöcke, deren Dach teils bis an die Erdoberfläche reicht und teils in Teufen von über 2000 m liegt, wurden im Zuge der Bearbeitung der BGR vier Strukturen ausgewiesen, die als untersuchungswürdig gelten können (Anl. 8 und 26). Wesentliche Teile des Subherzynen und Thüringer Beckens wurden bis in die jüngste Vergangenheit bergbaulich genutzt. In den noch unverritzten Teilen der tiefer liegenden Strukturbereiche können nach weiteren geologischen Erkundungsarbeiten Bereiche gefunden werden, die den Vorauswahlkriterien genügen, lässt man die Kali-Rohstoffreserve unberücksichtigt. Negativ zu bewerten sind dabei die komplizierte Tektonik und die damit verbundenen Gefährdungen durch Gas- und Lösungseinbrüche. Daher müssen die Möglichkeiten für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes in diesen Beckenbereichen als ungünstig angesehen werden.

5.1.2.3 Leine-Folge

Die primäre Mächtigkeit der Leine-Steinsalze und ihrer Zwischenmittel beträgt durchschnittlich 200 – 250 m, im deutschen Nordsee-Sektor 250 – 300 m. Im Verbreitungsgebiet des Kaliflözes Ronnenberg werden die Steinsalze zweigeteilt, wobei die Einzelpakete in der Regel <200 m mächtig sind (Tab. 5), getrennt durch mächtige Anhydrit-Schichten.

Ebenso wie das Staßfurt-Steinsalz findet man das Leine-Steinsalz aufgrund halokinetischer Prozesse kaum noch in primärer Lagerung vor. Während ersteres offensichtlich zuerst mobilisiert wurde und meist den Kern der Strukturen einnimmt, sind die Salze der Leine-Folge, die später nachflossen, bevorzugt in den Randbereichen der Salzstöcke zu finden, wo sie z. T. tief eingefaltet sind. Nach KOCKEL (1999) ist das Leine-Steinsalz oft noch tektonisch konkordant unter dem Buntsandsteinreflektor zu finden.

Tab. 5: Gliederung und Mächtigkeit der Leine-Folge

Gruppe	Folge	Lithostratigraphische Bezeichnung			Mächtigkeit [m]			
					NW-deutsches Becken [1]	Scholle von Calvörde [2]	Solling-Becken [3] (Bhg. Solling 5)	Thüringer Becken [4]
Hangendes		Roter Salzton		z4T	Z4T	z4T	z4T	z4T
Zechstein	Leine-Folge		Grenzsalz	Oberstes Leine-Steinsalz	40	–	–	–
			Tonmittelsalz (Zonen 1 – 3) z3NAt			4	–	–
		Kaliflöze „Riedel" u. „Albert" KR/			4 - 6	–	–	–
			Schwadensalz (Zone 1 – 10) z3NAh	Oberes Leine-Steinsalz	80	3		
		Anhydritmittel, Helgoland-Anhydrit z3AM			60	6	–	–
			Anhydrit-Mittelsalze g	Mittleres Leine-Steinsalz	120	76	–	–
			Buntes Salz f			10	–	–
			Bändersalz z3NAe					
			Banksalz z3NAd					
		Kaliflöz „Ronnenberg" z3KRO			2 - 4	15	–	–
			Orange Salz z3NAc	Unteres Leine-Steinsalz z3NAa	120 – 150		48	0 – 130
			Liniensalz z3NAb			25		
			Basissalz z3NAa			5		
		Leine-Sulfat (Hauptanhydrit) z3NA			30 - 40	35	60	0 - 60
		Plattendolomit z3D			–	–	–	0 - 25
		Grauer Salzton z3T			5	2,6	2	1 - 5
Liegendes		Oberer Staßfurt-Ton z2To		z2ANb	z2ANb	z2ANb	z2ANb	z2ANb

[1] KOCKEL & ROLAND 1977, [2] REICHENBACH 1970, [3] KÄDING 1977, [4] SEIDEL 1972

Fazit: Das Leine-Steinsalz ist als Wirtsgestein weniger geeignet, da es sich in wesentlich ungünstigerer Position im Salzstock befindet. Trotz der halokinetisch bedingten Mächtigkeitsanschwellung werden die Mächtigkeiten des Staßfurt-Steinsalzes nicht erreicht. Durch die komplizierteren Lagerungsverhältnisse ist der meist geklüftete Hauptanhydrit, der wegen seiner potentiellen Wasserfüh-

rung bei Auffahrungen zu meiden ist, nur schwer prognostizierbar. Außerdem sollten die Verbreitungsgebiete der hochwertigen Kaliflöze Riedel und Ronnenberg als potentielle Bergbaugebiete vorgehalten werden.

5.1.2.4 Aller-Folge

Im zentralen Teil des Beckens, das sich am Südrand allmählich in NNE-streichende Schwellen und Senken zu gliedern begann, wurden im Beckenzentrum ca. 100 m und auf den Schwellen ca. 50 m Aller-Steinsalz abgelagert (Tab.6). Das Salz wird durch Tonhorizonte und im Beckenzentrum durch bis zu drei Kalisalzlager gegliedert, die aber nicht durchhaltend ausgebildet sind. In den Diapiren ist das Aller-Steinsalz ebenso wie die Salze der anderen Zechstein-Folgen mit eingefaltet. Aufgrund der geringen Primärmächtigkeit ist es aber nicht zu nennenswerten Mächtigkeitsanschwellungen gekommen.

Fazit: Das Aller-Steinsalz ist aufgrund seiner geringen Mächtigkeit und im Beckenzentrum darüber hinaus auch wegen der großen Tiefenlage nicht als Wirtsgestein geeignet.

5.1.2.5.Ohre bis Mölln-Folge

Über der Aller-Folge wurden noch drei weitere Folgen nachgewiesen, die als Ohre-, Friesland- und Mölln-Folge bezeichnet werden (REICHENBACH 1970, BEST 1989, KÄDING 1977, 1987). Die Zyklen beginnen jeweils mit einem Tonstein (z5T – z7T), der von einem Anhydritband (z5AN – z7AN) überlagert wird. Darüber folgt jeweils ein Steinsalzpaket (z5NA – z7NA), das lediglich im 6. Zyklus von einem Kalilager zweigeteilt wird. Den Abschluss bildet häufig wiederum ein Anhydritband. Das Steinsalz erreicht Mächtigkeiten von bis zu 40 m (Tab. 7).
Fazit: Aufgrund der geringen Mächtigkeit sind diese Salinare nicht relevant.

Tab.6: Gliederung und Mächtigkeit der Aller-Folge

Gruppe	Folge	Lithostratigraphische Bezeichnung	Mächtigkeit [m] N-deutsches Becken (Bhg. Schwerin1 u. Grevesmühlen 1) [1]	N-deutsches Becke (Unterelbe-Becken) [2]	Altmark, Scholle von Calvörde [3]	Weser-Becken [2]	Ems-Becken [3]
Hangendes		Unterer Ohre-Ton z5T	z5T	z5T	z5T	z5T	z5T
Zechstein	Aller – Folge	Grenzanhydrit	1		0 – 1		
		Oberes Aller-Steinsalz	7,5		5 – 15		
		Oberer Aller-Ton	19,5		0,5 – 3		
				100		68	70
		Mittleres Aller-Steinsalz	8	Aller-Steinsalz	4 – 15	Aller-Steinsalz	Aller-Steinsalz
		Aller-Kaliflöz	33				
		Unteres Aller-Steinsalz	32,5		7 – 35		
		Pegmatit-Anhydrit z4AN	1,5	1	0,5 – 1,5	1	1
		Roter Salzton z4T	47	17	1 – 20	18	17
Liegendes		Oberes Leine-Steinsalz z3NAo	z3NAo	z3NAo	z3NAo	z3NAo	z3NAo

[1] LANGE 1990, [2] BEST 1989, [3] REICHENBACH 1970

Tab. 7: Gliederung und Mächtigkeit der Ohre- bis Mölln-Folge

Gruppe	Folge	Lithostratigraphische Bezeichnung		Mächtigkeit [m]				
				Ems-Becken[1]	Weser-Becken[1]	Unterelbe-Becken[1]	Helgoland-Becken[1]	Scholle von Calvörde[2]
Hangendes		Bröckelschiefer	suB	su	suB	suB	suB	suB
Zechstein	Mölln-Folge	Mölln-Anhydrit	z7NA	40 m anhydritische und tonige Sedimente sowie Sandlagen	–	1	1	–
		Mölln-Steinsalz	z7AN		–	37	23	–
		Mölln Anhydrit	z7AN		–	–	–	–
		Mölln-Ton	z7T		–	1	1	–
	Friesland-Folge	Friesland-Steinsalz	z6NA		–	30	34	–
		Kaliflöz Friesland	z6K		20 m rote Ton- und Sandsteine			–
		Friesland-Anhydrit	z6AN			<0,5	<1	0,25
		Friesland-Ton	z6T			6	6	1,5 – 2 schluffig
	Ohre-Folge	Ohre Anhydrit	z5AN	1	1	–	–	0,5
		Ohre-Steinsalz	z5NA	13	6	33	40	0,3 – 3
		Ohre-Anhydrit	z5AN	<1	? 0,5	1	1	0,1
		Ohre-Ton	z5T	6	8	15	10	5
Liegendes		Aller-Steinsalz	z4NA	Z4NA	z4NA	z4NA	z4NA	z4NA

[1] BEST 1989, [2] REICHENBACH 1970

5.1.3 Röt-Salinar

Oberhalb des Zechstein wurden im Norddeutschen und Thüringer Becken im Oberen Buntsandstein, in der Salinarröt-Folge, Salzgesteine abgelagert (Anl. 9). Insgesamt handelt es sich um Steinsalzschichten, die mehrfach mit tonig-anhydritischen oder/und dolomitisch-mergelig-schluffigen Schichten wechsellagern. Die Salzformation wird im Beckenzentrum durchschnittlich 100 – 200 m mächtig, wobei eine generelle Zweiteilung in ein unteres und ein oberes Röt-Steinsalz vorgenommen werden kann (Tab. 8). Die Mächtigkeitsanalyse wird allerdings dadurch erschwert, dass gebietsweise eingewanderte Zechsteinsalze zu einer Aufblähung in Form von Salzkeilen geführt haben (BALDSCHUHN et al. 1998) oder es zur Abwanderung von Rötsalz durch Auflast in den Muldenbereichen kam. Ferner wurden die Rötsalzhorizonte während der oberkretazischen Inversion tektonisch stark überprägt.

Tab. 8: Gliederung und Mächtigkeit der Salinarröt-Folge

Gruppe	**Folge**	**Lithostratigraphische Gliederung**		**Mächtigkeit [m]**	
		NW-deutschs Becken (RÖHLING 1991)	**Kleinzyklen**	**NW-deutsches Becken** [1)]	**Thüringer Becken** [2)]
Hangendes		Rotbraune Serie so3	Röt 3	So3	So3
Buntsandstein	**Salinarröt-Folge**	Oberes Röt-Salinar soSo	Röt 2-Deckanhydrit	8	17 – 25
			Röt 2-Salinar	25	5 – 15
			Röt 2-Basisanhydrit	2	18 – 30
		Röt-Zwischenmittel		25	
		Unteres Röt-Salinar soSo	Röt 1Deckanhydrit	20	
			Röt 1-Salinar	>120	20 – 50
			Röt 1-Basisanhydrit	4	1 – 4
Liegendes		Solling-Folge smS	Chirotherien-Sandstein	smS	smS

[1)] RÖHLING 1991 [2)] DDR-STANDARD TGL25234/11, 1974

Fazit: Das Röt-Salinar ist aufgrund seiner geringen Mächtigkeit als Wirtsgestein ungeeignet. In den zentralen Beckenbereichen, wo kompakte Röt 1-Steinsalz bis zu 100 m mächtig werden kann, liegt es in Teufen >1000 m.

5.1.4 Muschelkalk-Salinar

Das Salinarbecken des Mittleren Muschelkalk deckt sich in Norddeutschland annähern mit dem des Röt. Nach Süden bestand eine Verbindung über das Solling-Becken und die Hessische Senke mit den süddeutschen Vorkommen, die vom mittleren Main und mittleren Neckar bis Waldshut und Basel am Oberrhein reichen. Heute sind von diesem ehemals zusammenhängenden Salinar-Becken nur noch die Vorkommen in Norddeutschland sowie südlich des Main (Rothenburg, Schwäbisch Hall, Heilbronn, Stuttgart, Rottweil bis in den badischen Klettgau) erhalten (Anl.10).

Im Beckentiefsten Norddeutschlands gliedert sich das Salinar des Mittleren Muschelkalk in vier Salzhorizonte, die durch Tonmittel voneinander getrennt sind.

Der salinare Mittlere Muschelkalk wird von BRÜCKNER-RÖHLING (1999) und RÖHLING (2002) in insgesamt neun Salinarzyklen gegliedert, die der Karlstadt-Formation (Zyklus 1), der Heilbronn-Formation (Zyklen 2–8) und der Diemel-Formation (Zyklus 9) zugeordnet werden können (Tab. 9). Dabei enthalten die Zyklen 1, 8 und 9 keine Halit-Lagen, die Zyklen 2, 5, 6 und

7 nur in bevorzugten Subsidenzräumen. Am weitesten verbreitet und am mächtigsten ist das Steinsalz des Salinarzyklus 3. Eine detaillierte Darstellung der regionalen Verbreitung der einzelnen Salinare des Muschelkalkes findet man bei GAERTNER & RÖHLING (1993).

In Baden-Württemberg sind die größten Salzmächtigkeiten mit den größten Tiefen des Ablagerungsbeckens um Heilbronn sowie im Kraichgau verbunden. Zu den Beckenrändern werden die Salzmächtigkeiten immer geringer und keilen schließlich ganz aus (SIMON 1995, HANSCH & SIMON 2003). Der Gesteinsaufbau entspricht den idealen Folgen eines salinaren Zyklus. Im sog. Steinsalzlager des unteren Profilabschnitts kommen zwei Steinsalzhorizonte von ca. 10 – 20 und 12 – 18 m Mächtigkeit vor (Tab. 9), die bis heute bergmännisch genutzt werden (GEYER & GWINNER 1991).

Tab. 9: Gliederung und Mächtigkeit der Salinarfolge des Mittleren Muschelkalk in Nord- und Süddeutschland

Gruppe	Folge	Lithostratigraphische Bezeichnung N-Deutschland (GÄRTNER & RÖHLING 1993)	Zyklen-Gliederung (BRÜCKNER & RÖHLING 1999)	Steinsalz-Mächtigkeit [m] (Bhg. Norderney Z1) [1]	Litholologische Bezeichnung Süddeutschland (n. GEYER & GWINNER 1991, SIMON 1995)		Steinsalz-Mächtigkeit [m] Raum Heilbronn [2]
Hangendes		Trochitenkalk			Trochitenkalk		
Muschelkalk	Mittlerer Muschelkalk	Obere Dolomit-Mergel (mmOD)	Salinar-Zyklus 9	0	Obere Dolomit-Region		
					Obere Anhydrit-Region	Obere Sulfatregion	
			Salinar-Zyklus 8	0	Obere Ton-Dolomit-Anhydritregion		
		Vertretung des Muschelkalk-Salinar 5 und 6 (mmSF)	Salinar-Zyklus 7	67	Mittlere Anhydritregion		
			Salinar-Zyklus 6	85	Untere Ton-Dolomit-Anhydritregion		
		Muschelkalk-Salinar 4 (mmSF4)	Salinar-Zyklus 5	129	oberes Steinsalz	Steinsalzlager	25
					Oberes Bändersalz		10
		Muschelkalk-Salinar 3 (mmSF3)	Salinar-Zyklus 4	122	Anhydritbank		
		Muschelkalk-Salinar 2 (mmSF2)	Salinar-Zyklus 3	54	Unteres Bändersalz		5
		Muschelkalk-Salinar 1 (mmSF1)	Salinar-Zyklus 2	50	Unteres Steinsalz		40
		Untere Dolomit-Mergel (mmUD)	Salinar-Zyklus 1	0	Grundanhydrit (Unt. Sulfatregion)		
					Stinkdolomit (Untere Dolomitregion)		
Liegendes		Schaumkalkbänke			Orbicularis-Schichten		

[1] BRÜCKNER-RÖHLING, S. 1999, [2] GEYER & GWINNER 1991

Fazit: Die einzelnen Steinsalz-Horizonte des Mittleren Muschelkalks sind aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit weder in Norddeutschland noch in Süddeutschland als Wirtsgestein relevant.

5.1.5 Keuper-Salinar

Salinar-Formationen treten im Keuper im Norddeutschen und Thüringer Becken im Unteren und Oberen Gipskeuper auf (Anl. 11). Der Untere Gipskeuper, die Grabfeld-Formation, enthält die Salinare „A“ – „E“, und der Obere Gipskeuper, die Weser-Formation, enthält die Salinare „F“ – „H“ (BEUTLER 1995). Die primären Mächtigkeiten dieser Salzlager sind sehr unterschiedlich. Sie zeigen deutlich, dass die großen Mächtigkeiten an die Subsidenzzentren gebunden sind, das Emsmündungs-Riftsystem mit dem Ems-Graben, den Glückstadt-Graben, die Braunschweig-Gifhorn Bruchzone, den Senkungsraum über der Ostfriesland-Scholle sowie einige Spezialtröge auf der östlichen Pompeckj-Scholle. Während die Halitgruppen im allgemeinen Mächtigkeiten zwischen 10 und 500 m erreichen, können sie in den Halitgruppen „A“ und „H“ auf über 1000 m anschwellen (Tab. 10). Die größten Salzmächtigkeiten mit 2400 m werden auf der Krummendeich-Scholle südlich der Elbe erreicht. Allerdings werden diese Halitgruppen häufig durch Tonsteinmittel und Sulfathorizonte unterschiedlicher Mächtigkeit voneinander getrennt. Randlich werden die Salinare, die dem Playa-Sabkha-Typ angehören, durch Anhydrit und Gips vertreten. Die Verbreitung in relativ reiner Form ist weitgehend auf den Unterelberaum, Ostfriesland, das südliche Schleswig-Holstein und die deutsche Bucht beschränkt. In den Gebieten mit hoher Primärmächtigkeit neigen die Salze der Gruppe „H“, ähnlich den Zechsteinsalzen, zu sekundärer, halokinetisch bedingter Akkumulation. Sie bilden Salzkissen, in denen mehr als 1700 m mächtige reine Steinsalzkörper enthalten sein können (KOCKEL 1999). Oft kommt es am Rande von Zechsteinsalzstöcken oder Doppelsalinaren zur Anschweißung derartiger Keuper-Salzkissen, besonders im Unterelberaum und im südlichen Schleswig-Holstein. Eigenständige Keuper-Salzstöcke wurden bisher nicht beobachtet. Die Tiefenlage dieser Keuper-Salzkissen beträgt ausnahmslos mehr als 1200 m.

In Ostdeutschland sind die Salinare des Mittleren Keuper zwar ebenfalls sehr weit verbreitet. Sie sind aber wesentlich unreiner und geringmächtiger.

Tab. 10: Gliederung und Mächtigkeit des Mittleren Keuper

Gruppe	Sub-gruppe	Norddeutsches Becken			Steinsalz-Mächtigkeit [m]	
		Formation	Folge/Schicht (BEUTLER 1995)		Bhg. Sande Z1 [1]	Unterelbe-raum [2]
Hangendes:		Exter Fm.	Ob. Postera Schichten			
Keuper	Mittlerer Keuper		D5			
		Arnstadt Fm. (kmA) Steinmergel-Keuper (km4)	Unt. Postera Schichten			
			Ob. Steinmergelkeuper			
			Mittl. Steinmergelkeuper			
			Unt. Steinmergelkeuper			
			D4			
		Weser Fm. (kmW) Oberer Gips-Keuper (km3)	Heldburg-Gipsmergel			
			Bunte Heldburg-Mergel	Salinar H	222	2400
				Salinar G	5 – 10	
			Lehrberg-Horizont			
			Rote Wand	Salinar F	35 – 50	
		Stuttgart Fm. (kmS) Schilfsdst. (km2)	Schilfsandstein			
			D2			
				Salinar D	37	
				Salinar C	10	
			Äquivalent Engelhofer Platte			
			Untere Hauptgips-Schichten	Salinar B	59	
				Salinar A	62	500 – 1000
			Äquivalent Bleiglanzbank			
			Grundgips-Schichten			
Liegendes:			Obere Lettenkeuper			

[1] BEUTLER1995, [2] KOCKEL 1999

Fazit: Obwohl die Keupersalze durch Salzakkumulation im Unterelberaum und im südlichen Schleswig-Holstein große Mächtigkeiten erreichen und auch einen hohen Reinheitsgrad aufweisen, kommen sie aufgrund ihrer Tiefenlage als Wirtsgestein nicht infrage.

5.1.6 Malm-Salinar

Im Obermalm 3 und 5 (Münder Mergel) tritt in Nordwestdeutschland eine weitere Salzformation auf. Die Salinare sind auf die tief abgesunkenen Teile des Niedersachsen-Beckens beschränkt, also auf den Raum zwischen dem Emsland im W und nördlich des Weser-Wiehengebirges im E sowie südlich einer Linie Boertange-Nienburg (Anl. 12). Östlich der Weser treten die Salinare nur in geringer Mächtigkeit und auf lokale Senken beschränkt auf.

Es handelt sich um zahlreiche Steinsalzhorizonte, die durch Zwischenmittel aus grauen Tonen und Anhydritlagen voneinander getrennt sind. Die größten Mäch-

tigkeiten werden im Gebiet Lingen-Dümmer See mit über 2000 m erreicht. Die durchschnittliche Mächtigkeit der Folge beträgt ca. 800 m. Relativ reine Steinsalzpakete können Mächtigkeiten von über 150 m erreichen. In der Bohrung Alfhausen wurde z. B. folgendes Profil angetroffen: (von oben nach unten) 165 m relativ reines Steinsalz, 10 m Anhydrit, 50 m Tonstein, 220 m Steinsalz, vorwiegend durch Tonsteine verunreinigt, 240 m Steinsalz, vorwiegend durch Anhydrit verunreinigt, 110 m Steinsalz, vorwiegend durch Tonstein verunreinigt.

Insgesamt ist der Kenntnisstand über die Malmsalze jedoch gering. In der Regel ist die Lagerung des Salinars stratiform. Lediglich in den Gebieten mit den größten Mächtigkeiten besteht ähnlich wie bei den Keupersalinaren die Tendenz zu sekundären, halokinetisch bedingten Akkumulationen in Form von Salzkissen (*Herzlake, Bersenbrück, Bippen, Georgsdorf-Wietmarschen, Baccum, Lohne,, Alfhausen, Damme Lehmbruch*).

Fazit: Als Endlagerwirtsgestein sind die Malmsalze aufgrund der zahlreichen Tonstein- und Anhydriteinschaltungen nicht geeignet.

5.1.7 Tertiär-Salinar

Tertiär-Salinarfolgen sind ausschließlich im Oberrhein-Graben ausgebildet. Die mächtigsten Salzfolgen sind im südlichen Grabenteil sowohl auf badenwürtembergischer als auch auf elsässischer Seite im Wittelsheimer und Münchhausener Becken entwickelt (Anl. 12). Sie umfassen stratigraphisch das Obere Eozän und Untere Oligozän sowie das oberste Oligozän bis Miozän. Die gesamte Halit-Folge des Oberen Eozän bis Unteren Oligozän, die in eine Untere, Mittlere und Obere Salzfolge gegliedert wird, erreicht im Beckentiefsten eine Mächtigkeit von über 2000 m (Tab. 11). Die vorwiegend mergelige, häufig bituminöse Schichtenfolge enthält zahlreiche Einschaltungen von Steinsalz, Anhydrit und Gips, sowie in der Oberen Salzfolge in Baden und im Elsass zwei Kalilager, die bergmännisch genutzt wurden und werden (WAGNER 1955). Der klastische Anteil der Salzfolge übersteigt im allgemeinen 60%. Die reinen Steinsalzpakete sind nur in Ausnahmefällen über 100 m mächtig.
In den Bereichen mit hohen Salzmächtigkeiten und gleichfalls hohen Mächtigkeiten des Deckgebirges kam es zur Mobilisierung des Salzes und zur Bildung

Tab. 11: Gliederung und Mächtigkeit der Salinare des Alttertiär Oligozän im Oberrhein-Graben

Serie	Stufe	Schicht		Lithostratigraphische Gliederung (n. WAGNER 1955)		Salzanteil [m]		
Hangendes				Graue Mergel	Foraminiferen-Mergel			
Oligozän	Unteres Oligozän	Pechelbronner Schichten	Oberen	Bunte Mergel (Gips-Anhydrit-Zone) 80 m	Bunte, kompakte Mergel, unterer Teil mit Anhydrit-, oberer Teil mit Gipslagen	Obere Salzfolge	– > 1500	0
				Knollen-Anhydrit-Steinsalz-Zone 300 – 400 m	Graue und bunte Mergel mit knolligem Anhydrit und Steinsalzlagen			75 – 120
					VI. Steinsalz Anhydrit, Mergel			50
					V. Steinsalz Anhydrit, Mergel			
					IV. Steinsalz Anhydrit, Mergel			
					Oberes Kalilager III. Steinsalz Anhydrit, Mergel			
					Unteres Kalilager II. Steinsalz Anhydrit, Mergel			
					I. Steinsalz Anhydrit			
			Mittl.	Versteinerungsreiche Zone 70 – 80 m	Dunkle streifige Kalk- und Dolomitmergel	Mittlere Salzfolge		0
Eozän	Oberes Eozän		Untere	Untere bituminöse Zone 200 – 220 m				88
				Konglomeratzone bis 150 m				70
		Lymnäenmergel		Lymnäenmergel bis 150 m		Untere Salzfolge	– >900	0
				Graugrüne Dolomit-Kalkmergel bis 150 m				17
				Graugrüne Kalkmergel bis 250 m				185
				Grüne Lymnäenmergel >130 m				0
	Liegendes			Süßwasserkalke (bis 100 m)				0

von Diapiren, die bis an die Quartärbasis hinauf reichen (COURTOT et al. 1975, PFLUG 1982). Aufgrund des hohen Anteils klastischer Sedimente an den Salinarfolgen ist die Salzmobilität jedoch nicht so intensiv wie bei den Zechsteinsalzen in Norddeutschland. Es ist allerdings mit einem komplizierten Internbau zu rechnen.

Zu erneuten Salzbildungen, den jüngsten in der Bundesrepublik, kam es im höchsten Oligozän im nördlichen Oberrhein-Graben (Anl. 12) in der Umgebung von Worms und Darmstadt (GEYER & GWINNER 1991). In den Mittleren Cerithienschichten (früher „Untere Hydrobienschichten), die nach der neuen stratigraphischen Gliederung nicht in das Untere Miozän, sondern noch in das oberste Oligozän gestellt werden, herrschte ein brackisch-salinares Ablagerungsmilieu mit wahrscheinlich limnischen Einschaltungen. Die Ablagerungen zeichnen sich durch Einschaltungen dunkler bituminöser Mergel aus, die eine Feinstschichtung durch hellere Kalklamellen aufweisen. Daneben kommen Tonmergel, gelegentlich Sandsteine, Kalkmergel, Kalke, Dolomit, Anhydrit und Steinsalz vor. Die Steinsalzfolge erreicht NNE von Mannheim eine Mächtigkeit von 285 m (Tab. 12).

WAGNER (1955) beschreibt aus der Bohrung Worms I 1936 aus dem Teufenbereich 1700 – 1770 m 6 Steinsalzbänke mit zusammen 7 m reinem Steinsalz, von denen sich die 5 unteren auf einen 70 m mächtigen Schichtenstoß verteilen.

Fazit: Die alttertiären Salinarfolgen des südlichen Oberrhein-Grabens sind aufgrund der geringen Mächtigkeit, der häufigen Einschaltungen von Tonsteinen, Anhydrit und Gips als Endlagerwirtsgestein nicht geeignet. Ferner schließt die potentielle Erdbebengefährdung den Oberrhein-Graben als Standortregion aus.

Tab. 12: Gliederung und Mächtigkeit des Salinars des Oberoligozän im Oberrhein-Graben

Stufe	Gliederung (n. SONNE 1965)	Lithologische Gliederung (WAGNER 1955)	Mächtigkeit [m]	Salzanteil [m]
Miozän	Hydrobien-Schichten	Graugrüne Mergel	885	0
	Corbicula-Schichten	Graugrüne Mergel		0
Oberoligozän	Obere Cerithien-schichten	Bituminöse Mergel	200	0
	Mittlere Cerithien-schichten	Obere Anhydritzone	90	0
		Steinsalzzone	– 285	7
		Untere Anhydritzone	70	0
	Untere Cerithien-schichten	Graugrüne Mergel	350	0

5.2 Ton-/Tonsteinformationen

5.2.1. Bedeutung toniger Gesteinsformationen für die Endlagerung

In Abhängigkeit von dem natürlichen geologischen Angebot an potentiellen Wirtsgesteinen ist die Nutzung toniger Gesteinsformationen als Barriere- und Wirtsgestein bei der Endlagerung radioaktive Abfälle sowohl für oberflächennahe als auch für tiefe Endlagerkonzepte in mehreren Ländern eine der in Betracht gezogenen Optionen. Entsprechende Untersuchungen, Forschungsarbeiten bzw. Eignungsanalysen sind in Belgien, der Schweiz, Frankreich, Italien, Spanien, Großbritannien, Ungarn, Japan, Indien, Kanada und den USA durchgeführt worden und werden derzeit vor allem in Belgien, der Schweiz und in Frankreich sehr intensiv betrieben (siehe z.B. PAGIS 1989, OECD/NEA 2003). Aufgrund der unterschiedlich weit fortgeschrittenen einzelnen nationalen Endlagerprogramme reichen diese Untersuchungen von generellen Machbarkeitsstudien unter den länderspezifischen Gegebenheiten bis zur Auswahl von direkten Standorten und dem Betrieb von untertägigen Versuchseinrichtungen.

Erste Schlussfolgerungen zur Verbreitung geeigneter Tonformationen für die EU-Länder wurden bereits 1990 in einem PAGIS-Bericht dokumentiert (u. a. HEREMANS 1990, BONNE 1990). Eine Hauptschlussfolgerung dieses Berichtes ist die generelle Feststellung, dass Tonformationen eine sichere Endlagerung von radioaktiven Abfällen gewährleisten können, wenn sie bestimmte Kriterien erfüllen. Der Mächtigkeit der Tone und Tonsteine innerhalb der tonigen Gesteinsformationen und ihrem Rückhaltevermögen von Radionukliden wurde für die Eignungseinschätzung die größte Bedeutung beigemessen. Von CHAPMAN et al. (1995) sind der Stand der Untersuchungen bzw. die gewählten Schwerpunkte der einzelnen Länder zusammenfassend dargestellt worden. Die aufgeführten deutschen Erfahrungen beruhen vor allem auf den im Rahmen der Standortuntersuchung der Schachtanlage Konrad durchgeführten hydraulischen Untersuchungen und den generellen Feldexperimenten. Wesentliche neuere Forschungsergebnisse sowie Hinweise zum Vorgehen bei der Eignungsbeurteilung von tonigen Gesteinen und dem noch existierenden Forschungsbedarf sind Gegenstand von zwei OECD/NEA Publikationen aus dem Jahr 2003 mit den Titeln „Features, Events and Processes Evaluation - Catalogue for Argillaceous

Media“ (Mazurek et al.2003) und „Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Argillaceous Media“. Ähnlich wie bei Salzformationen können Tone/Tonsteine sowohl die Anforderungen als Wirtsgestein als auch die der natürlichen geologischen Barriere erfüllen. Außerdem sollen sie im Fall von Bentonit als Einbettungs- und Versatzmedium (geotechnische Barrieren) in den geplanten Endlagerbergwerken eingesetzt werden. Tonige Gesteine besitzen vor allem wegen der sie oft charakterisierenden geringen bis sehr geringen Permeabilität bzw. dem entsprechend niedrigen Durchlässigkeitsbeiwert (z.B. KATSUBE et al. 1991, KATSUBE & CONELL 1998, APLIN et al. 1999,), der für sie typischen Plastizität, ihrer chemischen Pufferwirkung und ihrer Rückhaltekapazität für Schadstoffe und Radionuklide günstige Barriereeigenschaften. Diese besonderen Eigenschaften, die vor allem auf der fein- feinstkörnigen Struktur dieser Gesteine und dem hohen Anteil an Schichtsilikaten bzw. Tonmineralen basieren, lassen sie neben verschiedenen technischen Anwendungen (Deponiebarrieren und Abdeckungen, Isolations- und Katalysatormaterial) auch als Barrieregesteine bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet erscheinen (Abb. 2).

