

Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands



Untersuchung und Bewertung von
Tongesteinsformationen

Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands

The background of the cover is a grayscale photograph of a geological rock formation. The rock shows distinct horizontal layering and some vertical fractures, suggesting a sedimentary or metamorphic origin. The lighting creates shadows that emphasize the texture and structure of the rock.

Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen

Berlin/Hannover, April 2007

Peer Hoth
Holger Wirth
Klaus Reinhold
Volkmar Bräuer
Paul Krull
Hagen Feldrappe

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort und Ziel der Studie	3
2	Eigenschaften von Tongesteinsformationen und ihre Bedeutung für die Endlagerung	5
3	Methodik	9
3.1	Datenbasis	9
3.2	Barriereigenschaften toniger Gesteine	12
3.2.1	Bestimmung des Tonanteils anhand petrografischer Eigenschaften	12
3.2.2	Beziehung zwischen Tonanteil und Gebirgsdurchlässigkeit	16
3.3	Geophysikalische Methoden zur Charakterisierung von Tongesteinsformationen	21
3.3.1	Bohrlochmessverfahren	21
3.3.2	Bestimmung des Tongehaltes	24
3.3.3	Bestimmung der Porosität	25
3.3.4	Bestimmung der lithologischen Zusammensetzung	29
3.3.5	Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung	32
3.4	Korrelation von Bohrlochmessungen und seismischen Daten	33
3.4.1	Bohrlochmessungen	33
3.4.2	Seismische Daten	35
3.5	Abschätzung der maximalen Temperaturbelastung	37
3.6	Auswahlkriterien	40
3.6.1	Grundanforderungen an einen Endlagerstandort	40
3.6.2	Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen	41
3.6.3	Wirtsgesteinsabhängige Auswahlkriterien für Tongesteine	44
4	Ergebnisse	48
4.1	Tongesteinsformationen in Deutschland	48
4.1.1	Tongesteinsformationen des Jura	55
4.1.2	Tongesteinsformationen der Kreide	57
4.1.3	Ton-/Tongesteinsformationen des Tertiär	60
4.2	Abgrenzung untersuchungswürdiger Teilgebiete	65
4.2.1	Norddeutschland - Unterjura	66

4.2.2	Norddeutschland - Mitteljura	71
4.2.3	Norddeutschland - Unterkreide	74
4.2.4	Süddeutschland - Mitteljura	76
4.3	Weitergehende Charakterisierung von untersuchungswürdigen Gebieten	81
4.4	Gesamteinschätzung der untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Deutschland	93
4.5	Weitere mögliche regionale Einschränkungen	96
5	Grenzen der Studie	98
6	Zusammenfassung	100
	Literaturverzeichnis	101
	Abbildungsverzeichnis	115
	Tabellenverzeichnis	118

1 Vorwort und Ziel der Studie

In Deutschland werden zirka dreißig Prozent der Stromversorgung durch Kernkraftwerke gedeckt. Die Entsorgung der dabei anfallenden hoch radioaktiven Abfälle ist neben dem sicheren Betrieb der Kraftwerke eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung der Kernenergie. Nach dem „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren“ (Atomgesetz) ist der Bund zuständig für die sichere Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle.

Nach dem deutschen Entsorgungskonzept sollen die hoch radioaktiven Abfälle konzentriert und isoliert in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden. Der langzeitsichere Einschluss der Abfälle in einem Endlager und ihre Isolation von der Biosphäre werden durch ein Multibarrieresystem gewährleistet, das aus einer geologischen und technischen Barriere besteht. Der Geologie kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu, denn eine günstige geologische Gesamtsituation mit einem geeigneten Wirts- und Barrieregestein, das entsprechend dem deutschen Endlagerkonzept die Hauptlast im Gesamtbarrieresystem übernimmt, ist die wesentliche Voraussetzung für einen geeigneten Endlagerstandort.

International werden auf Grund unterschiedlicher Endlagerkonzepte auch unterschiedliche Wirtsgesteine auf ihre Eignung für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle untersucht. In vielen Ländern spielen dabei, entsprechend den nationalen geologischen Gegebenheiten, Tongesteine eine wesentliche Rolle. Vor diesem Hintergrund erhielt die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) im Jahre 2003 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) den Auftrag, eine Studie über die Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen für die Endlagerung stark Wärme entwickelnder hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland zu erstellen.

Aufbauend auf ihren langjährigen Erfahrungen hatte die BGR bereits 1994 je einen Katalog für die Salz- und Kristallinvorkommen in Deutschland veröffentlicht, deren Ergebnisse auch heute noch aktuell sind und Gültigkeit haben:

- Endlagerung stark Wärme entwickelnder hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen (BRÄUER et al. 1994);

- Endlagerung stark Wärme entwickelnder hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen (KOCKEL & KRULL 1994).

Bei den jetzt komplementär für Tongesteine durchgeführten Untersuchungen dienten die im Jahr 2002 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) aufgestellten wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen als Grundlage. Sie wurden ergänzt durch international anerkannte wirtsgesteinsabhängige Auswahlkriterien für Tongesteine. Zusätzlich wurden weitere aus geowissenschaftlicher Sicht als maßgeblich erachtete Kriterien für regionale Einschränkungen von Tongesteinsformationen in Deutschland herangezogen.

Die vorliegende Studie hatte zum Ziel, nach dem derzeitigen Kenntnisstand Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinen als Endlagerwirtsgesteinsformationen in Deutschland auszuweisen. Dazu war es notwendig, eine auf die verfügbaren Daten abgestimmte Methodik für die großräumige Evaluierung von Tongesteinsformationen in Deutschland zu entwickeln. Als Grundlage der Bearbeitung dienten alle verfügbaren Daten aus Karten, Archivmaterial und Bohrungen. Untersuchungen vor Ort wurden für diese Studie nicht durchgeführt.

Über erste Ergebnisse voraus laufender Untersuchungen zur Eignung von Tongesteinen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle wurde bereits im Rahmen der Arbeit des AkEnd (1999 bis 2002) berichtet. Zwischenergebnisse von Untersuchungen zur vorliegenden Studie wurden im Jahr 2003 bei der 12. Jahrestagung der Gesellschaft für Geowissenschaften (GGW) und im Jahr 2005 beim Workshop „Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten im Salz und Tongestein (GEIST)“, in vier Zwischenberichten (HOTH et al. 2005) sowie in einem zusammenfassenden Bericht zur „Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinen“ (BGR 2006) vorgestellt. Seitdem wurde der Kenntnisstand über die Tongesteinsvorkommen in Deutschland weiter vervollständigt.

Die Bearbeiter dieser Studie danken den staatlichen Geologischen Landesämtern der Bundesrepublik Deutschland und den entsprechenden Firmen für die Unterstützung der Arbeiten, insbesondere für die Einsicht und Bereitstellung von Daten.

2 Eigenschaften von Tongesteinsformationen und ihre Bedeutung für die Endlagerung

Tonige Gesteine besitzen vor allem wegen der sie oft charakterisierenden sehr geringen Permeabilität bzw. dem entsprechend niedrigen Durchlässigkeitsbeiwert (siehe z. B. KATSUBE & CONNELL 1998; BRYANT 2003), der für sie typischen Plastizität, ihrer chemischen Pufferwirkung und ihrer Rückhaltekapazität für Schadstoffe und Radionuklide günstige Barriereigenschaften. Diese lassen sie neben verschiedenen technischen Anwendungen (Deponiebarrieren und Abdeckungen, Isolations- und Konservierungsmaterial) bei gegebenen spezifischen Grundvoraussetzungen (siehe Kapitel 3.6.2) auch als Barriere- bzw. Wirtsgesteine bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle als geeignet erscheinen. Dabei können Tongesteine gleichzeitig sowohl die Anforderungen als Wirtsgestein als auch die der natürlichen geologischen Barriere erfüllen. Deshalb werden derzeit in Abhängigkeit von den natürlichen geologischen Bedingungen in mehreren Ländern sowohl unverfestigte Tone (z. B. Boom-Ton in Belgien) als auch verfestigte Tongesteine (z. B. Opalinuston in der Schweiz, Tongesteine des Callov–Oxford in Frankreich) untersucht (NEA 2004).

Ton ist ein klastisches Sediment und im Gegensatz zu Sand (Korngröße: 2,000 mm bis 0,063 mm) und Silt bzw. Schluff (Korngröße: 0,063 mm bis 0,002 mm) durch eine geringe mediane Korngröße von weniger als 0,002 mm charakterisiert (HELING 1988). Abweichend zu dieser Definition wird insbesondere in den USA zur Korngrößenabgrenzung der Tone und Schluffe eine Grenze von 0,004 mm verwendet. Tone bestehen hauptsächlich aus einem Gemenge verschiedener Tonminerale. Das Verhältnis, in dem diese auftreten sowie der Anteil an anderen Mineralen bestimmen die Eigenschaften eines Tones und somit deren große Vielfalt. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft zwei Möglichkeiten von Klassifikationsschemas für klastische Sedimentgesteine. Während das Diagramm 2.1(a) in Anlehnung an PETTIJOHN et al. (1973) einer rein stofflichen Klassifizierung folgt, wird bei Schema 2.1(b) von DOTT (1964) sowohl die stoffliche Zusammensetzung als auch die Korngröße berücksichtigt. Die Unterschiede dieser Diagramme zeigen, wie schwierig eine Abgrenzung der feinkörnigen und schichtsilikatreichen Festgesteine ist. Dies bedingt eine Vielzahl von unterschiedlichen Begriffen für die Gruppe der Silt- und Tonsteine in der internationalen Literatur (z. B. mudstone, shale, claystone, siltstone, pelite, pelitic rocks, argillaceous rocks), die zum Teil als Synonym bzw. ohne klare Definitionen verwendet werden.

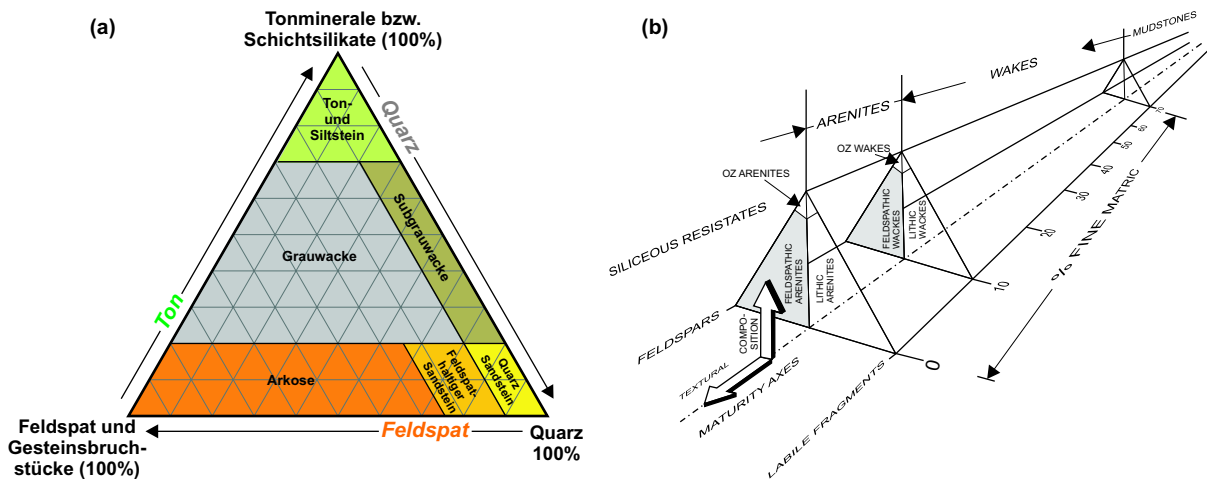


Abbildung 2.1: Klassifikationsschemas klastischer Gesteine (a) nach PETTIJOHN et al. (1973) und (b) nach DOTT (1964)

Die günstigen Barriere-Eigenschaften der Tone und Tonsteine basieren vor allem auf der fein- bis feinstkörnigen Textur dieser Gesteine und dem hohen Anteil an Schichtsilikaten bzw. Tonmineralen. Letztere weisen eine gute Spaltbarkeit senkrecht zur c-Achse der Kristalle auf. Dies bedingt ihre Blättchenform und die Entstehung von feinkörnigen Gemischen bei mechanischer Beanspruchung. Neben der Korngröße bestimmen das Verhältnis, in dem die verschiedenen Tonminerale (z. B. Kaoline, Illite, Montmorillonite/Smektit, Chlorite, Vermiculite) auftreten, der Anteil an anderen Mineralen, der Anteil an organischem Kohlenstoff und der Wassergehalt sowie der Verfestigungs- bzw. Diageneseegrad die Eigenschaften eines Tones bzw. Tonsteines und somit deren große Vielfalt (siehe z. B. APLIN et al. 1999).

Eine weitere Schwierigkeit ist die Abgrenzung der Locker- von den Festgesteinen und somit die Beurteilung des Diagenese- bzw. des Verfestigungsgrades. Bei der Versenkung von Tonformationen werden bei ansteigendem Druck und Temperatur durch Kompaktion und mineralogische Reaktionen wesentliche mineralogische, chemische und petrophysikalische Eigenschaften verändert. So werden die bei relativ geringen Temperaturen stabilen Illit-Smektit-Wechselagerungsminerale 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 (Einregelungsgrad, Korngrößen) einher, welche die petrophysikalischen Eigenschaften bestimmen. In Abbildung 2.2 ist der Zusammenhang zwischen Porosität und Versenkungstiefe für verschiedene Tone bzw. Tonsteine dargestellt. Die oberen Tiefenbereiche sind auf Grund der einfachen mechanischen Kompaktion (siehe angedeutete Änderung der Ge-

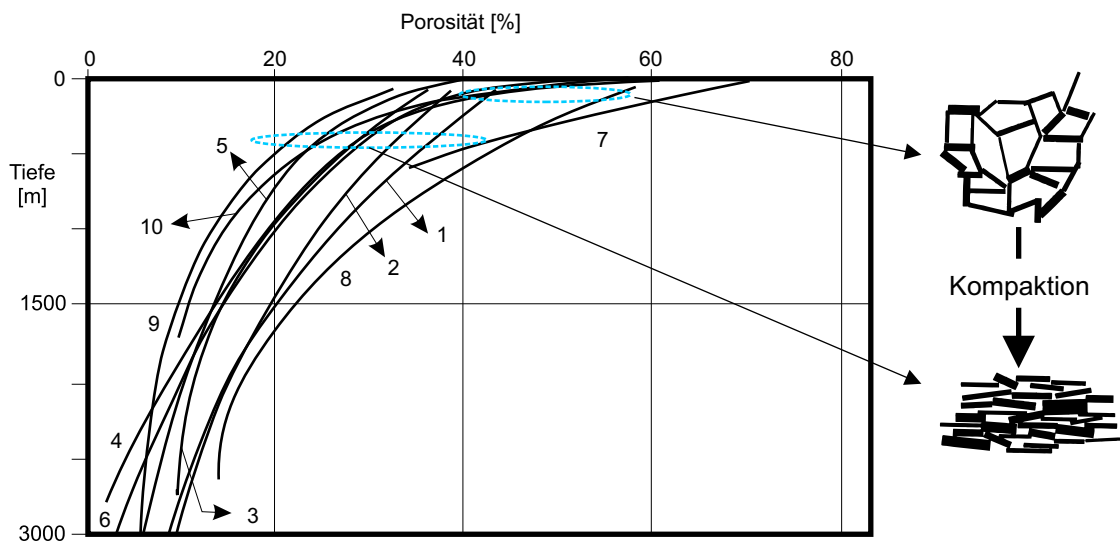


Abbildung 2.2: Porositäten in Abhängigkeit von der Versenkungstiefe von Tonen und Tongesteinen. Kurven nach: 1, 2, 3 OSIPOV et al. (2004); 4 ENGELHARDT (1973); 5, 6 ADDIS & JONES (1985); 7 HAMILTON (1976); 8 MAGARA (1968) (veröffentlicht in FÜCHTBAUER 1988), 9 PROSHLYAKOV (1960); (veröffentlicht in FÜCHTBAUER 1988); 10: MEADE (1966) (veröffentlicht in FÜCHTBAUER 1988).

steinspartikel) durch einen sehr starken Porositäts-Tiefen-Gradienten charakterisiert. Neben den vor allem durch die Versenkungstiefe bestimmten Parametern Druck und Temperatur sind auch chemische und weitere physikalische Parameter sowie der Faktor Zeit für die diagenetischen Veränderungen der Tone von Bedeutung. Deshalb ist, wie auch in Abbildung 2.2 verdeutlicht, eine rein auf die Tiefe bezogene exakte Abgrenzung zwischen Ton und Tonstein bzw. Tongestein nicht möglich. Während für die tonigen Ablagerungen des Mesozoikums bei Tiefen von über 300 m davon ausgegangen werden kann, dass ab diesem Tiefenniveau verfestigte Tonsteine vorliegen, gilt dies für die Tone des Tertiär nicht. Zumindest in einem Übergangsbereich stellen diese Gesteine eher Tone und bestenfalls sehr gering verfestigte Tonsteine dar.