Tone bzw. Tonsteine bestehen hauptsächlich aus einem Gemenge von verschiedenen Tonmineralen und einem stark variierenden Wasseranteil, welcher sich aus freiem Porenwasser und Wasser in unterschiedlich gebundener Form zusammensetzt. Tone werden nach sedimentologischen und ingenieurgeologischen Gesichtspunkten als überwiegend von Schichtsilikaten aufgebaute Lockersedimente mit einer medianen Korngröße von ≤ 2 µm (bzw. zum Teil auch ≤ 4 µm – siehe z.B. HELING 1988, TUCKER 2001) definiert. Bei der Unterteilung der sedimentären Festgesteine wird in den meisten Fällen die korngrößenabhängige Grenzziehung von den Lockersedimenten übernommen (Tonstein ≤ 2 µm, Siltstein >2-62 µm, Sandstein >62µm). Bei der Abgrenzung von Ton- und Siltsteinen kann die rein korngrößenabhängige Unterteilung unter bestimmten Bedingungen jedoch zu Schwierigkeiten führen, da z.B. sehr feinkörnige Sedimentgesteine mit hohem Quarzanteil existieren oder im Zuge der Diagenese auch schichtsilikatreiche Gesteine entstehen können, die eine mediane Korngröße von über 2 µm aufweisen. Neben rein korngrößenabhängigen Definitionen werden von anderen Autoren deshalb auch rein stoffliche Klassifizierungen

bzw. Kombinationen von beiden favorisiert (DOTT 1964, PETTIJOHN 1973, POTTER 1980, HELING 1988). Die Schwierigkeiten bei der klaren Abgrenzung der feinkörnigen, schichtsilikatreichen Festgesteine bedingen eine Vielzahl von unterschiedlichen Begriffen für die Gruppe der Silt- und Tonsteine in der internationalen Literatur, wie z.B. mudstone, shale, claystone, siltstone, pelite, pelitic rocks, argillaceous rocks, die zum Teil als Synonym bzw. ohne klare Definition verwendet werden. Eine weitere Schwierigkeit ist die Abgrenzung der Locker- von den sedimentären Festgesteinen und somit die Beurteilung des Verfestigungsgrades.

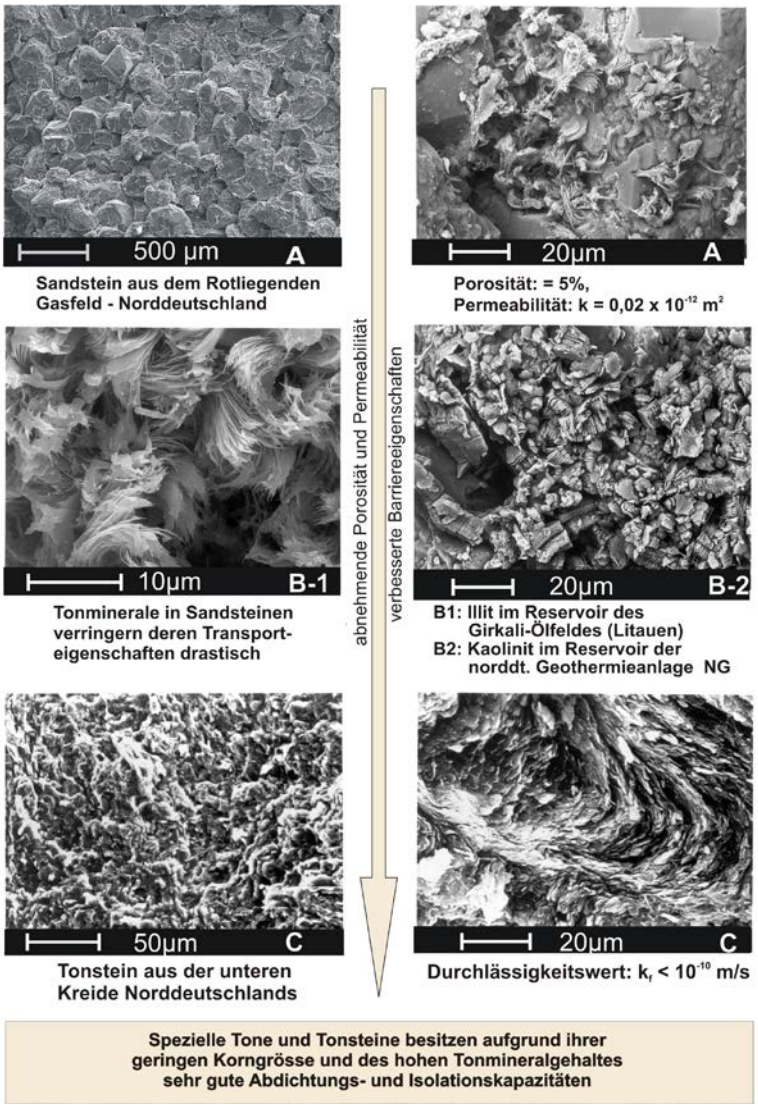


Abb. 2: Elektronenmikroskopische Strukturen klastischer Sedimentgesteine (Sandstein – Tonstein)

Die Aufzählungen zeigen, dass eine eindeutige Klassifizierung oft ohne detaillierte mineralogische und sedimentpetrographische Analysen nicht möglich ist.

Tone und Tonminerale entstehen bei der Verwitterung von Gesteinen hauptsächlich infolge der Hydrolyse von Gesteinspartikeln. Diese Wechselwirkungen mit dem Wasser sind abhängig von den klimatischen und vegetativen Verhältnissen. Somit ist das Vorkommen von speziellen Tonmineralen in geologischen Formationen primär vor allem von der Art des verwitternden Ausgangsmaterials, der Verwitterungsintensität, dem Transport und den Ablagerungsbedingungen abhängig. Bei der Versenkung von Tonformationen werden bei ansteigendem Druck und Temperatur durch Kompaktion und mineralogische Reaktionen wesentliche strukturelle, mineralogische, chemische und petrophysikalische Eigenschaften verändert. So werden neben der Reduktion des Wasseranteils bzw. der Porosität die bei relativ geringen Temperaturen stabilen Illit-Smektit-Wechsellagerungsminerale bzw. reine Montmorillonite bei erhöhter Temperaturbeanspruchung unter Abnahme des quellfähigen Schichtanteils teilweise oder vollständig in Illite umgewandelt. Mit diesen Umwandlungen gehen Veränderungen in der Struktur (Einregelungs- und Verfestigungsgrad, Korngrößen) einher, welche den Übergang von Tonen zu Tonsteinen und bei höheren p-T Bedingungen zu Tonschiefern bedingen (Abb. 3) und somit die petrophysikalischen Eigenschaften wesentlich bestimmen. Sedimentfazies und Diagenesegrad bedingen somit ganz wesentlich die Eignung von Tonen und Tonsteinen für die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten.

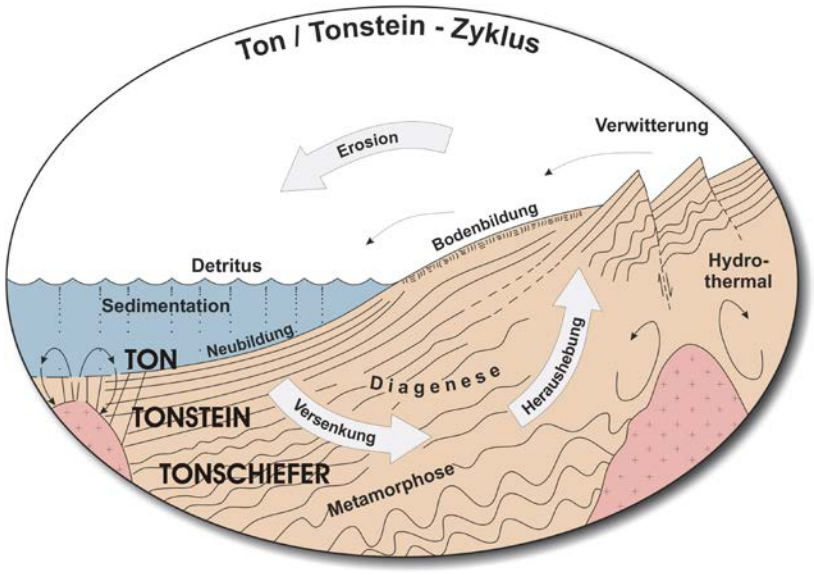


Abb. 3: Bildungsbereiche von tonigen Sedimentgesteinen
(in Anlehnung an ESLINGER & PEAVER 1988)

Tone und Tonsteine kontrollieren durch ihre Eigenschaften den Transport von Fluiden sowohl im oberflächennahen Bereich als auch in den tieferen Bereichen geologischer Strukturen wie z. B. in sedimentären Becken. Sie wirken zumeist als hydrogeologische Barrieren und begrenzen somit sowohl die tiefen oft Salzwasser führenden Grundwasserstockwerke als auch die für die Trinkwassergewinnung und die Biosphäre wichtigen Süßwasserreservoire. Für Kohlenwasserstoffsysteme besitzen Tonsteine sowohl Bedeutung als Barriere für entsprechende Reservoire (Abdeckerhorizonte) als auch als KW-Muttergesteine (Bildung von Kohlenwasserstoffen aus Corg.-reichen Tonsteinen). Sie beeinflussen zudem die Entstehung von Überdruckbereichen im Zuge der Absenkung von Sedimentfolgen.

5.2.2 Tonige Gesteinsformationen in Deutschland

Tone und Tonsteine treten in den verschiedensten stratigraphischen Einheiten des Deckgebirges in Nord- und Süddeutschland auf. Sowohl die Mächtigkeit, die flächenmäßige Verbreitung als auch die Homogenität und die stoffliche Ausbildung dieser Ablagerungen variieren jedoch stark.
Die Verbreitung potentieller toniger Barrieregesteine ist im oberflächennahen Bereich vor allem im Rahmen der Standorterkundung von Deponien untersucht. Entsprechende Schlussfolgerungen und Erfahrungen hinsichtlich geowissenschaftlicher Kriterien für barrierewirksame Gesteine sind durch eine Arbeitsgruppe „Deponien“ der Staatlichen Geologischen Dienste zusammengefasst worden (AD-HOC ARBEITSGRUPPE DEPONIEN 1997). Diese Darstellung gibt unter Einbeziehung der Erfahrung aller Bundesländer einen guten Überblick zum Auftreten von tonigen Gesteinsformationen in den verschiedenen Regionen.

Grundlage zur Beurteilung entsprechender Ablagerungen im tieferen Untergrund Deutschlands sind Bohrungen, die im Rahmen der Erdöl-Erdgas-, Salz-, Erz- oder anderer Rohstofferkundung sowie in geringerem Umfang als Forschungs- und Kartierungsbohrungen abgeteuft worden sind. Anlage 1.2 gibt einen Überblick über die Verteilung von Tiefbohrungen in den relevanten Regionen Deutschlands. In Verbindung mit den Ergebnissen dieser Bohrungen lassen sich zusätzliche Informationen aus reflexionsseismischen und anderen ge-

ophysikalischen Messungen ableiten. Abbildung 4 gibt einen Überblick über den Kenntnisstand zur stratigraphischen Lage wichtiger Tonformationen.

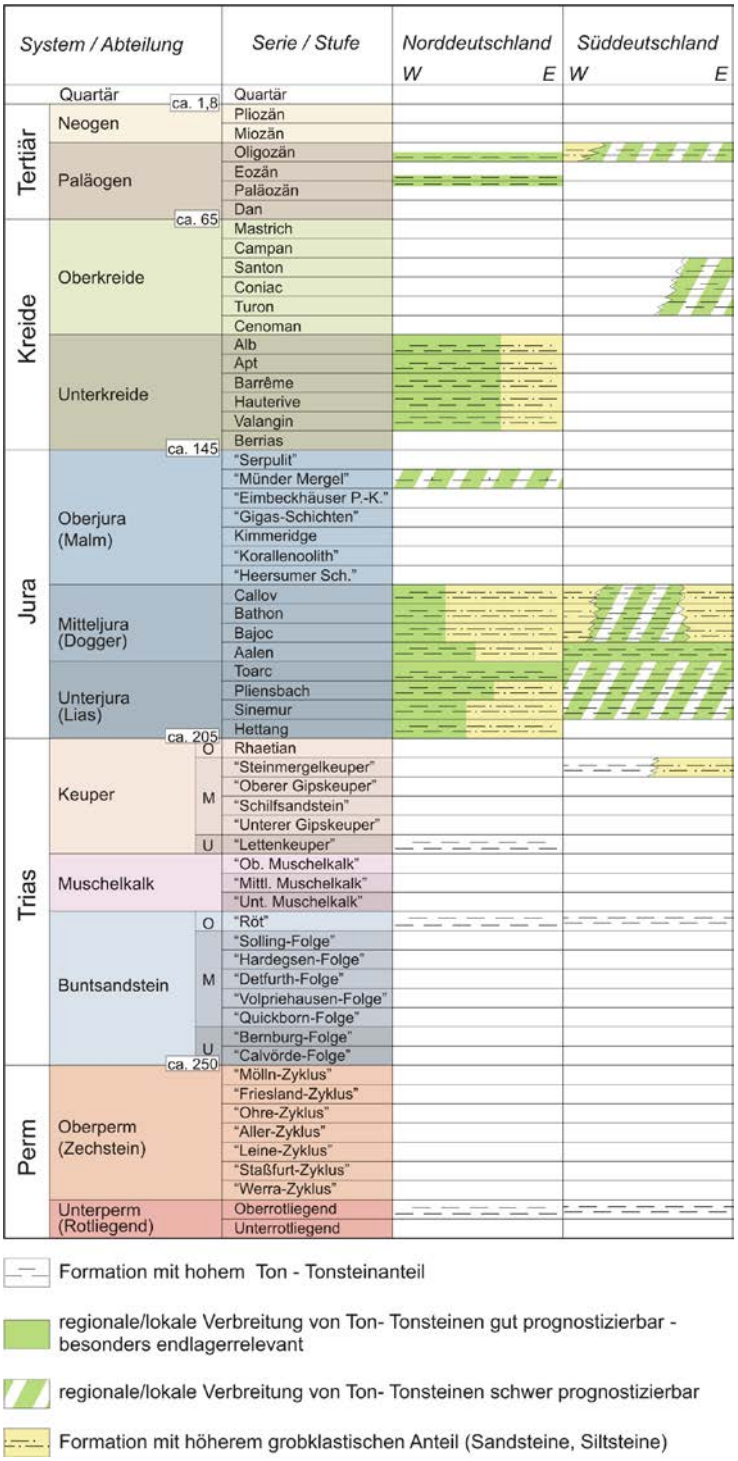


Abb. 4: Stratigraphische Position wichtiger Ton-/Tonsteinformationen in Deutschland.

Aus den unter Punkt 4.2 angeführten Mindestanforderungen für Wirtsgesteine sind folgende Grundanforderungen an potentiell untersuchungswürdige Ton-/Tonsteinformationen ableitbar:

- Formation mit 100 m mächtigenTonen oder Tonsteinen
- großflächige Verbreitung
- relativ homogen und gut prognostizierbar
- Tiefenlage zwischen 300 und 1500 m
- Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s.

Diese Grundanforderungen stimmen auch unter dem Aspekt der Barrierewirksamkeit mit der Vorgehensweisen zur Standortsuche in der Schweiz, Zielhorizont Opalinuston mit 110-120 m Mächtigkeit (NAGRA 2002, GAUTSCHI 1997), und in Frankreich, wo 130 m mächtige Tone/Tonsteine des Jura näher untersucht werden (ANDRA 1997), überein.

Mächtige Tone und Tonsteine kommen in Deutschland fast ausschließlich innerhalb der in Anlage 1.1 dargestellten Sedimentbecken vor. In den Bereichen mit gefaltetem sedimentären Grundgebirge sind die Tonsteine unter höheren Druck- und Temperaturbedingungen metamorph überprägt worden, so dass in diesen Gebieten nur Tonschiefer auftreten, die mindestens z. T. aufgrund der Schieferung und vorhandener Klüftung nicht mehr die geforderten geringen Wasserdurchlässigkeiten aufweisen. Bei Regionen mit an der Oberfläche anstehendem bzw. unter sehr geringer Bedeckung liegendem kristallinem Grundgebirge sind mächtige Tonsteine ebenfalls nicht vorhanden. Mächtigere Tone treten in diesen Gebieten nur stark lokal begrenzt auf, zumeist handelt es sich um Verwitterungsbildungen (z. B. Kaolinablagerungen in Sachsen). Aus diesen Gegebenheiten wird im Zusammenhang mit Abbildung 4 deutlich, dass die wichtigsten Ton-/Tonsteinformationen in Deutschland innerhalb des känozoischen und mesozoischen Deckgebirges liegen. Während sich die weitere Analyse dieser Ton-/Tonsteinformationen im Hinblick auf deren Mächtigkeit und Tiefenlage auf eine Vielzahl von Bohrungen, bereits bestehenden Kompilationen und zahlreichen geophysikalischen Messungen stützen kann, ist man bei

der direkten Beurteilung der Gebirgsdurchlässigkeit auf die Auswertung von Testdaten angewiesen. Für Tongesteinsformationen gibt es jedoch nur sehr wenige dieser Daten, da mit den tieferen Bohrungen vor allem die Speicherhorizonte charakterisiert und erschlossen worden sind. Die vorhandenen Testdaten (zumeist aus Packertesten) von tonigen Gesteinsformationen sind von APPEL & HABLER (2001) und von FELDRAPPE et al. (2004) ausgewertet worden. Die zusammengestellten Daten von APPEL & HABLER zeigen, dass Tonsteine im Tiefenbereich zwischen 300 – 1100 m die Grundanforderung hinsichtlich einer niedrigen Gebirgsdurchlässigkeit überwiegend erfüllen (siehe Abb. 5).

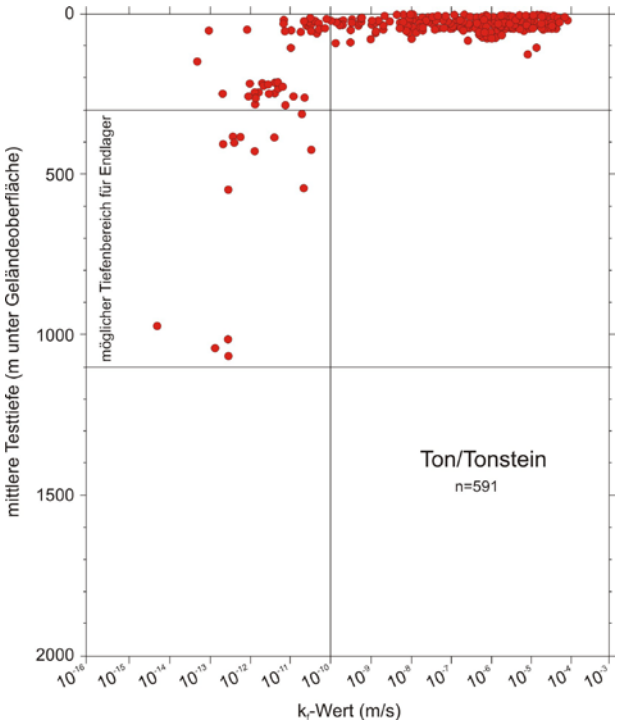


Abb. 5: Tiefenabhängige Verteilung der kf-Werte des Gesteinstyps Ton/Tonstein (APPEL & HABLER 2001, Abb. 5-3, S. 71)

Wesentlich höhere Gebirgsdurchlässigkeiten in geringeren Tiefen sind vermutlich vor allem auf Entlastungsklüfte und Verwitterungseffekte zurückzuführen. Die Analysen von FELDRAPPE et. al. (2004) belegen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Ton-/Tonsteinanteil der Formation und der Gebirgsdurchlässigkeit. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit den Untersuchungen von YANG & APLIN (1998), KATSUBE & CONNELL (1998), BRYANT (2003) und OSIPOV et al. (2004). Für die weiteren Betrachtungen der Ton- und Tonstein-

formationen kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sowohl Tonsteine als auch siltige Tonsteine mit den entsprechenden Mächtigkeiten in Tiefen zwischen 300 – 1500 m die Grundanforderung hinsichtlich der niedrigen Gebirgsdurchlässigkeit überwiegend erfüllen. Die Einschätzung lokaler Verhältnisse kann jedoch nur über entsprechende Bohrungen und detaillierte Untersuchungen erfolgen.

Um untersuchungswürdige Ton-/Tonsteinformationen für die Endlagerung weiter einzugrenzen, erfolgt die Analyse dieser Gesteinsformationen durch die BGR in drei Schritten. Der erste Schritt umfasste die regionale Übersichtskartierung im Hinblick auf die Mächtigkeit, die Tiefenlage sowie die Homogenität und die Prognostizierbarkeit der Gesteinsformationen (HOTH et al. 2001, FELDRAPPE 2003). Im zweiten Schritt stehen methodische Untersuchungen zur Charakterisierung von Tonsteinen mittels seismischer und Bohrlochmessungen sowie die Analyse spezieller Eigenschaften der Tonsteine im Vordergrund (WIRTH et al. 2003, FELDRAPPE et al. 2004, NOACK 2004). Im dritten Schritt werden spezielle Regionen, in denen untersuchungswürdige Tonsteine auftreten, detailliert untersucht.

Ton/Tonstein- Formationen, welche die oben erwähnten Grundforderungen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage erfüllen, treten in folgenden Regionen und stratigraphischen Abschnitten auf (siehe auch Abb. 4):

1) Tone/Tonsteine des Tertiär; vor allem in Schleswig-Holstein und in Teilen von Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Niedersachsen (Oberpaläozän - Miozän) sowie im Süddeutschen Molassebecken und im Oberrheingraben (Eozän - Miozän).

2) Tone/Tonsteine der Unterkreide (vor allem Valangin - Alb); vorwiegend in Niedersachsen und in Teilen von Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg. Tone/Tonsteine der Oberkreide regional stark begrenzt in Süddeutschland.

3) Tone/Tonsteine des Jura; vorwiegend im Niedersächsischen Becken, in Teilen von Sachsen Anhalt und Mecklenburg, im Süddeutschen Molassebecken sowie der Schwäbisch/Fränkischen Alb.

Tonige Formationen anderer stratigraphischer Abschnitte erfüllen zum großen Teil die oben genannten Grundanforderungen nicht. Die bisherigen Untersuchungen sind auf diese Gesteinsformationen konzentriert worden, da sie nach dem derzeitigen geologischen Kenntnisstand diejenigen darstellen, die unter den deutschen Gegebenheiten am untersuchungswürdigsten sind. Lokal stärker begrenzte tonige Formationen anderer stratigraphischer Abschnitte (Trias, Permokarbon) erfüllen zum großen Teil die oben genannten Grundanforderungen nicht, da sie in den Beckenbereichen einerseits in zu großen Tiefen liegen und in den Randbereichen der Becken die Mächtigkeiten nicht erreichen. Lokale Ausnahmen können allerdings auftreten. Regionen in denen dies jedoch lokal der Fall ist, werden vorerst nicht weiter betrachtet (siehe auch vorgeschlagene Verfahrensweise des AKEND 2002). Sollte sich dies aber als notwendig erweisen, sind diese in einer späteren Bearbeitungsetappe zu berücksichtigen.

Datengrundlage für die Kartierung der Tonformationen sind bereits in der BGR bzw. dem NLfB existierende Datenbanken, wie z. B.

- die Datenbank des NLfB und des „Erdölgeologischen Austauschkreises“ mit den Erdöl-Erdgas- Austauschdaten (siehe z.B. BRAUNER & KOSCHYK 2000),
- die Datenbank der Ergebnisse der Kartierungsbohrungen,
- die Bohrungsdatenbank des BGR-Referates B 3.21.

Neben den direkten Bohrungsinformationen, die zumeist in den entsprechenden Abschlußberichten der Bohrungen dokumentiert sind, wurden unveröffentlichte Arbeiten der Geologischen Landesämter, die verschiedenen verfügbaren Zusammenstellungen von Bohrungsergebnissen (siehe z.B. KUCKELKORN et al. 1999), bereits publizierte Informationen und verschiedene bereits vorhandene Kompilationen in die Übersichtskartierung einbezogen. Zu letzteren zählen insbesondere der Geotektonische Atlas von NW-Deutschland (KOCKEL et al. 1996, 1999) sowie die im BGR Referat B 3.21 in Arbeit befindliche östliche Fortsetzung und regionale geologische und geophysikalische Kartenwerke, wie z. B. das Geophysikalische Kartenwerk von Ostdeutschland (GEOPHYSIK LEIPZIG,

1989) und vorhandene paläogeographisch - lithologische Karten (ZGI: Ostdeutschland 1970-1978; Atlas der Unterkreide von JARITZ et al. 1967).

Da eine detaillierte und exakt auf die Mächtigkeiten von Tonen und Tonsteinen bezogene Übersichtskartierung für ganz Deutschland extrem zeitaufwendig und wirtschaftlich (vom Aufwand her) nicht vertretbar ist, wurde für den ersten Untersuchungsschritt folgender Kompromiss gefunden. Auf der Basis der bereits vorhandenen Kompilationen und Daten und zusätzlich analysierter Bohrungen wurden Mächtigkeiten und Tiefenlagen von stratigraphisch und z.T. auch geophysikalisch abgrenzbaren Gesteinsformationen erfasst, die überwiegend aus tonigen Gesteinen (Ton, Tonsteine, siltige Tonsteine, Tonmergelsteine) bestehen (HOTH et al. 2001). Die nachfolgenden diskutierten Kartendarstellungen beziehen sich deshalb überwiegend auf solche definierten Gebirgsabschnitte. Die dargestellten Mächtigkeiten der Schichten verkörpern also keinen 100 % Anteil an Ton bzw. Tonstein.

5.2.2.1 Ton-/Tonsteinformationen des Tertiär

Anlage 13 zeigt die generelle Verbreitung von Tonformationen im Tertiär. Mächtige tonige Sedimentgesteine dieses stratigraphischen Systems sind im Alpenvorland-Becken, dem Oberrheingraben und dem Norddeutschen Becken vorhanden.

Die tertiären Schichten erreichen im Norden des **Alpenvorland-Beckens** (Anl. 1.1) mit etwa hundert Metern ihre geringsten Mächtigkeiten, in Richtung auf den Alpenrand steigen die Mächtigkeiten bis auf maximal 6000 m an. Durch eine Vielzahl von Bohrungen der Erdölindustrie ist nachgewiesen, dass die entsprechenden Ablagerungen neben lockeren auch verfestigte grobklastische (Sandsteine, Konglomerate), feinklastische (Ton- und Siltsteine) und seltener auch karbonatische Sedimentgesteine enthalten. Im unteren Oligozän überwog der marine Einfluß und die sogenannte Untere Meeres-Molasse sedimentierte. In dieser Abfolge sind vor allem in Alpenrandnähe auch Tonmergelschichten ausgebildet. Die darüber folgende Untere Süßwasser-Molasse (Oberes Oligozän) besitzt ebenfalls Tonmergelschichten, allerdings in nicht so großer Mächtigkeit. Zwischen Unterer Süßwasser-Molasse und der später im Untermiozän abgelagerten Oberen Meeres-Molasse existiert eine Schichtlücke. Tonige und fein-

sandige Schluff- bzw. Siltsteine repräsentieren die feinklastischen Gesteine dieses Sedimentationsabschnittes. Nach dem Rückzug des Meeres sedimentierte vom Mittel- bis zum Obermiozän die Obere Süßwasser-Molasse. Auch die Ablagerungen dieses Abschnittes enthalten neben sandigen Sedimenten und sehr karbonatreichen Mergelsteinen, Silt- und Tonsteine die teilweise Braunkohle führen. Die während dieser unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen zur Ablagerung gelangten tonigen Gesteine stellen teilweise gute geologische Barrieren dar, aufgrund der starken faziellen Wechsel ist ihre Prognostizierbarkeit jedoch sehr eingeschränkt.

Das zweite bedeutende Verbreitungsgebiet von tertiären Tonen und Tonsteinen liegt im **Oberrhein-Graben** (Anl. 13). Der Graben besitzt eine Länge von 300 km und eine Breite von 35 km. Sein tektonischer Bau ist insbesondere durch die aktiven Grabenrandstörungen östlich und westlich des Rheines sowie durch die zahlreichen Staffelbrüche innerhalb des Grabens charakterisiert. Die Grabenfüllung selbst enthält in erster Linie mächtige Sedimentpakete des Tertiärs, die von Süden bis zur Höhe von Heidelberg u.a. auch von tonigen Sedimentserien des Jura unterlagert werden. Innerhalb des Tertiärs sind mächtige Tonsteine bzw. tonige Gesteinsserien erbohrt worden. Bedingt durch den stark gestörten tektonischen Bau der Region ist jedoch einerseits davon auszugehen, dass die Barrierefunktion teilweise durch Kluft- und Auflockerungszonen gestört ist und andererseits bedingt durch die synsedimentäre Wirkung dieser tektonischen Elemente die entsprechenden Serien auch lithologisch sehr inhomogen ausgebildet und ihre Barrierefunktion deshalb ebenfalls schwer prognostizierbar ist. Zusätzlich zeichnet sich der gesamte Oberrheingraben durch eine für Deutschland hohe Erdbebenhäufigkeit aus und zählt deshalb fast vollständig zu den Ausschlussgebieten (Anl. 3).

Das größte Verbreitungsgebiet tertiärer Tone und Tonsteine liegt in **Norddeutschland**. Das Tertiär begann in diesem Raum mit einer beckenweiten Meeresregression. Erst mit den beckenweiten Transgressionen im Oberpaläozän und Eozän wurden in diesem Bereich wieder Sedimente abgelagert. Mächtige und weit verbreitete Tone bzw. Tonsteine treten im Oberen Paläozän, im Eozän sowie im Mittleren Oligozän und im Mittel-Miozän auf. Die beiden letzteren Tonformationen kommen als Endlagerhorizont wegen ihrer Nähe zu

Schutzgütern (Rupeltone sind z.B. die wichtigste Barriere zwischen Salz- und Süßwasserstockwerk in Norddeutschland) nicht in Betracht.

Anlage 14 zeigt die Tiefenlage der Oberfläche des Mitteleozän – Untereozän welche in etwa der Oberfläche der tonigen Gesteinsformationen entspricht. Die roten Farben weisen auf eine Tiefenlage > 1500 m unter NN hin. Entsprechende Werte werden nur im Nordsee-Küstenbereich von Schleswig-Holstein und im Raum Hamburg erreicht. Grüne Farben kennzeichnen Gebiete, in denen diese Fläche zwischen 250 und 1500 m unter NN liegt, und die somit rein von der Tiefe dieser Gesteine als untersuchungswürdig erscheinen. Gelbe Farben kennzeichnen einen Tiefenbereich der die Mindestanforderung von 300 m Mindesttiefe überwiegend nicht erfüllt. Weiß markierte Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes sind zumeist durch Salzstrukturen bedingte sedimentfreie Gebiete. Aus der Analyse der entsprechenden Mächtigkeiten der tonigen Gesteinsserien wird deutlich, dass die geforderten Mindestmächtigkeiten nur in den südlichen Randbereichen des Beckens und im Osten des Untersuchungsgebietes (Teile von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern) nicht erreicht werden. Besonders hohe Mächtigkeiten treten vor allem im nördlichen Niedersachsen und in Teilen Schleswig-Holsteins auf. Aus der Kombination der Mächtigkeits- und Tiefenlagenkarten ist ersichtlich, dass der überwiegende Teil Norddeutschlands im Hinblick auf tertiäre Tone und Tonsteine als weiter untersuchungswürdig einzustufen ist. Der überwiegende Teil dieser Tonsedimente besitzt einen geringen bis sehr geringen Verfestigungsgrad. Aus diesem Grund sind diese Gesteine als geologische Barrieren zwar von großer Bedeutung, aufgrund ihrer geomechanischen Eigenschaften ist ihre Nutzung als Wirtsgestein jedoch sehr fragwürdig, zumal bei der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle zusätzlich mit mineralogischen Reaktionen der Gesteine gerechnet werden muss.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Tone und Tonsteine des Tertiär als Barrieren von großer Bedeutung sind, ihre Eignung als Wirtsgesteine aber eher kritisch beurteilt werden muss. Da andere Tonformationen in Deutschland deutlich bessere Eigenschaften besitzen, sind aus Sicht der BGR die Tonformationen des Tertiär bestenfalls als eine Reserveoption bei der weiteren Endlagersuche zu betrachten.

5.2.2.2 Ton-/Tonsteinformationen der Kreide

Aus Anlage 15 ist die generelle Verbreitung von Tonformationen der Kreide in Deutschland ersichtlich. Das Hauptverbreitungsgebiet toniger Sedimente dieses stratigraphischen Systems befindet sich in **Norddeutschland**. Die Mächtigkeiten der Unterkreide erreichen im Niedersachsen Becken maximale Werte von über 2000 m (KEMPER 1979). Abweichend von der Situation im Oberen Jura ist die Verbindung zum offenen Meer während des Berrias (Wealden) fast vollständig unterbrochen. Typisch für diesen Sedimentationsabschnitt sind sapropelitische Tonsteine, die in den beckenzentralen Bereichen zur Ablagerung kamen. Von den südlichen Festländern her wurden auch Sandsteine in dieses Becken geschüttet. An den proximalen Enden der entsprechenden Schüttungsfächer verzahnen sich die mächtigen Sandkörper mit siltig- tonigen Sedimenten, die in Richtung der beckenzentralen Regionen in die sapropeltischen Tonsteine übergehen. Schon gegen Ende des Wealden setzten vereinzelt marine Ingressionen ein, so dass Sedimente brackisch-limnischer und mariner Faziesbereiche wechsellagern (BOIGK 1981). Im Valangin überdeckte das Meer wieder den gesamten Raum des Niedersachsen Beckens und sogar Teile der Pompeckj'schen Schwelle (KEMPER 1973). Der überwiegende Teil der während der marinen Unterkreide abgelagerten Sedimente besteht aus dunkelgrauen Tonsteinen, Tonmergelsteinen und Mergelsteinen. Einschaltungen von Sandsteinen, die aus dem Raum der Rheinischen Masse und der Ostholländischen Schwelle geschüttet worden sind, treten vor allem im Osten und Süden des Niedersachsen Beckens auf.

In der nordöstlichen Verlängerung diese Beckens erstreckte sich ein Sedimentationsraum von SW-Mecklenburg und NW-Brandenburg bis nördlich der Niederlausitz. Ablagerungen des Wealden erreichen hier teilweise Mächtigkeiten bis 900 m (DIENER 1967). Die Transgression des Meeres erfolgte in diesem Bereich erst im oberen Valangin und z. T. sogar erst im Hauterive. Lückenlose Profile des Abschnittes Hauterive bis Apt sind nur aus den westlichen Bereichen dieses Sedimentationsgebietes bekannt. Bei den entsprechenden Sedimenten handelt es sich auch hier überwiegend um Tonmergel- und Tonsteine. Die nördlichen und östlichen Regionen des NE-Teils des Norddeutschen Be-

ckens weisen nur lückenhafte Profile und gleichzeitig einen hohen Anteil an Sandsteinen auf.

In **Süddeutschland** treten mächtigere tonige Sedimente in der Oberkreide Bayerns (siehe z. B. Lemcke 1986) und hier speziell im Bereich der Wasserburger Senke und des Braunauer Troges auf (Anl.15). In der Wasserburger Senke sind ebenfalls Sedimente der Unterkreide nachgewiesen. Während die Mächtigkeit der Oberkreidesedimente in letzterem Senkungsraum mehr als 500 Meter beträgt, werden im Braunauer Trog hingegen bis zu 1000 Meter erreicht. Die Bildung dieser beiden Becken setzte ab dem Obercenoman ein und erfuhr besonders im Coniac eine Intensivierung. Im Santon wurden vor allem schwach bis mäßig sandige Tonmergel mit fein- bis mittelkörnigen Sandzwischenlagen abgelagert. Diese Art der Sedimentation setzt sich besonders auch im Braunauer Trog bis in das Campan mit großen Mächtigkeiten fort. Mit den Campansedimenten enden nach heutigem Kenntnisstand auch die Oberkreideablagerungen in der Region des Molassebeckens.
Bei der detaillierten Auswertung von 16 Bohrungen aus der Wasserburger Senke und dem Braunauer Trog mit erbohrter Oberkreide zeigt sich, dass in beiden Becken Tonmergel und Tonmergelsteine mit Mächtigkeiten > 100 Meter vorkommen, allerdings in unterschiedlichen Teufen. Die Tonmergel der Oberkreide in der Wasserburger Senke scheiden bedingt durch ihre Teufenlage (>1500 m) für die weiteren Betrachtungen aus. In der Braunauer Senke kommen die Tonmergelsteine zwar in dem vorgegebenen Teufenbereich vor, weisen aber in den einzelnen Bohrungen fast immer mehr oder weniger mächtige Sandsteineinschaltungen auf. Der aus den Profilbeschreibungen und den Bohrlochmessungen abgeschätzte Ton-/Tonsteinanteil des Gebirges beträgt meist nur 65%. Nach den Untersuchungen von FELDRAPPE u. a. (2004) können solche Gesteinsfolgen die Anforderungen hinsichtlich einer sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeit unter bestimmten Umständen erfüllen. Im Zusammenhang mit der erheblichen faziellen Variabilität dieser Ablagerungen bedingt dies aber erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Prognostizierbarkeit ihrer Eigenschaften. Aus diesem Grund werden die Oberkreideablagerungen Bayerns nicht als eine derzeitige Wirtsgesteins-Option bei der Endlagersuche gesehen.

Weiter untersuchungswürdige Regionen mit Tonen und Tonsteinen liegen deshalb nur in **Norddeutschland**. Anlage 16 und 17 zeigen die Tiefenlage und die Mächtigkeit der marinen Unterkreide (der Abschnitt mit den mächtigen Ton- und Tonsteinen, siehe HOTH u. a. 2001, WIRTH u. a. 2003). Aus Anlage 16 geht hervor, dass die Unterkreide in großen Teilen von Schleswig-Holstein und des nördlichen Niedersachsens mehr als 1500 m tief liegt und deshalb für die Endlagerproblematik nicht weiter untersuchungswürdig ist, zumal auch die Mächtigkeiten in diesen Regionen zu einem großen Teil unter 100 m liegen. Die Verbreitung bedeutender Sandsteinhorizonte innerhalb der überwiegend tonigen Unterkreide im niedersächsischen Raum (siehe BOIGK 1981 und JARITZ et al. 1967) ist in der Anlage durch eine spezielle Signatur gekennzeichnet.

Da die nördlichen und östlichen Regionen des NE- Teils des Norddeutschen Beckens nur lückenhafte Profile aufweisen und gleichzeitig durch einen hohen Anteil an Sandsteinen charakterisiert sind, ist nach den derzeitig verfügbaren Daten bzw. Kompilationen eine Aushaltung von Regionen mit mächtigen Tonsteinformationen für diese Regionen nicht möglich. Bei einem Großteil dieser Gebiete muss davon ausgegangen werden, dass durch die zahlreichen Einschaltungen mächtiger Sandsteine die Mächtigkeit homogener Tonsteinhorizonte unter 100 m liegt (Anl. 17). Aus der Kombination der Tiefenlage und der Gesamtmächtigkeit, lassen sich diejenigen Gebiete aushalten, auf die sich weitere detaillierter Untersuchungen konzentrieren sollten (siehe Punkt 6).

5.2.2.3 Tonsteine des Jura

In der Anlage 18 ist die generelle Verbreitung von Tonen und Tonsteinen in Deutschland dargestellt. In **Norddeutschland** treten mächtige Tonsteine innerhalb des Unteren und Mittleren Jura auf. Bedingt durch eine weltweite Ingression des Meeres an der Wende Trias/Jura war das Norddeutsche Becken zu dieser Zeit ein fast vollständig mariner Ablagerungsraum. Im Verlaufe des Unteren Jura kam es dann zu einem Wechsel zwischen Trans- und Regressionen des Meeres. Der Lias ist in Norddeutschland zwischen 100 und maximal etwa 1500 m mächtig, das Hauptsenkungsgebiet liegt in NW-Deutschland. Die maximalen Mächtigkeiten treten einerseits innerhalb rheinisch (NNE-SSW) gerichteter Spezialtröge auf, deren Bildung mit Bewegungsvorgängen der Permsalina-

re im Zusammenhang stehen. Weiterhin sind eine größere NW-SE gerichtete Zone, die in etwa das westliche und nordwestliche Niedersachsen umfasst, sowie der Gifhorn-Hamburger Trog durch sehr hohe Mächtigkeiten charakterisiert. Lokal sind in diesen Gebieten bis zu 1400 m mächtige vor allem dunkle Tonsteine führende Schichten erbohrt worden. Mächtigkeitsreduktionen in Richtung Holland deuten auf den Einfluss einer Mittelholländischen Schwelle hin.

Generell ist in Norddeutschland eine sandigere Ostfazies von einer tonigeren Westfazies (auch Beckenfazies genannt) zu unterscheiden (BRAND & HOFFMANN 1963). Die Sande sind vor allem aus nordöstlicher und südöstlicher Richtung geschüttet worden. In Anlage 19 ist die Tiefenlage der Lias- Oberfläche dargestellt. Beim Vergleich mit Anlage 16 wird deutlich, dass sich die Bereiche mit Teufen <1500 m nun noch stark weiter eingrenzen. In Kombination mit der Mächtigkeitskarte in der Anlage 20 ergibt sich, dass in Niedersachsen nur eine relativ kleine Region verbleibt, in der sowohl Mächtigkeit als auch Tiefenlage die geforderten Grenzbedingungen erfüllen. Bei generell nicht so hohen Mächtigkeiten sind auch Regionen in Mecklenburg, im nördlichen Teil von Sachsen Anhalt und in Brandenburg im Hinblick auf Lias- Tonsteine als weiter untersuchungswürdig einzustufen. Die weiter östlich gelegenen Regionen der Bundesländer Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern sind durch Sedimentfolgen des Lias charakterisiert, die einen hohen Sandanteil aufweisen.

Die marine Entwicklung setzt sich vom Unteren in den Mittleren Jura hinein fort. Auch hier existieren mächtige tonige Ablagerungen. Allerdings werden diese Tonsteinfolgen wesentlich häufiger als im Unteren Jura von Sandsteinen unterbrochen. Nach BOIGK (1981) sind die von Osten geschütteten Flachmeer- und Küstensande bis an den westlichen Rand des Gifhorn- und Ostholstein- Troges verbreitet. Diese Sandsteinschüttungen gehören zu einem im Norden liegenden Deltabereich, dessen Sande sich zungenförmig bis fast an die Rheinische Masse erstrecken. Aufgrund der komplizierten Verhältnisse durch diese Sandsteineinschaltungen ist für diesen Abschnitt eine detaillierte Analyse von Bohrungen durchgeführt worden (FELDRAPPE 2003, FELDRAPPE et al. 2004). Daraus geht hervor, dass im Osten Norddeutschlands nur 9 kleinere Gebiete verbleiben in

denen Tonsteine des Mittleren Jura auftreten, welche die geowissenschaftlichen Mindestanforderungen erfüllen.

In den von der AD-HOC-ARBEITSGRUPPE Deponien der Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesrepublik 1997 veröffentlichten geowissenschaftlichen Rahmenkriterien zur Standorterkundung für Deponien sind in **Süddeutschland** für die Bundesländer Baden Württemberg und Bayern aus dem Jura folgende Tonstein führende Schichten aufgeführt:

Unterer Jura: Baden Württemberg - Lias β (untere und obere beta Tone)

Unterer Jura: Bayern-Lias δ und ε (Amaltheenton und Posidonienschiefer)

Mittlerer Jura: Baden Württemberg und Bayern - Dogger α (Opalinuston – bis 150 m mächtig)

Die Tonsteine des Unteren Jura erfüllen in Süddeutschland nicht annähernd die Mindestkriterien hinsichtlich der Mächtigkeit (100 m) und scheiden deshalb für die weiteren Betrachtungen aus. Von den Tonsteinen des Jura verbleiben für die weiteren Untersuchungen somit nur die Tonsteine des Dogger α (Opalinuston). Nach GAUTSCHI (1997) kann der Opalinuston als ein gut verfestigter, dunkelgrauer, glimmerführender, siltiger Tonstein charakterisiert werden, der teilweise geringmächtige Sandlinsen und Karbonatkonkretionen enthält. Der Tonmineralgehalt liegt zwischen 40 und 80 Gewichtsprozent. Die mineralogische Zusammensetzung lässt sich wie folgt charakterisieren: 18-36 % Illit, 6 -12 % Chlorit, 10- 20 % Kaolinit, 6 –12 % Illit/Smectit-Wechsellagerungen, 10-25 % Quarz und 5-20 % Karbonat. Der Wassergehalt schwankt zwischen 4 und 12 Prozent. Bereits 1992 wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“ durch HEKEL (1992) Ergebnisse von Untersuchungen im Opalinuston der Schwäbischen Alb veröffentlicht, die mit der Dissertation des gleichen Autors 1994 über die „Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium)“ ihren Abschluss fanden.

Der nördliche bzw. westliche Ausbiss der Doggerbasis in der Schwäbischen und Fränkischen Alb ist in den entsprechenden geologischen Karten sehr gut dokumentiert. Die mesozoischen Schichten fallen generell sehr gleichmäßig und flach nach Süden ein und werden im Molassebecken von mächtigen, tertiären Sedimenten überdeckt. Die Doggerschichten tauchen konform mit den an-

deren Ablagerungen mehrere 1000 m ab und wurden durch die nordwärts vorgestoßenen alpinen Decken überschoben bzw. durch die Hebung der Alpen aufgeschleppt (Anl. 21). In südöstlicher Richtung erreichen die Tonsteine des Doggers α die Region der Alpen nicht, sondern streichen auf einer SW-NE verlaufenden Linie (München-Landshut-Straubing) aus. Von dieser Linie aus nimmt die Mächtigkeit des Opalinustons in nordwestlicher Richtung kontinuierlich zu und erreicht im Bereich der Schwäbischen Alb mit 150 m westlich von Ulm seine größte Mächtigkeit, während in der Region der Fränkischen Alb nur im äußersten Norden bei Bamberg Mächtigkeiten von knapp 100 m erreicht werden (Anl. 22). Generell kann daraus geschlossen werden, dass der Opalinuston von den geforderten Mächtigkeiten sowie von den vorgegebenen Teufenintervallen her südlich des Nordrandes der Schwäbischen Alb für weitere Betrachtungen untersuchungswürdig erscheint. Mit Ausnahme einer kleinen Region ist der Opalinuston in Bayern dagegen nicht weiter zu berücksichtigen (siehe Kapitel 6).

Bei der detaillierten Betrachtung ergeben sich durch die vorgegebenen Ausschlusskriterien jedoch weitere Einschränkungen. Speziell der westliche Teil der Schwäbischen Alb ist neben dem Oberrheingraben ein in Deutschland seismisch sehr aktives Gebiet. Zu nennen wäre hier in erster Linie die Region des Hohenzollern-Grabens. Nach den Ausschlusskriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte sind Gebiete innerhalb der Erdbebenzonen ≥ 2 nicht in weitere Untersuchungen einzubeziehen. Dieses Kriterium reduziert die verbleibende Fläche erheblich (siehe Kapitel 6). Zusätzlich sind weitere spezielle geologische Bedingungen zu berücksichtigen. So sind Teile der verbleibenden Regionen durch einen bedeutenden Karstgrundwasserleiter charakterisiert, der z. T. für die Trinkwasserversorgung genutzt wird. In einem weiteren Teilgebiet treten tertiäre Vulkangesteine auf, die den Opalinuston mit zahlreichen Eruptionsröhren durchschlagen haben. Zumindest in der Nähe von den entsprechenden Aufstiegswegen muss damit gerechnet werden, dass der Opalinuston seine Barriereeigenschaften verloren hat.

Für den Oberrheingraben ergeben sich die gleichen Schlussfolgerungen wie für das Tertiär.

5.2.3 Detaillierte Charakterisierung von Tonen und Tonsteinen

Die Beurteilung der Eignung toniger Gesteinsformationen als Barriere- und /oder Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland erfordert neben der Aushaltung von Gebieten, in denen die Ton-/Tonsteinformationen die entsprechenden Mindestanforderungen erfüllen, eine komplexe lithologische, petrophysikalische und geochemische Analyse dieser Gesteinsformationen. Entsprechende Detailuntersuchungen sind aufgrund des Arbeitsaufwandes für die in den Anlagen 24 und 25 dargestellten Regionen nicht flächendeckend möglich, sie können sich nur auf mehrere Detailgebiete konzentrieren. Um diese auszuwählen, ist es notwendig weitere Abwägungskriterien für diese Auswahl zu definieren.

Mit den Arbeiten von WIRTH et al. (2003), FELDRAPPE (2003), HOTH et al. (2003) und WIRTH et al. (2004) ist eine Methodik zur lithologischen und petrophysikalischen Charakterisierung von Tonformationen mittels vorhandener Bohrloch- und seismischer Messungen abgeleitet und auf verschiedene Detailgebiete angewendet worden.

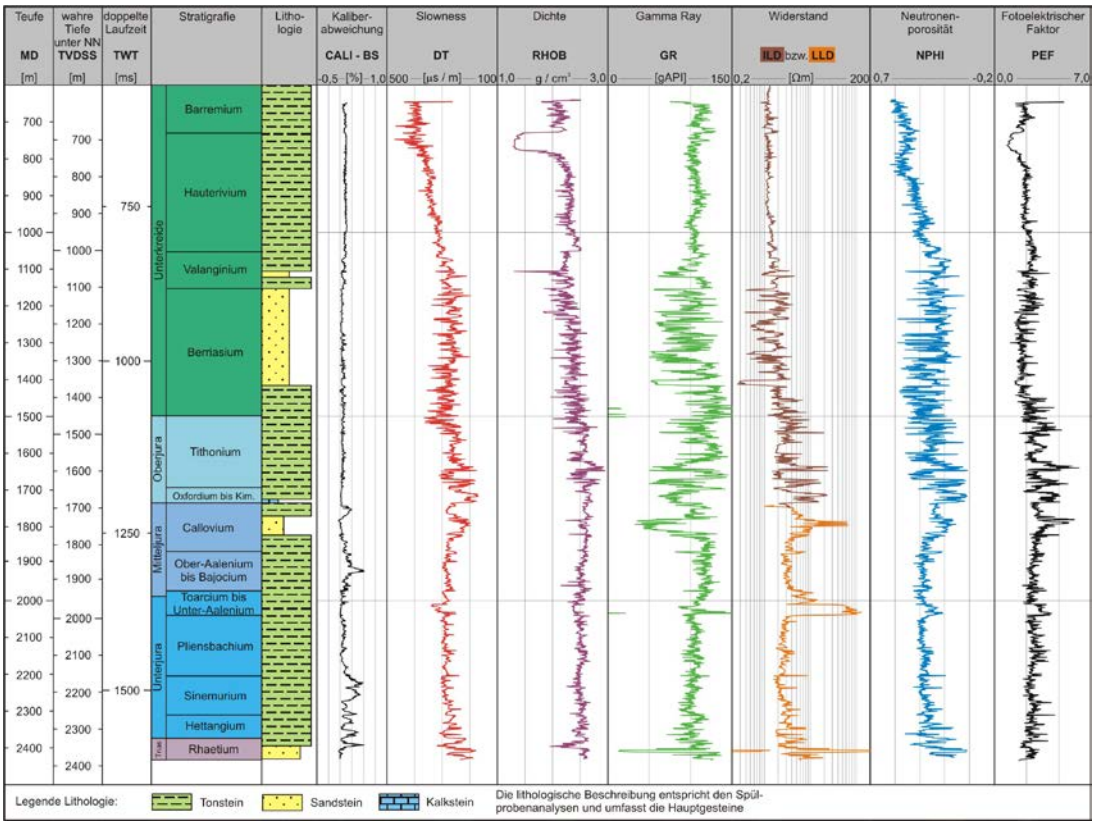
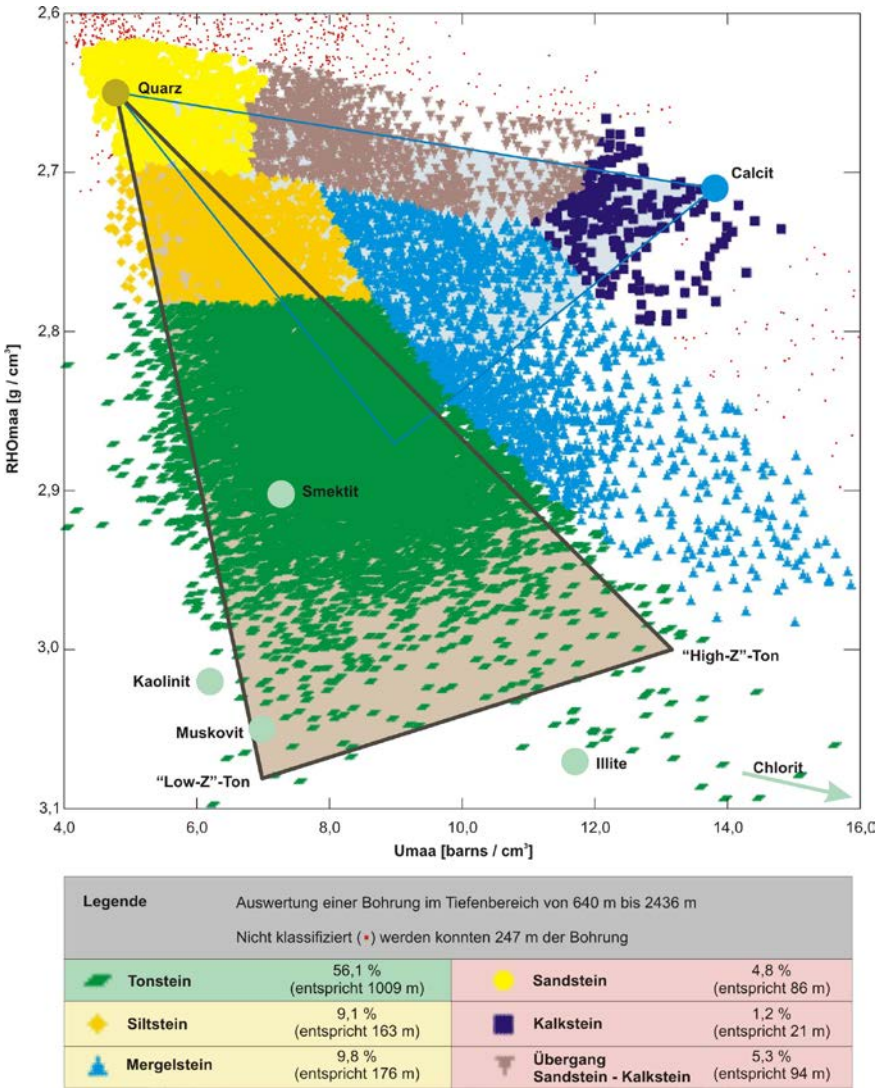


Abb. 6: Beispiel einer Tiefbohrung aus Norddeutschland mit Angabe der erbohrten Lithologie (Tonsteine, Sandsteine, Karbonate) und der verfügbaren Bohrlochmessungen.

Durch die Einbeziehung der geophysikalischen Daten ist es möglich, innerhalb der Tonformationen homogene Tonsteine und/oder Tonmergelsteine abzugrenzen und die räumliche Verbreitung dieser homogenen Schichtpakete zu analysieren und darzustellen. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die Vorgehensweise exemplarisch für eine Tiefbohrung in Norddeutschland. Während in Abbildung 6 die lithologische Gesteinsansprache der Spülproben und Kerne sowie die Logdaten dargestellt sind, zeigt Abbildung 7 eine Klassifikation der Gesteinstypen, basierend auf der Analyse des Dichte-, Neutronenporositäts- und des PEF-Logs.



Legende	Auswertung einer Bohrung im Tiefenbereich von 640 m bis 2436 m Nicht klassifiziert (•) werden konnten 247 m der Bohrung		
Tonstein	56,1 % (entspricht 1009 m)	Sandstein	4,8 % (entspricht 86 m)
Siltstein	9,1 % (entspricht 163 m)	Kalkstein	1,2 % (entspricht 21 m)
Mergelstein	9,8 % (entspricht 176 m)	Übergang Sandstein - Kalkstein	5,3 % (entspricht 94 m)

Abb. 7: Klassifikation der Gesteinstypen der in Abb. 6 dargestellten Bohrung nach Dichte-, Neutronenporositäts- und PEF-Log.

Die generelle Vorgehensweise bei der detaillierten Charakterisierung von Tonformationen ist in Abbildung 8 dargestellt.

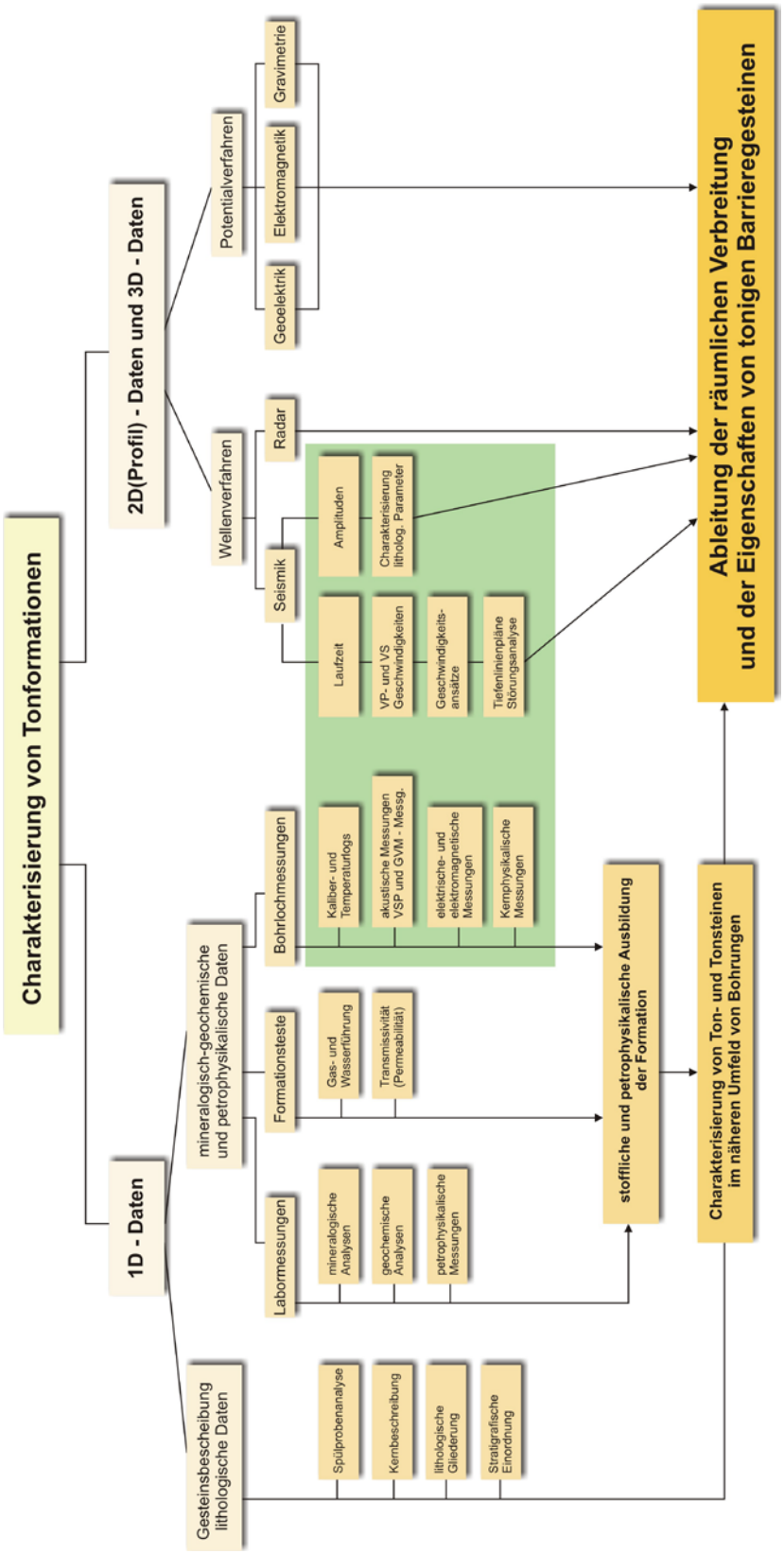


Abb. 8: Vorgehensweise zur Charakterisierung von Tonformationen (WIRTH et al. 2003)

Bei Vorhandensein von Gesteinsproben und von Testergebnissen aus den entsprechenden Bohrungen sind die Untersuchungen durch die Integration geochemischer, mineralogischer und hydrogeologischer Daten erweiterbar. Weiterführende Analysen sind jedoch auf der Basis von bereits vorliegendem Datenmaterial nicht möglich, sie erfordern neue geophysikalische Messungen und gegebenenfalls neue Bohraufschlüsse.

5.3 Andere Wirtsgesteine unter mächtigen Barrieregesteinen (Ton/Salz)

Die anstehenden magmatischen und hochmetamorphen Kristallingesteine sind durch die Kristallinstudie der BGR (BRÄUER et al. 1994) und weitere Arbeiten im Rahmen von FISGEA (Fachinformationssystem Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen, BALZER & MAURER 2003) im Hinblick auf ihre Endlagertauglichkeit evaluiert worden. Obwohl mit diesen Arbeiten Gebiete als weiterhin untersuchungswürdig eingestuft worden sind, erfüllen diese Gebiete in großen Bereichen die Mindestanforderungen hinsichtlich der sehr geringen Wasserdurchlässigkeit aufgrund vorhandener Klüftung nicht bzw. ist die Prognostizierbarkeit dieser Mindestanforderungen nicht gegeben, so dass die entsprechenden Gebiete derzeit nicht weiter betrachtet werden.

Beide Studien haben aber Kristallinbereiche unter mächtiger Sedimentbedeckung nicht untersucht. In Abbildung 9 sind diejenigen Kristallinbereiche der Länder Bayern und Baden – Württemberg südlich der SW - NE verlaufenden “Baden-Baden – Nürnberg – Erbendorf“ – Linie dargestellt, die unter einer Sedimentbedeckung von minimal 300 m und maximal 1000 m liegen (REINHOLD 2004, STETTNER 2001, DRONG 2003). Dieser Bereich des verdeckten Grundgebirges ähnelt in seiner lithologischen Zusammensetzung dem Moldanubikum Ostbayerns und des Schwarzwaldes (ROHRMÜLLER 2003).

Ähnliche Verhältnisse mit verdecktem kristallinen Grundgebirge finden sich auch in anderen Bundesländern, wie z.B. Sachsen, Sachsen Anhalt oder Hessen. Die Prognostizierbarkeit der entsprechenden Mindestanforderungen ist für diese Regionen allerdings sehr schwierig. Dennoch sollte die Möglichkeit der Überdeckung von kristallinen Gesteinen durch tonige Sedimente weiter geprüft werden. Gleiches gilt für die Überlagerung von anderen Gesteinen (z. B. Mer-

gelsteine, Karbonate) durch Tone und Tonsteine in Norddeutschland (geologische Gesamtsituation vom Typ Konrad).