Sedimentfazies und Diageneseegrad bedingen somit ganz wesentlich die Eignung von Tonen und Tonsteinen für die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten. APLIN et al. (1999) betonen in ihrer zusammenfassenden Darstellung über Transport- und weitere physikalische Eigenschaften von Mudstones (umfassen nach Definition Ton-, Tonmergel- und Siltsteine), dass diese Gesteine trotz ihrer weiten Verbreitung bisher nicht so gut untersucht sind wie andere Gesteinstypen. Defizite werden insbesondere in folgenden Bereichen gesehen:

- Verfügbarkeit von petrophysikalischen Daten für geologisch und geochemisch gut charakterisierte Gesteine;

- Ein- und Zweiphasenströmung in Tonsteinen;
- Zusammenhang zwischen chemischen und mechanischen Eigenschaften;
- räumliche Analyse von Ton- und Siltsteinfolgen sowie der geophysikalischen Erkundungsmethodik.

Tongesteine sind in Deutschland bis zum Jahr 2000 als Wirtsgesteine für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle nicht näher untersucht worden. Deutsche Erfahrungen auf diesem Gebiet beruhen vor allem auf den im Rahmen der Standortuntersuchung der Schachtanlage Konrad durchgeführten hydraulischen Untersuchungen und der Mitarbeit bei internationalen Feld- und Untertageexperimenten.

Als Tongesteinsformation werden im Folgenden Gesteinsformationen bezeichnet, die überwiegend aus Tongesteinen bestehen, aber noch zusätzlich andere Gesteine wie z. B. Sandsteine oder Karbonatgesteine enthalten. Tongesteinsformationen werden somit nicht ausschließlich durch Tongesteine charakterisiert.

3 Methodik

3.1 Datenbasis

Die im Folgenden aufgeführten Datensätze bildeten die Grundlage für die großräumige Charakterisierung und Abgrenzung untersuchungswürdiger Tongesteinsformationen in Deutschland und die Entwicklung einer Methodik sowie den Test von möglichen weitergehenden Untersuchungsmethoden. Diese Datensätze wurden durch eine umfangreiche Literaturlauswertung ergänzt, um somit für die untersuchten Regionen eine möglichst vergleichbare Datengrundlage zur Verfügung zu haben.

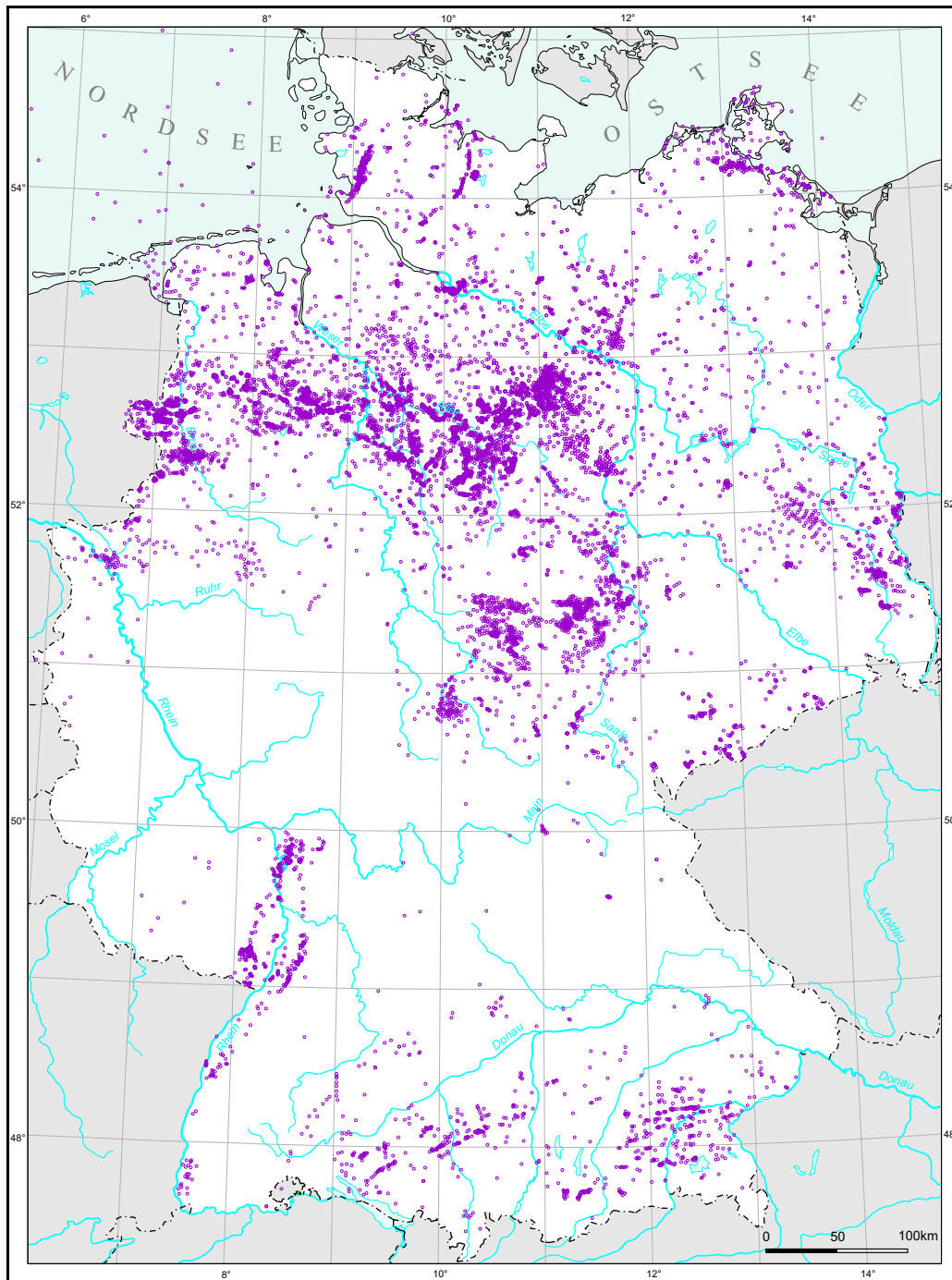
Grundlage zur Beurteilung entsprechender Tongesteinsformationen im tieferen Untergrund Deutschlands sind Bohrungen, die im Rahmen der Erdöl-, Erdgas-, Salz-, Erz- oder anderer Rohstofferkundung sowie in geringerem Umfang als Forschungs- und Kartierungsbohrungen abgeteuft und ausgewertet wurden (siehe Abbildung 3.1). Die Informationen zu den Bohrungen liegen in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie anderen staatlichen Geologischen Landesdiensten in bereits existierenden Datenbanken vor. Beim Zugang zu diesen Daten müssen aber häufig privatrechtliche Einschränkungen berücksichtigt werden.

Dabei handelt sich z. B. um:

- die Datenbank des LBEG mit Daten der Erdöl-/Erdgas-Erkundung (siehe z. B. BRAUNER & KOSCHYK 2000; BRAUNER 2003);
- die Datenbank der Ergebnisse der Kartierungsbohrungen;
- die Bohrungsdatenbank der BGR im Referat „Nutzung des tieferen Untergrundes“.

Die Erdöl-/Erdgas-Daten beinhalten Bohrungsergebnisse der in Deutschland durch Firmen auf Kohlenwasserstoffe abgeteuften Bohrungen. Diese Daten werden am LBEG im Bereich Kohlenwasserstoffgeologie verwaltet und in einem Datenbanksystem geführt (siehe z. B. BRAUNER & KOSCHYK 2000; BRAUNER 2003). Abbildung 3.1 gibt eine Übersicht zu den Bohrlokalationen.

Die ebenfalls in einem relationalen Datenbanksystem vorliegende Bohrungsdatenbank des Referates „Nutzung des tieferen Untergrundes“ beinhaltet neben den Basisdaten zu jeder Bohrung Angaben zur Stratigraphie und Lithologie. Für Teile der Bohrungen sind



○ Tiefbohrungen

Abbildung 3.1: Lokationen von Bohrungen (ca. 25 000) mit Aufschluss des für die Endlagerung relevanten Tiefenbereiches (>300 m) in Deutschland

weitere Informationen zur Geochemie und zum Vorhandensein von Spezialdaten (Bohrlochmessungen, Tests von angrenzenden Speichergesteinen, Inkohlungsdaten aus der BGR-Datenbank) der interessierenden Bohrungsabschnitte vorhanden.

Mit entsprechenden Firmen wurden Übereinkommen über die Nutzung von geologisch-geophysikalischen Daten für die großräumige Evaluierung der Tongesteinsformationen getroffen. Diesen Vereinbarungen ist gemeinsam, dass entsprechende Daten für die großräumige Evaluierung genutzt, aber Detaildaten nicht an Dritte weitergegeben werden dürfen. In diesem Abschlussbericht sind daher keine dieser Informationen dargestellt.

Lücken durch nicht zur Verfügung stehende digitale Datensätze wurden durch eigene Datenerfassung im Rahmen des Projektes geschlossen. Dies betrifft einerseits insbesondere Detailinformationen zu den im Mittelpunkt der Untersuchungen stehenden Tongesteinsformationen und andererseits aber auch tiefere Bohrungen mit anderem Erkundungsziel (z. B. Geothermie, Erzerkundung). Dafür wurden die Archive der BGR in Hannover und Berlin sowie das Archiv des LBEG und Archive anderer staatlicher Geologischer Landesämter genutzt. Zusätzlich zu den Bohrungsdaten wurden die Ergebnisse wichtiger seismischer Profilmessungen mit einbezogen, sie bildeten eine wichtige Grundlage für die Erfassung und Charakterisierung von Störungen und deren Tiefenreichweite. Neben den direkten Bohrungsinformationen sind unveröffentlichte Arbeiten der staatlichen Geologischen Landesämter, die verschiedenen verfügbaren Zusammenstellungen von Bohrungsergebnissen (z. B. KÄMPFE 1984; HOTH et al. 1993), bereits publizierte Informationen und verschiedene bereits vorhandene Kompilationen hinzugezogen worden. Zu letzteren zählen insbesondere der Geotektonische Atlas von Nordwestdeutschland in analoger (BALDSCHUHN et al. 1996) und digitaler Form (KOCKEL 1999) sowie der im Referat „Nutzung des tieferen Untergrundes“ in Berlin in Arbeit befindliche Geotektonische Atlas von Norddeutschland, Teil Nordostdeutschland und regionale geologische und geophysikalische Kartenwerke (z. B. JARITZ et al. 1967; ZGI 1970, 1978; GEOPHYSIK LEIPZIG 1989).

Zusätzlich soll hier auch auf die Arbeit der „Arbeitsgruppe Deponien“ der staatlichen Geologischen Dienste verwiesen werden (AG DEPONIEN 1997), welche die Informationen zur Verbreitung potenzieller toniger Barrieregesteine im oberflächennahen Bereich im Rahmen der Standorterkundung von Deponien zusammenfassend dargestellt hat. Diese Darstellung gibt unter Einbeziehung der Erfahrung aller Bundesländer einen guten Überblick zum Auftreten von tonigen Gesteinsformationen in den verschiedenen Regionen.

Für die Anwendung der Ausschlusskriterien nach AkEnd wurden zusätzlich Publikationen zu folgenden Themen berücksichtigt und für die Anwendung der Geoverarbeitungsprozesse digital umgesetzt:

- großräumige Vertikalbewegung;
- seismische und vulkanische Aktivität (inklusive der Karte der Erdbebenzonen und geologischen Untergrundklassen für Baden-Württemberg);
- Temperaturfeld in 1000 m Tiefe;
- digitale Geländemodelle.

Die digitale Bearbeitung, Umsetzung und Analyse der Daten erfolgte mit ArcGIS (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, ESRI), GeODin (FUGRO CONSULT GmbH), ISPoo3 (Firma CCI der ATOS ORIGIN GmbH, ehemals SATTLEGER GmbH), GeoFrame (OILFIELD SERVICES der SCHLUMBERGER GmbH), CORRELATOR (OLEA & SAMPSON 2002) und PetroMod 1D (INTEGRATED EXPLORATION SYSTEMS, IES).

3.2 *Barriereigenschaften toniger Gesteine*

3.2.1 Bestimmung des Tonanteils anhand petrografischer Eigenschaften

Tone und Tongesteine kontrollieren durch ihre hydraulische Barrierewirkung den Transport von Fluiden sowohl im oberflächennahen Bereich als auch in den tieferen Bereichen von sedimentären Becken. Sie wirken zumeist als Grundwasserstauer und begrenzen somit sowohl die tiefen oft Salzwasser führenden Grundwasserstockwerke als auch die für die Trinkwassergewinnung und die Biosphäre wichtigen Süßwasserreservoirs. In Norddeutschland bilden insbesondere die Oligozän-Tone die Barriere gegen aufsteigende Salzwässer des tieferen Untergrundes. Für Kohlenwasserstoffsysteme besitzen Tonsteine große Bedeutung als Abdeckerhorizonte für entsprechende Lagerstätten. Sie beeinflussen zudem die Entstehung von Überdruckbereichen im Zuge der Absenkung von Sedimentfolgen.

Da die Tongesteinsformationen häufig heterogen aufgebaut sind und sich auch im Hinblick auf die mineralogische Zusammensetzung und den Diageneseegrad der Tonsteine unterscheiden (siehe Kapitel 2), weisen die barrierewirksamen Eigenschaften von Tongesteinsformationen ebenfalls erhebliche Unterschiede auf. In Tongesteinen können im Porenwasser gelöste Stoffe durch Advektion oder Diffusion transportiert werden. Ein

advektiver Transportprozess setzt eine verbundene Poren- oder Kluftstruktur voraus. Der Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) beschreibt die daraus resultierende gesteins- und fluidspezifische hydraulische Leitfähigkeit bzw. die Durchlässigkeit des Gesteins.

Verbundene Kluftstrukturen sind bei Tongesteinen vor allem auf spezielle geologisch-tektonische Prozesse zurückzuführen. Sie können z. B. in der Nähe von großen Bruchstörungssystemen auftreten, auf Entlastungsklüfte infolge starker tektonischer Hebung bzw. auch auf Verwitterungsprozesse zurückgehen oder durch eine starke thermische Überprägung bedingt sein. Diese Kluftstrukturen finden sich fast ausschließlich in stark diagenetisch überprägten und verfestigten Tongesteinen. Bei Durchlässigkeitsbeiwerten von $k_f < 10^{-12}$ m/s ist die Diffusion der dominierende Transportprozess. Sie wird durch den Diffusionskoeffizienten beschrieben. Dieser wird im Labor an Gesteinsproben bestimmt oder von natürlichen Tracer-Profilen abgeleitet. Entsprechende Daten existieren nur von sehr gut untersuchten Standorten (siehe z. B. NAGRA 2002).

Wie in Kapitel 3.1 dargelegt, basiert die mit dieser Studie durchgeführte großflächige Evaluierung nicht auf eigenen Bohr- noch Laboruntersuchungen, sondern im Wesentlichen auf bereits existierenden Archivdaten und vorhandenen Kompilationen. Da die entsprechenden Bohrungen zumeist zur Lagerstättensuche bzw. zur Förderung von Öl und Gas abgeteuft worden sind, existieren Spezialuntersuchungen zur Durchlässigkeit von Tongesteinsformationen bzw. Tongesteinen nur sehr selten. Aus diesem Grund war es notwendig, einen Indikator zu finden, der einerseits aus einfachen Bohrunterlagen ableitbar und mit detaillierten Daten weiter verifizierbar ist, sowie andererseits einen Vergleich von Tongesteinsformationen und eine Abschätzung des Durchlässigkeitsbeiwertes (k_f) ermöglicht.