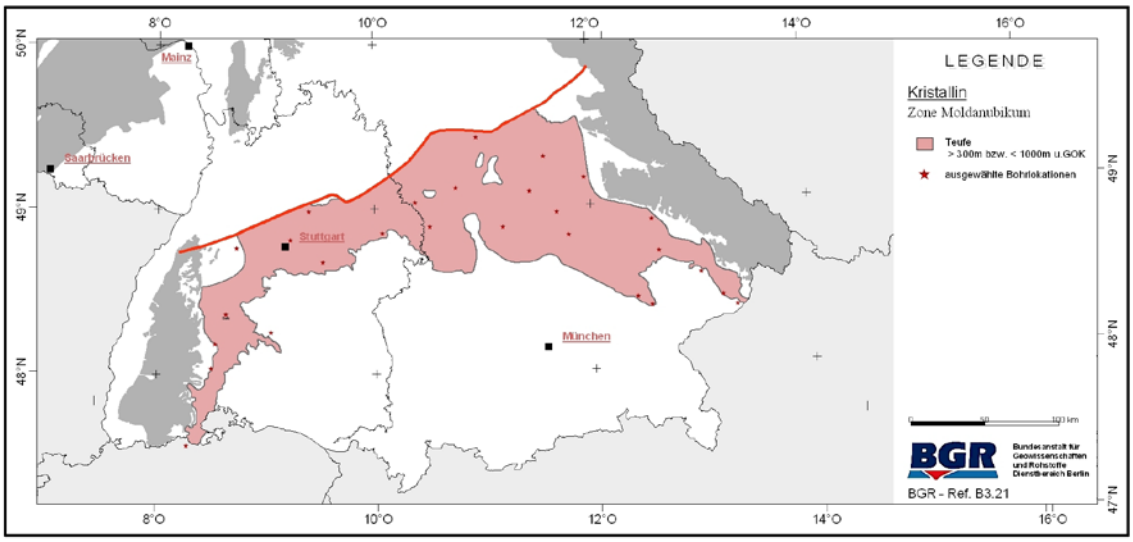


Abb. 9: Kristallines Grundgebirge unter 300-1000 m mächtiger Sedimentbedeckung südlich der „Baden-Baden – Nürnberg – Erbendorf – Linie“ (REINHOLD 2004)

6 Untersuchungswürdige Strukturen und Regionen in Deutschland

Salzformationen

Die angestellten Betrachtungen und vorgenommenen Analysen haben gezeigt, dass von den in Deutschland vorkommenden Salzformationen lediglich die Salze der Staßfurt-Folge in Salzstöcken nach dem derzeitigen Kenntnisstand für die Anlage eines Endlagerbergwerkes für radioaktive Abfälle geeignet sind. Obwohl Deutschland über annähernd 480 Salzstrukturen (Salzkissen und Salzstöcke) verfügt, erfüllt keine der Strukturen alle untersuchten Auswahlkriterien optimal. Dabei muss allerdings auch konstatiert werden, dass für die Einschätzung einzelner Parameter der einen oder anderen Struktur der gegenwärtige Kenntnisstand für eine hinreichend untermauerte Analyse nicht ausreicht, weil die erforderlichen geologischen und geophysikalischen Informationen, wie Bohrungen und hochauflösende seismische Messungen, fehlen. Diese Einschränkungen betreffen jedoch nur eine kleine Anzahl von Strukturen.

Legt man die in Kap. 4 diskutierten Kriterien für eine Vorauswahl zugrunde und zieht man weiterhin in Betracht, dass die Tiefenlage der Keupersalinare aus-

nahmslos zu tief liegen und die Salinare des Jura und Tertiär nach der Mächtigkeit der weitgehend reinen Steinsalzpakete den Anforderungen nicht gerecht werden, verbleiben die Strukturen WADDEKATH, WAHN und ZWISCHENAHN und mit Einschränkung GÜLZE-SUMTE (Anl. 23), die als Reservestrukturen für etwaige detailliertere Untersuchungen angesehen werden können (KOCKEL & KRULL 1995). Nicht völlig auszuschließen ist die Eignung des Salz-Ton-Gemisches des „Haselgebirges“ als Wirtsgestein in einigen Doppelsalinar-Strukturen, allerdings ist die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit schlechter als beim Staßfurt-Steinsalz und der Aufwand bei der Vorerkundung wäre sehr hoch (Tab. 13).

Tonformationen

Die Ausführungen unter Punkt 5.2 zeigen, dass mächtige Tonformationen im Tertiär, in der Kreide und im Jura sowohl in Nord- als auch in Süddeutschland in weiter Verbreitung auftreten. Folgende Einschränkungen hinsichtlich der Suche nach einem geeigneten Ton/Tonstein als Endlager-Wirtsgestein lassen sich treffen:

- Sämtliche Ton- /Tonsteinformationen des Oberrheingrabens sind aufgrund der tektonischen Verhältnisse und der komplizierten faziellen Ausbildung als nicht weiter untersuchungswürdig einzustufen.
- Die Tertiärtone Norddeutschlands stellen zwar wichtige hydrogeologische Barrieren des Untergrundes dar, ihre Wirtsgesteinseignung ist aufgrund des geringen Verfestigungsgrades jedoch als sehr eingeschränkt zu beurteilen. Sie sind deshalb bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle nur als Barrieregesteine von Bedeutung.
- Die tertiären Tone und Tonsteine des Alpinen Vorlandbeckens sind wie die Ablagerungen im Oberrheingraben durch starke lithologische Variabilität gekennzeichnet. Da sie zum großen Teil auch einen geringen Verfestigungsgrad aufweisen liegt ihre Bedeutung ebenfalls in der Barrierefunktion. Im Hinblick auf die Eignung als Wirtsgestein stellen sie bestenfalls eine Ausweichoption dar.
- Der Opalinuston des Oberrheingrabens ist aufgrund der Ausschlusskriterien ebenfalls als nicht weiter untersuchungswürdig einzustufen.

Somit verbleiben für die Auswahl von untersuchungswürdigen Regionen diejenigen, die mindestens 100 m mächtige Tonsteine in der Kreide und im Jura aufweisen. Anlage 24 zeigt diese Regionen, in denen diese Gesteine flacher als in 1500 m Tiefe vorkommen. Mittels der Abwägungskriterien Prognostizierbarkeit, Homogenität und Tiefenlage lassen sich die Flächen weiter eingrenzen.

Die Prognostizierbarkeit der räumlichen Verbreitung der Tonmergelsteine der Oberkreide Bayerns ist im Vergleich zum Opalinuston und zu den Tonsteinen in Norddeutschland wesentlich geringer, zusätzlich verfügen diese Gesteine im Vergleich auch über schlechtere Barriereeigenschaften. Aus diesem Grund werden diese Ablagerungen nach derzeitigem Kenntnisstand als nicht weiter untersuchungswürdig eingestuft.

Das Tiefenkriterium 1500 m erscheint auch aufgrund der Untergrundtemperaturen maximal gefasst. Zusätzlich weisen die Untersuchungen von EBERTH et al. (2002) darauf hin, dass für Tonsteine unterhalb von 1000 m Tiefe mit deutlich ungünstigeren gebirgsmechanischen Vorraussetzungen bei der Errichtung eines Bergwerks gerechnet werden muss. Aus diesem Grund ist in Anlage 25 das Tiefenkriterium „Teufe zwischen 300 und 1000 m unter Geländeoberkante“ angewandt worden. Zusätzlich wurde das Flächenkriterium von 10 km^2 berücksichtigt und Gebiete mit extrem steiler Lagerung in der Nähe von Salzstrukturen ausgeschlossen. Im Verbreitungsgebiet des Opalinuston tritt im Deckgebirge ein bedeutender und genutzter Karst-Grundwasserleiter auf. Für die Regionen in denen dieses Schichtpaket an der oder nahe der Oberfläche liegt und intensiv genutzt wird, ist eine Nutzung des Opalinuston für Endlagerzwecke ebenfalls nicht denkbar.

Synthese

Anlage 26 zeigt die Synthese aller in diesem Bericht aufgeführten Argumente in Kartenform. Unter Anwendung der Ausschlusskriterien sind die dargestellten Flächen jene, die als untersuchungswürdig im Hinblick auf die Wirtsgesteinssuche eingestuft werden. Die Karte enthält jedoch keine Hinweise hinsichtlich des Vorkommens von anderen möglichen nutzbaren Gesteinen (Kristallin, Karbonate) unterhalb von entsprechenden Barrieregesteinen (spezielle geologische Situation Typ „Konrad“ siehe 5.3).

Für den weiteren Vergleich von Regionen ist es notwendig weitere Abwägungskriterien zu formulieren. Diese müssen nicht nur geowissenschaftlicher Art sein sondern es kann sich dabei auch um planungswissenschaftliche Kriterien handeln. Abb. 10 zeigt in diesem Sinn und als Beispiel Nutzungskonflikte mit anderen Nutzungsformen des Untergrundes für Norddeutschland auf.

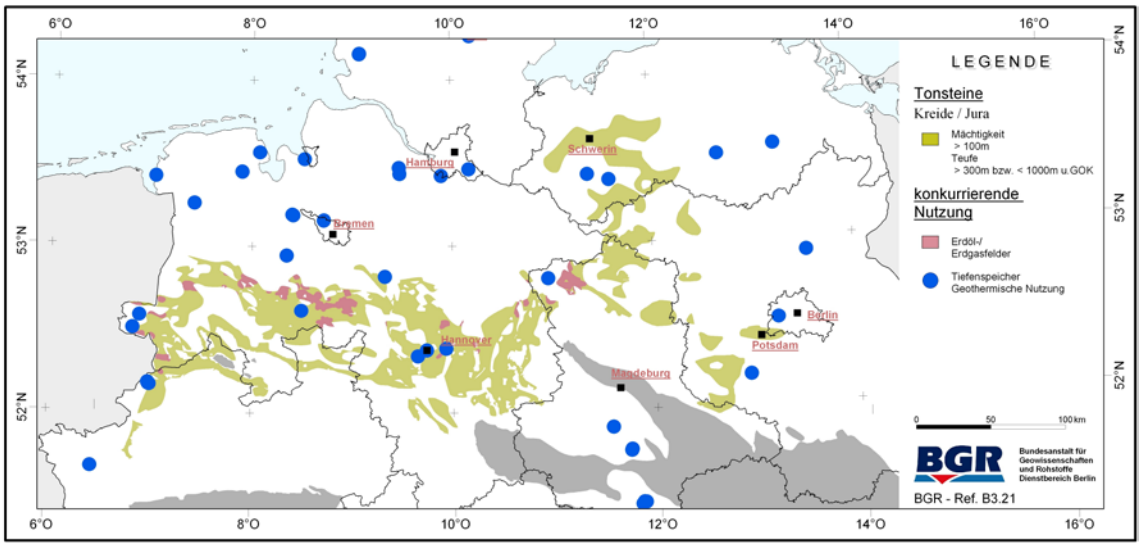


Abb. 10: Lage von produzierenden Erdöl- und Erdgasfeldern, Tiefenspeichern und geothermischen Anlagen in Norddeutschland.

7 Zusammenfassung

Ausgehend von einer kritischen Betrachtung der Anwendbarkeit der vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte vorgeschlagenen Auswahlkriterien auf die sedimentären Wirtsgesteine Salz und Ton/Tonstein wird ein Überblick über die Verbreitung der in Deutschland vorkommenden Salz- und Tonformationen gegeben. Da es für die Salzformationen seit der BGR-Studie von 1995 keine nennenswerten neuen Erkenntnisse gibt, sind die Aussagen von 1995 nach wie vor aktuell.

Für die Tonformationen, die vor dem Jahre 2000 hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerwirtsgesteine nicht umfassend untersucht wurden, wird der in den letzten vier Jahren erzielte Kenntnisstand dokumentiert. Entsprechend der international üblichen Praxis ist die Bewertung der verschiedenen Ton-/Tonsteinformationen in Deutschland breit angelegt. Anhand der angewendeten Auswahlkriterien werden die potentiell in Frage kommenden Regionen Schritt für

Schritt eingeengt. Unter konsequenter Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen können einzelne Regionen als ungeeignet ausgeschlossen werden, andere werden nach Abwägung verschiedener Kriterien als Reserveoptionen zurückgestellt. Alle Entscheidungen werden nachvollziehbar begründet. Als Ergebnis wird eine Karte untersuchungswürdiger Wirtsgesteinsformationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland vorgelegt.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Im Auftrag

……

(Dr. M. Wallner)

- Dir. u. Prof. -
Abteilungsleiter B2
Projektleiter Endlagerung

……

(Dr. V. Bräuer)
Geologieoberrat
Referatsleiter B2.

……

(Dr. Peer Hoth)
Wiss. Mitarbeiter
Arbeitspaketleiter

……

(Dr. B. Buttkus)
- Dir. u. Prof. –
Abteilungsleiter B3

(Dr. P. Krull)
Geologiedirektor
Referatsleiter B 3.21

(Holger Wirth)
Wiss. Mitarbeiter

8 Literaturverzeichnis

AD-HOC AG DEPONIEN DER STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (1997): Geowissenschaftliche Rahmenkriterien zur Standorterkundung von Deponien. – Geol. Jb., **G 4**: 98 S., Hannover.

AKEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AKEND-Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. – Abschlußbericht: 272 S., Hannover.

ANDRA (1997): Underground Research Laboratory East of France - State of knowledge and experimental program. - Report, 34 p.

APLIN, A. C., FLEET, A. J. & MACQUAKER, J. H. S. (1999): Muds and Mudstones: Physical and Fluid-Flow properties. - Geological Society Special Publication, **158**: 190 S.

APPEL, D. & HABLER, W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. Datenbank „Gebirgsdurchlässigkeit“. – Unveröff. Bericht.

BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1998): Der Salzkeil, ein strukturelles Requisit der saxonischen Tektonik. - Z. dt. geol. Ges., **149, 1**: 59 - 69, Stuttgart.

BALDSCHUHN, R., FRISCH, U. & KOCKEL, F. (1999): Die Strukturen im Untergrund NW-Deutschlands 1 : 500 000. – Unveröff. Bericht: BGR, Hannover.

BALZER, D. & MAURER, U. (2003): Fachinformationssystem (FIS) Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen (GEA) – Unveröff. Bericht: 52 S., BGR, Berlin.

BAUMANN, H. & ILLIES, J. H. (1983): Stress Field and Strain Release in the Rhenisch Massif.- In: FUCHS, K., V. GEHLEN, K., MÄLZER, H., MURAWSKI, H. & SEMMEL, A. [Hrsg.]: Plateau Upliff.- Springer Verl.: 411 S., Berlin, Heidelberg, New-York, Tokyo.

BANKWITZ, P. (1965): Interpretation der vorläufigen Karte der rezenten vertikalen Krustenbewegungen in der DDR. - Peterm. Geogr. Mitt., **109**: 143-151, Gotha/Leipzig.

BANKWITZ, P., GROSS, U. & BANKWITZ, E. (1993): Krustendeformation im Bereich der Finne-Kyffhäuser-Gera-Jachymov-Zone. - Z. geol. Wiss., **21**: 1/2: 3-20, Berlin.

BEST, G., BORNEMANN, O., KOCKEL, F. & LEYDECKER, G. (1982): Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern. - Unveröff. Bericht: BGR, Hannover.

BEST, G. (1989): Die Grenze Zechstein/Buntsandstein in Nordwest-Deutschland nach Bohrlochmessungen. - Z. dt. geol. Ges., **140**: 73-85, Hannover.

BEUTLER, G. (1995): Quantifizierung der altkimmerischen Bewegungen in Nodwestdeutschland. Teil I: Stratigraphie des Keupers. - Unveröff. Bericht: 45 S., BGR, Hannover.

BLESS, M. J. M., DEMOULLIN, A., FELDER, P. & et al.. (1990): The Hautes Fagnes area (NE Belgium) as a Monadnock during the late Cretaceous. - Ann. Soc. Geol. Belgique, **113** 2: Liege.

BMU (2000): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen vom 14. Juni 2000.

BOIGK, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland.- Ferdinand Enke Verlag, 313 S. Stuttgart.

BONNE, A. (1990): Randbedingungen, Sicherheitsberechnungen und Ergebnisse. - Kernforschung und -technologie: 45-54.

BONNE, A., HEREMANS, R., MANFROY, P. & DEJONGHE, P. (1979): Investigations entreprises pour préciser les caractéristiques du site argileux de Mol comme lieu de rejet souterrain pour les déchets radioactifs solidifiés. - Int. Symp. on the Underground Disposal of Radioactive Wastes, Otaniemi 2-6 July 1979. Int. Atomic Energy Agency IAEA-SM-243/2.

BORNEMANN, O. (2003): Kap. 7.3.3 Zechstein. - In: ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R. et al.: Projekt Gorleben, Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- und Nebengebirges. - Unveröff. Bericht, BGR, Hannover.

BORNHORST, A., BANCHET, D. S. VON & BRÄUER, V. (1984): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland, 2. Teil: Die Schwarzwälder Granitmassive. - Bericht Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Archiv-Nr. 96868.

BRÄUER, V. (1984): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland, 3. Teil: Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes. – Bericht Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe, Hannover, Archiv-Nr. 96933.

BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P.& SPRADO, K.-H. (1991): Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer. – 1. Bericht, 26 S., BGR, Hannover.

BRÄUER, V., REH, M., SCHULZ, P., SCHUSTER, P. & SPRADO, K. H. (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen.- Unveröff. Bericht: 147 S., BGR, Hannover.

BRAND, E. & HOFFMANN, K. (1963): Stratigraphie und Fazies des nordwestdeutschen Jura und Bildungsbedingungen seiner Erdöllagerstätten. - Erdöl u. Kohle, **16**: 437-450, Hamburg.

BRAUNER, H.-J. & KOSCHYK (2000): Benennung und Zählung von Kohlenwasserstoff-Bohrungen in der Bundesrepublik Deutschland. - Erdöl Erdgas Kohle, **116** 10: 480-481, Hamburg.

BRÜCKNER-RÖHLING, S. (1999): Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der Deutschen Nordsee. – Unveröff. Bericht: BGR, Hannover.

BRÜCKNER-RÖHLING, S., ESPIG, M., FISCHER, M., FLEIG, S., FORSBACH, H., KOCKEL, F., KRULL, P., STIEWE, H. & WIRTH, H. (2002): Standsicherheitsnachweis Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung – Projekt Gorleben - Teil 1: Strukturgeologie. - Unveröff. Bericht:183 S., BGR, Hannover.

BRYANT, W. R. (2003): Permeability of clays, silty-clays and clayey-silts. In: SCOTT, E. D., BOUMA, A. H. & BRYANT, W. R. [Hrsg.]: Siltstones, mudstones and shales: Depositional processes and characteristics (publ. on CD-ROM): SEPM & GCAGS, 76-84, Tulsa.

CHAPMAN, N. A., COME, B., GERA, F. & LANGER, M. (1995): Thermal, mechanical & hydrogeological properties of hostrocks for deep geological disposal of radioactive wastes. - Final report.

COURTOT, C., CANNAT, É. & WENDLING, É. (1975): Le bassin potassique d'Alsace. In: FLUCK, P. et al.: Gîtes minéraux de la France. - Mém. B.R.G.M., **II** 87: 89-96.

DDR-STANDARD Geologie Stratigraphische Skala der DDR, Trias.- TGL 25234/11, 1974.

DIENER, I. (1967): Die Paläogeographie der Kreide im Nordteil der DDR in Beziehung zu den Nachbargebieten. - Ber. dt. Ges. geol. Wiss., **A 12** 3/4: 289-313, Berlin.

DOBEN, K. & RISCH, H. (1996): 5.8 Nördliche Kalkalpen (Oberostalpin) In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000, 220-231, Bayerisches Geologisches Landesamt, München.

DOTT, R. H. (1964): Sandstone types and their associated depositional environments. – Journal of Sedimentary Petrology, **34**, 625 – 632.

DRONG, H.-J. (2003): Das kristalline Grundgebirge in Bohrungen des nordwestlichen Alpenvorlandes. – Geologica Bavarica, **108**: 13-110, München.

DUDEK, A. & ELIÁŠ, M. (1984): 5. Magmatic history. - In: SUKET, M. [Hrsg.]: Geological history of the territory of Czech Socialist Republic, 229-262. - Úst. Geol. Prag.

DÜRR, R. (1982): Strukturgeologische Untersuchungen im Bereich der Neckar-Jagst-Furche (Baden-Württemberg).- Arb. Inst. Geol. Paläont.- Univ. Stuttgart, N. F. **77**: 75 – 146, Stuttgart.

EBERTH, S., LUX, K.-H. & LOMO-APPEYH, G.(2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen – Gutachten für den AkEnd. – Bericht, TU Clausthal – Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik: 117 S., Clausthal-Zellerfeld.

ELLENBERG, J. (1988): Rezente vertikale Krustenbewegungen als geologischer Prozeß. - Unveröff. Habilschrift: 141 S., Potsdam.

ESLINGER, E. & PEAVER, D. (1988): Clay Minerals for Petroleum Geologists and Engineers. SEPM Short Course 22, Tulsa.

FELDRAPPE, H. (2003): Untersuchung von Tongesteinen als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle am Beispiel des Mittleren Jura (Dogger) von Nordost-Deutschland. – Unveröff. Bericht: 49 S., BGR Hannover/Berlin.

FELDRAPPE, H., HOTH, P. & KRULL, P. (2004): Die Barriereeigenschaften von Tongesteinsformationen – eine Methodik zur Erfassung wesentlicher geologischer Parameter.- Unveröff. Bericht: 14 S., BGR, Berlin.

FISCHER, U., KATZUNG, G., SIEGENEGER, W.-D., SÜßMUTH, S., WARNCKE, D. et al. (1975, 1977, 1978): Einheitliche Lithostratigraphie des Saxon im Nordteil der DDR auf genetischer Grundlage (3 Bände). - Unveröff. Bericht, ZGI, Berlin, Schwerin.

FREUDENBERGER, W. & SCHWERD, K. R. (1966): Geologische Karte von Bayern 1 : 500 000. - München, Bayerisches Geologisches Landesamt.

FRISCHBUTTER, A. (2001): Recent vertical movements (map 4).- In: Neogeodynamica Baltica IGCP-Projekt 346. - Brandenb. Geowiss. Beitr., **8** 1: 27-31, Kleinmachnow.

FRISCHBUTTER, A. & SCHWAB, G. (1995): Karte der rezenten vertikalen Krustenbewegungen in der Umrahmung der Ostsee-Depression. Ein Beitrag zu IGCP-Projekt Nr. 346 "Neogeodynamica Baltica". - Brandenburgische Geowiss. Beitr., **2** 2: 59-67, Kleinmachnow

GAERTNER, H. & RÖHLING, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken, In: HAGEDORN & SEILACHER [Hrsg.]: Muschelkalk. - Schöntaler Symposium 1991: 85-103, Goldschneck Verlag, Stuttgart.

GAUTSCHI, A. (1997): Hydrogeologie des Opalinustons - Bedeutung für den Radionuklidtransport. - Nagra informiert, **31**: 19-27, Wettingen.

GEOPHYSIK LEIPZIG (1989): Geophysikalisches Kartenwerk von Ostdeutschland (Reflexionsseismik im Maßstab 1 : 500 000 bis 1 : 100 000. In: REINHARDT und Gruppe „Regionales Kartenwerk“, verschiedene interne Berichte zwischen 1980-1989, Leipzig.

GEYER, O. F. & GWINNER, M. P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. - 4**.** Auflage, 482 S., Schweizerbart, Stuttgart.

GRALLA, P. (1988): Das Oberrotliegende in NW-Deutschland - Lithostratigraphie und Faziesanalyse. - Geol. Jb., **A 106**: 3-59, Hannover.

GRÜNTHAL, G. (1988): Erdbebenkatalog des Territoriums der Deutschen Demokratischen Republik und angrenzender Gebiete von 823 bis 1984. - Veröff. Zentralinst. Physik Erde, **99**: 177 S., Potsdam.

GRÜNTHAL, G., MAYER-ROSA, D. & LEONHARDT, W. A. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz. - Bautechnik, **75** 10: 3-17, Berlin.

GUBLER, E., ARCA, S., KAKKURI, J. & ZIPPELT, K. (1992): Recent vertical crustal movement. In: FREEMAN, S. & S. MÜLLER: A continent revealed - The European Geotraverse. - Atlas of compiled data, Univ. Press: 20-24, Cambridge.

HANSCH, W. & SIMON, T. [Hrsg.] (2003): Das Steinsalz aus dem Mittleren Muschelkalk Südwestdeutschlands.- Museo, 20: 240 S., Heilbronn.

HEKEL, U. (1992): Forschungsprojekt „Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“.- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 190 S., Freiburg.

HELING, D. (1988): Ton- und Siltsteine. In: FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.]: Sedimente und Sedimentgesteine Band 2, Schweizerbart’sche Verlagsbuchhandlung, 185-231.

HENNIGSEN, D. & KATZUNG, G. (1992): Einführung in die Geologie Deutschlands. - Ferdinand Enke Verlag, 214 S., Stuttgart.

HEREMANS, R. (1990): Die Eigenschaften des Gesteins als Mittel für geologische Endlagerung; PAGIS und die Unterstützung von nationalen Programmen. - Kernforschung und -technologie: 33-44.

HESSMANN, W. (1974): Anl. 5 Rötsalinar, Anl. 6 Salinarfolge Mittlerer Muschelkalk, Anl. 7 Salinarfolge Oberer und Unterer Gipskeuper. – In: BEYWL, T., GLANDER, H., HESSMANN, W., KÄBEL, H. & LANGE, M. Höffigkeitseinschätzung UGS. – Unveröff. Bericht: ZGI, Berlin.

HISS, M. & MILBERT, G. (1983): Geologische Untersuchungen von Anhydritstrukturen im Steinsalzbergwerk Borth der Deutschen Solvay-Werke .- Unveröff. Bericht, Geol. L.-A. Nordrhein-Westfalen: 1-43, Krefeld.

HOTH, P., SCHULZ, P., KRULL, P. & FISCHER, M. (2001): Regionale Kartierung von Ton-/Tonsteinformationen als Grundlage zur Beurteilung der Eignung dieser Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. - Unveröff. Bericht: BGR, Hannover.

HOTH, P., KRULL, P., WIRTH, H. & OLEA, R. (2003):Screening Methodology for Site Selection of a Nuclear Waste Repository in Shale Formations in Germany. In: OECD Nuclear Energy Agency: Stability and Buffering Capacity of the Geopshere for Longterm Isolation of Radioactive Waste: Application to Argillaceous Media, Abstract Volume, 63-67.

HÖVERMANN, J. (1950): Die diluvialen Terrassen des Oberharzes und seines Vorlandes. - Petermanns geogr. Mitt., **94**: 121-130, Gotha.

IHDE, J., STEINBERG, J. & BANKWITZ, E. (1987): On recent vertical crustal movements derived from relevellings within the territory of the GDR. - Gerlands Beitr. Geophysik, **96** 3/4: 206-217, Leipzig.

JARITZ, W., KOCH, K. E., KOCKEL, F. et al. (1967): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland. - Bundesanstalt für Bodenforschung, 298 S., Hannover

JARITZ, W. (1983): Eignung von Salzstöcken in Niedersachsen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. – Unveröff. Bericht: 105 S., BGR: Hannover.

JUNG, R., RÖHLING, S., OCHMANN, N., ROGGE, E., SCHELLSCHMIDT, R., SCHULZ, R. & THIELEMANN, T. (2002): Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland. - Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag: BGR/GGA, Hannover.

KÄDING, K.-C. (1977): Salinarformationen des Zechstein, In*:* LEPPER: [Hrsg.]: Geologische Karte von Niedersachsen 1:25 000, Erläuterungen zu Bl. 4323, Uslar. - NLfB, Hannover.

KÄDING, K. C. (1987): Verbreitung und Mächtigkeit der hohen Zechstein-Folgen im zentralen Teil des Zechstein-Beckens.- Internat. Sympos. Zechstein 1987; Abstracts: 42-43, Bochum.

KATSUBE, T. J., MUDFORD, B. S. & BEST, M. E. (1991): Petrophysical characteristics of shales from the Scotian Shelf. – Geophysics, **56** (10): 1681-1689.

KATSUBE, T. J. & CONNELL, S. (1998): Shale permeability characteristics. - Current Research, **1998-E**:183-192, Ottawa.

KEMPER, E. (1973): The Valanginian and Hauterivian stages in northwest Germany.- In: R. CASY & P. F. RAWSON [Hrsg.] The Boreal Lower Cretaceous. - Geol. SJ. spec. issue, **5**: 327-344, Liverpool.

KEMPER, E. (1979): Die Unterkreide Nordwestdeutschlands - Ein Überblick. - Intern. Union Geol. Sciences, **Ser. A** 6: 1-9.

KEMPER, E. (1982): Das späte Apt und frühe Alb Nordwestdeutschlands - Versuch einer umfassenden Analyse einer Schichtenfolge. - Geol. Jb., **A 65**: 1-73, Hannover.

KOALITIONSVEREINBARUNG (1998): Aufbruch und Erneuerung – Deutschlands Weg ins 21. Jahrhundert.- Koalitionsvereinbarung der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands und Bündnis 90/Die GRÜNEN, Bonn.

KOCKEL, F. & ROLAND, N. W. (1977): Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle. Katalog geeigneter geologischer Formationen in der Bundesrepublik Deutschland. - Unveröff. Bericht: BGR, Hannover.

KOCKEL, F. & KRULL, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. – Unveröff. Bericht: 48 S., BGR, Hannover/Berlin.

KOCKEL, F., BALDSCHUHN, R., BEST, G., KOCKEL, F. (1996): Geotektonischer Atlas von NW-Deutschland 1: 300 000,Teil 1-17.- 14 Strukturkarten, 2 abgedeckte Karten, 7 Profiltafeln. – BGR, Hannover.

KOCKEL, F. (1999): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1 : 300 000,Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung Nordwestdeutschlands - Bd. 3: Der Zechstein, die Trias. - Unveröff. Bericht: 133 S., BGR: Hannover.

KOSINOWSKI, M. & BANCHET, D. S. VON (1983): Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibungvon Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland, 1. Teil: Das bayerische Kristallin am Westrand der Böhmischen Masse. – Unveröff. Bericht: BGR, Hannover.

KRULL, P. (1991): Bewertung der Salzformationen in den neuen Bundesländern für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. – Unveröff. Bericht: BGR: 133 S., Berlin.

KUCKELKORN, K. F., BROCKERT, M., KOCH, E. et al. (1999): Kohlenwasserstoffpotential der Bundesrepublik - Teil 1 Alpen und Alpenvorland. -.

Lange, U. (1990): Ergebnisbericht der Forschungsbohrung E Schwerin 1/87 + 1a/89.- Unveröff. Bericht: E-E Grimmen.

LEMCKE, K. (1988): Geologie von Bayern - I. Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit, Erdgeschichte Bau Bodenschätze. - E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchh., Stuttgart.

LEONHARD, T. (1988): Zur Berechnung von Höhenänderungen in Norddeutschland - Modelldiskussion, Lösbarkeitsanalyse und numerische Ergebnisse. - Wiss. Arb. Fachr. Vermessungswesen, **152**: 1-158, Univ. Hannover.

LEYDECKER, G. (1980): Erdbeben in Nord-Deutschland. - Z. dt. geol. Ges., **131**: 547-555, Hannover.

LEYDECKER, G. (1986): Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000 - 1981. - Geol. Jb., **E 36**: 83 S., Hannover.

LEYDECKER, G. & HARJES, H. P. (1978): Seismische Kriterien zur Standortauswahl kerntechnischer Anlagen (mit einem Katalog der Erdbeben der BRD mit Randgebieten für die Jahre 1000 - 1974). - Unveröff. Bericht: BGR, Hannover.

LINDERT, W., WARNCKE, D. & STUMM, M. (1990): Probleme der lithostratigraphischen Gliederung des Oberrotliegenden (Saxon) im Norden der DDR. - Z. angewandte Geol., **36**: 368-374, Berlin.

LUDWIG, A. O. & SCHWAB, G. (1995): Neogeodynamica Baltica - ein internationales Kartenprojekt (IGCP-Projekt Nr. 346) - Deutsche Beiträge zur Charakterisierung der vertikalen Bewegungen seit Beginn des Rupelian (Unteroligozän) bzw. seit Ende der Holstein-Zeit. - Brandenburgische Geowiss. Beitr., **2** 2: 47-57, Kleinmachnow.

MATHER, J. D., GRAY, D. A. & GREENWOOD, P. B. (1979): Review of geological criteria and site selection for high-level radioactive waste repositories in the United Kingdom. - Int. Symp. on the Underground Disposal of Radioactive Wastes, Otaniemi 2-6 July 1979. Int. Atomic Energy Agency IAEA-SM-243/29.

MÄLZER, H. (1990) [Hrsg.]: DGK-Arbeitskreis für rezente Krustenbewegungen - Berechnungen von Höhenänderungen im Bayrischen Haupthöhennetz unter Verwendung unterschiedlicher Modelle. -Deutsch. Geodät. Kom. bei der Bayerischen Akad. Wiss., Reihe B, Angew. Geodäsie, **293**: München.

MÄLZER, H., HEIN, G. & ZIPPEL, K. (1983): 6.1 Height Changes in The Rhenish Massif: Determination an Analysis. - In: FUCHS; K. v. GEHLEN, K. MÄLZER, H., MURAWSKI, H. & SEMMEL, A. [Hrsg]. - Plateau Uplift, **164-176**, Springer-Verl. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.

MAZUREK, M., PEARSON, F. J., VOLCKAERT, G. & BOCK, H. (2003): Features, Evens and Processes Evaluation - Catalog for Argillaceous Media. 376 S.

MEYER, W. & STETS, J. (1998): Junge Tektonik im Rheinischen Schiefergebirge und ihre Quantifizierung. - Z. dtsch. geol. Ges., **149** 3: 359-379, Stuttgart.

NAGRA (1988): Sedimentstudie-Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz, NTB 88-25 - Baden/Schweiz.

NAGRA (2002): Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, NTB 02-03, 659 S., Wettingen.

NIES, A. (2003): Perspektiven der Endlagerung radioaktiver Abfälle. - Schriftenreihe Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Institut für Aufbereitung und Deponietechnik, Technische Universität Clausthal, **14**:233-238, Clausthal.

NOACK, V. (2004): Maximale Temperaturbelastung von Tonformationen - ein Indikator zur Beurteilung der Eignung von Tongesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. – Unveröff. Bericht: 65 S., BGR: Hannover/Berlin.

NOWEL, W., BÖHNISCH, R., SCHNEIDER, W. & SCHULZE, H. (1994): Geologie des Lausitzer Braunkohlenreviers. - Lausitzer Braunkohle AG, **101**: 101 S., Senftenberg.

OECD/NEA (2003): Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Argillaceous Media. Nuclear Energy Agency.

OSIPOV, V. I., SOKOLOV, V. N. & EREMEEV, V. V. (2004): Clay Seals of Oil and Gas Deposits. 288 S.

PAGIS (1990): Sitzungsbericht des PAGIS-Informationstags. – Madrid 30 Juni 1989.

PETTIJOHN, F. J., POTTER, P. E., SIEVER, R. (1973): Sand and Sandstone.- Springer Verlag, Berlin.

PFLUG, R. (1982): Bau und Entwicklung des Oberrhein-Grabens. - Erträge der Forschung, **Bd. 1984**: 145 S., Wiss. Buchges., Darmstadt.

POTTER, P. E., MYNARD, J. B., PRIOR, W. A. (1980): Sedimentology of Shale, New York, Springer Verlag.

REICHENBACH, W. (1970): Die lithologische Gliederung der rezessiven Folgen von Zechstein 2 - 5 in ihrer Beckenausbildung. - Ber. dt. Ges. geol. Wiss., A, Geol., Paläont., **15** 4: 555-563, Berlin.

REINHOLD, K. (2004): Zur Tiefenlage des Basements in Deutschland – Fakten & Hypothesen.– Unveröff. Bericht: BGR, Berlin (in Vorbereitung).

ROHRMÜLLER, J. (2003): Bohrungen in den kristallinen Untergrund der Süddeutschen Scholle – ein Überblick.- Geologica Bavarica, **108**: 5-12, München.

RÖHLING, H.-G. (1991): A Lithostratigraphic subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German Lowlands and the German Sector of the North Sea, based on Gamma-Ray and Sonic Logs. - Geol. Jb., **A 119**: 3-24, Hannover.

RÖHLING, S. (2002): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zyklo- und Sequenzstratigraphie.- Diss: 199 S., Univ. Halle/Saale.

SCHAUBERGER, O. (1955): Zur Genese des alpinen Haselgebirges. - Z. deutsch. geol. Ges. **105**: 736-71, Hannover.

SEIDEL, G. (1972): Thüringer Becken. Geologische Exkursionen. - Geographische Bausteine, **11**: 96, Gotha/Leipzig.

SIMON, T. (1995): Salz und Salzgewinnung im nördlichen Baden-Württemberg. - Geologie-Technik-Geschichte, **34**: Jan Thorbecke Verlag Sigmaringen.

STETTNER, G. (2001): Untergrund Süddeutsche Scholle südlich der MKZ (16) / (Vorsilur unter dem Süddeutschen Deckgebirge). In:Stratigraphische Kommission Deutschlands [Hrsg.]: Stratigraphie von Deutschland II (Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum), 234: 65-76, Frankfurt a. M. Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg.

SPÖTL, C. (1988): Sedimentologisch-fazielle Analyse tektonisierter Evaporitserien - eine Fallstudie am Beispiel des alpinen Haselgebirges (Permoskyth, Nördliche Kalkalpen). - GPM, Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck, **15**: 59-69, Innsbruck.

TEICHMÜLLER, R. (1957): Ein Querschnitt durch den Südteil des Niederrheinischen Zechsteinbeckens. - Geol. Jb., **73**: 39-50, Hannover.

TUCKER, M. E. (2001): Sedimentary Petrology. An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks. 262 S.

WAGNER, W. (1955): Die tertiären Salzlagerstätten im Oberrheingraben. - Z. dt. geol. Ges., **105**: 707-728, Hannover.

WIRTH, H., HOTH, P., KRULL, P. & ESPIG, M. (2003): Regionale Tonstudie - Lithologische und petrophysikalische Charakterisierung von Tonformationen mittels Bohrlochmessungen. – Unveröff. Bericht: 72 S., BGR, Berlin.

WIRTH, H., OLEA, R., HOTH, P., KRULL, P. (2004): Spatial Characterization of Shales for Nuclear Waste Deposition. EAGE Conference, Abstract Volume, Paris.

WOLBURG, J. (1969): Die epirogenetischen Phasen der Muschelkalk- und Keuper-Entwicklung Nordwest-Deutschlands, mit einem Rückblick auf den Buntsandstein. – Geotekt. Forsch. **32**, I-II, 1-97, Stuttgart.

WOLF, R. (1985): Tiefentektonik des linksrheinischen Steinkohlengebietes. - In: DRODZDEWSKI; ENGEL, WOLF und WREDE: Beiträge zur Tiefentektonik westdeutscher Steinkohlenlagerstätten. -: 105-167, Krefeld (Geol. L.-A. Nordrhein-Westfalen), Krefeld.

YANG, Y. & APLIN, A. C. (1998): Influence of lithology and compaction on the pore size distribution and modelled permeability of some mudstones from the Norwegian margin. – Marine and Petroleum Geology, **15**: 163-175.

ZIEGENHARDT, W. (1972): Bau und Genese lokaler Strukturen im Zechstein der Lausitz und ihre Bedeutung für die Erdöl/Erdgas-Lagerstättenbildung. - Unveröff. Bericht, VEB Erdöl und Erdgas, Mittenwalde/Mark.

ZIERMANN, H., ZWIRNER, R. & HEDERICH, N. (1998): Projekt Morsleben - Geologische Bearbeitung des Quartärs. – Unveröff. Bericht: 105 S., BGR: Hannover.

9 Anlagenverzeichnis

Anlage 1.1: Tiefenlage des sedimentären Deckgebirges in Deutschland

Anlage 1.2: Tiefenlage des sedimentären Deckgebirges in Deutschland und Verteilung der Tiefbohrungen

Anlage 2: Vertikale Krustenbewegungen in Deutschland

Anlage 3: Potentielle Gefährdungsgebiete durch Erdbeben und Vulkanismus

Anlage 4: Schematische Darstellung vermutlich neotektonisch aktiver Störungszonen Deutschlands

Anlage 5: Temperaturverteilung in 1000 m Tiefe

Anlage 6: Schematische Verbreitung des Rotliegend-Salinars

Anlage 7: Schematische Verbreitung der Zechstein-Salinare

Anlage 8: Schematische Verteilung der Salinarstrukturen

Anlage 9: Schematische Verbreitung des Röt-Salinars

Anlage 10: Schematische Verbreitung des Salinars im Mittleren Muschelkalk

Anlage 11: Schematische Verbreitung der Salinare des Mittleren Keupers

Anlage 12: Schematische Verbreitung der Salinare des Oberen Jura und des Tertiär

Anlage 13: Schematische Verbreitung von Tonformationen des Tertiär

Anlage 14: Tiefenlage von Tonformationen des Tertiär

Anlage 15: Schematische Verbreitung von Tonformationen der Kreide

Anlage 16: Tiefenlage von Tonformationen der Kreide

Anlage 17: Mächtigkeit der marinen Unterkreide

Anlage 18: Schematische Verbreitung von Tonformationen im Jura

Anlage 19: Tiefenlage von Tonformationen des Jura

Anlage 20: Mächtigkeit des Lias

Anlage 21 Tiefenlage des Opalinustons in Süddeutschland

Anlage 22: Mächtigkeit des Opalinustons in Süddeutschland

Anlage 23: Untersuchungswürdige Salzstrukturen

Anlage 24: Potentielle untersuchungswürdige Tonsteinformationen Kreide/Jura

Anlage 25: Untersuchungswürdige Tonsteinformationen Kreide/Jura

Anlage 26: Untersuchungswürdige Wirtsgesteinsformationen

10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Stratigraphische Position der Salzformationen in Deutschland

Abb. 2: Elektronenmikroskopische Strukturen klastischer Sedimentgesteine

Abb. 3: Bildungsbereiche von tonigen Sedimentgesteinen

Abb. 4: Stratigraphische Position wichtiger Ton-/Tonsteinformationen in Deutschland

Abb. 5: Tiefenabhängige kf-Werte des Gesteinstyps Ton/Tonstein

Abb. 6: Beispiel einer Tiefbohrung aus Norddeutschland mit Angabe der erbohrten Lithologie und der verfügbaren Bohrlochmessungen

Abb. 7: Klassifikation der Gesteinstypen der Bohrung aus Abb. 5 nach Dichte-, Neutronenporositäts- und PEF-Log.

Abb. 8: Vorgehensweise zur Charakterisierung von Ton-/Tonsteinformationen

Abb. 9: Kristallines Grundgebirge unter 300-1000 m mächtiger Sedimentbedeckung südlich der „Baden-Baden – Nürnberg – Erbendorf“ Linie

Abb. 10: Lage von produzierenden Erdöl- und Erdgasfeldern, Tiefenspeichern und geothermischen Anlagen in Norddeutschland.

11 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Endlagerrelevante Eigenschaften potentieller Wirtsgesteine

Tab. 2: Endlagerkonzepte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen

Tab. 3: Gliederung und Mächtigkeit der Werra-Folge

Tab. 4: Gliederung und Mächtigkeit der Staßfurt-Folge

Tab. 5: Gliederung und Mächtigkeit der Leine-Folge

Tab. 6: Gliederung und Mächtigkeit der Aller-Folge

Tab. 7: Gliederung und Mächtigkeit der Ohre- bis Mölln-Folge

Tab. 8: Gliederung und Mächtigkeit der Salinarröt-Folge

Tab. 9: Gliederung und Mächtigkeit der Salinarfolge des Mittleren Muschelkalk in Nord- und Süddeutschland

Tab. 10: Gliederung und Mächtigkeit des Mittleren Keuper

Tab. 11: Gliederung und Mächtigkeit der Salinare des Alttertiär Oligozän im Oberrhein-Graben

Tab. 12: Gliederung und Mächtigkeit des Salinars des Oberoligozän im Oberrhein-Graben

Tab. 13: Bewertung der Salinarstrukturen in Norddeutschland

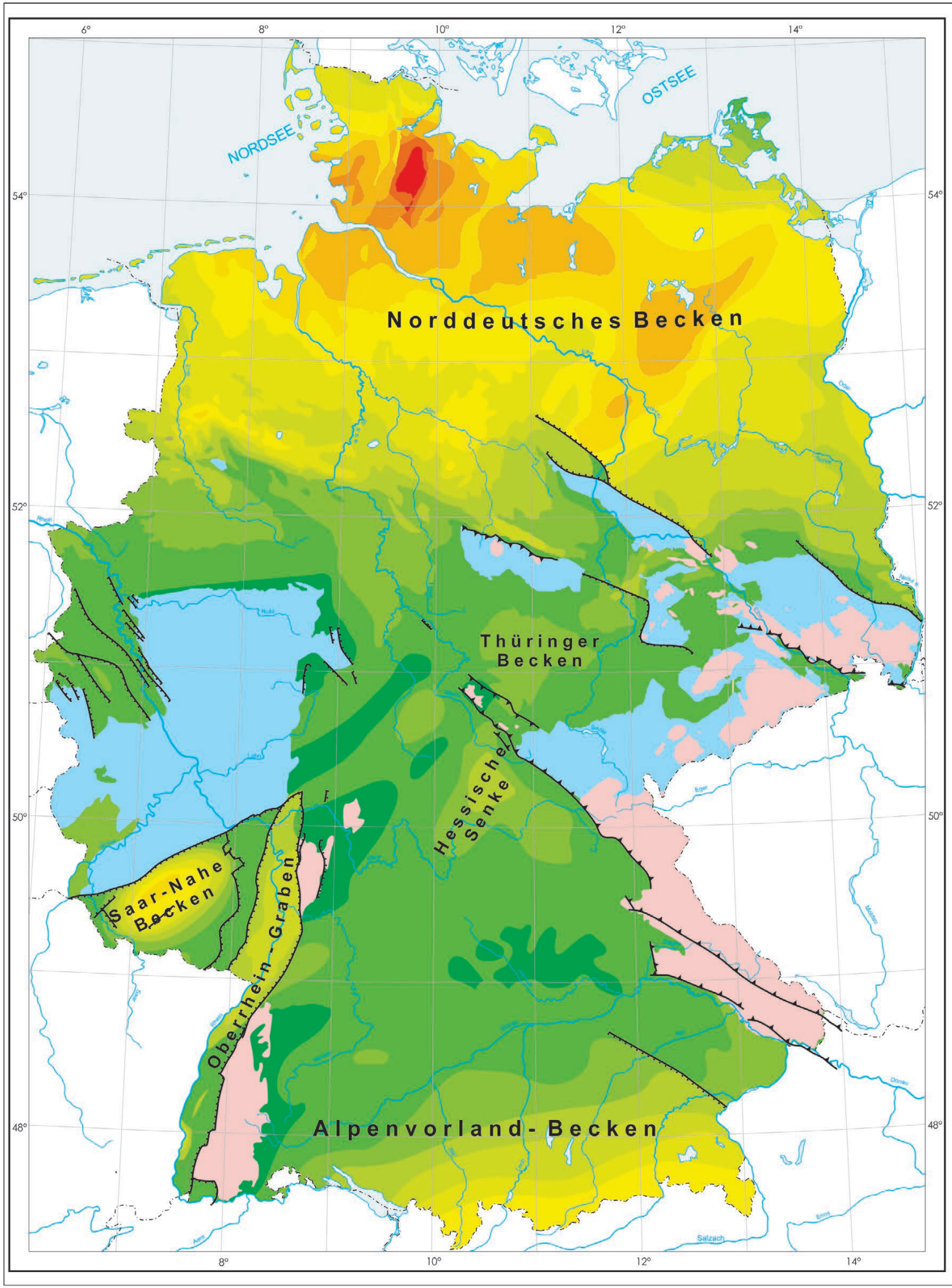
Tab. 13: Bewertung der Salinarstrukturen in Norddeutschland

Name	Kulmination u. NN [m]	Deckgebirgsmächtigkeit (min.) [m]	Fläche 300 m u. Caprockoberfläche [km²]	Fläche 1000 m u. NN [km²]	Tiefe des Salzspiegels u. NN [m]	Salinaralter	Überdeckung im Scheitelbereich (Formation)[m]	konkurr. Nutzung
Baccum	300-500*	340 - 540	15,0	15,0	?	jo	kru,tpg, q	nein
Bahnsen	160	220	11,0	21,0	180-208	z	tpg, q	ja
Bersenbrück (Alfhausen)	200	240	58,0	58,0	?	jo	kro, tpg, q	nein
Bippen (Ohrte)	200-500*	225-525	52,0	52,0	?	jo	kru, tpg, q	nein
Colbitz	125	187	14,8	6,9	180 - 250	z	tpg, q	nein
Damme	200	240-260	15,0	15,0	?	jo	kru, kro, tpg, q	nein
Demker-Grieben	250 u. 500**	285 u. 580	5,6***	5,6***	?	z	tpg, q	nein
Eisendorf-Gnutz	200 u. 480**	230 u. 505	65,0	92,0	411 u. 686	ro, z	kru, kro, q	nein
Eitzendorf	389	403	6,5	13,0	440	z	tpg, q	nein
Gorleben								
Gülze-Sumte	111 u. 305**	122 u. 345	60,0	90,0	165 u. 367	z	tpg, tng, q	nein
Hamdorf	350	360	18,0	48,0	498	ro, z	tpg, tng, q	nein
Harsefeld	240	270	37,0	40,0	300-340	ro, z	tpg, tng	ja
Hennstedt	390**	395	58,5	70,0	683	ro, z	kro, tpg, q	nein
Herzlake (Haselünne)	340-500*	355-515	30,0	30,0	?	jo	tpg, tng, q	nein
Jahrstedt	150-200**	220	5,5	9,9	?	z	tpg q	nein
Kraak	249	280	27,7	18,4	340	z	q	ja
Krempe	30	32	26,5	62,0	75	ro, z	q	nein
Lilienthal	183	186	20,0	38,0	205	z	kro, tpg, q	nein
Lohne	300-800*	330-830	38,0	38,0	?	jo	tpg, q	nein
Mützel-Viesen	384 u. 310**	347 u. 420	8,5***	8,5***	?	z	tpg, q	nein
Netzeband	140	180-210	14,9	14,1	ca. 500?	z	tng, q	nein
Neusustrum	180	191	3,0	15,0	250-280	z	tng, q	nein
Oberlanger Tenge	140	152	10,0	8,5	157-180	z	tpg, tng, q	ja
Peckensen	230 u. 240**	285	46,0	42,0	340 - 400	z	tpg	nein
Schneflingen	240	130	06,0	9,0	265	z	tpg	nein
Siek	200	260	6,5	14,0	400	ro, z	kro, tpg, q	nein
Stemmen-Otter-Todtshorn	600**	640-660	25,5	43,0	?	z	kro, tpg, tng, q	nein
Sterup	260	320	15,3	25,5	>277	ro, z	kro, q	nein
Taaken	200 u. 250**	225 u. 280	12,0	23,0	260-270	z	kro, tpg, tng, q	ja
Thedinghausen	275 u. 380**	284 u. 290	9,0	11,0	300-410	z	kro, tpg, tng, q	nein
Volkwardingen	150	250	14,0	25,0	?	z	tpg, q	nein
Vorhop	200	260-270	23,0	21,0	260	z	tpg, q	ja
Waddekath	300 u. 300**	440	16,5	16,5	363 - 441	z	tpg, tng, q	nein
Wahn	290**	300-310	23,0	36,5	315-330	z	kru, tpg, tng, q	nein
Wesen-Lutterloh	49 u. 100**	130 u. 170	15,5	40,5	114-145	z	kro, tpg, q	nein
Werle	511	545	40,0	40,0	700	z	kru, tpg, tng, q	nein
Wittingen	190	270	8,0	12,0	218-290	z	tpg, q	ja
Wredenhagen	73	150	12,0	11,0	293	z	tng, q	nein
Zechlin	200	260 - 300	14,8	16,0	>500?	z	tng, q	nein
Zobbenitz	200	250	11,0	0,0	219	z	tpg, q	nein
Zwischenahn	290 u. 380**	300 u. 390	38,0	26,0	340 u. 430?	z	kro, tpg, q	nein

rot	entspricht nicht den Vorgaben	<200 >500	<200 >500	<8,5	<8, 5	<200 >700		nur q bzw. q + tng	ja
gelb	entspricht annähernd den Vorgaben	ca. 200	ca. 200	8,5 - 9,0	8,5 - 9,0	600 - 700	ro +-z, jo	tpg bzw. älter, unvollständig	
grün	entspricht den Vorgaben	>200	>200	>9,0	>9,0	200-600	z	tpg bzw. älter, vollständig	nein

* = geneigte Dachfläche ohne Kulmination
** = mehrere Kulminationen (Anzahl)
*** bei einer Mindestbreite von >1000 m

ro = Rotliegend, z = Zechstein, jo = Oberjura, kru = Unterkreide
kro = Oberkreide, tpg = Alttertiär (+ Rupel), tng = Jungtertiär
q = Quartär



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

kristallines Grundgebirge
(magmatische und hochmetamorphe Einheiten)

gefaltetes sedimentäres Grundgebirge
(einschließlich schwach- bis mittelmetamorpher Einheiten)

Tiefenlage der Präperm-
oberfläche [km]

+1
0 (NN)
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11

0 50 100km

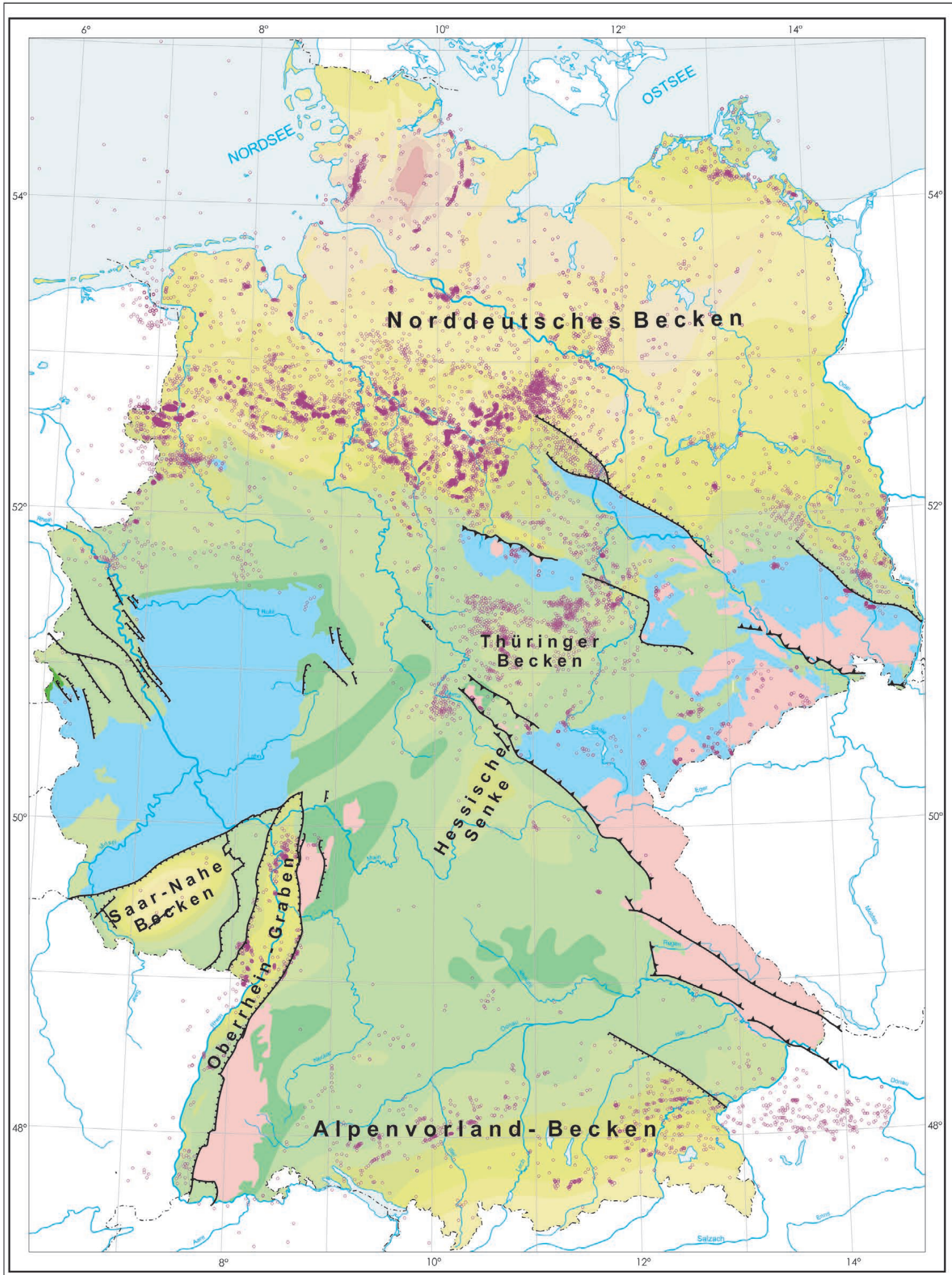
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Tiefenlage des sedimentären Deckgebirges in Deutschland (Lage der Sedimentbecken)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 1.1**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

- Abschiebungen
- Aufschiebungen

- kristallines Grundgebirge (magmatische und hochmetamorphe Einheiten)
- gefaltetes sedimentäres Grundgebirge (einschließlich schwach- bis mittelmetamorpher Einheiten)
- Tiefbohrungen

Tiefenlage der Präperm-oberfläche [km]

+1
0 (NN)
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
-9
-10
-11

0 50 100km

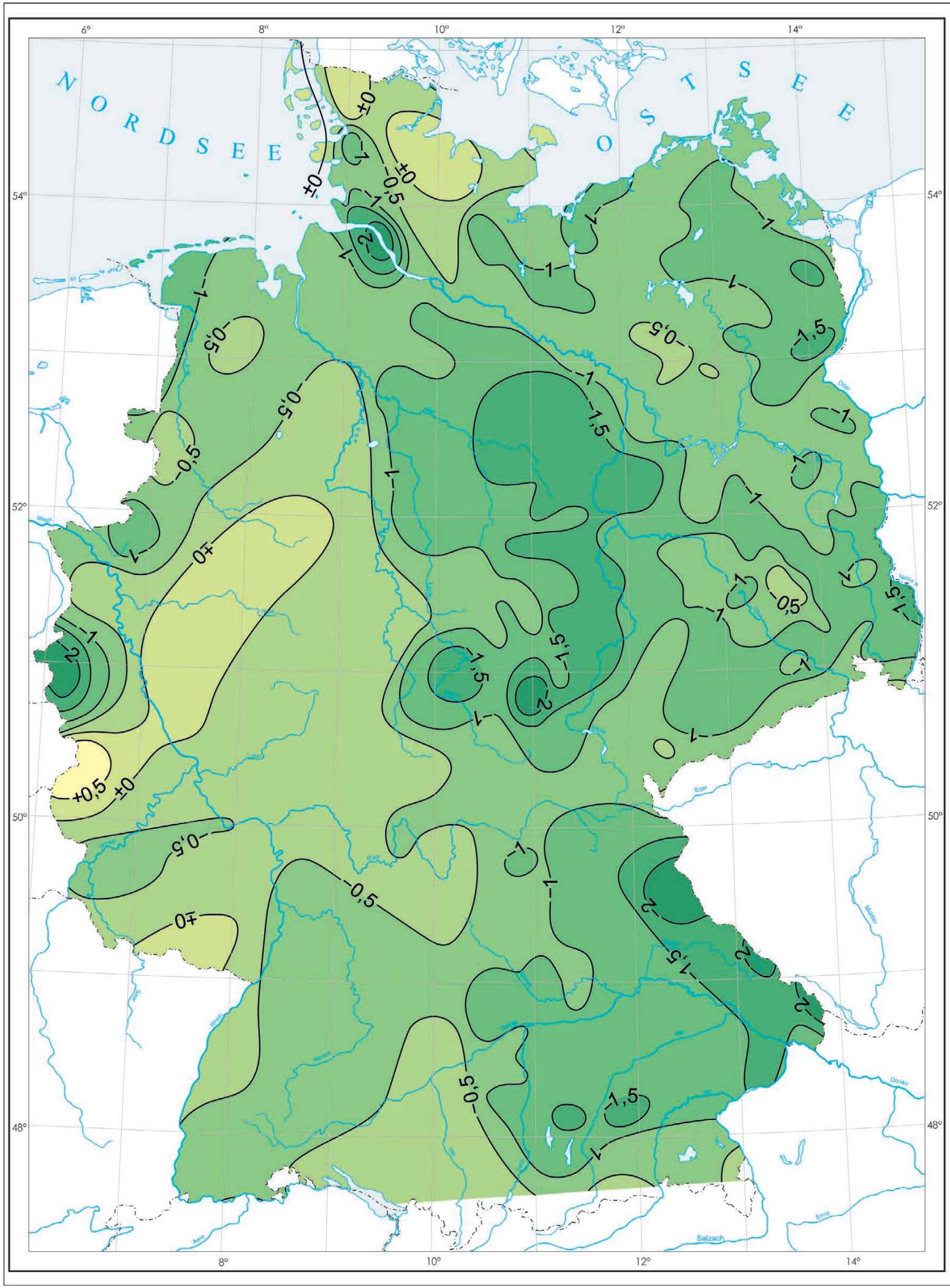
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Tiefenlage des sedimentären Deckgebirges in Deutschland und Verteilung der Tiefbohrungen

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 1.2**



LEGENDE

- <+0,5mm/a
- +0,5mm/a bis ±0,0mm/a
- ± 0,0mm/a bis -0,5mm/a
- -0,5mm/a bis -1,0mm/a
- -1,0mm/a bis -1,5mm/a
- -1,5mm/a bis -2,0mm/a
- <-2,0mm/a

0 50 100km

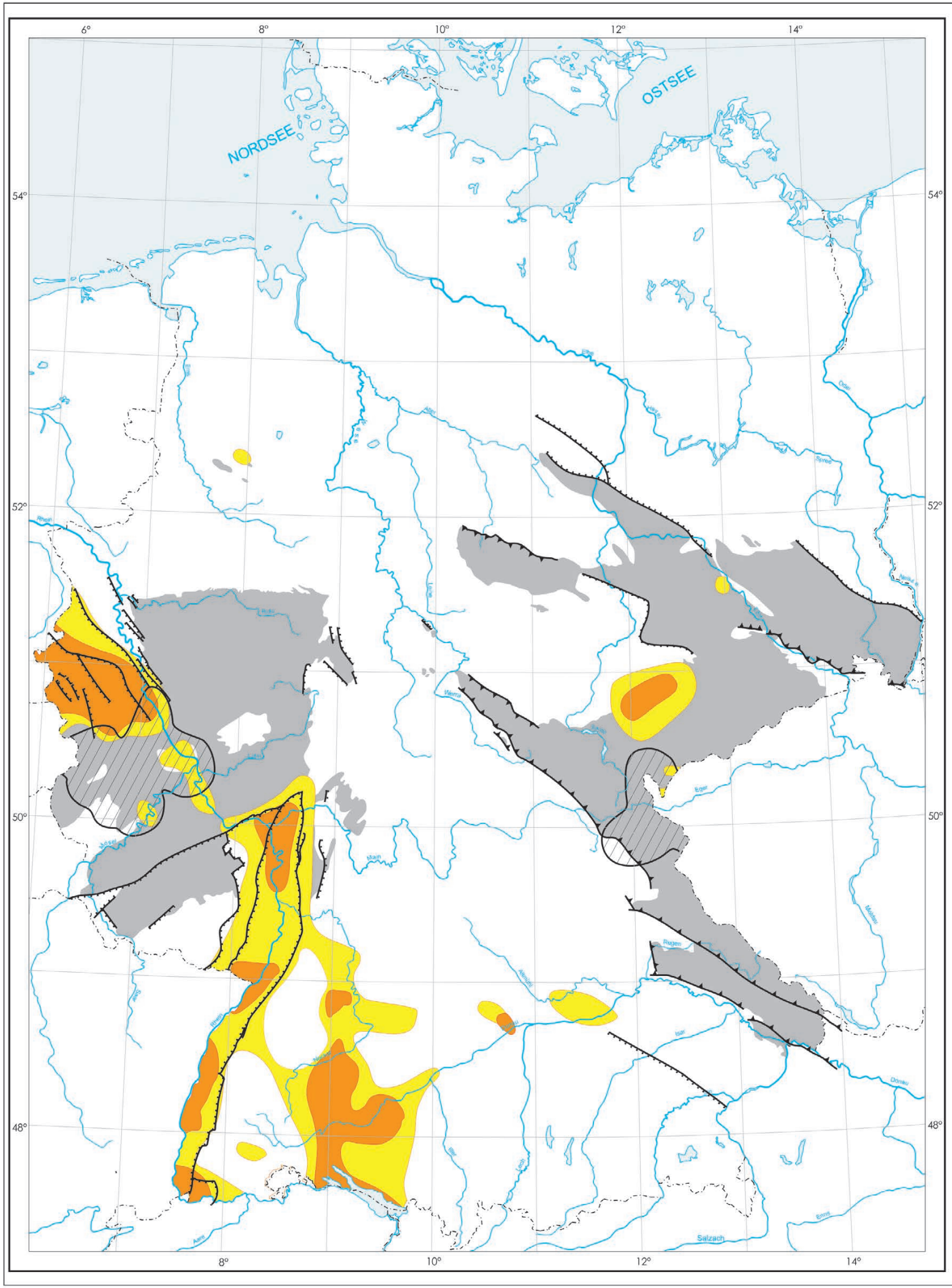
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Vertikale Krustenbewegungen in Deutschland