In verschiedenen Arbeiten wird auf den generellen Zusammenhang zwischen dem Tonanteil des Gebirges bzw. dem Tonmineralanteil des Gesteins und der Durchlässigkeit verwiesen (siehe z. B. REUTER 1985; BRYANT 2003; OSIPOV et al. 2004). Eine grobe Abschätzung des Tonanteils kann somit anhand der im Schichtenverzeichnis der Bohrungen enthaltenen petrografischen Schichtbeschreibung erfolgen (siehe Abbildungen 3.2 und 3.3). Mittels der Auswertungen von Bohrlochmessungen (vgl. Kapitel 3.3.2) ist es möglich, diese Abschätzungen weiter zu verifizieren. Um eine Einheitlichkeit bei der Abschätzung des Tonanteils aus den Angaben der Schichtenverzeichnisse der Bohrungen zu gewährleisten, wurden auf der Grundlage der durchschnittlichen Zusammensetzung den verschiedenen Lithotypen Tonanteile zugewiesen. Die in Tabelle 3.1 aufgeführten

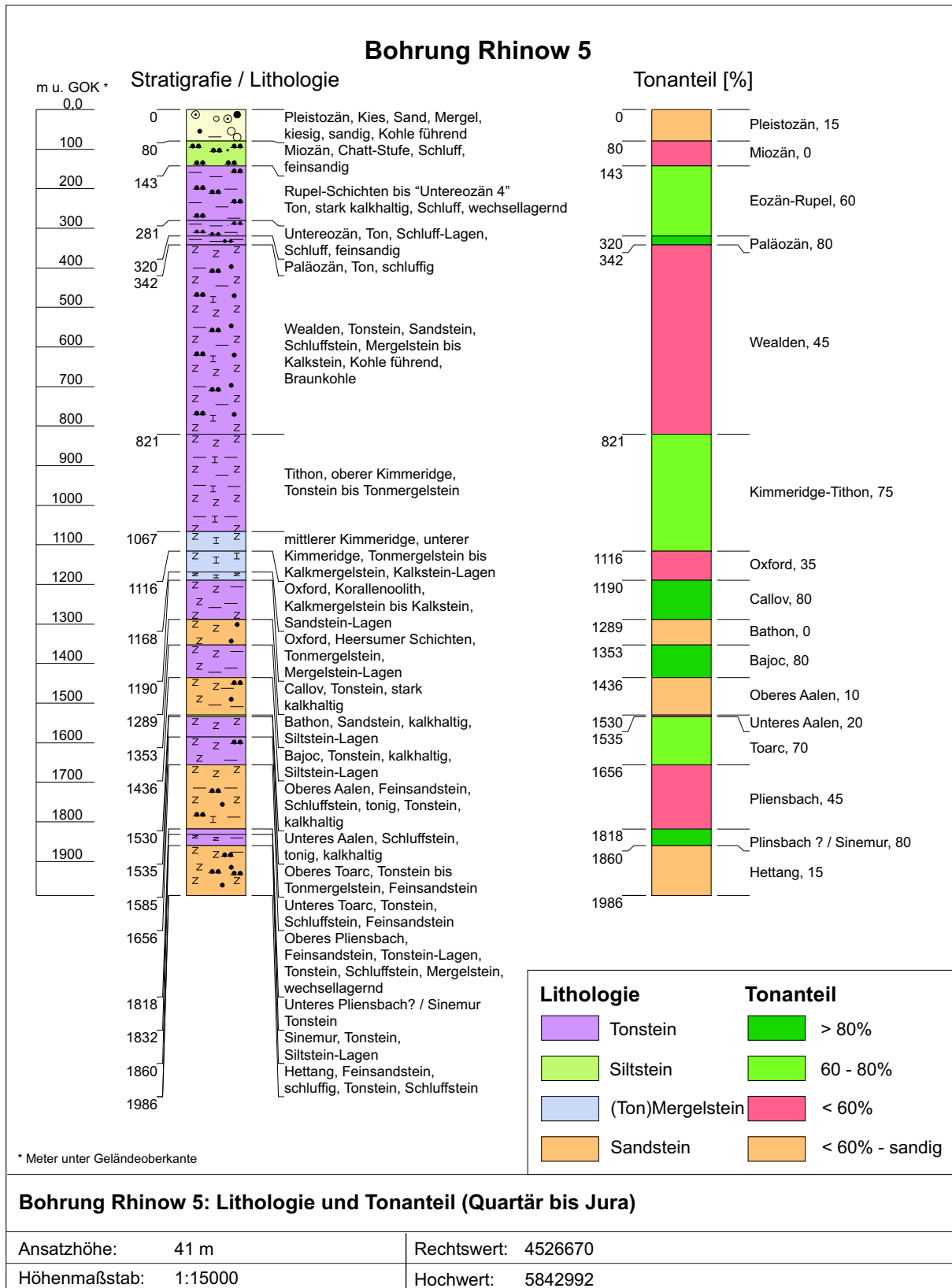


Abbildung 3.2: Abschätzung des Ton-/Tonsteinanteils für die Bohrung Rhinow 5 (aus HOTH et al. 2005)

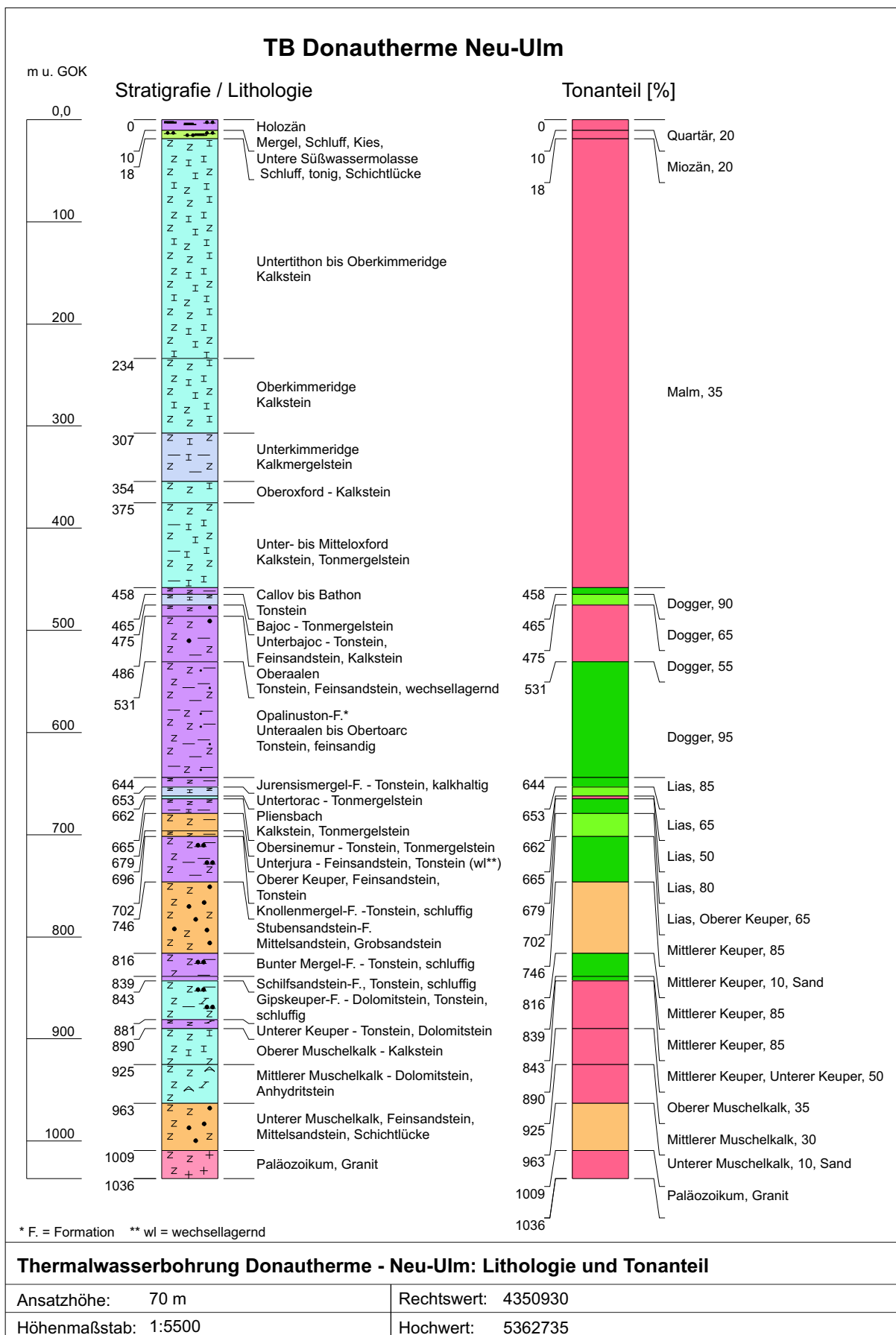


Abbildung 3.3: Abschätzung des Ton-/Tonsteinanteils für die Bohrung Donautherme Neu-Ulm (Lithologie nach FRANZ et al. 2001)

Tabelle 3.1: Schlüssel für die Abschätzung des Tonanteils in untersuchungswürdigen tonigen Gesteinen (Tonstein bis Tonmergelstein)

Lithologie	Zusammensetzung	Tonanteil [%]
Ton/Tonstein	Ton	100
Ton/Tonstein mit sehr geringen Einschaltungen ¹		80 (-90)
Ton/Tonstein, schluffig bzw. sandig od. karbonatisch ²	Ton, Schluff bzw. Sand oder Karbonat	85 (-95)
Mergeltonstein	Ton, Karbonat	80
Salzton	Ton, Evaporite	70
Tonmergelstein	Ton, Karbonat	65

¹ z. B. Sandsteinbänke, Anhydrit-, Dolomitlagen, Braunkohle

² Anteile sind gering bzw. schwach ausgeprägt

Festlegungen erfolgten nach sedimentpetrologischen Gesichtspunkten (vgl. FÜCHTBAUER 1988).

Für den Fall, dass die Erfassung der Lithologien ohne anteiliges Verhältnis im Schichtenverzeichnis einer Bohrung erfolgte, wurde ebenfalls ein Schlüssel entwickelt (Tabelle 3.2). Dieser stellt die einheitliche Bestimmung des Tonanteils für Schichten mit unterschiedlicher Lithologie sicher und berücksichtigt die Reihenfolge und die Anzahl der für die Schicht aufgeführten Lithologien. Dabei wird davon ausgegangen, dass die zuerst genannte Lithologie dominiert, während die nachfolgend beschriebenen Lithologien einen geringeren Anteil an der Schicht besitzen.

Sind in den Schichtenverzeichnissen Wechselfolgen mit Einschaltungen höher permeabler Gesteine, wie z. B. Sandstein oder Kalkstein, verzeichnet, wurden diese separat ausgehalten. Diese Verfahrensweise erlaubt es, die Tongesteinsformationen bei ihrer Evaluierung auf das Auftreten höher permeabler Einschaltungen, speziell von Sandsteinen, zu überprüfen. In den Abbildungen 3.2 und 3.3 wird die Abschätzung des Tonanteils anhand petrographischer Eigenschaften exemplarisch für eine norddeutsche und eine süddeutsche Bohrung verdeutlicht.

3.2.2 Beziehung zwischen Tonanteil und Gebirgsdurchlässigkeit

Obwohl auf den generellen Zusammenhang zwischen dem Tonanteil und der Durchlässigkeit in zahlreichen Arbeiten verwiesen wird, existiert eine systematische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Tonanteil von Tongesteinen und ihrer Gebirgsdurchlässigkeit.

Tabelle 3.2: Schlüssel für die Festlegung des Tonanteils in Wechselfolgen bzw. bei der Angabe mehrerer Lithologien mit unbestimmten Mengenverhältnissen

Schichten unterschiedlicher Lithologie und Wechselfolgen	Tonanteil [%]
Ton , Sand, Schluff, Kalk	40
Schluff, Ton , Sand, Kalk	25
Sand, Schluff, Ton , Kalk	20
Sand, Schluff, Kalk, Ton	15
Ton , Sand, Schluff, Kalk, Anhydrit	30
Schluff, Ton , Sand, Kalk, Anhydrit	20
Sand, Schluff, Ton , Kalk, Anhydrit	20
Sand, Schluff, Kalk, Ton , Anhydrit	15
Sand, Schluff, Kalk, Anhydrit, Ton	15
Ton , Schluff (Wechselfolge)	60
Schluff, Ton (Wechselfolge)	40
Ton , Schluff, Sand (Wechselfolge)	40 (-50)
Schluff, Ton , Sand (Wechselfolge)	30
Sand, Schluff, Ton (Wechselfolge)	(20-) 30

sigkeit nicht. Dies hängt zum einen mit den Schwierigkeiten zusammen, die sehr geringen Permeabilitäten von Tonsteinen zu messen. Die zweite wesentliche Ursache dafür ist die große Bandbreite von feinklastischen Sedimentgesteinen, die teilweise unter dem Begriff „Tonstein“ verstanden wird (YANG & APLIN 1998; DEWHURST et al. 1999). TAVENAS et al. (1983) zeigen, dass die Beziehung zwischen beiden Parametern kompliziert ist und von mehreren, teilweise schwer zu bestimmenden Parametern abhängt. Nach ihren Untersuchungen verdoppelt sich der k_f -Wert von Tonen von 1000 pm/s auf 2000 pm/s ($1 \text{ pm/s} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$) bei einer Verringerung des Tonanteils (Fraktion $< 2 \mu\text{m}$) von 80 % auf 60 %. Die von BRYANT (2003) untersuchten Tone mit 60 % bis 80 % bzw. $> 80 \%$ Tonanteil weisen kaum Unterschiede in den Durchlässigkeiten auf, die mit k_f -Werten unter 20 pm/s (bei Porositäten von etwa 40 %) ausnahmslos sehr gering sind. DEWHURST et al. (1999) zeigen wiederum, dass bei tonigen Gesteinen mit 65 % bzw. 30 % Tonanteil die Durchlässigkeiten um mehr als eine Zehnerpotenz variieren (0,1 pm/s und 50 pm/s). Nach Modellrechnungen von YANG & APLIN (1998) differieren die Permeabilitäten für Tonsteine mit Tonanteilen von 35 % bis 40 %, 50 % bis 55 % bzw. 75 % um mehr als zwei Zehnerpotenzen. Geringe Permeabilitäten wurden an Tonsteinen aus verschiedenen Sedimentbecken Nordamerikas bei hohen Tonanteilen gemessen (KATSUBE et al. 1991; KATSUBE & CONNELL 1998; KATSUBE et al. 1998).

In Bezug auf die Einschätzung der Eignung von Tongesteinen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass Formationen mit einem Tonanteil größer 80 % mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Mindestanforderung an die Gebirgsdurchlässigkeit ($k_f < 100$ pm/s) erfüllen (vgl. Kapitel 3.6.2). Diese Formationen bestehen aus Tonen, Tonsteinen bzw. Mergel-Tonsteinen und weisen nur geringe gröberklastische bzw. karbonatische Beimengungen auf. APPEL & HABLER (2001, 2002) zeigen mit ihrer Zusammenstellung von verfügbaren Testdaten, dass diese Gesteinstypen im Tiefenbereich 300 m bis 1500 m mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte von 0,95 pm/s mit einer Bandbreite von 0,0055 pm/s bis 205 pm/s aufweisen.

Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 %, die im Wesentlichen aus Tonmergelsteinen, Mergeltonsteinen und/oder Tonsteinen mit gröberklastischen bzw. karbonatischen Einschaltungen bestehen, können die Mindestanforderung hinsichtlich der Gebirgsdurchlässigkeit zumindest teilweise ebenfalls erfüllen. Neben den oben erwähnten Arbeiten zeigen dies auch die Studien von APPEL & HABLER (2001, 2002). Danach weisen Mergelsteine, die hier mit einem Tonanteil von 50 % bewertet werden, im Tiefenbereich 300 m bis 1500 m mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte von 30,7 pm/s auf. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass Mergelsteine in ihrem Karbonat- und Tongehalt sehr variabel sein können und dass es sich bei den Mergelsteinen aus der Studie von APPEL & HABLER (2001, 2002) wahrscheinlich um geringmächtige homogene Mergelsteine handelt. Bei den Formationen mit einem Tonanteil zwischen 60 % und 80 % können die gröberklastischen bzw. karbonatischen Einschaltungen jedoch einen erheblichen Anteil bilden bzw. in Wechsellagerung mit Tonsteinen vorliegen. Damit können die Durchlässigkeiten für diese Formationen sehr deutlich variieren und teilweise auch hohe Gebirgsdurchlässigkeiten vorliegen. Die Charakterisierbarkeit der Tongesteine im Hinblick auf die geforderten geringen Gebirgsdurchlässigkeiten ist somit wesentlich schwieriger.

Formationen mit einem abgeschätzten Tonanteil kleiner 60 % werden auf Grund ihrer inhomogenen bzw. gröberklastischen Zusammensetzung, die ein unzureichendes Durchlässigkeitsverhalten ($k_f > 100$ pm/s) erwarten lässt, als nicht weiter untersuchungswürdig eingestuft.

Die hier abgeleiteten Zusammenhänge zwischen Tonanteil und Gebirgsdurchlässigkeit wurden anhand von Daten aus 84 in situ durchgeführten hydraulischen Tests in überwiegend tonigen und tonhaltigen Gesteinsformationen überprüft. Die Durchlässigkeitsversuche wurden in elf Bohrungen aus Norddeutschland und der Schweiz durchgeführt.

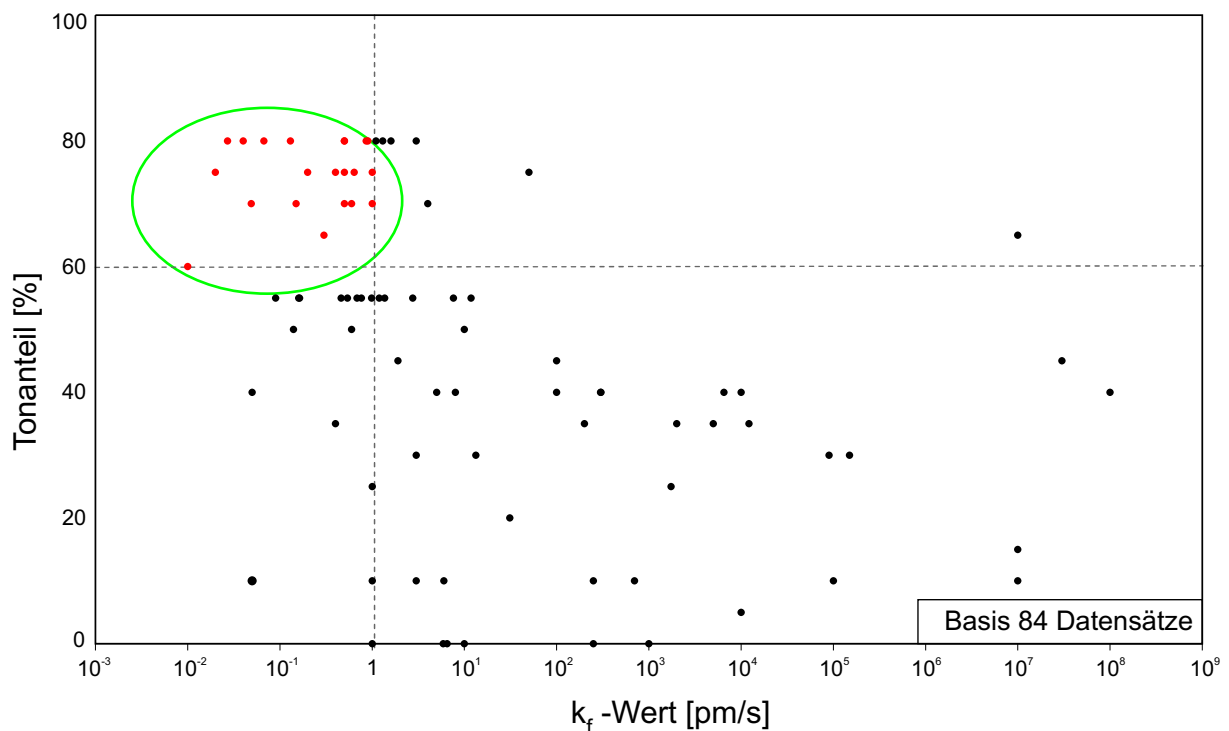


Abbildung 3.4: Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinsformationen (Tiefenlage 100 m bis 1500 m) in Abhängigkeit vom abgeschätzten Tonanteil. Die roten Punkte verdeutlichen, dass bei einem Tonanteil über 60 % die Gebirgsdurchlässigkeit größtenteils ≤ 1 pm/s ist ($1 \text{ pm/s} \hat{=} 1 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$).

Die Testintervalle sind zwischen 3 m und 128 m lang und liegen in 100 m bis 1394 m Tiefe (meist 400 m bis 1000 m). Die untersuchten Bereiche liegen fast ausschließlich in Gesteinsformationen des Mesozoikum. Fünf Messungen wurden in Schichten des Tertiär bzw. des Rotliegend durchgeführt.

Für die getesteten Formationen wurde nach dem Schlüssel in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 der Tonanteil bestimmt. Die Auswertung zeigt, dass zwölf Formationen mit einem Tonanteil ≥ 80 % mittlere Durchlässigkeiten von 0,835 pm/s (3 pm/s bis 0,027 pm/s) aufweisen (Tabelle 3.3 und Abbildung 3.4). Bei 15 Formationen mit einem Tonanteil von 60 % bis 80 % beträgt die mittlere Gebirgsdurchlässigkeit 4 pm/s (50 pm/s bis 0,01 pm/s).

Die Überprüfung anhand der in situ hydraulisch getesteten Tongesteinsformationen bestätigt im Wesentlichen, dass ein Tonanteil ≥ 80 % mit einer Gebirgsdurchlässigkeit $k_f \leq 1$ pm/s bzw. ein Tonanteil 60 % bis 80 % mit einer Gebirgsdurchlässigkeit ≤ 100 pm/s korrelieren. Diese Beziehungen gelten jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Schichtenfolgen keine mehrere Meter mächtigen Sandstein- oder Karbonateinschaltungen enthalten, welche durch hohe hydraulische Leitfähigkeiten charakterisiert sind.

Tabelle 3.3: Hydraulische Tests in tonigen Gesteinsformationen in Bohrungen von Norddeutschland und der Schweiz. Die Lithologie ist nach dem Symbolschlüssel Geologie (PREUSS et al. 1991; DOMINIK et al. 2003) kodiert. Die Lithologie ist beschrieben in NLFB (1986): Dolgen; MATTER (1988): Riniken; NAGRA (1992); MOE et al. (1990); MATTER et al. (1988): Schafisheim; NAGRA (2001): Benken; GERARDI (1986): Konrad 101/1984

Bohrungsname	Tiefe Oberk. [m]	Tiefe Unterker. [m]	k _f -Wert [pm/s] ¹	Lithologie	Tonanteil [%]	Gamma Ray Log [gAPI] ²
Tonanteil >80 % (abgeschätzt aus der lithologischen Beschreibung der Bohrung)						
Konrad 101/1984	428	449	3,000	^t,u4,s,^s(lag)	>80	85
Konrad 101/1984	776	880	0,900	^t,s,u,^mt,^s(lag)	>80	90
Dolgen VI	102	111	1,100	^t,u,k,s2,^k(lag),^mt	>80	100–130
Dolgen VI	119	129	0,860	^t,u,k,s2,^k(lag),^mt	>80	100
Dolgen VI	140	150	1,300	^t,u,k,s2,^k(lag),^mt	>80	125
TB Riniken	398	430	0,040	^t,u2,^s(lag),^mt(lag)	>80	85
SB Schafisheim	1001	1029	0,500	^t,u,^s(lag)	>80	95
SB Schafisheim	1052	1080	0,500	^t,u,^t,u,^s(lag),”py”	>80	95
SB Benken	566	597	0,067	^t,k,u,s,^u(lag),^mt,^s(lag),^k	>80	90
SB Benken	600	603	0,027	^t,k,u,s,^u(lag),^mt,^s(lag),^k	>80	95
SB Benken	605	624	1,600	^t,k,u,s,^u(lag),^mt,^s(lag),^k	>80	95
SB Benken	624	656	0,130	^t,k,u,s,^u(lag),^mt,^s(lag),^k	>80	70–85
Tonanteil 60 % bis 80 % (abgeschätzt aus der lithologischen Beschreibung der Bohrung)						
Konrad 101/1984	241	292	1,000	^mt,^t,u2,s2,k2	70	30–55 ^{3,4}
Konrad 101/1984	302	427	0,500	^t,u,s,^mt,u,^s	75	70
Konrad 101/1984	480	608	1,000	^t,^mt,^s(lag),^mk	75	65–90 ⁴
Konrad 101/1984	919	1002	0,400	^t,u,^s(lag),^mt,^mk	75	100
Remlingen 6	279	329	0,150	^t,k,d,”ah”,”y”	70	40 ³
Remlingen 6	330	380	4,000	^t,k,d,”ah”,”y”	70	40 ³
Remlingen 6	687	698	50,000	^t,k,ah,^mt	75	40 ³
TB Riniken	339	400	0,020	^t+^mt,^s(lag),^k(lag),”py”	75	80
TB Riniken	433	490	0,600	^t,s2,^s(lag),^mt,^mk,^k,^md	70	80–85
SB Schafisheim	961	988	0,010	^mt,s^t,^mk,^k,^ms,^m	60	55–90 ⁴
SB Schafisheim	989	1017	0,500	^t,u,^s(lag),^ms,^mt,^k	70	65–95 ⁴
SB Schafisheim	1029	1057	0,200	^k(lag),^s(lag)	75	95
SB Schafisheim	1080	1108	0,300	^t,k,^k(lag),^u,^md,^k	65	50–95 ⁴
SB Benken	549	565	0,640	^t,^u(lag),^s(lag),^mt,^k	75	100
SB Benken	657	698	0,049	^t,^s(lag),^mt,^k(lag)	70	–

¹ 1 pm/s = 1 · 10⁻¹² m/s (pm/s: Pikometer pro Sekunde)

² gAPI: Gamma-API-Einheiten (siehe dazu Kapitel 3.3.1)

³ Messwert des Gamma Ray Log fraglich

⁴ im Testintervall inhomogene Gesteinsfolge

Abschließend muss jedoch noch einmal darauf hingewiesen werden, dass der Tonanteil nicht zu einer direkten Ableitung einer Gebirgsdurchlässigkeit genutzt werden kann. Der Parameter Tonanteil dient nur als ein Hilfsmittel für die in dieser Studie durchzuführende großräumige Evaluierung der deutschen Tongesteinsformationen.

3.3 Geophysikalische Methoden zur Charakterisierung von Tongesteinsformationen

3.3.1 Bohrlochmessverfahren

Neben den lithologischen Beschreibungen existieren für viele der Tiefbohrungen im endlagerrelevanten Tiefenbereich zusätzlich einige Bohrlochmessungen. Diese können genutzt werden, um die lithologisch-mineralogischen Verhältnisse entlang der Bohrung zu charakterisieren und Aussagen zu endlagerrelevanten Parametern (z. B. Tongehalt, Porosität) auf der Grundlage von zusätzlichen verlässlichen Daten zu gewinnen. Die folgende Methode wurde in ausgewählten Teilgebieten genutzt und führt, je nach Umfang der vorhandenen Bohrlochmessungen, zu detaillierten Ergebnissen bezüglich der Lithologie und der Charakterisierung der Tongesteine am entsprechenden Bohrpunkt. Um eine Aussage zur flächigen Verbreitung der Tonsteinhorizonte zu erhalten, besteht die Möglichkeit der Korrelation mehrerer Bohrungen miteinander (siehe Kapitel 3.4.1) bzw. der Nutzung von seismischen Daten (siehe Kapitel 3.4.2). Die Korrelation liefert Angaben dazu, in wie weit die entsprechenden Tonsteine homogen verbreitet sind, bzw. wie sich die einzelnen Parameter (Tongehalt, Porosität) flächenhaft verteilen. Damit unterstützen die im Folgenden vorgestellten geophysikalischen Methoden die in Kapitel 3.2 aufgeführten Methoden und führen in den angewendeten Gebieten zu komplexen, detaillierten Aussagen bezüglich der Charakterisierung der Tongesteine.

Die verschiedenen Standard-Bohrlochmessverfahren sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt. Ausführliche Darstellungen zur Auswertung von Bohrlochmessungen finden sich in der Literatur (siehe z. B. SCHÖN & FRICKE 1999; DOVETON 1994; BOYER & MARI 1997; THEYS 1999).

Da in den meisten Fällen die Bohrungen die Erkundung von Kohlenwasserstoffen zum Ziel hatten und aus den fünfziger bzw. achtziger Jahren stammen, stehen allerdings für den Großteil der Bohrungen oft nur Bohrlochmessungen (Logs) zur Verfügung, die eine grobe lithologische Charakterisierung der Schichtenfolge ermöglichen. Im Einzelnen sind

Tabelle 3.4: Übersicht der Bohrlochmessverfahren (vgl. ELLIS 1987; SCHÖN & FRICKE 1999)

Verfahren	Messgröße	Beispiel	Interpretationsergebnis
passive elektrische und elektromagnetische Verfahren			
Eigenpotenzialmessung	Potenzialdifferenz zwischen Bezugs- und Bohrlöchelektrode	SP-Log	Lithologie bei Sand- und Tonfolgen
aktive elektrische und elektromagnetische Verfahren			
Widerstandsmessung	Widerstand (Stromzuführung und Spannungsabgriff galvanisch)	Widerstandsmessung, Microlog	Lithologie, Porositäts-, Sättigungsbestimmung
induktive Messung	induktive Feldübertragung	Induktionslog	
dielektrische Wellenmessung	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen	Electromagnetic Propagation-Tool	Dielektrizität, Leitfähigkeit
passive kernphysikalische Verfahren			
γ -Messung	natürliche γ -Strahlung - integral - spektral	Gamma Ray Log Spektrales Gamma Ray Log	Aussagen zur Lithologie und zum Tongehalt
aktive kernphysikalische Verfahren			
γ - γ -Messung	γ -Strahlung nach - Compton-Effekt - Foto-Effekt	γ - γ -Dichtelog P_e -Log	Dichte, Porosität, Lithologische Aussagen
Neutronenmessung	Neutronenstrahlung nach - Wechselwirkung - zeitlichem Abklingvorgang - durch Aktivierung	n-n-, n- γ -Messung gepulste n-Messung, n- γ -Spektroskopie n-Aktivierung	Lithologie, Neutronenporosität, Tongehalt, Porosität
akustische Verfahren			
Transmission, Refraktion	- an der Bohrlochwand refraktierte oder geführte Wellen - in der Verrohrung / Zementation laufende Wellen	Akustiklog Cement Bond Log	Porosität, Speichereigenschaften, Klüftigkeit, mech. Gesteinseigenschaften
Reflexion	- an der Bohrlochwand / Verrohrung reflektierte Wellen	Borhole-Televiwer, akustischer Bohrlochfernseher	Klüftigkeit, Inhomogenitäten, Orientierung von Bohrkernen
Eigenschaften, Zustandsgrößen und Bewegungen des Bohrlochfluids			
	Temperatur, Leitfähigkeit vertikale Bewegungen	Temperaturlog, Spülungslog, Salinitätslog Impellerflowmeter Heat-Pulse-Flowmeter	Temperaturverlauf Förderraten, hydraulische Aussagen
gravimetrische Verfahren			
	vertikale Schwereänderung	Bohrlochgravimeter	Gesteinsdichte, Blockdichte
Verfahren zur Bestimmung von geometrischen Größen			
	Durchmesser, räumlicher Verlauf einer Bohrung	Kalibermessung, Bohrlochabweichungsmessung	technischer Zustand der Bohrung, Lithologie

das folgende Logtypen:

- Kaliberlog (CALI);
- Gamma Ray Log (GR) oder bei älteren Bohrungen Eigenpotenziallog (SP);
- Widerstandslogs (ILD oder LLD).

Die Logs, die zur Ableitung von Porositäten bzw. detaillierten lithologischen Charakterisierung von Tonsteinen notwendig wären, sind nur in ausgewählten neueren Bohrungen vorhanden bzw. nur für die Speichergesteine und nicht für die Tonsteinbereiche gemessen worden. Um Aussagen zur stofflichen Charakterisierung von Tonsteinformationen zu treffen, sollten zumindest folgende zusätzlich gemessenen Logs im Bereich der Tonsteine vorhanden sein:

- Akustiklog (DT);
- Dichtelog (RHOB);
- Neutronenporositätslog (NPHI);
- Log des fotoelektrischen Faktors (PEF).

Kaliberlog (CALI)

Mit der Kalibermessung wird der Durchmesser des Bohrloches bestimmt. Sie gibt Auskunft über die Bohrlochgeometrie und bildet die Grundlage für Kaliberkorrekturen. Im Rahmen dieser Studie wurde die Kalibermessung vorrangig zur qualitativen Abschätzung weiterer Messungen genutzt. Bei großen Kaliberausbrüchen kann davon ausgegangen werden, dass nachfolgende Messungen auf Grund des fehlenden Kontaktes zwischen Sonde und Gestein qualitativ schlechtere Ergebnisse liefern.

Gamma Ray Log (GR) bzw. Eigenpotenziallog (SP)

Bei den Gamma Ray Messungen wird die natürliche Radioaktivität des Gesteins aufgenommen. Die vorhandenen Logwerte liegen als integrale Gesamtmessung vor und sind auf das API-Standardmaß (API = American Petroleum Institute) bezogen. Allgemein besteht der Zusammenhang für Sedimentgesteine, dass die Radioaktivität von tonfreiem zu tonhaltigem Gestein zunimmt. Damit können aus den Gamma Ray Messungen Aussagen zum Tongehalt des Gesteins getroffen werden. Prinzipiell ist dies auch mit Eigenpotenzialmessungen möglich. In den meisten Fällen liefert jedoch das Gamma Ray Log die besseren Ergebnisse und sollte deshalb dem Eigenpotenziallog vorgezogen werden.

Akustiklog (DT), Dichtelog (RHOB) und Neutronenporositätslog (NPHI)

Akustiklog, Dichtelog und Neutronenporositätslog dienen der Bestimmung der Porosität. Aus dem Akustiklog kann mittels der WYLLIE-Gleichung (3.3) bzw. (3.4) (WYLLIE et al. 1958) oder der RAYMER-HUNT-GARDNER-Gleichung (3.5) (RAYMER et al. 1980) die Porosität abgeschätzt werden.

Die Dichte ist eine Funktion der Matrixdichte, der Porosität und der Dichte des Fluids im Porenraum. Daher kann aus dem Dichtelog bei bekannter Matrixdichte des Gesteins und bekanntem Fluid die Porosität ermittelt werden.

Das Neutronenporositätslog misst die Wasserstoffkonzentration in der Formation. In tonfreien Materialien wird somit der gefüllte Porenraum (z. B. mit Wasser oder Öl) gemessen. Erstreckt sich die Bohrung über verschiedene Lithologien, müssen bei der Auswertung der Logwerte Korrekturen entsprechend der Gesteine angebracht werden. Die meist benutzten Neutronenlogs sind das „Compensated Neutron Log“ (CNL) und das „Sidewall Neutron Log“ (SNP). Hier können die Messwerte direkt in Kalkstein-, Sandstein- oder Dolomit-Porositäts-Einheiten überführt werden.

Log des fotoelektrischen Faktors (P_e -Log oder PEF)

Bei der P_e -Messung wird das Ergebnis im Wesentlichen von der mittleren Kernladungszahl des Gesteins bestimmt. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die nach ihrem Elementbestand unterschiedlich zusammengesetzten Gesteinsarten zu differenzieren. Die P_e -Messungen werden häufig mit der γ - γ -Dichtemessungen (RHOB) kombiniert und nach SCHLUMBERGER als „Litho Density Log“ bezeichnet.

3.3.2 Bestimmung des Tongehaltes

Der Tongehalt kann aus dem Gamma Ray Log und notfalls aus dem Eigenpotenziallog bestimmt werden. Da Tone eine höhere radioaktive Eigenstrahlung als Karbonate oder Sandsteine haben, ist dies ein Maß für den Tongehalt der Formation. Innerhalb klastischer Gesteinsfolgen gilt mit Ausnahme der unten angeführten speziellen Bedingungen: je höher die Aktivität, desto tonhaltiger sind die Gesteine. Aus den Gamma Ray Werten kann in diesen Fällen der Tonanteil (V_{sh}) direkt mit Hilfe des Gamma Ray Index

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (3.1)$$

ermittelt werden. Dabei sind I_{GR} der Gamma Ray Index, GR_{log} der Messwert aus dem Gamma Ray Log, GR_{min} der Gamma Ray Wert für Sandsteine und GR_{max} der Gamma Ray Wert

für Tonsteine. Beachtet werden müssen jedoch folgende spezielle Bedingungen:

- es können in sedimentären Gesteinen Th- und U-reiche Schwerminerale auftreten, die entsprechenden höheren γ -Aktivitäten der Gesteine korrelieren dann nicht mit dem Tongehalt;
- gleiches gilt für stark an Kalifeldspat angereicherten Sand- und Siltsteinen;
- organische Komponenten können unter besonderen Umständen auch in gröber klasischen Gesteinen mit höherer Konzentration auftreten und damit zu einer Anreicherung von Uran führen;
- der Kaliumgehalt der Tone nimmt durch diagenetische Reaktionen infolge zunehmender Versenkung/Temperatur zu.