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

nach FRISCHBUTTER 2001	Zeichnung: B. BOHRACH / J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 2**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

Potentielle Gefährdungsgebiete durch Erdbeben nach DIN 4149

Erdbebenzone 1

Erdbebenzone >2

Potentielle Gefährdungsgebiete durch Vulkanismus (modifiziert nach AKEND)

0 50 100km

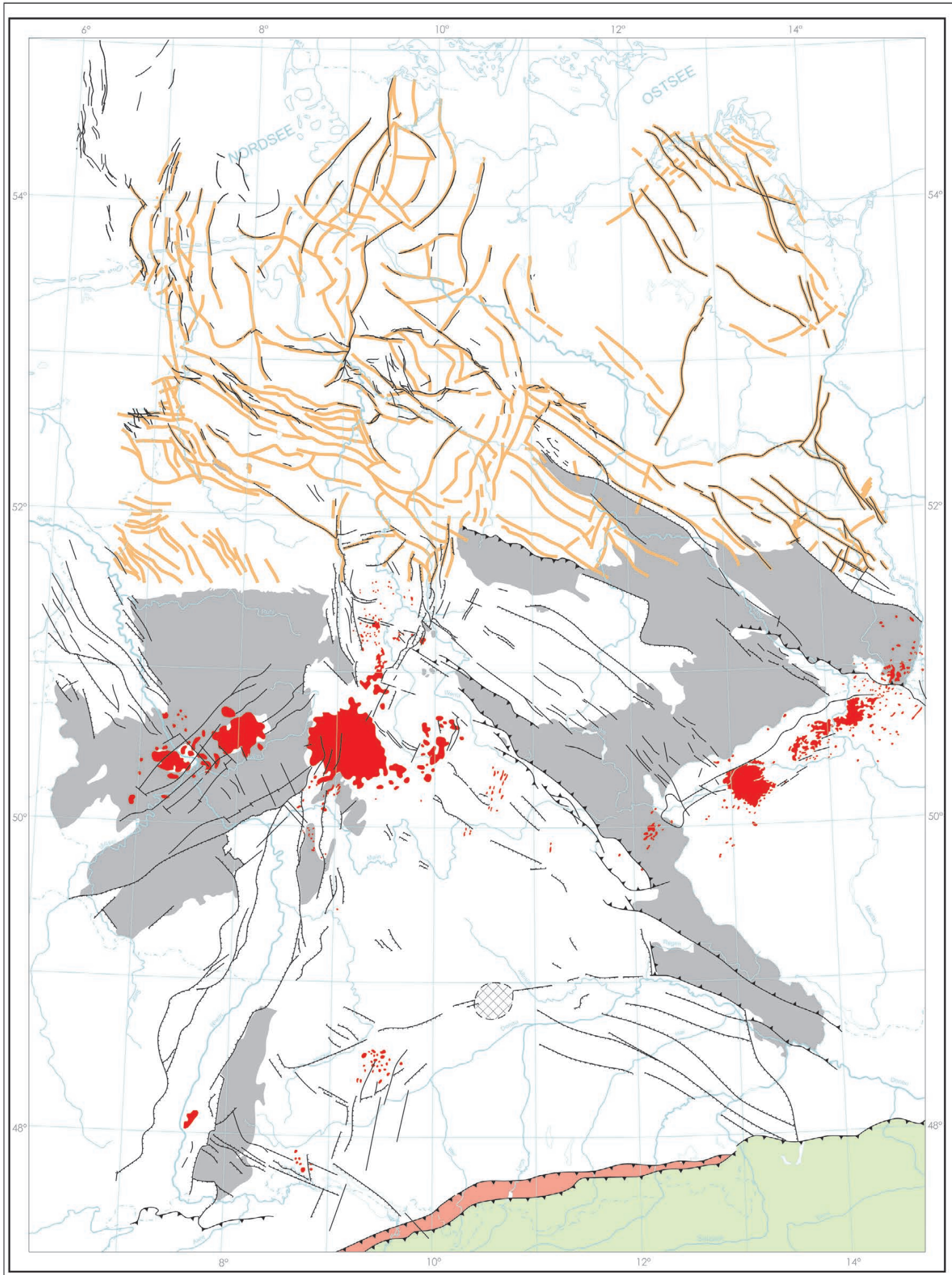
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - Dienstbereich Berlin -

Potentielle Gefährdungsgebiete durch Erdbeben und Vulkanismus

(n. AKEND 2002)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 3**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

- Abschiebungen
- Aufschiebungen
- Störungen, ohne Angabe des Bewegungssinns
- Sockelstörungen
- Wiederbelebter Abschnitt einer Sockelstörung im Tertiär

- Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung
- Känozoische Vulkanite
- Alpenorogen
- Faltenmolasse
- Nördlinger Ries

0 50 100km

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

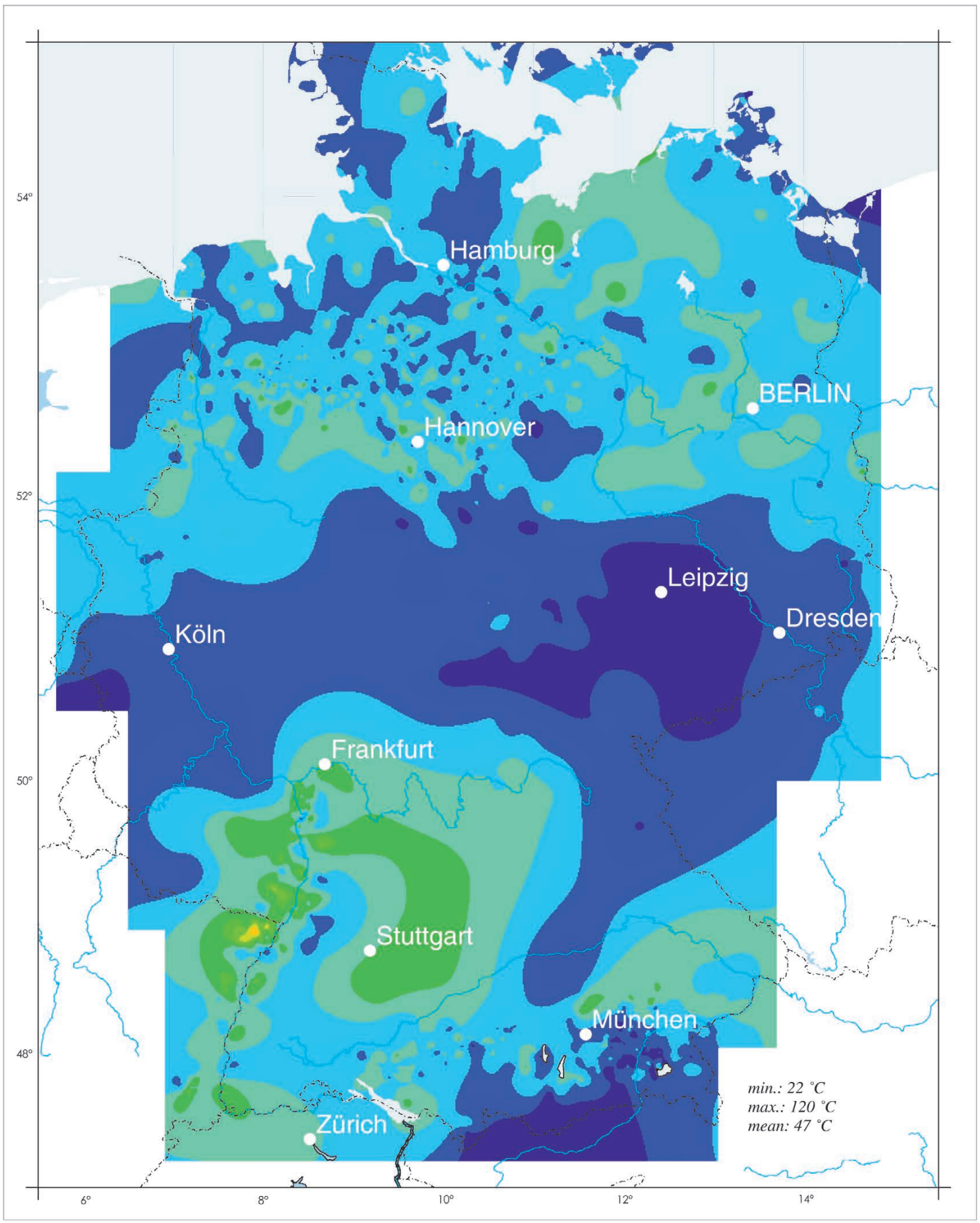
- Dienstbereich Berlin -

Schematische Darstellung potentieller neotektonisch aktiver Störungszonen

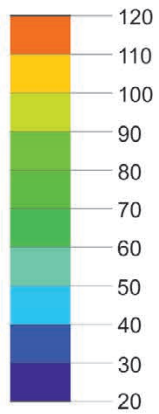
(n. Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1 000 000, BRÜCKNER-RÖHLING et al. 2002, BAUMANN & ILLIES 1983, DÜRR 1982))

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 4**



LEGENDE



$T_{z=1000\ m}$ (°C)

0 50 100km

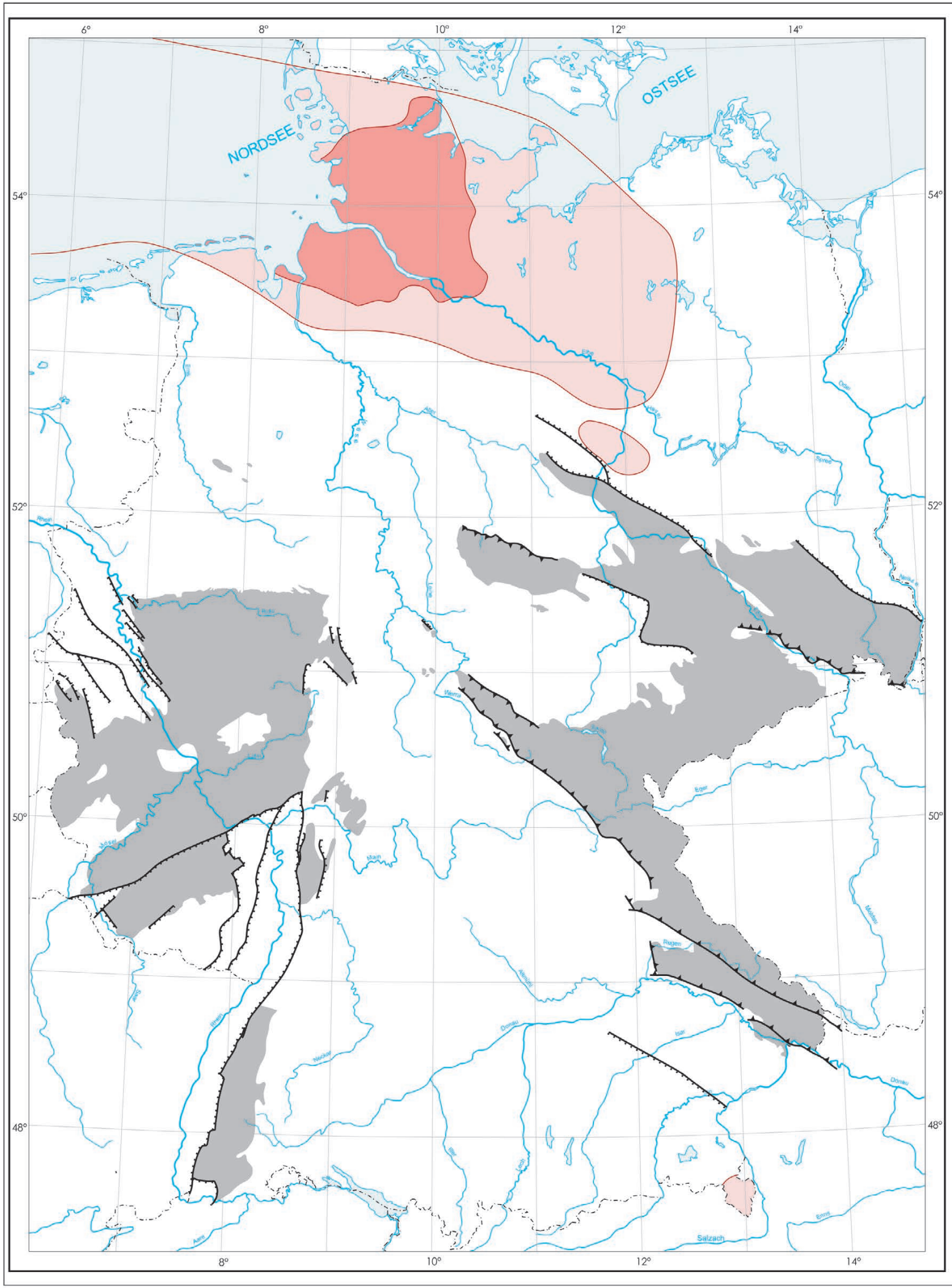
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Temperaturverteilung in 1000m Tiefe

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

nach JUNG et al. 2002	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 5**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Rotliegend - Salinar

Verbreitung der strukturbildenden Rotliegendsalinare

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

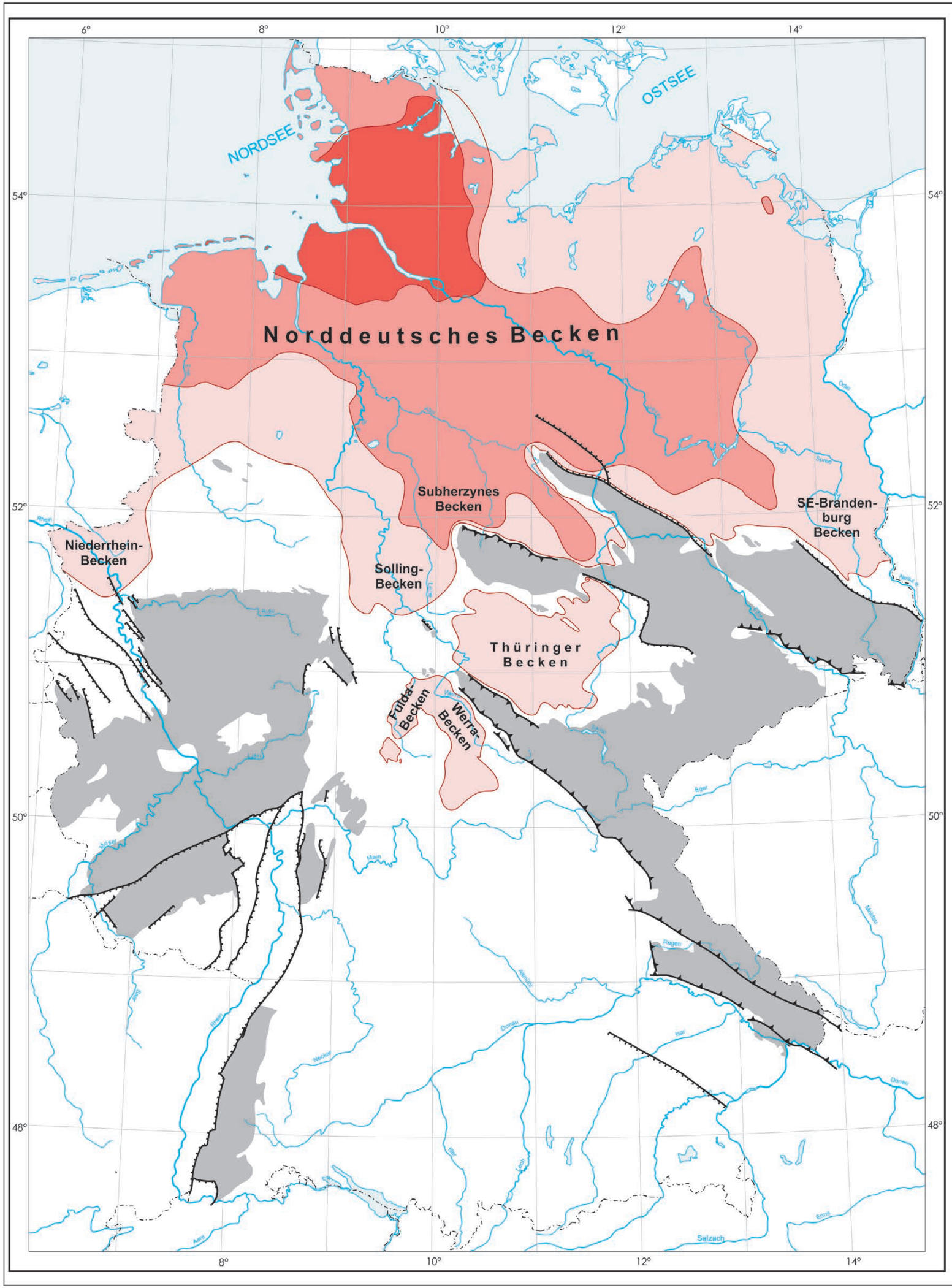
- Dienstbereich Berlin -

Schematische Verbreitung des Rotliegend - Salinars

(n. Bohrergebnissen, BALDSCHUHN et al. 1999, LINDERT et al. 1990, SCHAUBERGER 1955)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 6**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

- Abschiebungen
- Aufschiebungen

- Zechsteinsalinare
- Verbreitung der Zechsteindiapire
- Verbreitung der strukturbildenden Rotliegendsalinare

- Grundgebirge (einschließlich Molasse des Permo - Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

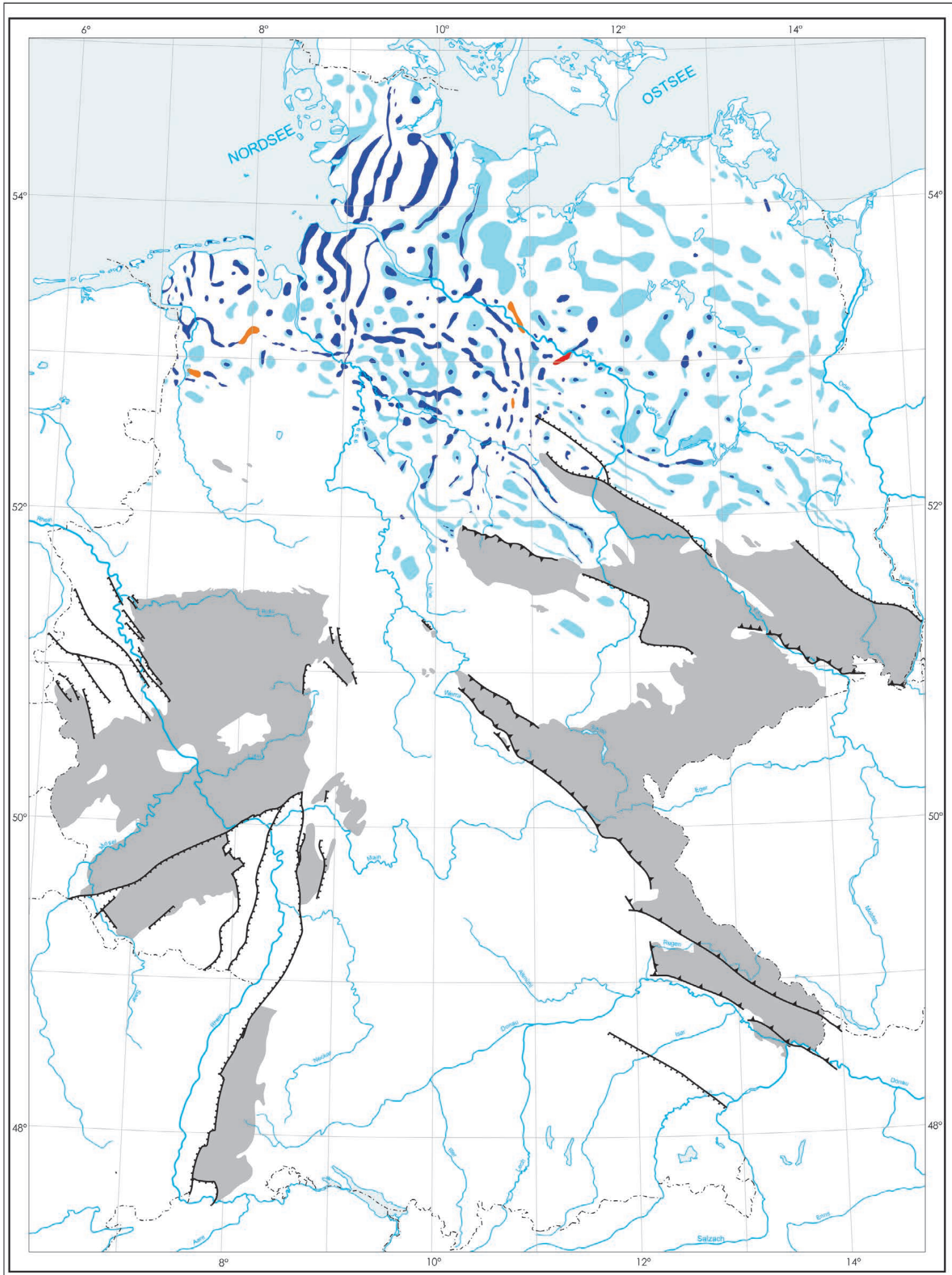
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Schematische Verbreitung der Zechstein - Salinare

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 7**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

- Abschiebungen
- Aufschiebungen

- Salzkissen
- Salzstöcke
- Salzstöcke (Reserveoptionen BGR 1995)
- Salzstock Gorleben
- Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

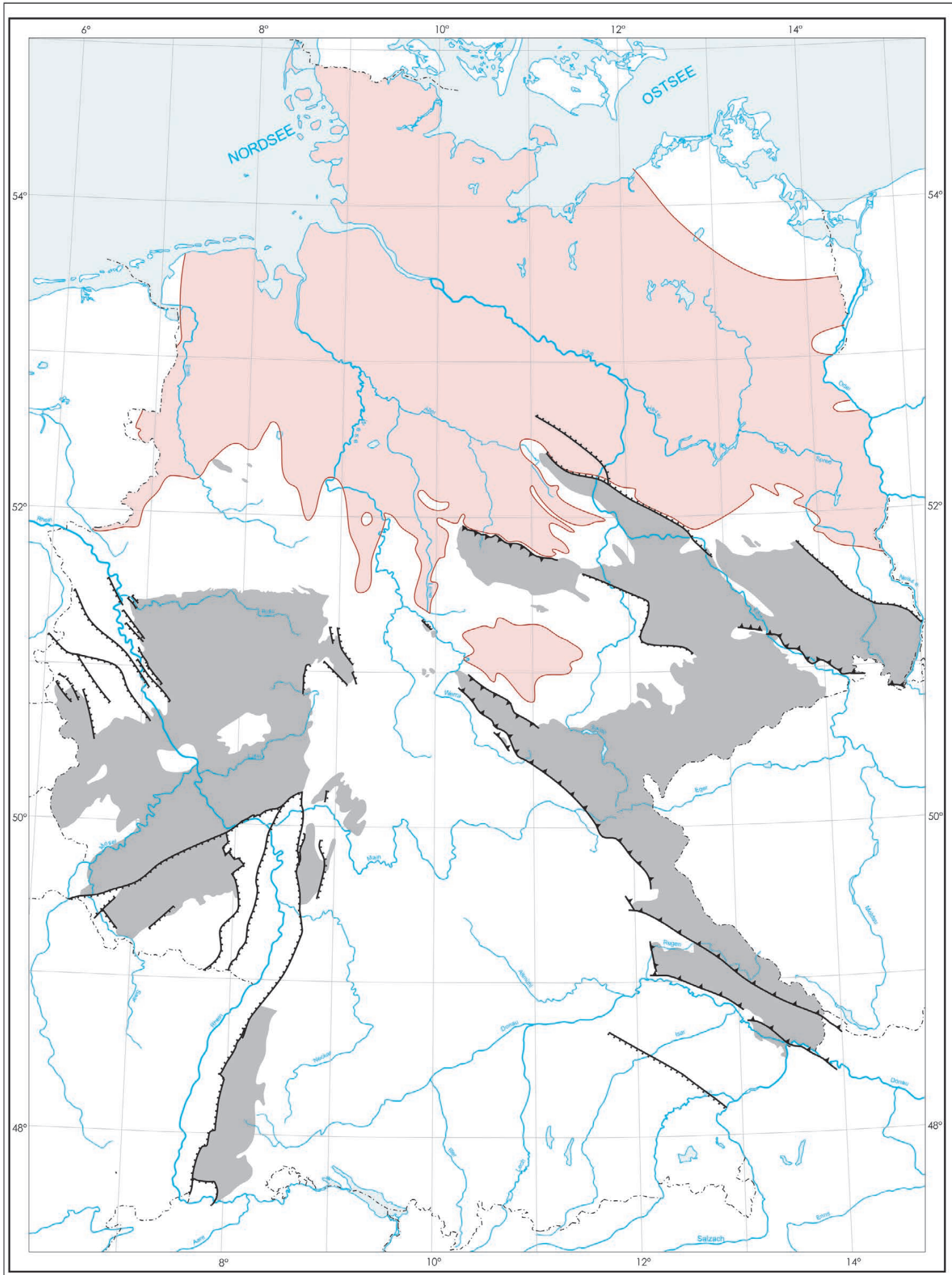
- Dienstbereich Berlin -

Schematische Verteilung der Salinarstrukturen

(n. BALDSCHUHN et al. 1999, KRULL 1991, KOCKEL & KRULL 1995)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 8**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Röt - Salinar

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

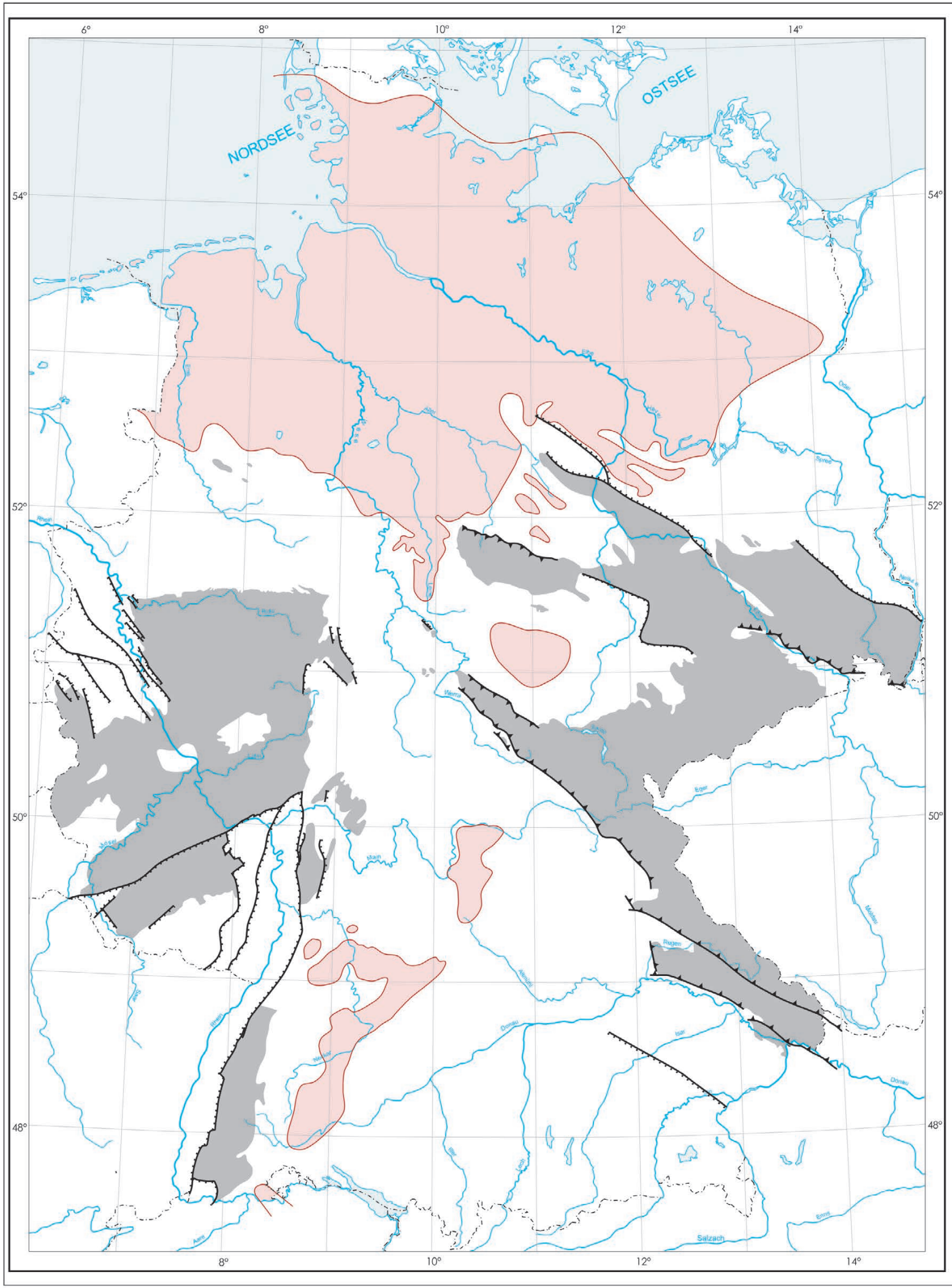
Schematische Verbreitung des Röt - Salinars

(lokale Fehlstellen an Salinarstrkturen sind nicht berücksichtigt)

(n. HESSMANN 1974, WOHLBURG 1969)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 9**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

- Abschiebungen
- Aufschiebungen
- Salinare des Mittleren Muschelkalk
- Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