Das Eigenpotenziallog kann unterstützend zur Bestimmung des Tongehalts herangezogen werden und sollte Verwendung finden, wenn kein Gamma Ray Log vorhanden ist. Die aus dem Eigenpotenziallog gewonnenen Ergebnisse sind jedoch unsicherer als Aussagen aus dem Gamma Ray Log, da z. B. bei starker Filterkuchenbildung die membranaktiven Tonpartikel des Filterkuchens ein Membranpotenzial verursachen, welches das Diffusionspotenzial in der permeablen Zone verfälscht bzw. abmindert. Um den Tongehalt V_{sh} aus dem Eigenpotenziallog bestimmen zu können, muss eine Ton- (Maximum) und eine Sandlinie (Minimum) ermittelt werden. Die Tonbasislinie zeigt jedoch oftmals eine trendartige Verlagerung mit der Tiefe oder auch Versetzungen, was Schwierigkeiten bei der Bestimmung von V_{sh} bereitet (vgl. z. B. SCHÖN & FRICKE 1999). Analog zu (3.1) gilt für die Bestimmung des Eigenpotenzialindex:

$$I_{SP} = \frac{SP_{log} - SP_{min}}{SP_{max} - SP_{min}}, \quad (3.2)$$

wobei I_{SP} der Eigenpotenzialindex, SP_{log} der Messwert aus dem Eigenpotenziallog, SP_{min} der Eigenpotenzialwert entsprechend der Sandlinie und SP_{max} der Eigenpotenzialwert entsprechend der Tonlinie sind.

3.3.3 Bestimmung der Porosität

Die Porosität kann aus drei Logtypen (Akustiklog, Dichtelog, Neutronenporositätslog) ermittelt werden. Keines der Verfahren misst das Porenvolumen direkt, aber die Porosität kann aus den Logwerten bestimmt werden, wenn die Mineralogie der Gesteinsmatrix und die diese charakterisierenden petrophysikalischen Parameter bekannt sind. Bisherige Untersuchungen der Erdöl-/Erdgasindustrie zielen meist auf Bereiche von wenigen Zehnermetern

der Speichergesteine ab und haben im Allgemeinen klar definierte Werte für die Gesteinsmatrix. Bei der Untersuchung von Tonen können diese Werte jedoch stark variieren und sich auf Grund der Kompaktion und unterschiedlicher chemischer Diageneseprozesse zusätzlich noch mit der Tiefe ändern. Daher können die Modelle zur Charakterisierung von Speichergesteinen nicht direkt auf Tonsteine übertragen werden. Im Folgenden wird ausgehend von Standardmethoden der Reservoiruntersuchungen versucht, durch Anwendung verschiedener Korrekturverfahren diese Modelle für die Charakterisierung von Tonsteinen zu nutzen. Für die detaillierte Analyse von Tonsteinen ist es allerdings notwendig, diese Modelle mit den im Labor am Kernmaterial bestimmten petrophysikalischen Kennwerten der Tonsteine (siehe z. B. Tabelle 3.5) zu verknüpfen.

Akustiklog

Das Akustiklog misst die Intervalllaufzeit (Δt) einer Kompressionswelle, die sich in der Formation entlang der Bohrlochachse ausbreitet. Diese Laufzeit stellt den reziproken Wert der Geschwindigkeit der Kompressionswelle in der Formation dar. Da Δt abhängig von der Lithologie und der Porosität ist, muss die Matrixlaufzeit der Formation bekannt sein, um die Sonic-Porosität zu bestimmen. Zur Abschätzung der Porosität aus dem Akustiklog kann die WYLLIE-GLEICHUNG (WYLLIE et al. 1958) verwendet werden:

$$\Delta t = \Phi_S \Delta t_f + (1 - \Phi_S) \Delta t_{ma}, \quad (3.3)$$

wobei Δt die Laufzeit (Slowness) entsprechend dem Akustiklog, Δt_f die Slowness des Fluids, Φ_S die Sonic-Porosität und Δt_{ma} die Slowness der Gesteinsmatrix darstellen. Für Φ_S ergibt sich aus (3.3)

$$\Phi_S = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}. \quad (3.4)$$

Eine andere Möglichkeit zur Berechnung der Porosität haben RAYMER, HUNT und GARDNER vorgeschlagen (RAYMER et al. 1980):

$$\Phi_{S,RHG} = \frac{5}{8} \cdot \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t}. \quad (3.5)$$

Bei der Ableitung der Porosität aus dem Akustiklog sind Korrekturen auf Grund des Einflusses der Kompaktion für unkonsolidierte Formationen, für die Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen und für das Vorhandensein von tonhaltigen Materialien anzubringen.

Für tonhaltige Gesteine erscheint die Sonic-Porosität höher als die eigentliche Formationsporosität auf Grund der höheren Laufzeiten in Tonen und Tonsteinen. Um hierfür einen Korrekturwert zu erhalten, muss der Volumenanteil an Ton (V_{sh}) in der Formation bestimmt

werden. Dieser Wert kann z. B. aus den Gamma Ray Messungen ermittelt werden (Kapitel 3.3.2). Damit kann der Einfluss toniger Materialien durch folgende Korrekturen berücksichtigt werden (DRESSER ATLAS 1974):

$$\Phi_{S,korr} = \left(\frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \cdot \frac{100}{\Delta t_{sh}} \right) - V_{sh} \cdot \left(\frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \right) \quad (3.6)$$

bzw. nach DEWAN (1983)

$$\Phi_{S,korr} = \Phi_S - V_{sh} \cdot \Phi_{S,sh}, \quad (3.7)$$

wobei $\Phi_{S,korr}$ die tonkorrigierte Sonic-Porosität, $\Phi_{S,sh}$ die Sonic-Porosität der Tonsteine, V_{sh} der Volumenanteil an Ton und Δt_{sh} der Slownesswert für das Tongestein bedeutet.

Dichtelog

Die Formationsdichte (ρ_b) ist eine Funktion der Matrixdichte, der Porosität und der Dichte des Porenfluids (Wasser, mineralisiertes Wasser, Kohlenwasserstoffe). Um die Dichte-Porosität (Φ_D) zu bestimmen, müssen die Matrixdichte der Formation und des Fluids, welches den Porenraum füllt, bekannt sein. Für die Abschätzung der Dichte-Porosität (Φ_D) aus dem Dichtelog (RHOB) kann die folgende Beziehung verwendet werden:

$$\rho_b = \Phi_D \cdot \rho_f + (1 - \Phi_D) \rho_{ma}, \quad (3.8)$$

wobei ρ_b die Dichte entsprechend dem RHOB-Log, ρ_f die Dichte des Fluids, Φ_D die Dichte-Porosität und ρ_{ma} die Dichte der Gesteinsmatrix darstellen. Für Φ_D ergibt sich:

$$\Phi_D = \frac{\rho_b - \rho_{ma}}{\rho_f - \rho_{ma}}. \quad (3.9)$$

Bei der Messung des Dichtelogs wird der Comptoneffekt ausgenutzt. Eine weitere Möglichkeit einer γ - γ -Messung stellt die Nutzung des Foto-Effekts dar. Hierbei wird mit einer niedrigenergetischen Quelle (Energiebereich etwa 40 keV bis 120 keV) der Absorptionseffizient P_e gemessen (PEF-Log) (siehe auch SCHÖN & FRICKE 1999).

P_e -Messungen werden häufig mit den γ - γ -Dichtemessungen kombiniert und nach SCHLUMBERGER z. B. als „Litho Density Log“ bezeichnet. Das PEF-Log kann somit zur Bestimmung der Lithologie und damit für eine einfache Klassifizierung von Tongesteinen verwendet werden.

Bei der Ableitung der Porosität aus dem Dichtelog sind Korrekturen analog zu den Laufzeitkorrekturen (Akustiklog) für das Vorhandensein von Kohlenwasserstoffen und Schwermetallen anzubringen und der Einfluss toniger Materialien ist zu berücksichtigen.

Neutronenporositätslog

Die Neutronenporosität resultiert aus dem Zusammenstoß der Neutronen mit Wasserstoffkernen und gibt damit die Wasserstoffkonzentration an. Erst in zweiter Linie wird damit die Porosität gemessen. Die „Wasserstoffdichte“ für Wasser errechnet sich aus

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 2\text{H}/(2\text{H} + \text{O}) = 2 \cdot 1/(2 \cdot 1 + 16) = 1/9. \quad (3.10)$$

Der Wasserstoffindex für Wasser kann als Referenzwert benutzt werden und wird im Allgemeinen gleich eins gesetzt.

Bei modernen Messmethoden wird die Porosität direkt detektiert. Eine Messmethode ist das „Sidewall Neutron Log“ (SNP), wobei Quelle und Empfänger in einer Messanordnung enthalten sind, welche gegen die Bohrlochwand gepresst wird. Das SNP-Log ist relativ unempfindlich gegen lithologische Effekte, jedoch empfindlich gegen Bohrlochunregelmäßigkeiten, welche zu Problemen bei den Messungen führen können. Die günstigere Methode ist die Messung des „Compensated Neutron Log“ (CNL). Hier hat die Messanordnung eine Quelle und zwei Empfänger und damit ist das Verfahren relativ unempfindlich gegen Bohrloch-Irregularitäten. Beide Messmethoden können als Kalkstein-, Sandstein- oder Dolomitporosität aufgezeichnet werden.

Für Tone gilt, dass die Neutronenporosität je nach Mineral, Zusammensetzung und Haftwasser variiert. Das bedeutet, dass der Wasserstoff in den Mineralen mit in den Messwert eingeht. Typische Werte für Tonsteinporositäten sind 30 % bis 40 %.

Bei der Anwesenheit von Tonen ist die Neutronen-Porosität größer als die eigentliche Formationsporosität, auf Grund des Wasseranteils in der Tonstruktur. DEWAN (1983) schlägt als Korrektur folgende Beziehung vor:

$$\Phi_{\text{N,korr}} = \Phi_{\text{N}} - V_{\text{sh}} \cdot \Phi_{\text{N,sh}}, \quad (3.11)$$

wobei Φ_{N} die Neutronenporosität, $\Phi_{\text{N,korr}}$ der tonkorrigierte Wert der Neutronenporosität und $\Phi_{\text{N,sh}}$ die Neutronenporosität von Tonen darstellen.

Sind Dichtelog und Neutronenporositätslog gemessen, kann nach SCHLUMBERGER (1975) folgende Korrektur angewendet werden:

$$\Phi_{\text{N,korr}} = \Phi_{\text{N}} - \left[\left(\frac{\Phi_{\text{N,sh}}}{0,45} \right) \cdot 0,03 \cdot V_{\text{sh}} \right]; \quad (3.12)$$

$$\Phi_{\text{D,korr}} = \Phi_{\text{D}} - \left[\left(\frac{\Phi_{\text{N,sh}}}{0,45} \right) \cdot 0,13 \cdot V_{\text{sh}} \right]. \quad (3.13)$$

Tabelle 3.5: Typische Werte der Gesteinsmatrix zur Berechnung der Porosität (vgl. z. B. SCHLUMBERGER 1991; DOVETON 1994; ASQUITH & KRYGOWSKI 2004)

Lithologie	Δt_{ma} bzw. Δt_f (WYLLIE) [$\mu\text{S/m}$]	Δt_{ma} bzw. Δt_f (RHG) [$\mu\text{S/m}$]	ρ_{ma} bzw. ρ_f [g/cm^3]	P_e [barns/e]	U [barns/cm ³]	Φ_{SNP} [%]	Φ_{CNL} [%]
Sandstein	168...182	184	2,64	1,81	4,79	-1	-2
Kalkstein	156	161	2,71	5,08	13,77	0	-1
Dolomit	143	144	2,88	3,14	9,00	2	1
Anhydrit	164		2,96	5,05	14,95	-1	-2
Salz (Halit)	219		2,04	4,65	9,45	-2	-3
Baryt			4,50	267	1070	-1	-2
Montmorillonit			2,12	2,04	7,28	40	44
Illit			2,65	3,55	10,97	20	30
Kaolinit			2,44	1,84	6,14	34	37
Frischwasser	620		1,00	0,36	0,40		
Salzwasser	607		1,15	0,81	0,96		
Öl			0,85	0,12	0,11		

Aus den korrigierten Porositätswerten $\Phi_{D,korr}$ und $\Phi_{N,korr}$ kann nach DEWAN (1983) eine korrigierte Neutronen-Dichte-Porosität ($\Phi_{ND,korr}$) ermittelt werden:

$$\Phi_{ND,korr} = \sqrt{\frac{\Phi_{N,korr}^2 + \Phi_{D,korr}^2}{2}}. \quad (3.14)$$

In Tabelle 3.5 sind Matrixwerte für die verschiedenen Formationen zusammengefasst. Diese Werte bilden die theoretische Grundlage für die Ermittlung der Porositäten aus den entsprechenden Log-Typen. Detaillierte Bestimmungen erfordern, wie oben beschrieben, entsprechende Labormessungen am Kernmaterial.

3.3.4 Bestimmung der lithologischen Zusammensetzung

Um verschiedene Gesteinsarten zu klassifizieren bzw. voneinander abzugrenzen, können Crossplots verwendet werden. Folgende Logpaare werden meist genutzt:

- Neutronenporositätslog (NPHI)-Dichtelog (RHOB);
- Neutronenporositätslog (NPHI)-Akustiklog (DT);
- Fotoelektrischer Faktor (PEF)-Dichtelog (RHOB);
- Akustiklog (DT)-Dichtelog (RHOB).

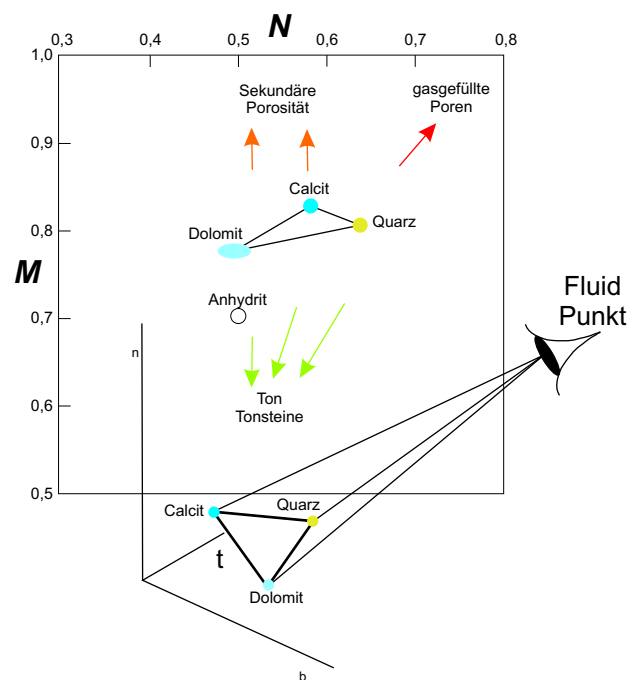


Abbildung 3.5: Der **M-N**-Plot und seine Darstellung als eine konische Projektion der Daten des Neutron-Dichte-Akustik-Log-Raumes, betrachtet vom Fluid Punkt (aus DOVETON 1994)

Mit diesen Crossplots kann eine generelle lithologische Abgrenzung der Hauptgesteinstypen erfolgen. Abbildungen und ausführliche Beschreibungen dazu sind in SCHLUMBERGER (1991); DOVETON (1994); ASQUITH & KRYGOWSKI (2004) zu finden. Zur Identifikation von Tonmineralen wird in SCHLUMBERGER (1991) ein Neutronenporositäts-Dichte-Crossplot vorgeschlagen.

Der M-N-Plot

Der **M-N**-Plot wurde von BURKE et al. (1969) vorgeschlagen und insbesondere zur Abschätzung der Gesteinszusammensetzung verwendet (Abbildung 3.5). Er dient dazu, die Auswertung der drei gemessenen Porositätslogs (RHOB, DT und NPHI) auf ein zweidimensionales Problem zurückzuführen. Die Variablen **M** und **N** kombinieren die drei Porositätslogs in der Form, dass das Volumen des Porenwassers durch eine konische Projektion der Daten der drei Porositätslogs eliminiert wird. Daraus leitet sich ein porositätsunabhängiger Plot zur Bestimmung der Lithologie ab. **M** wird für das metrische System gesetzt als:

$$M = \frac{\Delta t_f - \Delta t}{\rho_b - \rho_f} \cdot 0,003. \quad (3.15)$$

M stellt damit eine relativ porositätsunabhängige Größe dar. Für **N** kann folgende Formel angegeben werden:

$$N = \frac{\Phi_{N,f} - \Phi_N}{\rho_b - \rho_f}, \quad (3.16)$$

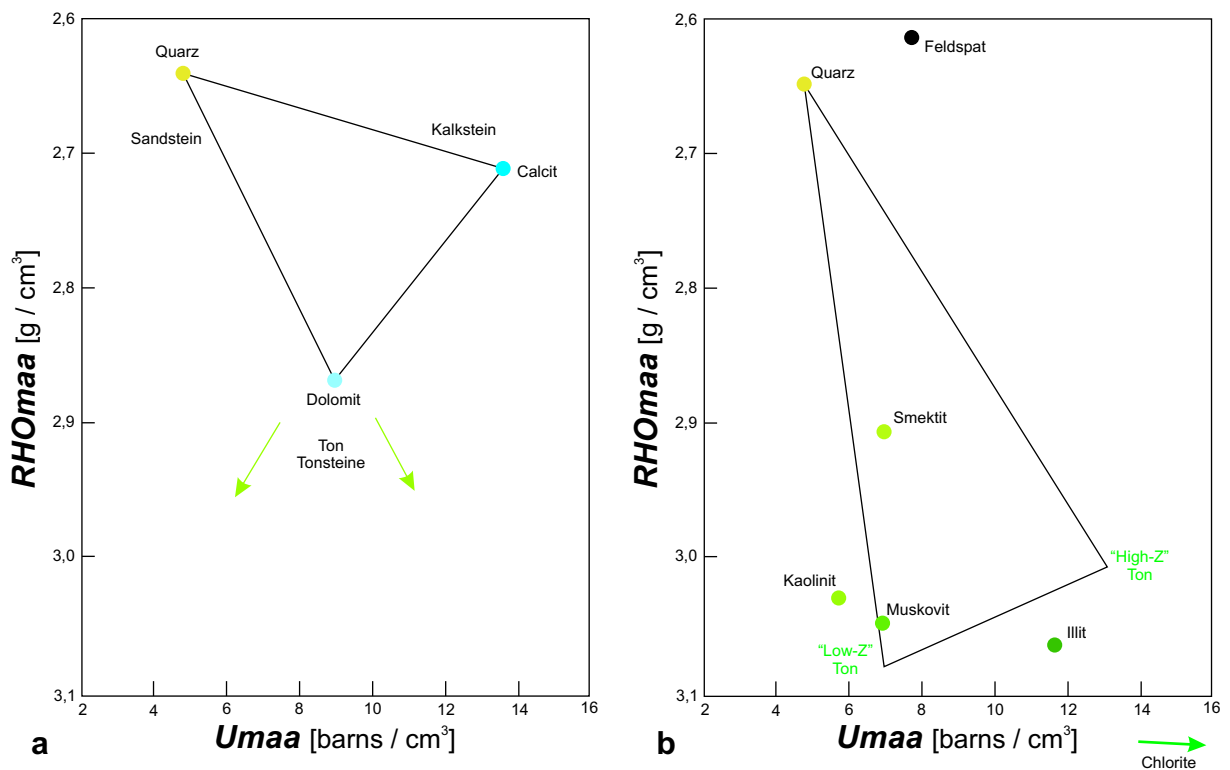


Abbildung 3.6: Der $RHOMaa-Umaa$ -Plot (a) für die drei Hauptminerale Quarz, Calcit und Dolomit und (b) mit Angabe der Lage der Tonsteine und der Maximalwerte High-Z Ton und Low-Z Ton (aus DOVETON 1994)

wobei $\Phi_{N,f}$ die Neutronenporosität des Fluids (meist 1,0) und Φ_N die gemessene Neutronenporosität aus dem NPHI-Log darstellen.

$RHOMaa-Umaa$ -Plot

Der $RHOMaa-Umaa$ -Plot wird genutzt, um das P_e -Log, das Neutronenporositätslog und das Dichtelog gemeinsam auszuwerten. Analog zum $M-N$ Plot wird das Problem auf eine zweidimensionale Problemstellung zurückgeführt. $RHOMaa$ stellt die scheinbare Matrixdichte und $Umaa$ die scheinbare volumenzugewandene fotoelektrische Absorption dar. Das P_e -Log ist dabei sensitiv gegenüber der mineralogischen Zusammensetzung der Formation. Eine schematische Darstellung der $RHOMaa-Umaa$ -Plots ist in Abbildung 3.6 zu finden. Hier sind die mittleren Werte für Quarz, Calcit, Dolomit sowie für die verschiedenen Tonminerale angegeben.

Um die Größen $RHOMaa$ und $Umaa$ zu ermitteln, wird zuerst der fotoelektrische Index P_e in die volumenzugewandene Größe U überführt. Die Umrechnung erfolgt durch Multiplikation

mit der Elektronendichte ρ_e :

$$U = P_e \cdot \rho_e = \frac{P_e(\rho_b + 0,1883)}{1,07} \quad (3.17)$$

oder näherungsweise

$$U = P_e \cdot \rho_b, \quad (3.18)$$

wobei U der volumenbezogene fotoelektrische Faktor ist. Die Dichte ρ_b und U sind Eigenschaften der zusammengesetzten Formationsmatrix und des Porenfluids. Die Eliminierung des Beitrages des Porenfluids führt zur Abschätzung der scheinbaren Dichte (**RHO_{maa}**) und der fotoelektrischen Absorption der Matrix (**U_{maa}**). Hiefür muss jedoch die wahre Porosität Φ_t ermittelt werden. Sie wird aus dem Neutronenporositäts-Dichte-Crossplot abgelesen oder berechnet. **RHO_{maa}** und **U_{maa}** können dann wie folgt berechnet werden:

$$\rho_b = \Phi_t \cdot \rho_f + (1 - \Phi_t) \cdot \mathbf{RHO}_{maa} \quad (3.19)$$

oder

$$\mathbf{RHO}_{maa} = \frac{(\rho_b - \Phi_t \cdot \rho_f)}{(1 - \Phi_t)} \quad (3.20)$$

und

$$U = \Phi_t U_f + (1 - \Phi_t) \cdot \mathbf{U}_{maa} \quad (3.21)$$

oder

$$\mathbf{U}_{maa} = \frac{(U - \Phi_t U_f)}{(1 - \Phi_t)}. \quad (3.22)$$

Die Dichte des Fluids ρ_f wird je nach dessen Art eins oder größer eins gesetzt. Als Fluidwert für die fotoelektrische Absorption U_f wird im Allgemeinen 0,5 barns/cm³ angenommen.

3.3.5 Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung

Eine Möglichkeit, die mineralogische Zusammensetzung von Tonsteinen abzuschätzen bieten selektive bzw. spektrale Gamma Ray Messungen. Die entsprechenden Messergebnisse werden mittels einer speziellen Bearbeitung als U-, Th- und K-Gehalte dargestellt. Hierzu ist eine entsprechende Kalibrierung (spectral stripping) der Sonden erforderlich. Bei der selektiven Messung werden in den Fenstern für die typischen Energien der K-, U- und Th-Strahlung die Impulse separat gemessen und in einem jeweiligen Kanal als Impulsrate registriert (GRS-K, GRS-U, GRS-Th). Bei der spektralen Messung erfolgt eine Aufnahme der gesamten Spektren mit einer 256-kanaligen Messeinrichtung.

Da sich Tonminerale oft durch charakteristische Kaliumkonzentrationen bzw. Thorium/Kalium-Verhältnisse auszeichnen, besteht die Möglichkeit, unterschiedlich zusammengesetzte Tongesteine voneinander abzugrenzen (siehe auch SCHLUMBERGER 1991; DOVETON 1994; ASQUITH & KRYGOWSKI 2004).

Bei der Auswertung vorhandener Bohrungen aus den bisherigen Testgebieten lagen keine spektralen oder selektiven Gamma Ray Logs für die interessierenden Tiefenbereiche vor.

3.4 Korrelation von Bohrlochmessungen und seismischen Daten

3.4.1 Bohrlochmessungen

Wichtige Kriterien bei der Beurteilung der Tonsteinformationen im Hinblick auf ihre mögliche Nutzung zur Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind die räumliche Charakterisierbarkeit und damit auch die Beurteilung ihrer Homogenität. Für ihre Anwendung sind Untersuchungen zur Korrelation der Bohrlochmessungen für spezielle Regionen unabdingbar. Zu diesem Zweck wurde das Softwarepaket CORRELATOR (OLEA & SAMPSON 2002), ein interaktives Expertensystem zur Korrelation von Bohrlochmessungen, eingesetzt und für die spezielle Aufgabenstellung weiterentwickelt. Die Korrelation der Bohrlochmessungen basiert auf der Analyse von Ähnlichkeiten in zwei Logtypen, von denen eines der Logs den Tonanteil und das andere Änderungen in einem speziellen petrophysikalischen Parameter (z. B. Widerstand, akustische Impedanz) angibt. Zur Charakterisierung des Tonanteils können das Eigenpotenziallog (SP) oder besser das Gamma Ray Log (GR) verwendet werden. Für die Korrelation wird ein Intervall A in der Bohrung X mit einem Intervall derselben Länge in der Bohrung Y verglichen. In der Bohrung Y wird das Intervall gesucht, das die maximale Ähnlichkeit in Bezug auf den Tongehalt und den zweiten gewählten petrophysikalischen Parameter aufweist. Um die Aussagen beider Logs nutzen zu können, arbeitet das Programm CORRELATOR mit einem gewichteten Korrelationskoeffizienten $w_{1,2,3,4}(i, k; n)$. Dieser ist definiert als Produkt des standardisierten Shale-Similarity-Koeffizienten $\alpha_{1,3}(i, k; n)$ und dem Pearson-Korrelationskoeffizienten, $r_{2,4}(i, k; n)$:

$$w_{1,2,3,4}(i, k; n) = \alpha_{1,3}(i, k; n) \cdot r_{2,4}(i, k; n), \quad (3.23)$$

wobei i der Index in der Tiefe z_i ist, der im Mittelpunkt des Intervalls in der Referenzbohrung liegt, k der Offset zwischen Mittelpunkt des Vergleichsintervalls (gemessen in Sample-Intervallen) und $(2n + 1)$ die Anzahl der Werte eines Intervalls sind.

λ_1 und λ_2 sind die Shale-Logs von zwei Bohrungen, welche im selben Sample-Intervall vorliegen. Wenn $\lambda_l(j)$ der Wert des Logs λ_l in der Tiefe z_j ist, dann berechnet sich der standardisierte Shale-Similarity-Koeffizient wie folgt:

$$\alpha_{1,3}(i, k; n) = 1 - \frac{1}{2n+1} \sum_{j=1-n}^{i+n} \left| \frac{\lambda_l(j) - \lambda_{\text{shale},1}}{\lambda_{\text{min},1} - \lambda_{\text{shale},1}} - \frac{\lambda_3(j+k) - \lambda_{\text{shale},3}}{\lambda_{\text{min},3} - \lambda_{\text{shale},3}} \right|, \quad (3.24)$$

wobei $\lambda_{\text{shale},l}$ einem hypothetischen Wert für reinen Ton entspricht und $\lambda_{\text{min},l}$ der minimale Wert des Log l ist. Der standardisierte Shale-Similarity-Koeffizient erreicht Werte zwischen 0 und 1.

Der Pearson-Korrelationskoeffizient kann somit wie folgt berechnet werden:

$$r_{2,4}(i, k; n) = \frac{\text{cov}_{2,4}(i, k; n)}{s_2(i, n) \cdot s_4(i, k; n)}, \quad (3.25)$$

wobei $s_2(i, n)$ die Standardabweichung für $(2n+1)$ Messintervalle mit dem Mittelpunkt z_i im Log λ_2 , $s_4(i, k; n)$ die Standardabweichung für dieselbe Intervalllänge mit dem Mittelpunkt z_{i+k} im Log λ_4 , $\text{cov}_{2,4}(i, k; n)$ die Kovarianz zwischen denselben Intervallen in $s_2(i, n)$ und $s_4(i, k; n)$ darstellen (OLEA 2003).

Abbildung 3.7 zeigt ein Beispiel für eine Korrelation von Bohrlochmessungen für sechs Bohrungen eines Erdölfeldes. Dargestellt sind sowohl die gefundenen Korrelationen als auch die Variationen der Porosität. Zur Bestimmung Letzterer standen in diesem Beispiel sowohl die Daten aus dem Dichtelog als auch aus dem Neutronenporositätslog zur Verfügung. Die Abschätzung der Porosität aus den Messdaten dieser zwei Logs ist mittels folgender Korrektur erfolgt:

$$\Phi = \Phi_{\text{ND,korr}} - V_{\text{sh}} \cdot \Phi_{\text{sh}}, \quad (3.26)$$

wobei $\Phi_{\text{ND,korr}}$ näherungsweise die Hälfte der Summe aus Dichteporosität und Neutronenporosität darstellt. V_{sh} gibt den Tonanteil an und Φ_{sh} verkörpert eine mittlere Porosität für typische Tonsteine.

Tests in verschiedenen Regionen und mit verschiedenen Logs haben gezeigt, dass CORRELATOR ein gutes Hilfsmittel zur detaillierten Charakterisierung von Tonen und Tonsteinen im Hinblick auf ihr regionales Aushalten und ihre Homogenität darstellt. Insbesondere bei sehr komplexen geologischen Verhältnissen sind alle stratigrafischen Fixpunkte zu berücksichtigen und Ringkorrelationen zwischen den Bohrungen durchzuführen, um somit zwar mathematisch korrekte, geologisch jedoch nicht sinnvolle Korrelationen auszuschließen.

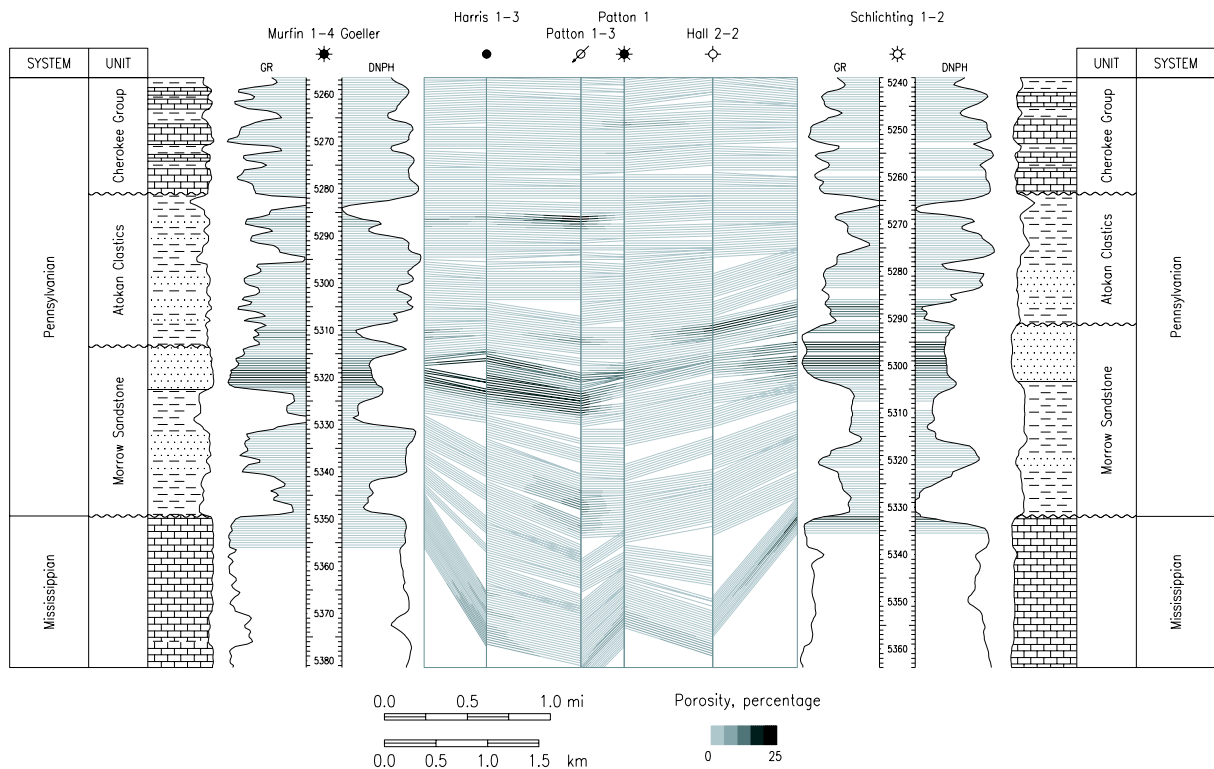


Abbildung 3.7: Korrelation von Bohrlochmessungen eines Profilschnittes (Erdölfeld in Kansas). Dargestellt sind drei unterschiedliche Gesteinstypen: Sandsteine, Karbonate und Tonsteine. (Abbildung nach OLEA 2003)

3.4.2 Seismische Daten

Die geophysikalischen und geologischen Untersuchungen an Bohrungen führen zu einer Aussage bezüglich des entsprechenden Bohrpunktes bzw. in der unmittelbaren Umgebung des Bohrpunktes. Das heißt, Bohrlochmessungen liefern lediglich eine eindimensionale Aussage betreffs des gewählten Parameters. Um diese Ergebnisse in die Fläche oder in den Raum zu transformieren bedarf es zweidimensionaler Profilmessungen oder dreidimensionaler Messungen. Die Wahl der Messverfahren hängt dabei von den zu bestimmenden Parametern ab. Eine Möglichkeit der Korrelation ist die Verwendung von Ergebnissen aus seismischen Messungen.