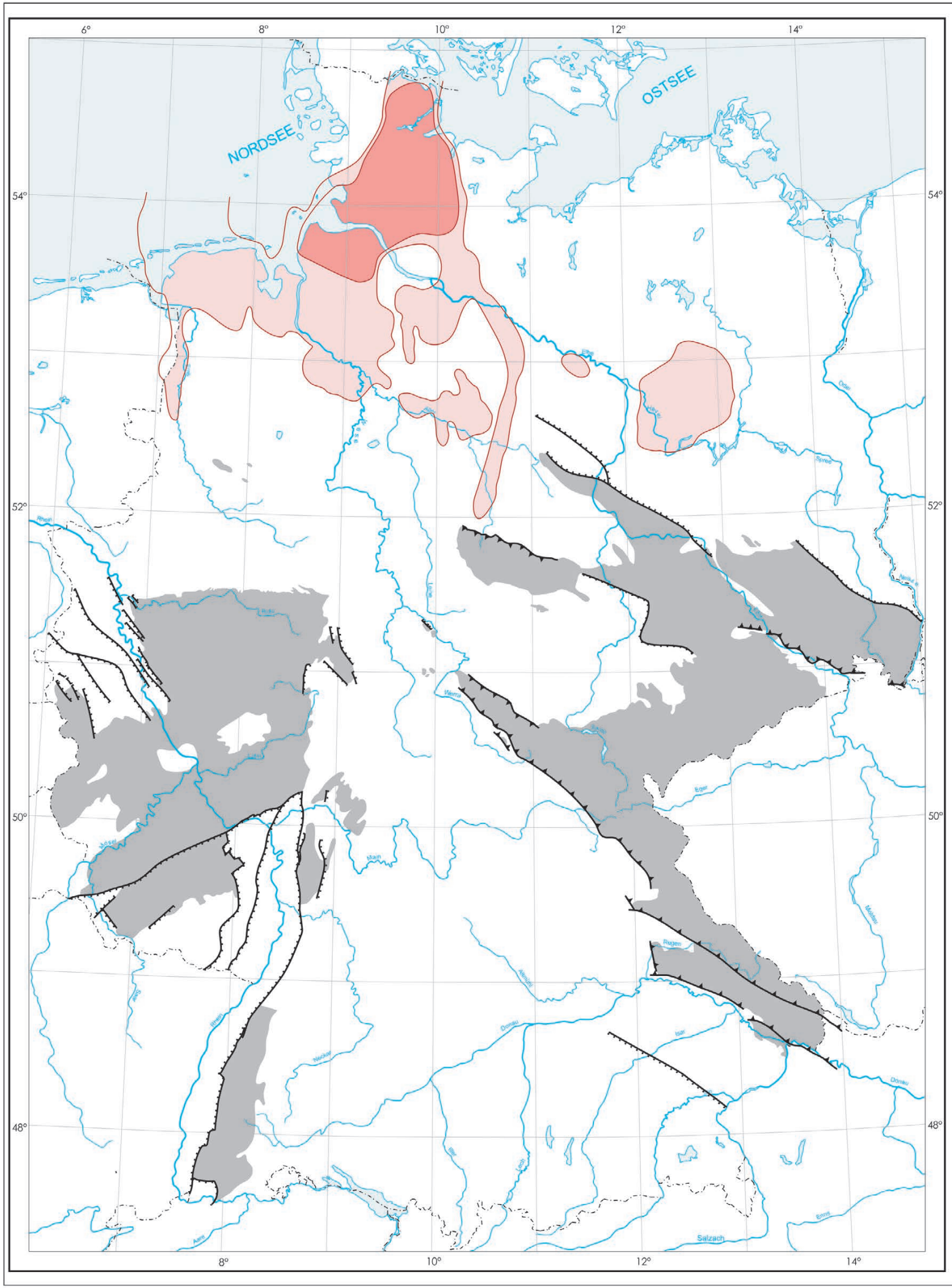
Schematische Verbreitung des Salinars im Mittleren Muschelkalk

(lokale Fehlstellen an Salinarstrukturen sind nicht berücksichtigt)

(n. GAERTNER & RÖHLING 1993, SIMON 1995, HESSMANN 1974)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 10**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

- Abschiebungen
- Aufschiebungen

Salinare des Mittleren Keupers

Verbreitung der Salinarstrukturen des Mittleren Keupers

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

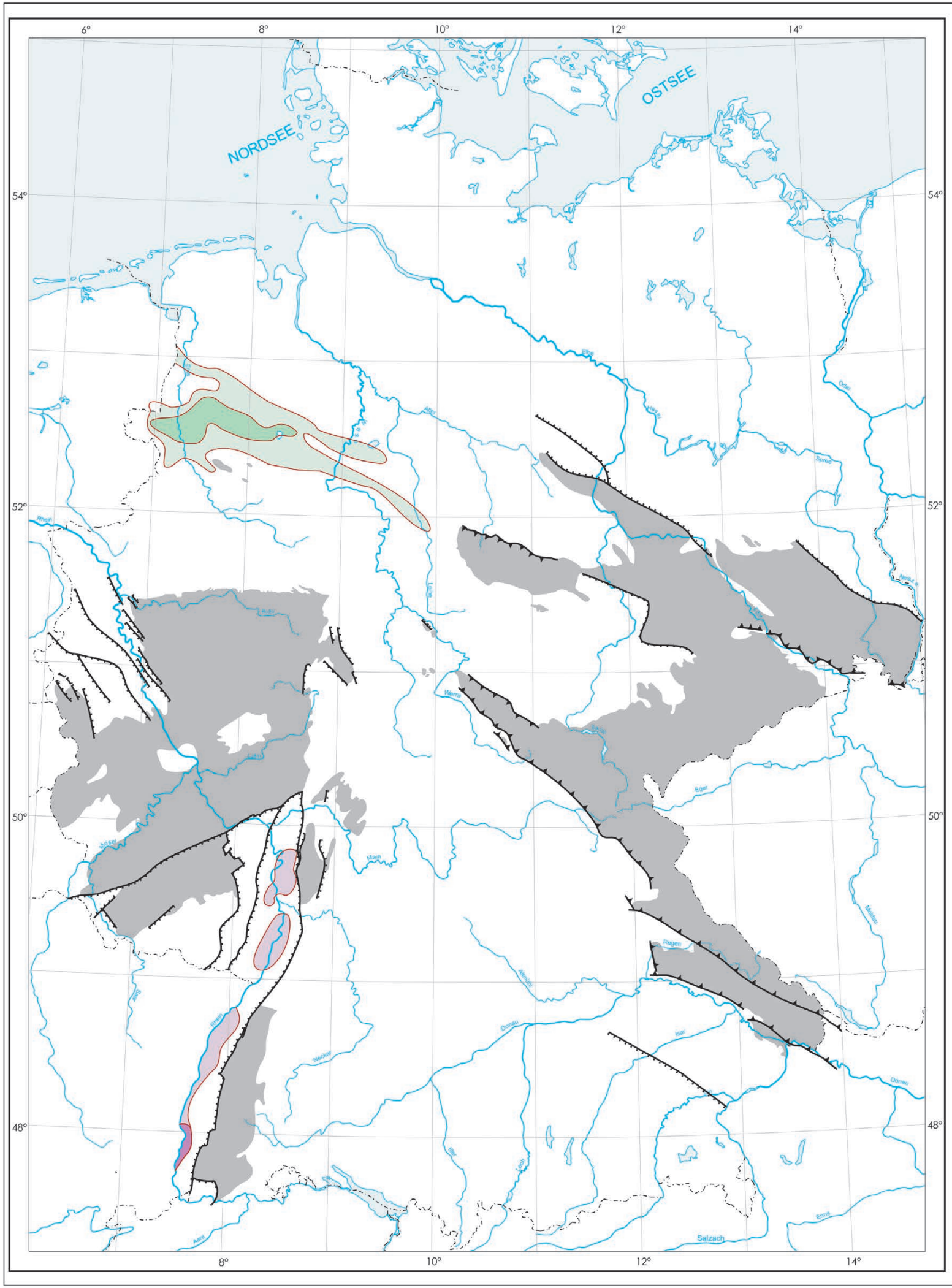
Schematische Verbreitung der Salinare des Mittleren Keupers

(lokale Fehlstellen an Salinarstrukturen sind nicht berücksichtigt)

(n. KOCKEL 1999, HESSMANN 1974)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 11**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

- Abschiebungen
- Aufschiebungen
- Salinare des Oberen Jura
- Verbreitung der Salinarstrukturen des Oberen Jura
- Salinare des Tertiär
- Verbreitung der Salinarstrukturen des Tertiär
- Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

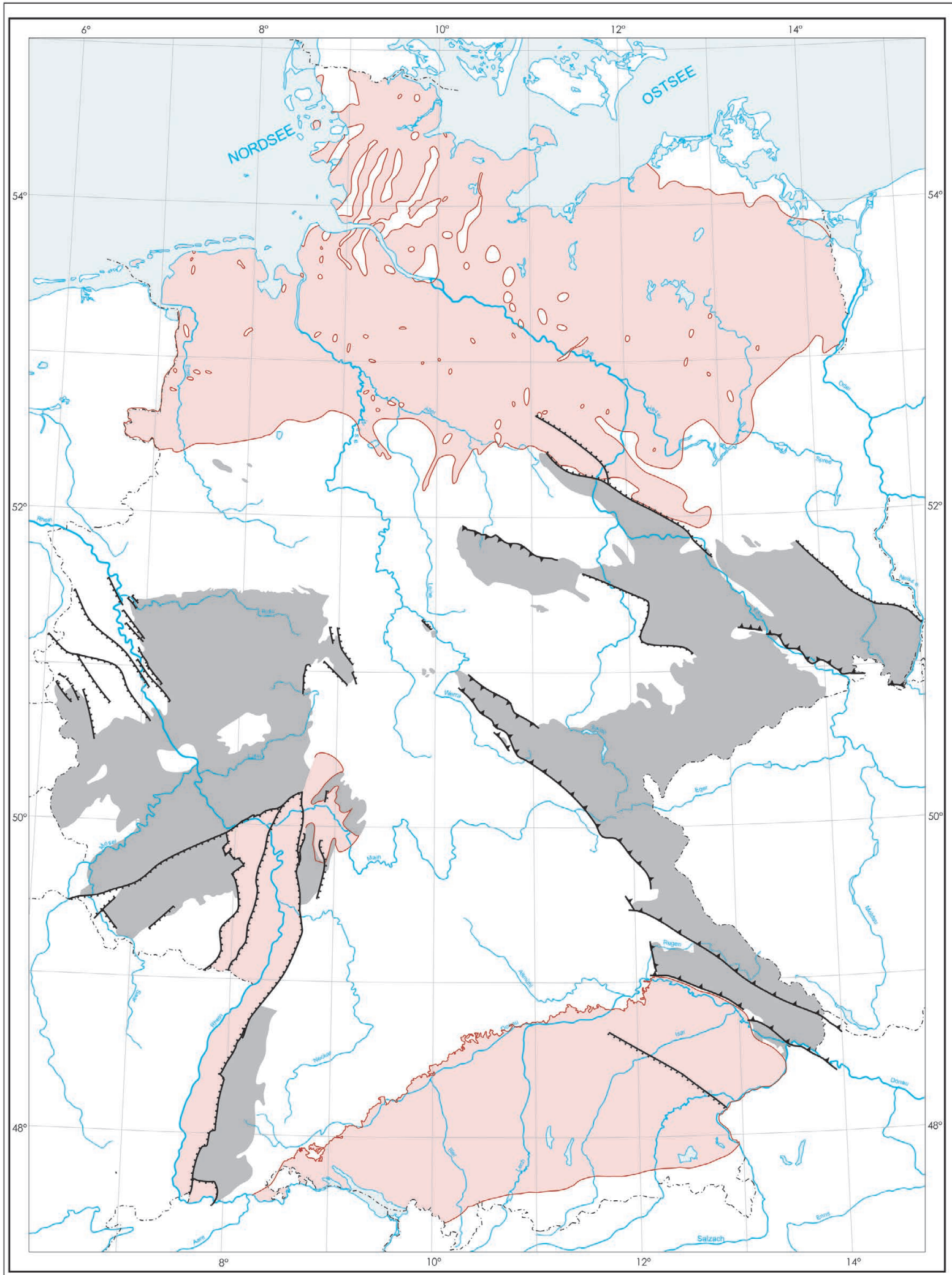
- Dienstbereich Berlin -

Schematische Verbreitung der Salinare des Oberen Jura und Tertiär

(n. Bohrergebnissen, BALDSCHUHN et al. 1999, WAGNER 1955)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 12**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Tonformationen im Tertiär

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

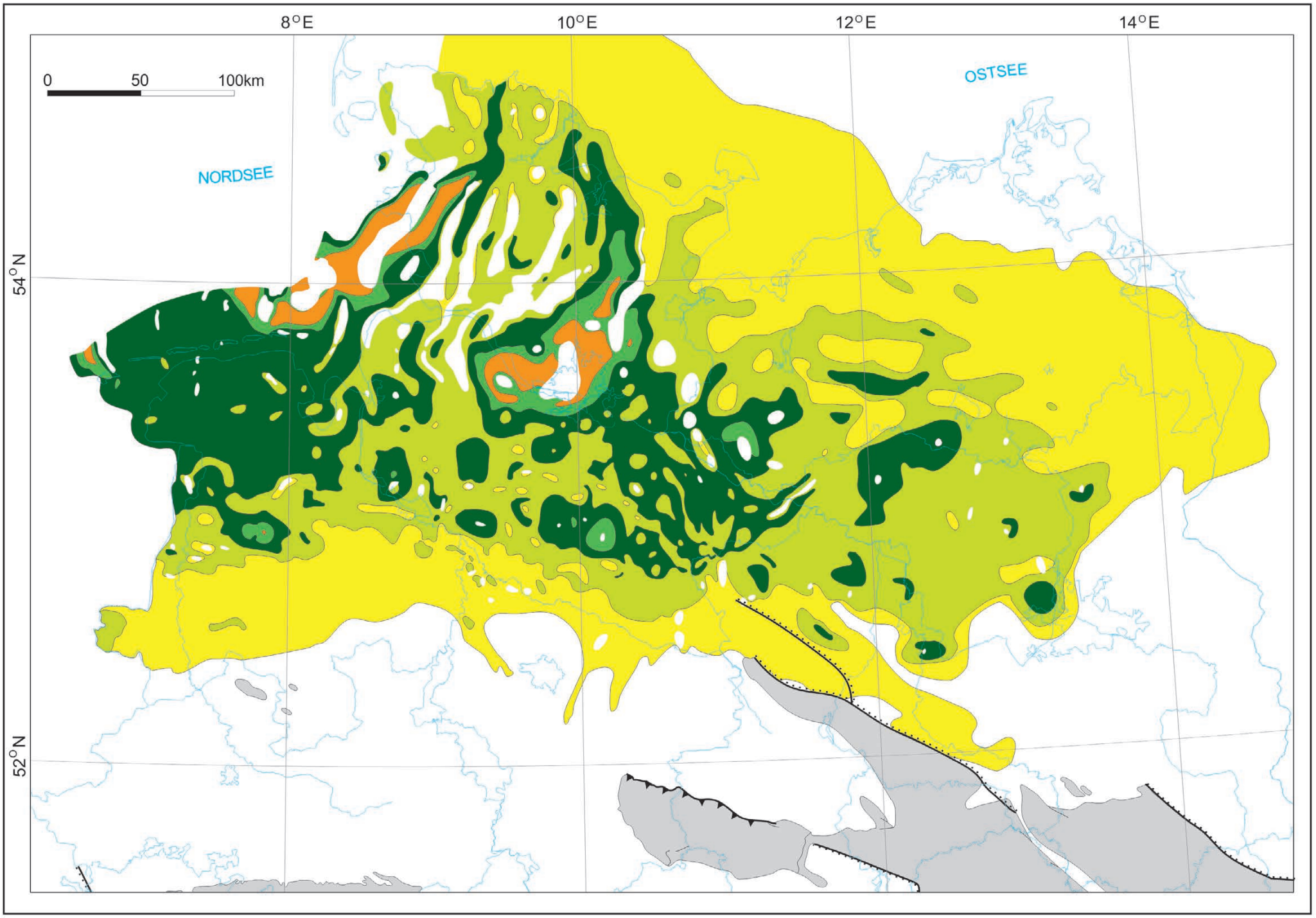
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Schematische Verbreitung von Tonformationen des Tertiär

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 13**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

Tiefenlage in [m]

- > NN - 250m (unter NN)
- 250 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 1500
- > 1500

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

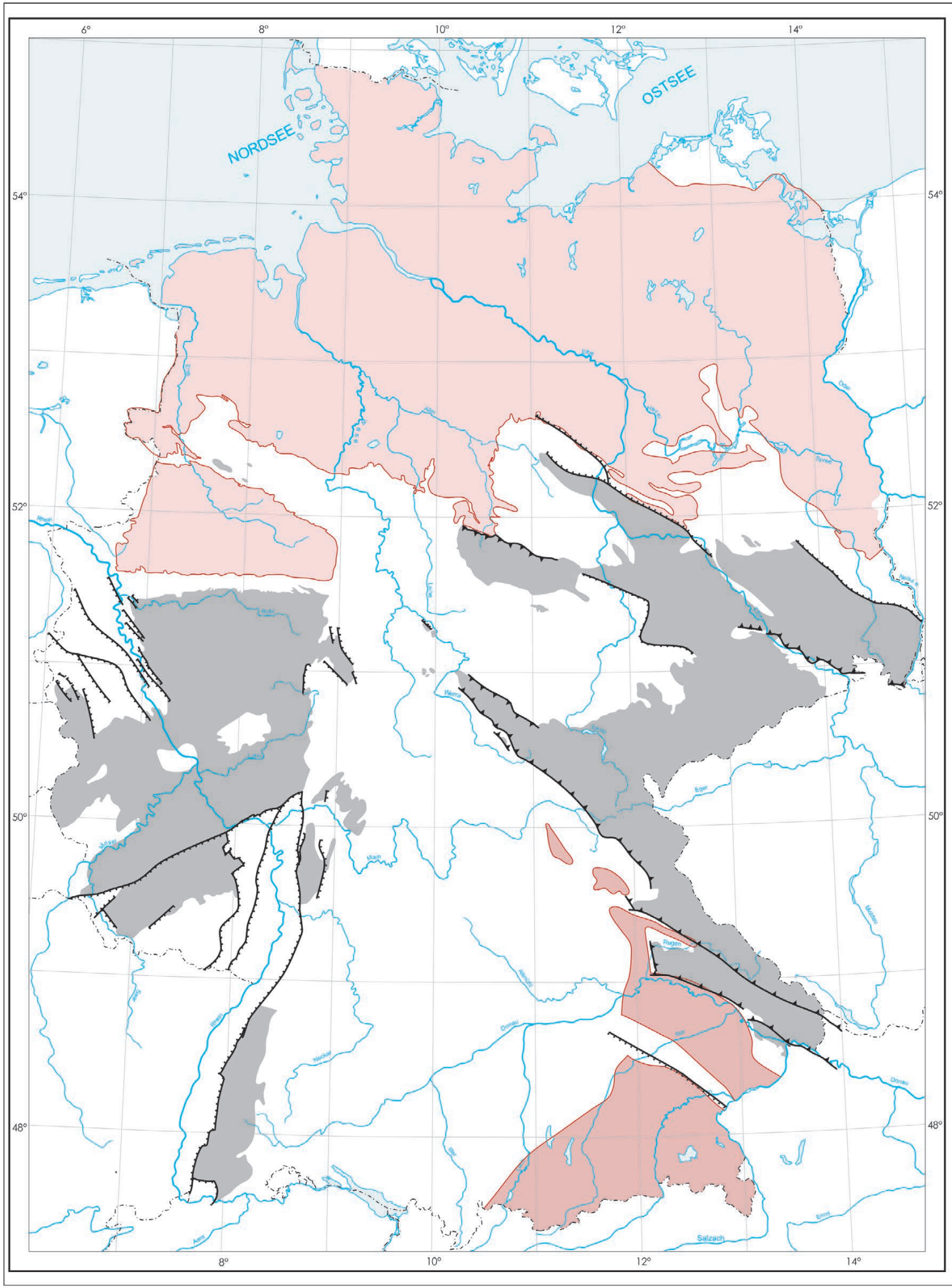
- Dienstbereich Berlin -

Tiefenlage von Tonformationen des Tertiär

(Oberfläche Mittel-Untereozän)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL, M. FISCHER	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 14**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Tonformation der Unterkreide

Tonformation der Oberkreide

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

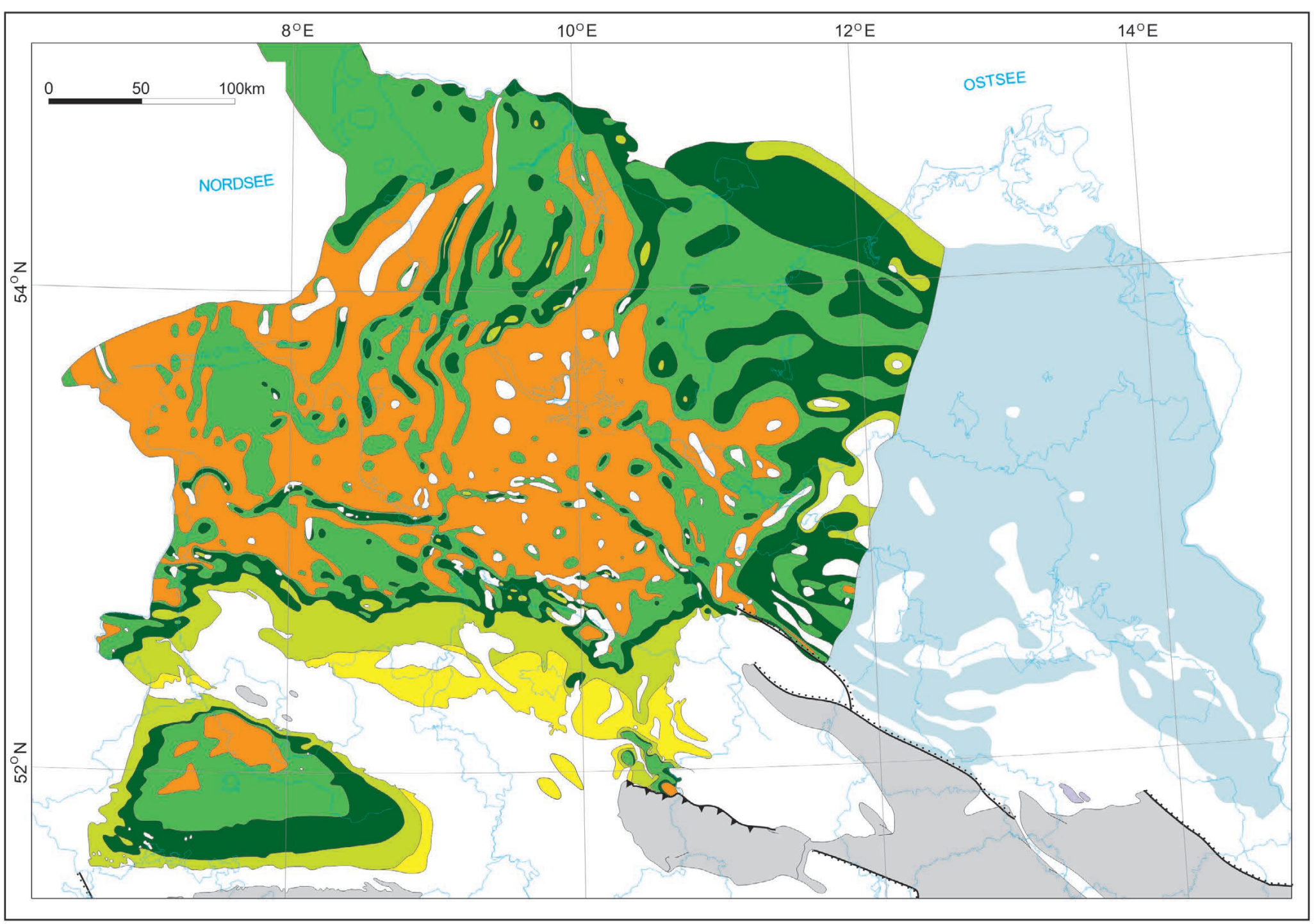
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Schematische Verbreitung von Tonformationen der Kreide

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 15**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

starker Sandsteinanteil

Tiefenlage in [m]

- über NN
- 0 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 1500
- > 1500

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

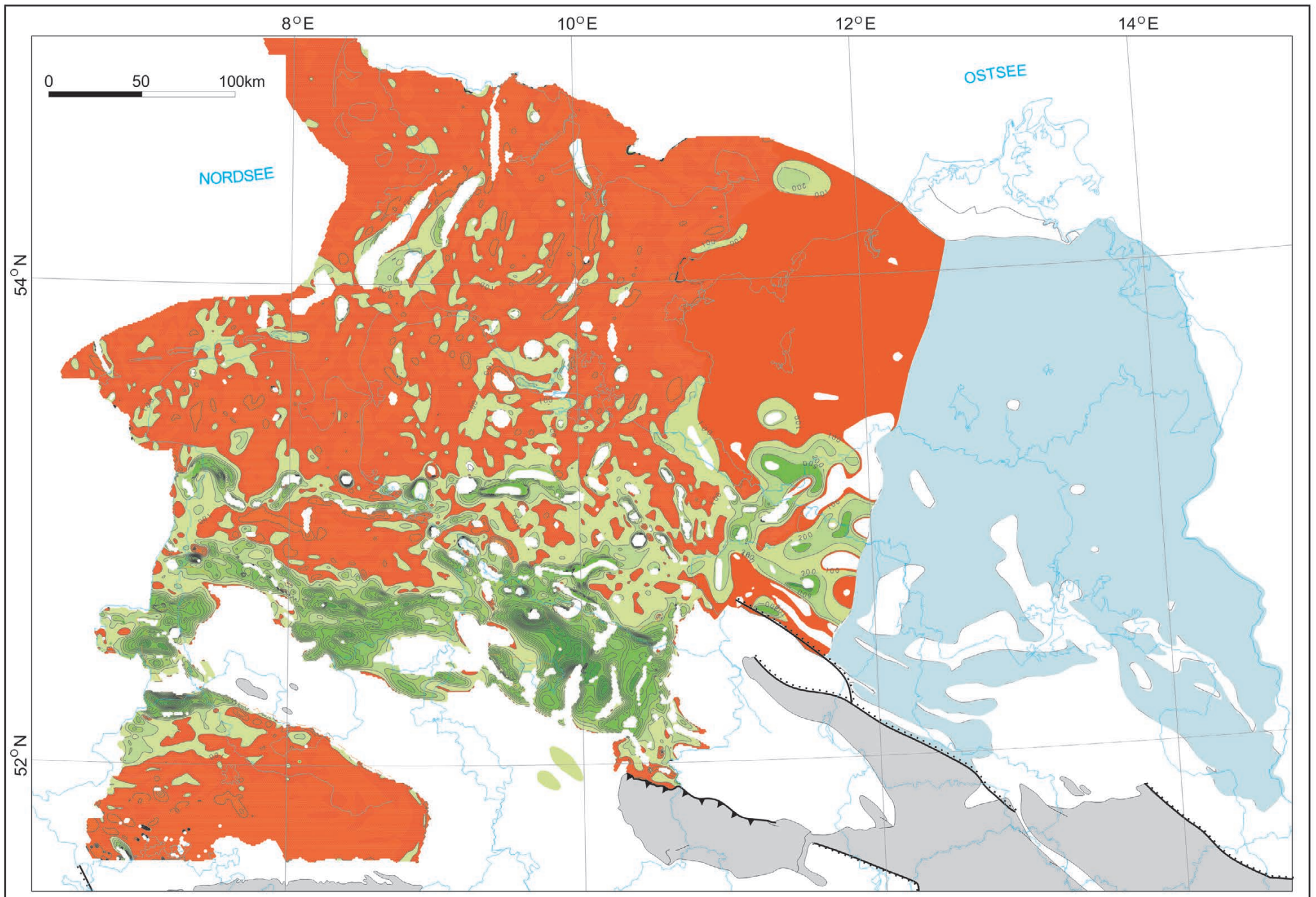
- Dienstbereich Berlin -

Tiefenlage von Tonformationen der Kreide

(Oberfläche Unterkreide)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL, M. FISCHER	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 16**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

starker Sandsteinanteil

Mächtigkeit in [m]

- 0m
- 100m
- 200m
- 300m
- 400m
- 500m
- 600m
- 700m
- >800m

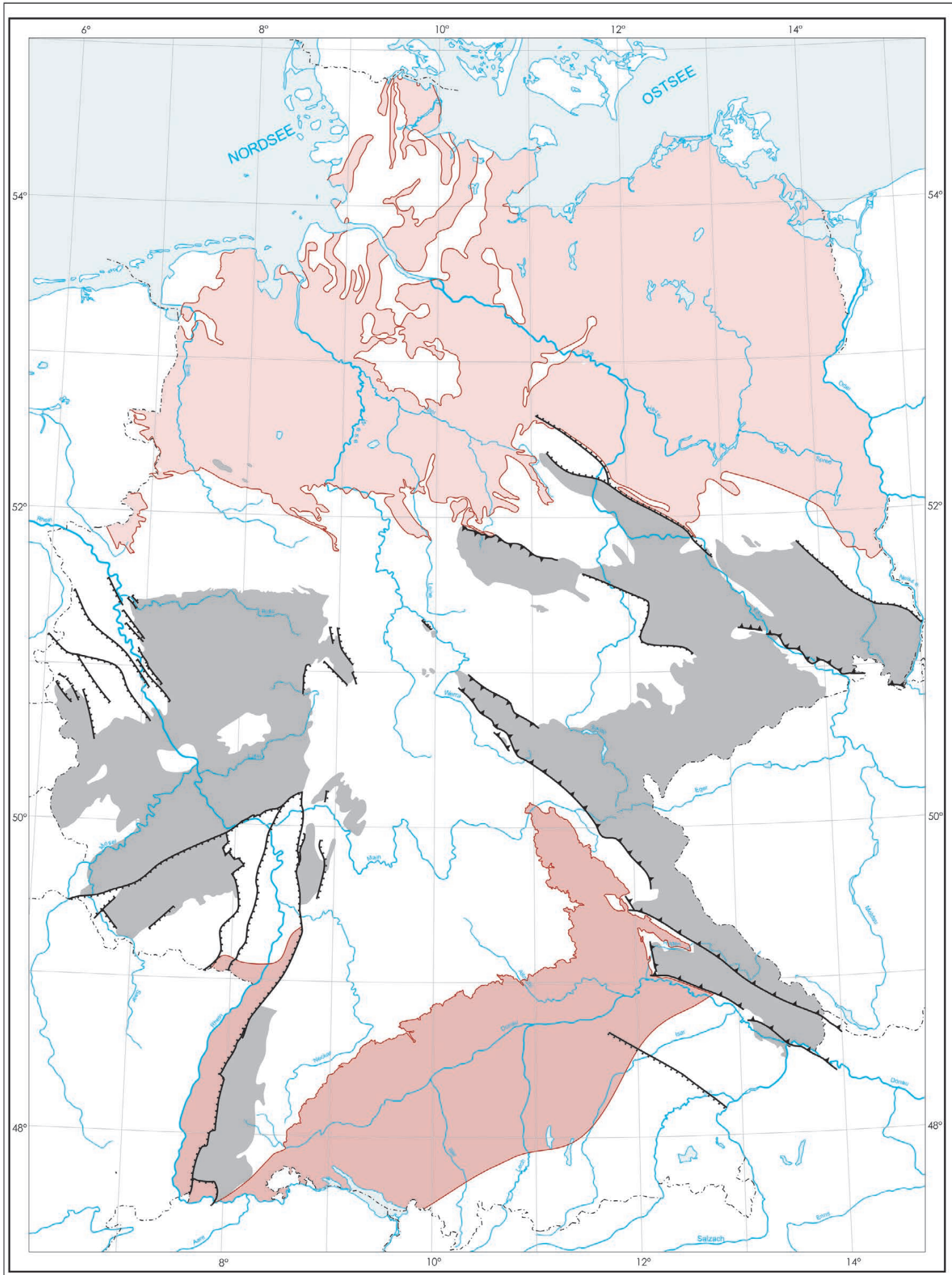
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Mächtigkeit der marinen Unterkreide

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL, M. FISCHER	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 17**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Tonformationen im Lias und Dogger