Seismische Messungen sind Wellenverfahren und detektieren Impedanzunterschiede, d. h. es werden Horizonte erkannt, an deren Übergang sich die Impedanz (Schallhärte, Produkt aus Geschwindigkeit und Dichte) ändert. Diese Impedanzunterschiede sind nach entsprechender Datenbearbeitung (Processing) im Wellenfeld des Seismogramms zu erkennen und lassen somit Rückschlüsse auf die Lithologie und Stratigrafie zu. Um die geologische

Gesamtsituation einschätzen zu können müssen eindimensionale Verfahren (Ergebnisse aus Bohrungen) mit zwei- bzw. dreidimensionalen Verfahren kombiniert werden.

An einer Bohrung können punktuell mit relativ hoher Genauigkeit verschiedene lithologische Parameter in direkter Abhängigkeit von der Tiefe gemessen werden. Bei seismischen Messungen wird die Laufzeit detektiert und mit einem entsprechenden Geschwindigkeitsmodell in die Tiefe transformiert. Zur Bewertung seismischer Daten müssen Ergebnisse aus den Bohrungen herangezogen werden, um die detektierten seismischen Ereignisse geologisch zu charakterisieren und die gemessenen Laufzeiten in Tiefenwerte übertragen zu können. Diesbezüglich gibt es verschiedene zwei- und dreidimensionale Verfahren, die hier nicht im Einzelnen beschrieben werden sollen. Ausführliche Darstellungen zu diesen Methoden sind z. B. in YILMAZ (1987); BENDER (1985); MILITZER & WEBER (1987); LA FRENIER & DUNKELBERG (1997) zu finden.

Für diese Studie lagen die seismischen Daten als Stapelsektion (stacked section) oder Zeit-Migration (time migrated section) vor. Hier werden die markanten Reflektoren angerissen und aus der Stratigrafie der Bohrung der geologisch-lithologische Bezug hergestellt. Ein wesentliches Hilfsmittel sind dabei die Untersuchung der Kern- und Spülproben, die Geofonversenkmessungen (GVM), das Vertical Seismic Profiling (VSP) und die Akustiklogs der Bohrungen. Diese Untersuchungen dienen der Übertragung der Lithologie und Tiefenwerte der einzelnen Horizonte in den Zeitbereich und damit der Korrelation mit den seismischen Daten. Zusätzlich werden die Bohrlochmessungen zur Ermittlung der Geschwindigkeiten an den Bohrpunkten verwendet, welche die Grundlage des Geschwindigkeitsmodells bilden. Eine schematische Bearbeitung der seismischen Daten ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

Die interpretierten seismischen Stapelsektionen bilden zusammen mit dem Geschwindigkeitsansatz die Voraussetzung zur Erstellung von Tiefenlinienkarten (Isobathenkarten). Eine ausführliche Beschreibung der Methode ist z. B. in SATTLEGGGER (1984, 1985, 1988); LA FRENIER & DUNKELBERG (1997) zu finden.

Im Ergebnis der Untersuchungen entsteht eine Datenbasis (Gitterpunkte) für ausgewählte Horizonte der Tonformationen. Sie ist Grundlage für Strukturkartendarstellungen und ermöglicht die Konstruktion von Profilschnitten sowie 3D-Abbildern der strukturellen Situation. Diese Untersuchungen dienen zusammen mit den Ergebnissen der Interpretation der Bohrlochmessungen der Einschätzung der geologischen Gesamtsituation und der Eignungsbeurteilung des Gesteins als Barriere- und/oder Wirtsgestein.

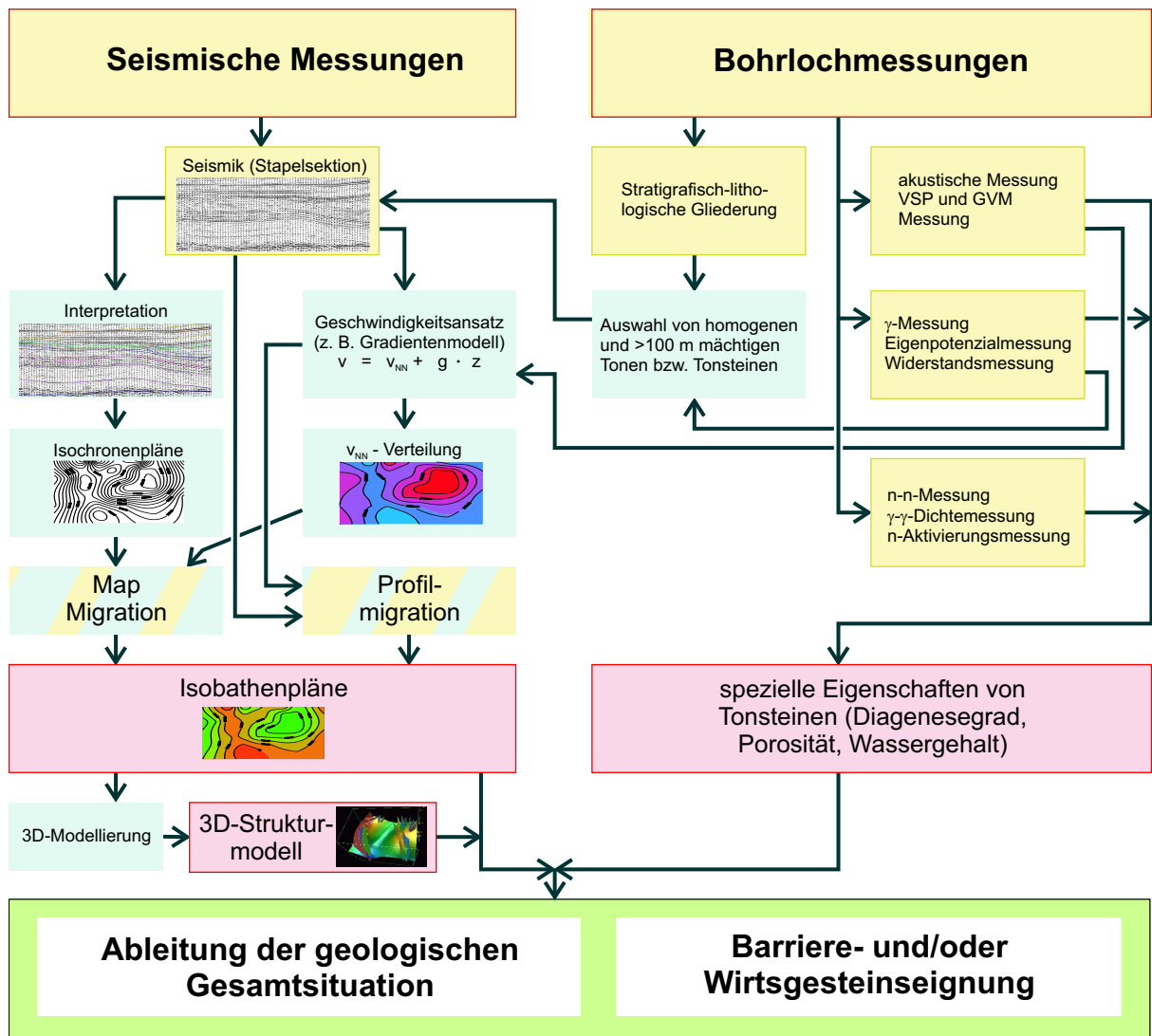


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der Bearbeitung von seismischen Daten und Bohrlochmessungen

3.5 Abschätzung der maximalen Temperaturbelastung

Wie im Kapitel 2 dargelegt, sind Kenntnisse zum Diageneseegrad der Tone und Tongesteine von großer Bedeutung für die Beurteilung der Wirtsgesteinseignung. Die Zusammenstellung von OSIPOV et al. (2004) verdeutlicht anhand der Deckschichten von Erdöl-/Erdgaslagerstätten in diesem Zusammenhang folgende Fakten:

- Tone erreichen etwa ab Tiefen von 400 m bis 600 m ein gutes Isolationspotential für Kohlenwasserstoffe und bilden dann die abdeckenden Schichten der entsprechenden Lagerstätten;
- bei Tongesteinen mit einem mittleren diagenetischen Beanspruchungsgrad bleiben die guten Barriereigenschaften erhalten;

- bei höheren diagenetischen Beanspruchungen tendieren einige Tonsteine (abhängig von der Fazies und dem Schichtsilikatanteil) zur Bildung von Mikrorissen und Mikroklüften.

Zur Einschätzung des Diagenesegrades der Tonsteine können Dichte- und Akustiklogs herangezogen werden (YANG & APLIN 1998). Die Analyse der Tiefentrends dieser Messungen gestattet es, einerseits die verschiedenen Tonsteinfohlen hinsichtlich ihres Diagenesegrades zu vergleichen und andererseits ehemals tiefer versenkte Tonsteine und abnormale Druckverhältnisse in den Tonsteinen zu identifizieren (MAGARA 1976; REISER 1991; HEASLER & KHARITONOVA 1996). Durch zusätzliche an Gesteinsmaterial bestimmte mineralogisch-geochemische und petrophysikalische Daten lassen sich die gewonnenen Aussagen absichern.

Im direkten Zusammenhang mit dem Diageneseegrad steht die Temperaturverträglichkeit der Tone und Tongesteine. Im unmittelbar um die Einlagerungshohlräume liegenden Gestein darf es bei Temperaturen bis 100 °C nicht zu Mineralumwandlungen kommen, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen (AKEND 2002). Ein bedeutender Indikator für die Abschätzung der möglichen temperaturbedingten Änderungen der Gesteinseigenschaften ist deshalb die maximale Temperaturbelastung, die Tone und Tonsteine während der Versenkung bzw. ihrer geologischen Geschichte erfahren haben. In Abbildung 3.9 sind verschiedene Indikatoren zusammengestellt, die zu groben Abschätzungen des Diagenesegrades bzw. der maximalen Temperaturbelastung herangezogen werden können. Diese Indikatoren sind allerdings nur für wenige Bohrungen verfügbar und kommen somit für eine großräumige Evaluierung nicht in Frage.

Eine Ausnahme bilden Daten zur Reife (Inkohlung) des organischen Materials. Die in den Tonsteinen sehr oft enthaltenen organischen Partikel sind durch unterschiedliche chemische Ausgangszusammensetzungen gekennzeichnet und werden Mazeralgruppen (Vitrinite, Exinite, Inertinite) zugeordnet. Der nach statistischer Auswertung mikroskopisch ermittelte durchschnittliche Reflexionsgrad R_r [%] des Vitrinitits entspricht dem Inkohlungsgrad und somit dem Reifegrad des Gesteins (siehe Abbildung 3.9). Die Reflexion des Vitrinitits hängt von der Aromatisierung und Ringkondensation des Kohlenstoffs und von der schichtparallelen Regelung und Stapelung der aromatischen Kristallite ab (KOCH & SCHELLSCHMIDT 2001). Sie steigt in Abhängigkeit von der erreichten Maximaltemperatur an, wobei neben der Temperatur auch die Zeit ein wichtiger Einflussfaktor ist oder sein

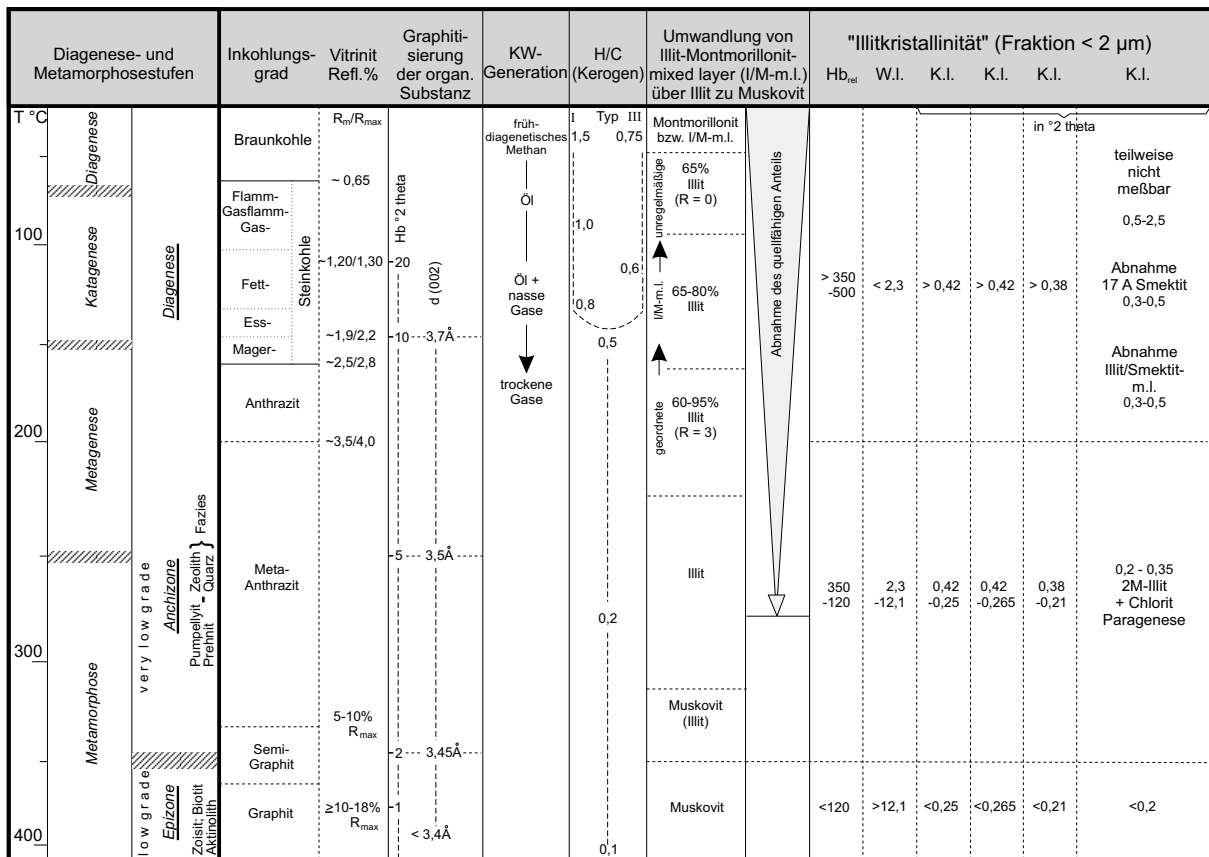


Abbildung 3.9: Möglichkeiten der Abschätzung der maximalen Temperaturbelastung von Tonsteinen während ihrer Versenkungsdiagenese (HEROUX et al. 1979; STACH 1982; TEICHMÜLLER 1987; WEAVER 1984; KÜBLER 1984; KRUMM et al. 1988; HOTH 1997)

kann (BARKER 1983; QUIGLEY & MACKENZIE 1988; SWEENEY & BURNHAM 1990; KOCH & SCHELLSCHMIDT 2001).

Entsprechende Vitrinitreflexionswerte liegen insbesondere auch aus den endlagerrelevanten Tiefenbereichen von zahlreichen Erdöl- und Erdgasbohrungen vor. Mittels dieser Daten ist zumindest ein Vergleich hinsichtlich des Diagenesegrades möglich. Im Rahmen dieser Studie wurde zusätzlich getestet, inwieweit auch die maximale Temperaturbelastung, die Tone und Tonsteine während der Versenkung bzw. ihrer geologischen Geschichte erfahren haben, mit diesen Daten abschätzbar ist. Dazu wurden Modellierungen von Temperatur- und Versenkungsgeschichte mit dem numerischen Beckensimulationsprogramm PetroMod 1D durchgeführt und die Ergebnisse mit den empirischen Modellen von KOCH & SCHELLSCHMIDT (2001) und BARKER & PAWLEWICZ (1994) verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass auch mittels der einfachen Modelle grobe Abschätzungen der erfahrenen Maximaltemperaturen für Tonsteine möglich sind.

3.6 Auswahlkriterien

Ziel der Studie war die Identifizierung von untersuchungswürdigen Teilgebieten mit Tongesteinsformationen als Wirtsgesteine für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Deutschland. Als untersuchungswürdiges Teilgebiet wird eine Fläche verstanden, unter der eine für die Endlagerung potenziell geeignete geologische Wirtsgesteinsformation (hier Tongestein) in einer günstigen geologischen Gesamtsituation ausgewiesen werden kann. Ziel der Studie war nicht die Ausweisung konkreter Endlagerstandorte.

Für die Identifizierung und Ausweisung untersuchungswürdiger Teilgebiete werden in dieser Studie unterschiedliche Kategorien von Kriterien und Anforderungen herangezogen, die in den folgenden Kapiteln dargestellt werden.

3.6.1 Grundanforderungen an einen Endlagerstandort

International sind für Endlagerstandorte allgemein gültige Grundanforderungen definiert. Sie orientieren sich im Wesentlichen an von der International Atomic Energy Agency (IAEA) formulierten generellen Anforderungen (IAEA 1993, 1994). In Anlehnung daran hatte die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) für das schweizerische Konzept zur Anlage eines Endlagers in Tongesteinen folgende übergeordnete Anforderungen aufgestellt (NAGRA 2002):

- geologische Langzeitstabilität (z. B. geologisch tektonisch stabiles Gebiet);
- günstige Wirtsgesteinseigenschaften (z. B. geotechnische Eigenschaften);
- genügende Ausdehnung des Wirtsgesteinskörpers;
- Vermeidung von Störeinflüssen (z. B. kein Risiko für menschliches Eindringen);
- Robustheit gegenüber Störeinflüssen (z. B. bei konkurrierender Nutzung);
- Explorierbarkeit (z. B. einfacher geologischer Bau, homogenes Gestein);
- Prognostizierbarkeit (z. B. großflächig geologisch-tektonisch ruhiges Umfeld).