Opalinuston

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100km

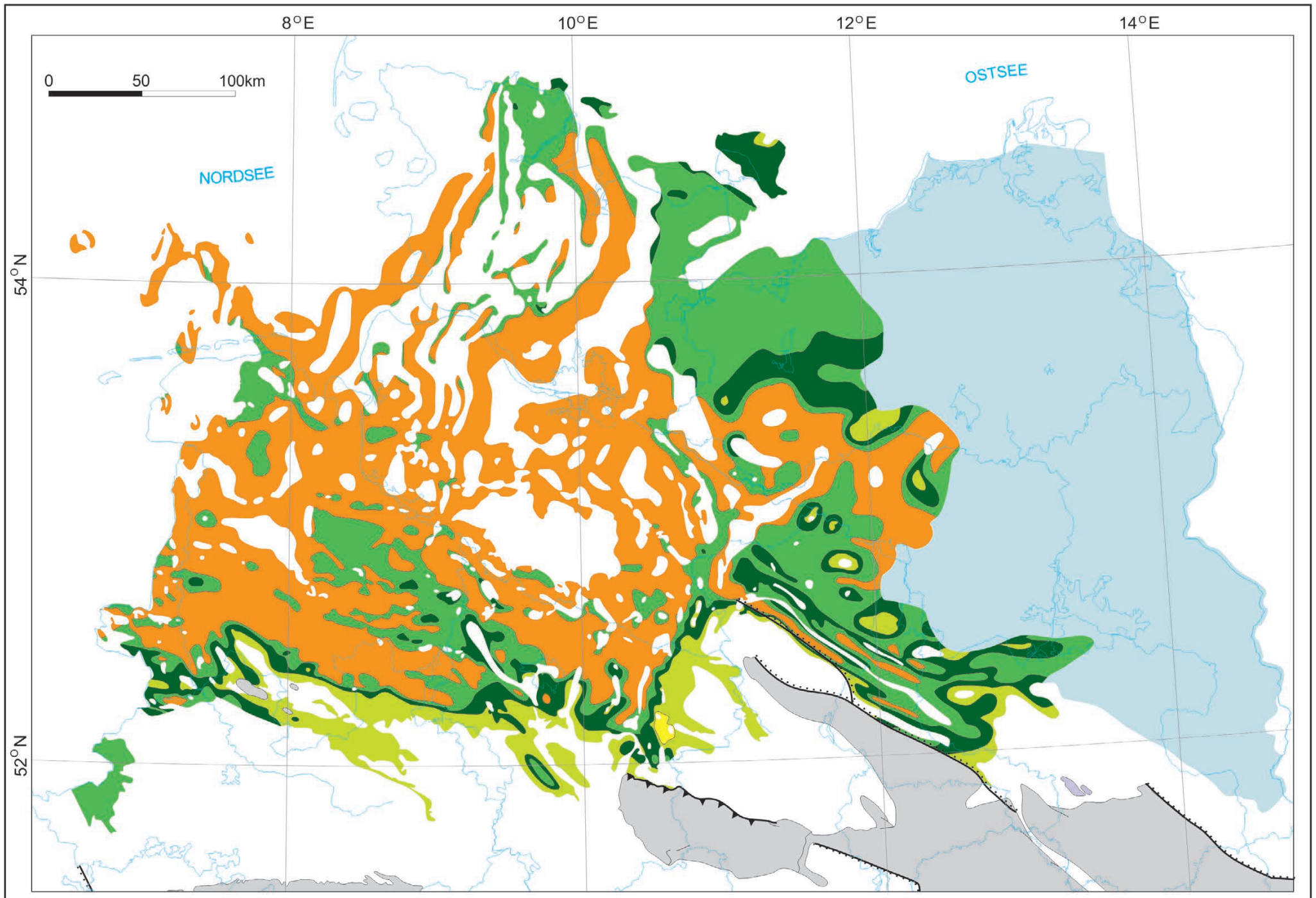
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Schematische Verbreitung von Tonformationen im Jura

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 18**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

starker Sandsteinanteil

Tiefenlage in [m]

- über NN
- 0 - 500
- 500 - 1000
- 1000 - 1500
- > 1500

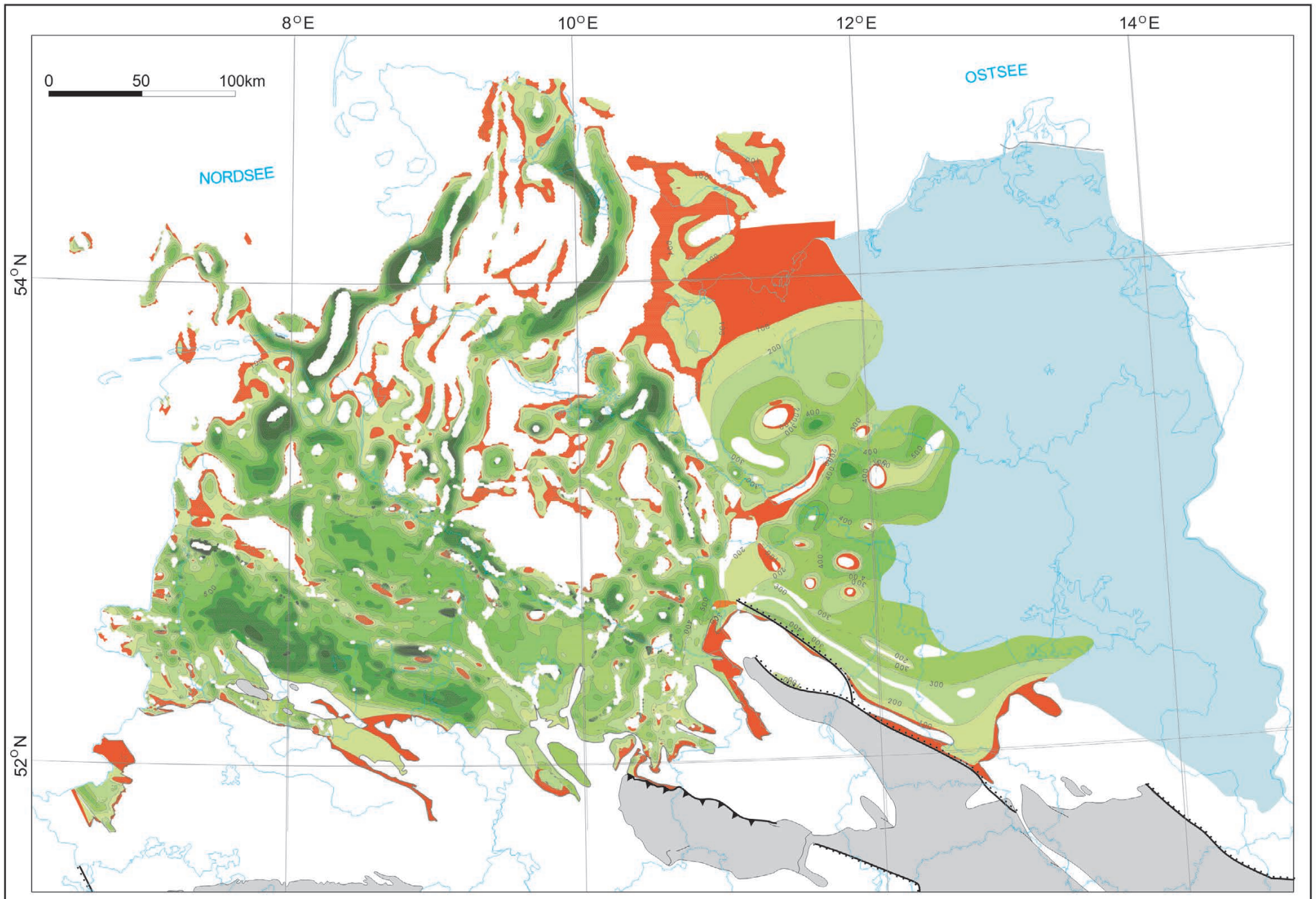
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Tiefenlage von Tonformationen des Jura
(Oberfläche Lias)

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. Hoth, P. Krull, M. Fischer	Zeichnung: J. Rätz	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 19**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

starker Sandsteinanteil

Mächtigkeit in [m]

0m
100m
200m
300m
400m
500m
600m
700m
>800m

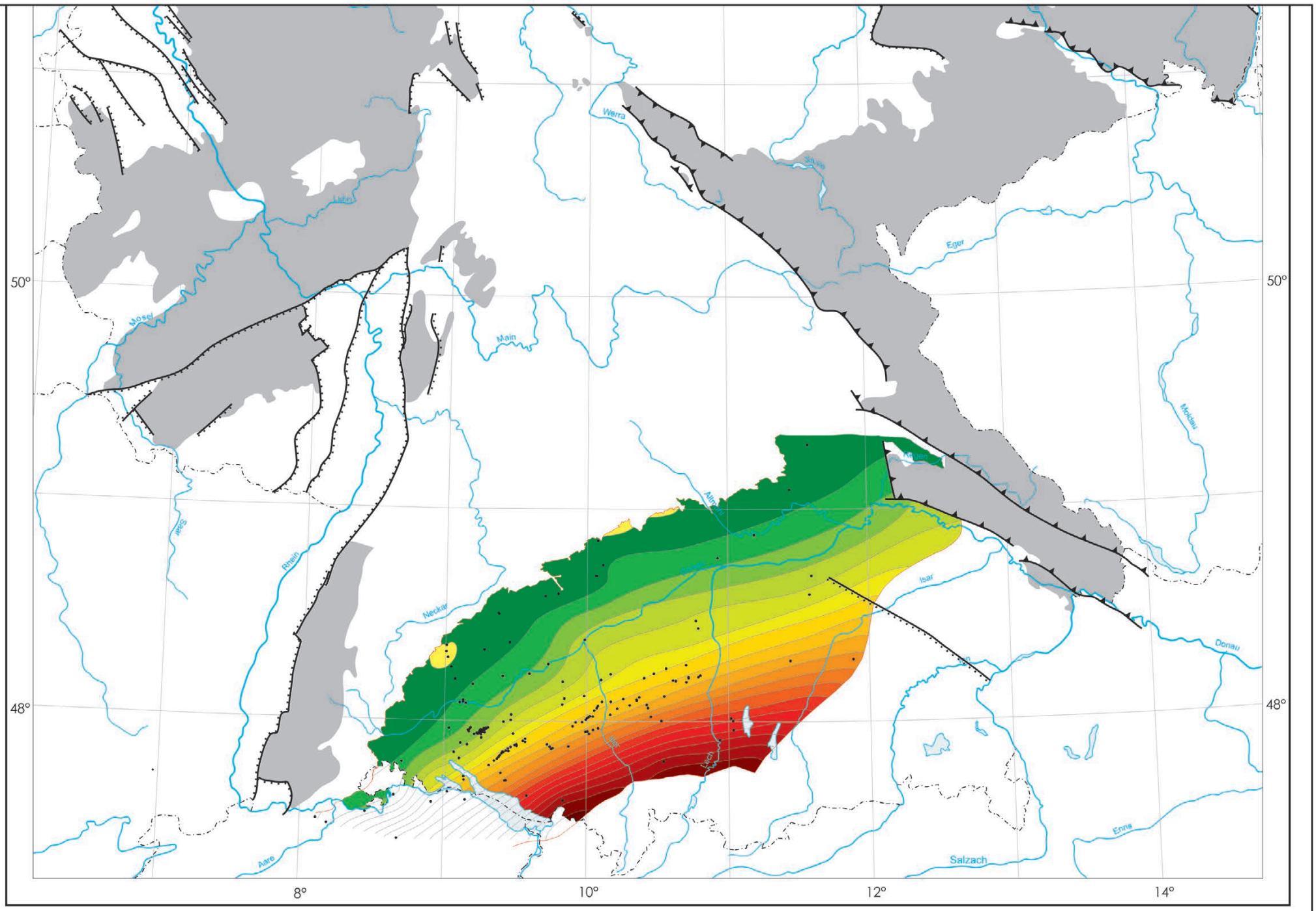
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Mächtigkeit des Lias

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL, M. FISCHER	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 20**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

Tiefenlage Opalinuston in [m]

500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
-3500
-4000

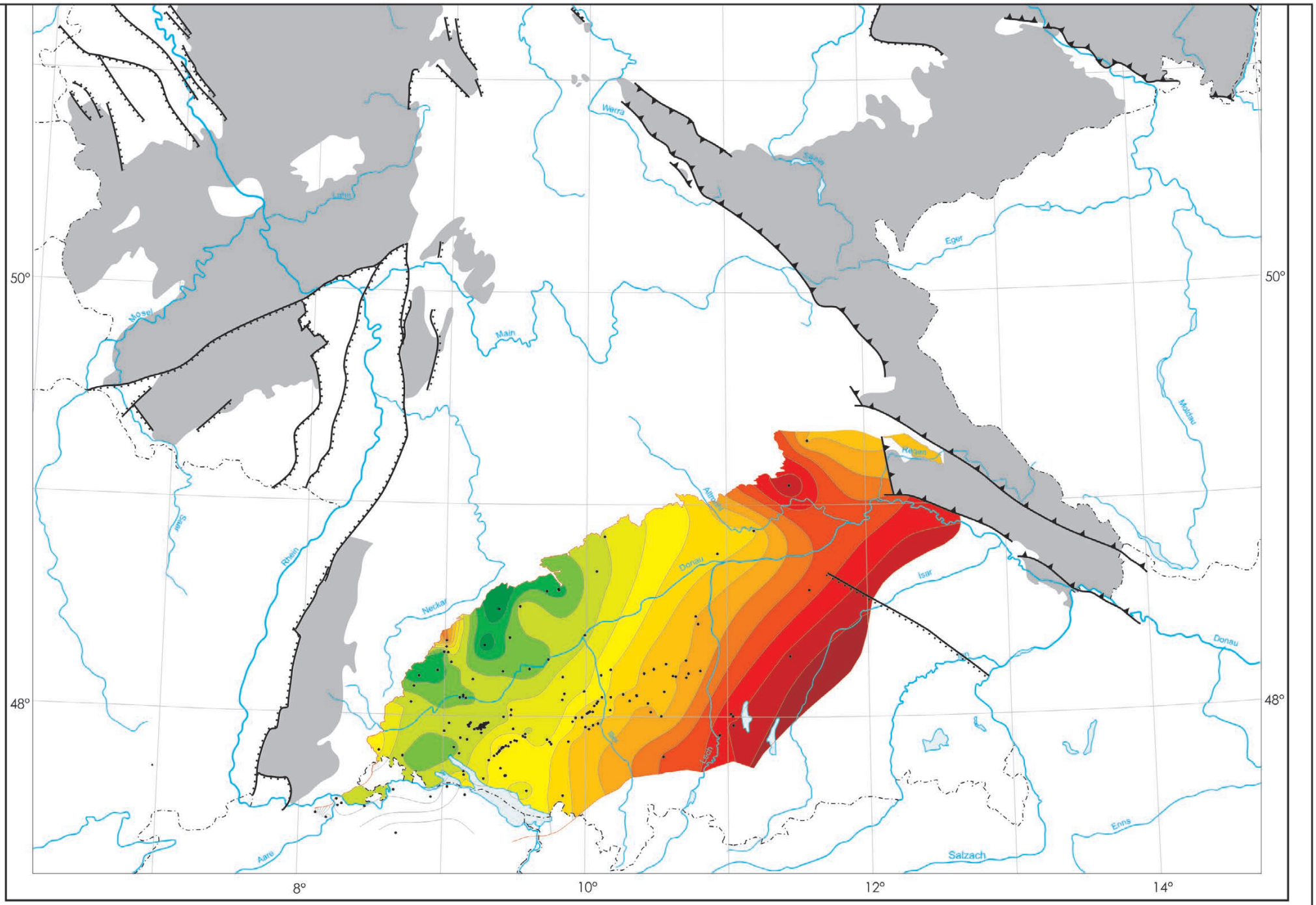
BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Tiefenlage des Opalinustons im Alpenvorland-Becken

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL, M. FISCHER, H. WIRTH	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 21**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Abschiebungen

Aufschiebungen

Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permo-Karbon), z.T. unter känozoischer Bedeckung

Mächtigkeit Opalinuston in [m]

20
40
60
80
100
120
140
160

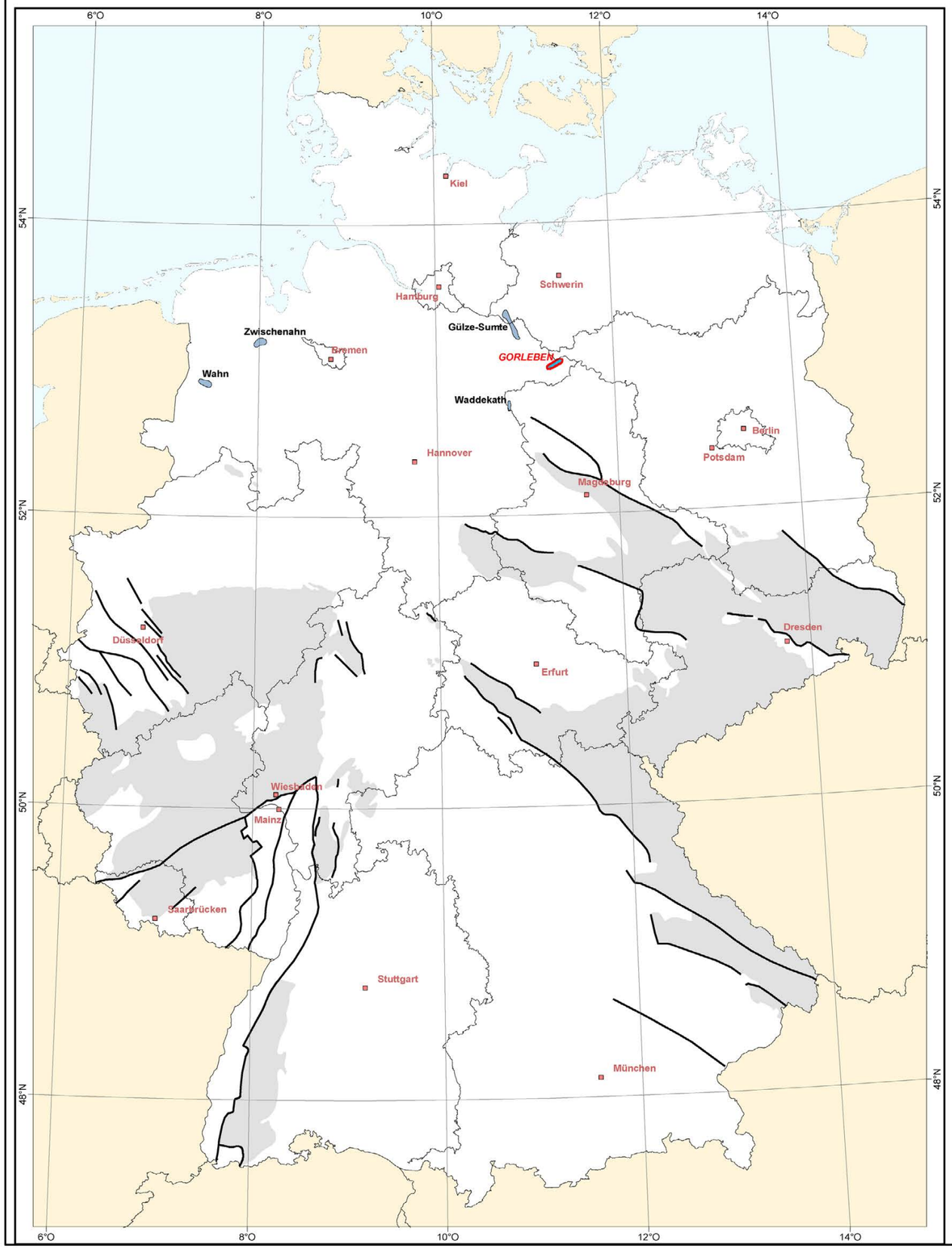
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- Dienstbereich Berlin -

Mächtigkeit des Opalinustons im Alpenvorland-Becken

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. HOTH, P. KRULL, M. FISCHER, H. WIRTH	Zeichnung: J. RÄTZ	
BGR - Ref. B3.21	Stand: 09/2004	**Anlage 22**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

untersuchungswürdige Salzstöcke
(nach BGR 1995)

Salzstock Gorleben

Grundgebirge
(einschließlich der Molasse des Permo-Karbon),
z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100 km

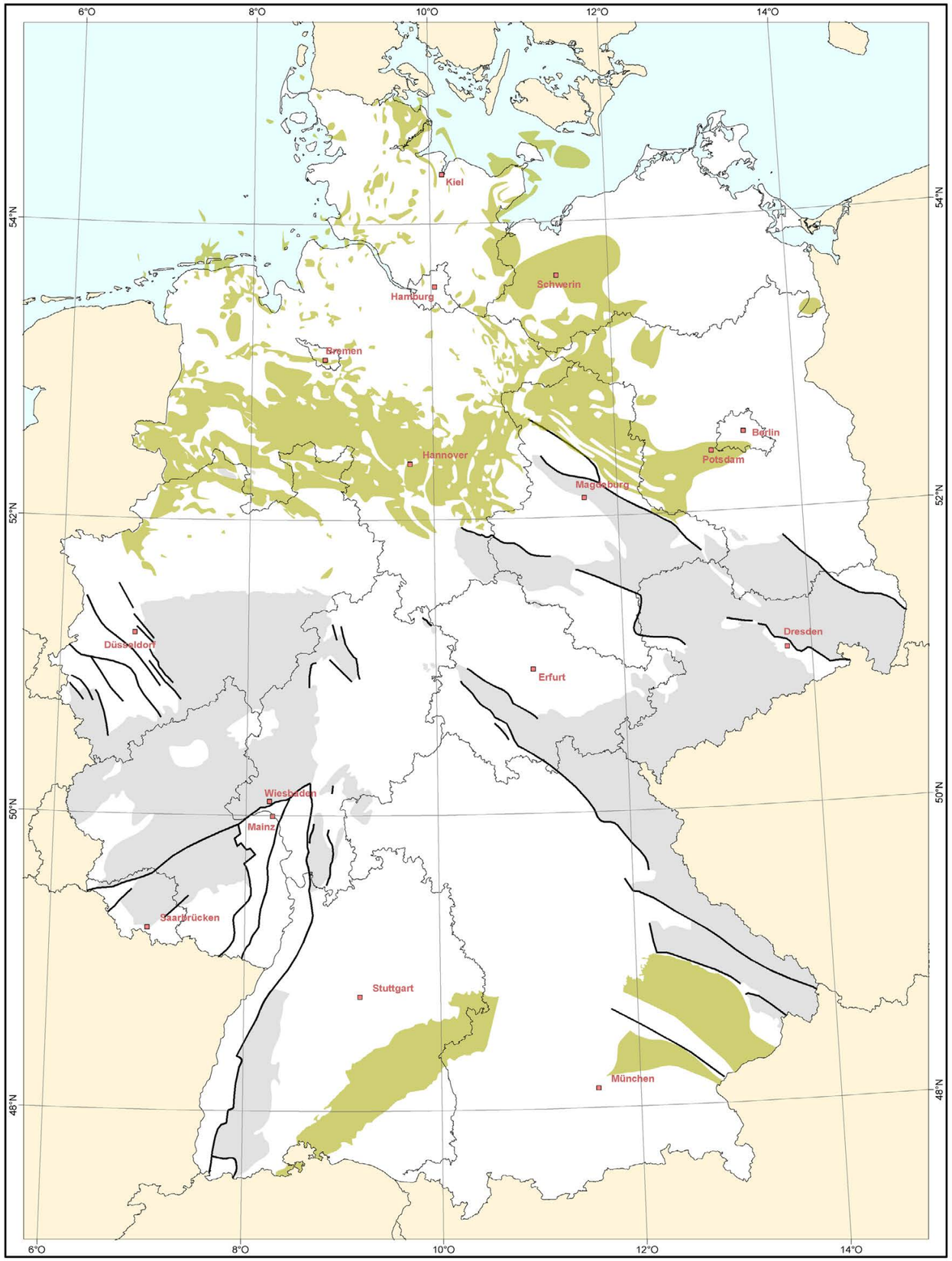
Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe
Dienstbereich Berlin

Untersuchungswürdige Salzstrukturen

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. KRULL, P. HOTH, K. REINHOLD

BGR - Ref. B3.21 | Stand: 10/2004 | **Anlage 23**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Tonsteinformationen
Mächtigkeit > 100m
Teufe < 1500m u.GOK*

Grundgebirge
(einschließlich der Molasse des Permo-Karbon),
z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100 km

* unter Geländeoberkante

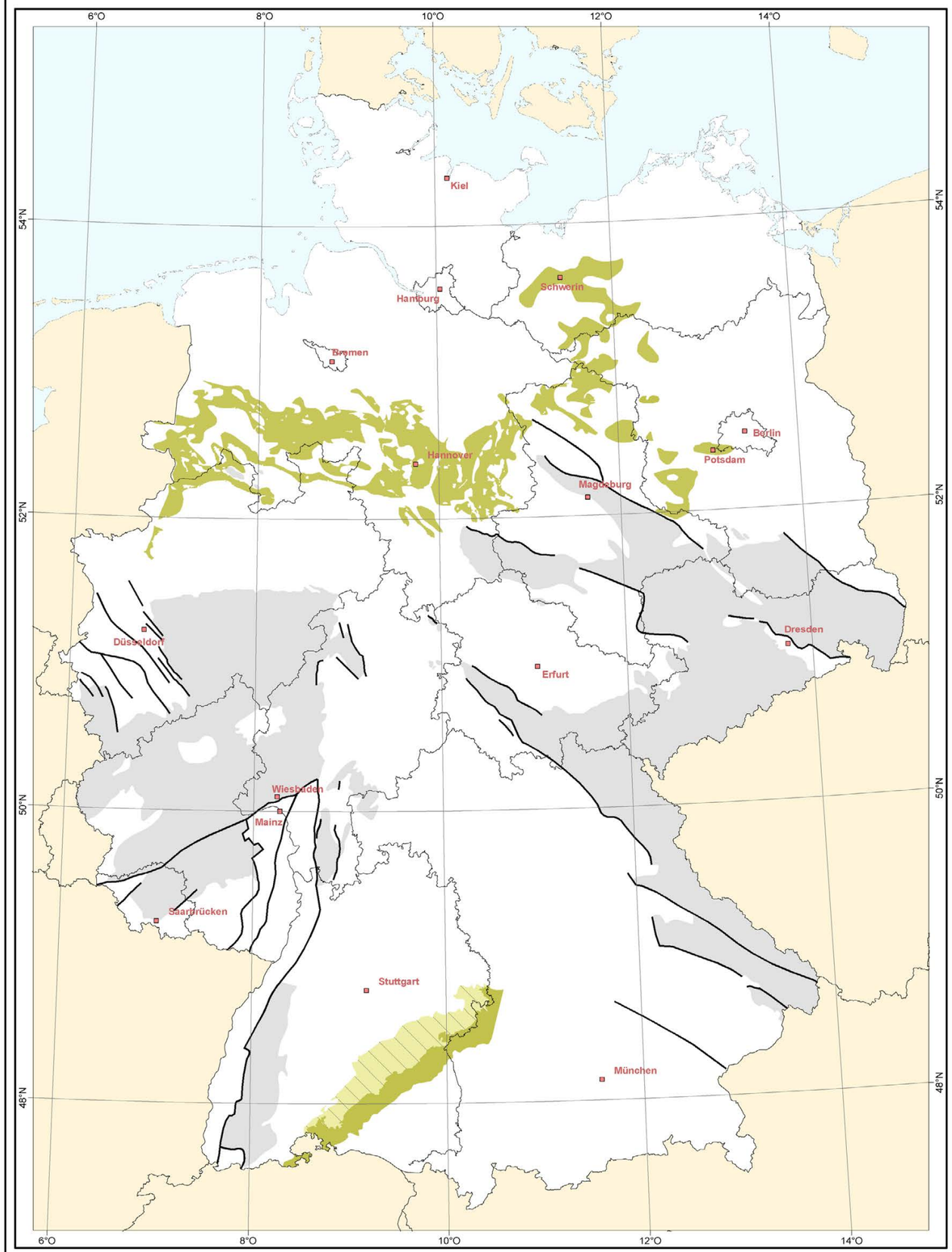
BGR
Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe
Dienstbereich Berlin

Potentielle untersuchungswürdige Tonsteinformationen Kreide / Jura

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. KRULL, P. HOTH, K. REINHOLD

BGR - Ref. B3.21	Stand: 10/2004	**Anlage 24**



LEGENDE

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Tonsteinformationen
Mächtigkeit > 100m
Teufe > 300 bzw. < 1000m u.GOK*

Überdeckung der Tonsteinformation
mit bedeutenden
Karst - Grundwasserleiter

Grundgebirge
(einschließlich der Molasse des Permo-Karbon),
z.T. unter känozoischer Bedeckung

0 50 100 km

* unter Geländeoberkante

BGR

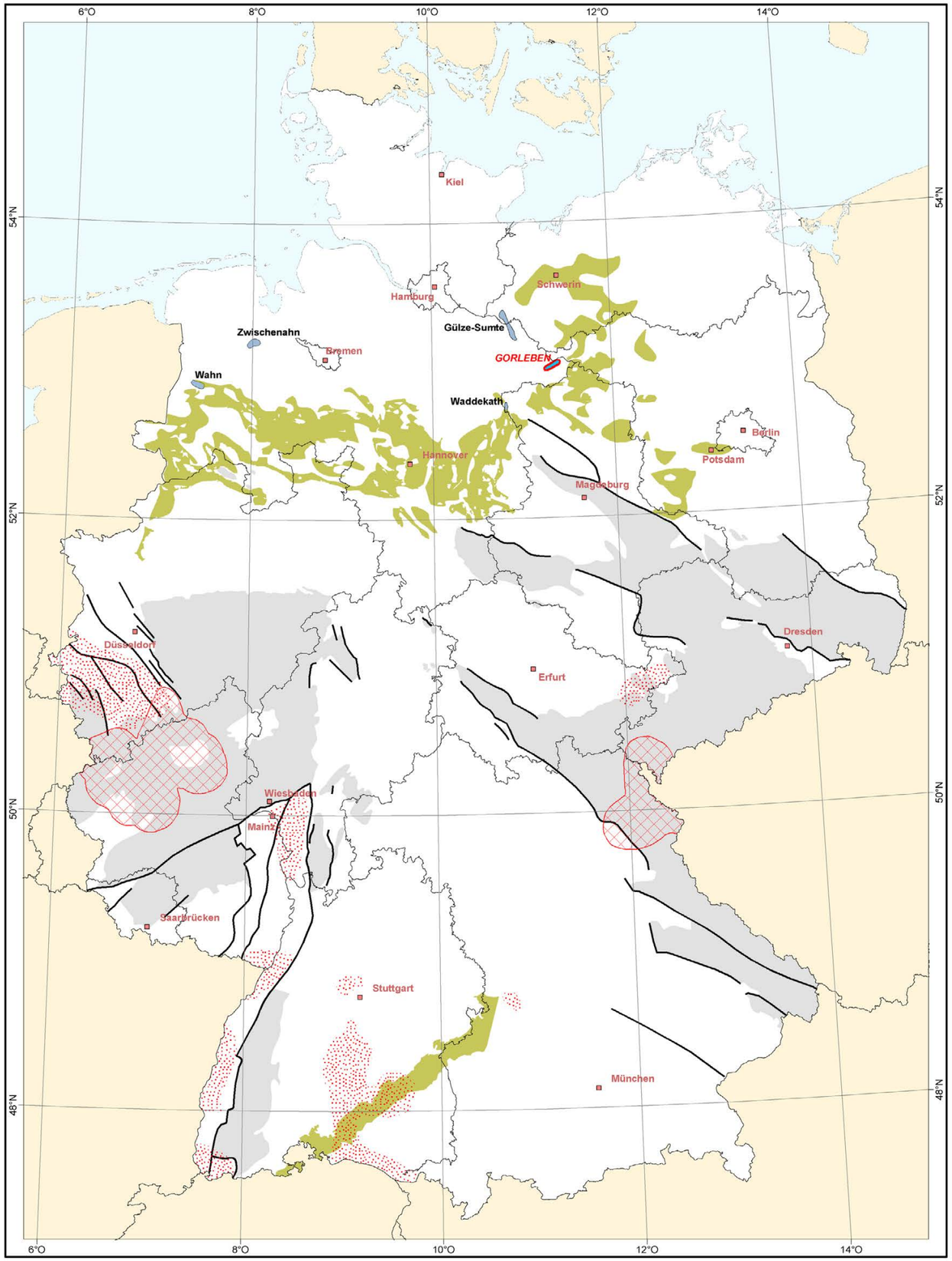
Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe
Dienstbereich Berlin

Untersuchungswürdige Tonsteinformationen Kreide / Jura

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. KRULL, P. HOTH, K. REINHOLD

BGR - Ref. B3.21 | Stand: 10/2004 | **Anlage 25**



LEGENDE

Wirtsgesteinsformationen

untersuchungswürdige Salzstöcke (nach BGR 1995)

Salzstock Gorleben

Tonsteinformationen
Mächtigkeit > 100m
Teufe > 300 bzw. < 1000m u.GOK*

Ausschlussflächen nach AkEnd - Kriterien (2002)

Erdbebenzone > 1 (nach DIN 4149)

Gebiete mit vulkanischer Gefährdung

Grundgebirge

überregionale Störungen (Schollengrenzen)

Grundgebirge einschließlich der Molasse des Permo-Karbon (z.T. unter känozoischer Bedeckung)

0 50 km

* unter Geländeoberkante

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Dienstbereich Berlin

Untersuchungswürdige Wirtsgesteinsformationen Salzgesteine / Tonsteine

Quellenangaben im Text

Projekt: **Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen**

Sachbearbeiter: P. KRULL, P. HOTH, K. REINHOLD

BGR - Ref. B3.21 | Stand: 10/2004 | **Anlage 26**