Auch im französischen Endlagerkonzept für Tongesteine werden fast gleich lautend ausgerichtete Anforderungen an einen Standort zugrunde gelegt (DSIN 1991).

Auf der Basis dieser international anerkannten Grundanforderungen und unter zusätzlicher Berücksichtigung der im folgenden Kapitel dargestellten Ausschlusskriterien und

Mindestanforderungen des AkEnd wurden in einem ersten Schritt geowissenschaftlich begründete und sicherheitsgerichtete Abgrenzungen untersuchungswürdiger Teilgebiete vorgenommen (Kapitel 3.6.2).

In einem zweiten Schritt konnten mit Hilfe wirtsgesteinsabhängiger Kriterien für Tongesteine und unter Hinzuziehung der Kenntnisse über die speziellen regionalgeologischen Verhältnisse in Deutschland weitere Regionen von der Bearbeitung ausgeschlossen werden (Kapitel 3.6.3). Die Ergebnisse werden in Kapitel 4.2 aufgelistet und die betreffenden Gebiete dargestellt.

3.6.2 Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen

In Kapitel 1 wurde bereits beschrieben, dass der geologischen Barriere bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen in Deutschland die entscheidende Bedeutung zukommt. Ein Endlagerstandort muss folgerichtig prioritär sicherheitsgerichtete geowissenschaftliche Kriterien erfüllen.

Entsprechend der Empfehlung des AkEnd erfolgte die Ausweisung von Gebieten in Tongesteinsformationen in dieser Studie in einem ersten Schritt anhand folgender geowissenschaftlicher und wirtsgesteinsunabhängiger Ausschlusskriterien:

- die Endlagerregion darf keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum aufweisen (Abbildung 3.10);
- im Endlagerbereich dürfen keine aktiven Störungszonen vorliegen;
- im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone eins nach DIN 4149 (2005) (Abbildung 3.11);
- in der Endlagerregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen (Abbildung 3.11).

Zur Identifizierung von Gebieten, in denen die geologischen Strukturen die Anforderungen an das Isolationsvermögen und die Tiefenlage erfüllen können, wurden vom AkEnd zusätzliche sicherheitsgerichtete Mindestanforderungen aufgestellt, deren Nichterfüllung zum Ausschluss weiterer Teilgebiete führen:

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

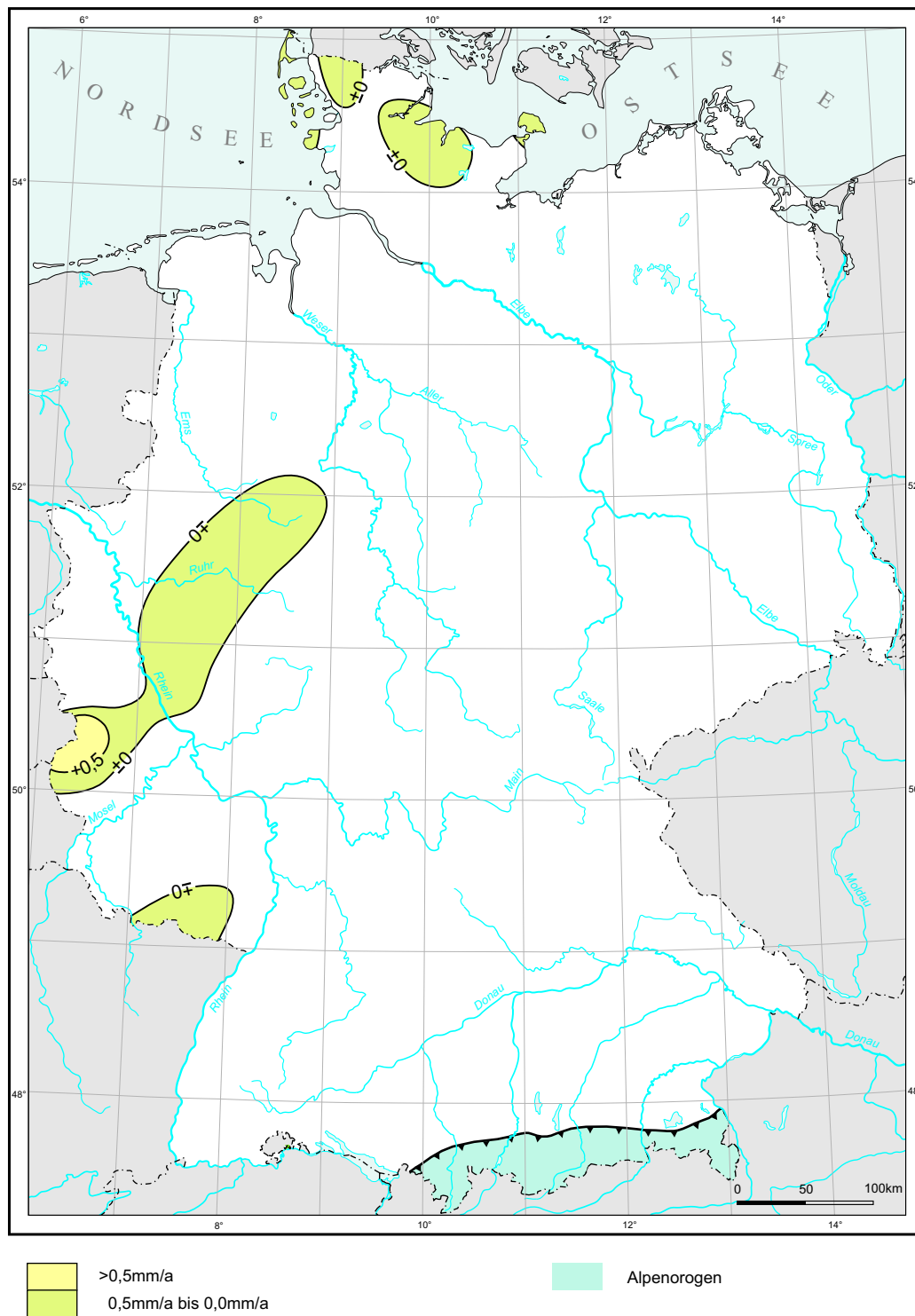


Abbildung 3.10: Vertikale Krustenbewegungen (Hebungen) in Deutschland nach FRISCHBUTTER & SCHWAB (2001)

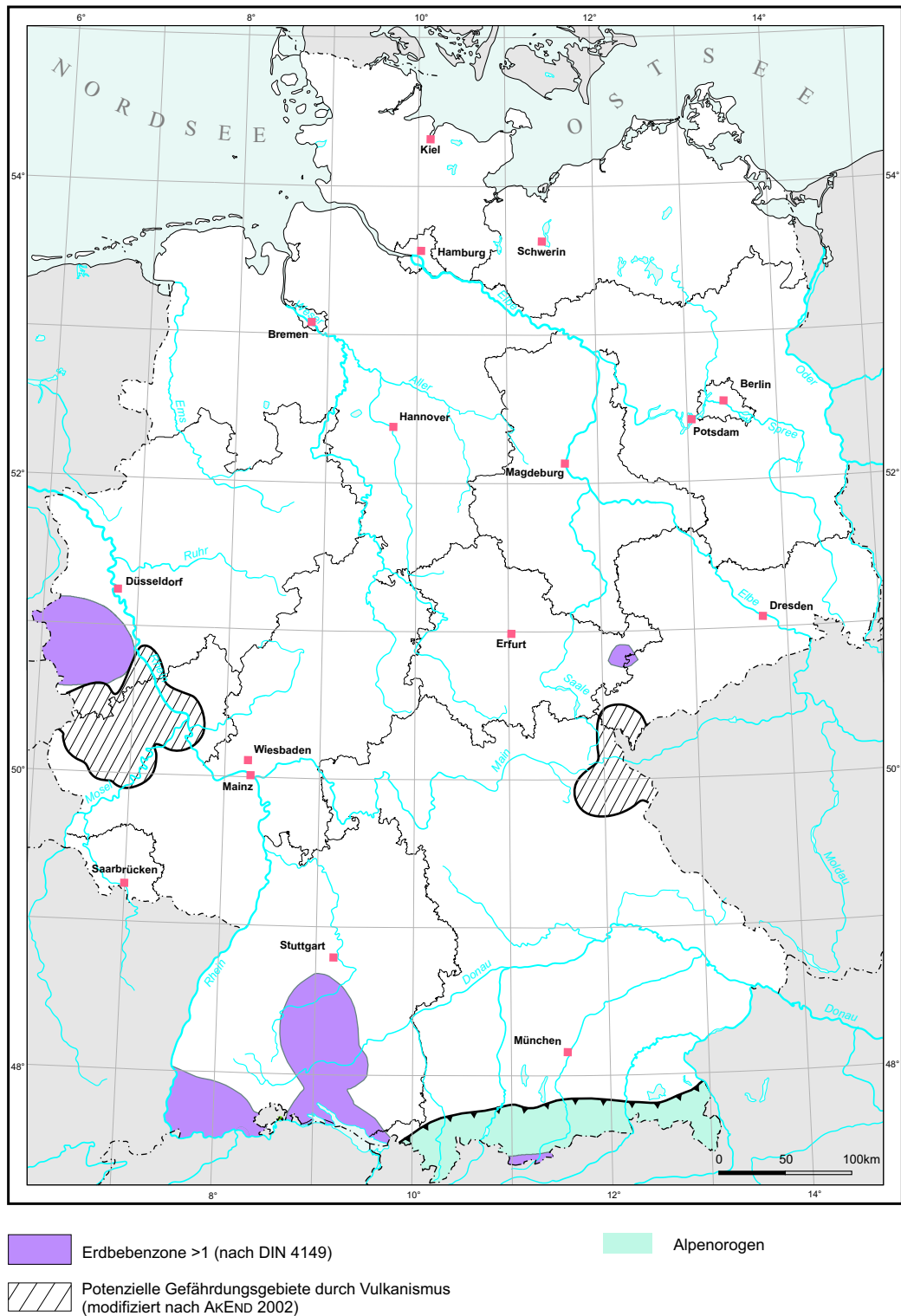


Abbildung 3.11: Ausschlusskriterien: Erdbebenzone größer eins und potenzielle Gefährdungsgebiete durch Vulkanismus

- der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein;
- die Tiefenlage der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen;
- das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1500 m liegen (siehe dazu auch Kapitel 3.6.3);
- der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (mind. 10 km² im Tongestein);
- der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht gebirgschlaggefährdet sein;
- es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre zweifelhaft erscheinen lassen.

Legt man diese Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen für die Ausweisung von Gebieten mit Tongesteinsformationen in Deutschland zugrunde, kommen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle zunächst die in den Einzelkarten dargestellten Teilgebiete in Betracht (siehe Kapitel 4.1 und 4.2).

3.6.3 Wirtsgesteinsabhängige Auswahlkriterien für Tongesteine

Tongesteinsformationen haben als abdeckende, dichte Schichten z. B. für Kohlenwasserstoffvorkommen ihre langfristige Wirksamkeit als geologische Barriere nachgewiesen. Die für die Endlagerung relevanten günstigen Eigenschaften der Tongesteine sind insbesondere die sehr geringe Durchlässigkeit und die hohe Sorptionsfähigkeit.

Der Aufwand für ein Endlager, die Sicherheit während der Betriebsphase sowie die Möglichkeiten, das Endlager während und nach der Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle zu verschließen, hängen jedoch in starkem Maße auch von den gebirgsmechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins ab. Während in Deutschland ein hoher Kenntnisstand zur Gebirgsmechanik der Salzgesteine existiert, ist dieser für Tongesteine wesentlich geringer.

In Bezug auf die gebirgsmechanischen Eigenschaften weisen Tongesteine eine große Bandbreite, vom plastischen Ton mit Übergangsformen bis zum stark verfestigten und

z. T. geklüfteten Tonstein, auf. Dabei können erhebliche Unterschiede im Verformungsverhalten, der Temperaturempfindlichkeit und der Gebirgsstabilität auftreten. Vor diesem Hintergrund werden in internationalen Endlagerkonzepten, die Tonformationen als Wirtsgesteine vorsehen, zusätzliche, die gebirgsmechanischen Eigenschaften betreffende, wirtsgesteinsabhängige Auswahlkriterien für Tongesteine berücksichtigt. Ein wesentliches Kriterium ist dabei die maximale Tiefenlage des Endlagers in einer Tongesteinsformation.

Das Konzept der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen setzt generell eine ausreichende Festigkeit für die Erstellung und Offenhaltung der untertägigen Strecken voraus. Die Tiefenlage des Endlagers hat dabei erheblichen Einfluss auf die Stabilität der Einlagerungsstrecken und damit auch auf die bergmännische Erschließung und die bautechnische Machbarkeit. In Tongesteinen kann die Standsicherheit der Strecken nur mit angepassten Ausbaumaßnahmen erreicht werden. Zementgebundene Felssicherungsmaßnahmen sind jedoch dabei u. a. auch wegen der langzeitsicherheitlichen Relevanz (Beeinflussung der natürlichen geochemischen Verhältnisse) nicht erwünscht (NAGRA 2002). Die Wahl der Tiefe des Endlagers in Tongesteinen muss daher zum einen den Sicherheitsabstand zur Biosphäre gewährleisten, darf jedoch zum anderen eine unzulässige Tiefenlage aus gebirgsmechanischer Sicht und mit unerwünschten Langzeiteffekten nicht zulassen.

Bereits 1977 hatte die BGR in einer Studie über die möglichen Endlagerwirtsgesteinsformationen in Deutschland eine Endlagertiefe von maximal 1000 m in Tongesteinen vorgeschlagen (BGR 1977). Diese Angabe wurde 1979 als Empfehlung in eine Studie für die damaligen EU-Mitgliedstaaten aufgenommen und ist heute weltweit anerkannt (EU 1979). Auch im französischen Konzept in Jura-Tonsteinen wird von einer Einlagerungstiefe zwischen 200 m und 1000 m ausgegangen (ANDRA 2001) und als generelle Richtlinie wird von der IAEA eine Tiefe von „mehreren hundert Metern“ für die Endlagerstrecken angegeben (IAEA 2003). Berechnungen von JOBMANN et al. (2006) zur sicherheitstechnischen Auslegung eines Endlagers in Tonstein zeigen ebenfalls, dass aus thermischer und aus mechanischer Sicht „eine Tonsteinformation in möglichst geringer Tiefenlage absolut zu bevorzugen ist“. Im schweizerischen Endlagerkonzept für den Opalinuston wird schließlich eine Maximaltiefe von ca. 900 m angegeben (NAGRA 2002).

Es besteht somit in der internationalen Fachwelt Einigkeit, dass bei Tongesteinsformationen unterhalb von 1000 m Tiefe mit sehr schwierigen gebirgsmechanischen Verhältnissen zu rechnen ist. Dies macht extreme Aufwendungen bei der Auffahrung und dem Betrieb eines Endlagers unterhalb dieser Tiefe notwendig (BFS 2006). Vor diesem Hintergrund wurde

in der vorliegenden Studie eine maximal mögliche Tiefenlage der Tongesteinsformationen von 1000 m als Grenzwert festgelegt.

Bei der Festlegung der Maximaltiefe eines Endlagerbergwerkes ist neben bergbautechnischen und damit felsmechanischen Aspekten auch die Temperatur im Einlagerungsbereich zu berücksichtigen. Als Maximaltemperatur für das Gebirge sollten 50 °C nicht überschritten werden, da Tonsteine deutlich schlechtere Wärmeleitfähigkeiten als Salz aufweisen. Dies bedingt einen deutlich schlechteren Wärmeabtransport aus einem Endlagerbergwerk im Tonstein. Die nach JUNG et al. (2002) in Norddeutschland auftretenden Temperaturen in 1000 m Tiefe liegen im Mittel zwischen 40 °C und 50 °C. In weiten Teilen der süddeutschen Großscholle und des Oberrheingrabens liegen deutlich höhere Temperaturen vor (siehe Abbildung 3.12).

Neben der bergbautechnischen Problematik gehen die gesteinsmechanischen Eigenschaften von Tongesteinen als wesentlicher Faktor auch in Langzeitsicherheitsbetrachtungen ein. Auch der AKEND (2002) weist in der Formulierung der Abwägungskriterien für mögliche Endlagerregionen auf die Bedeutung des gebirgsmechanischen Langzeitverhaltens der Wirtsgesteine hin. Im schweizerischen Endlagerkonzept spielt das rheologische Materialverhalten von Tonsteinen für die Beurteilung der mechanischen Stabilität von Grubenbauen ebenfalls eine große Rolle (NAGRA 2002). Dabei müssen besonders bei sich plastisch verhaltenden Tonen die zeitabhängigen Deformationsprozesse berücksichtigt werden.

In Laborversuchen konnte bisher im Wesentlichen das Kurzzeitmaterialverhalten von Tonen abgebildet werden (LUX 2002). Die Extrapolation auf lange Zeiträume gestaltet sich hingegen, besonders unter zusätzlicher Berücksichtigung thermischer Einflüsse bei der Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle, als äußerst schwierig. Bei dem im Vergleich zum Wirtsgestein Steinsalz sehr geringen Kenntnisstand ist eine hinreichende Charakterisierung der Tone zudem nur standortspezifisch möglich und mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden.

Vor dem Hintergrund der ungünstigen Materialeigenschaften unverfestigter Tone in Deutschland wurden in dieser Studie für die Endlagerung in relevanten Tiefen vorkommende, meist plastisch reagierende, tertiäre Tongesteinsformationen nicht weiter betrachtet.

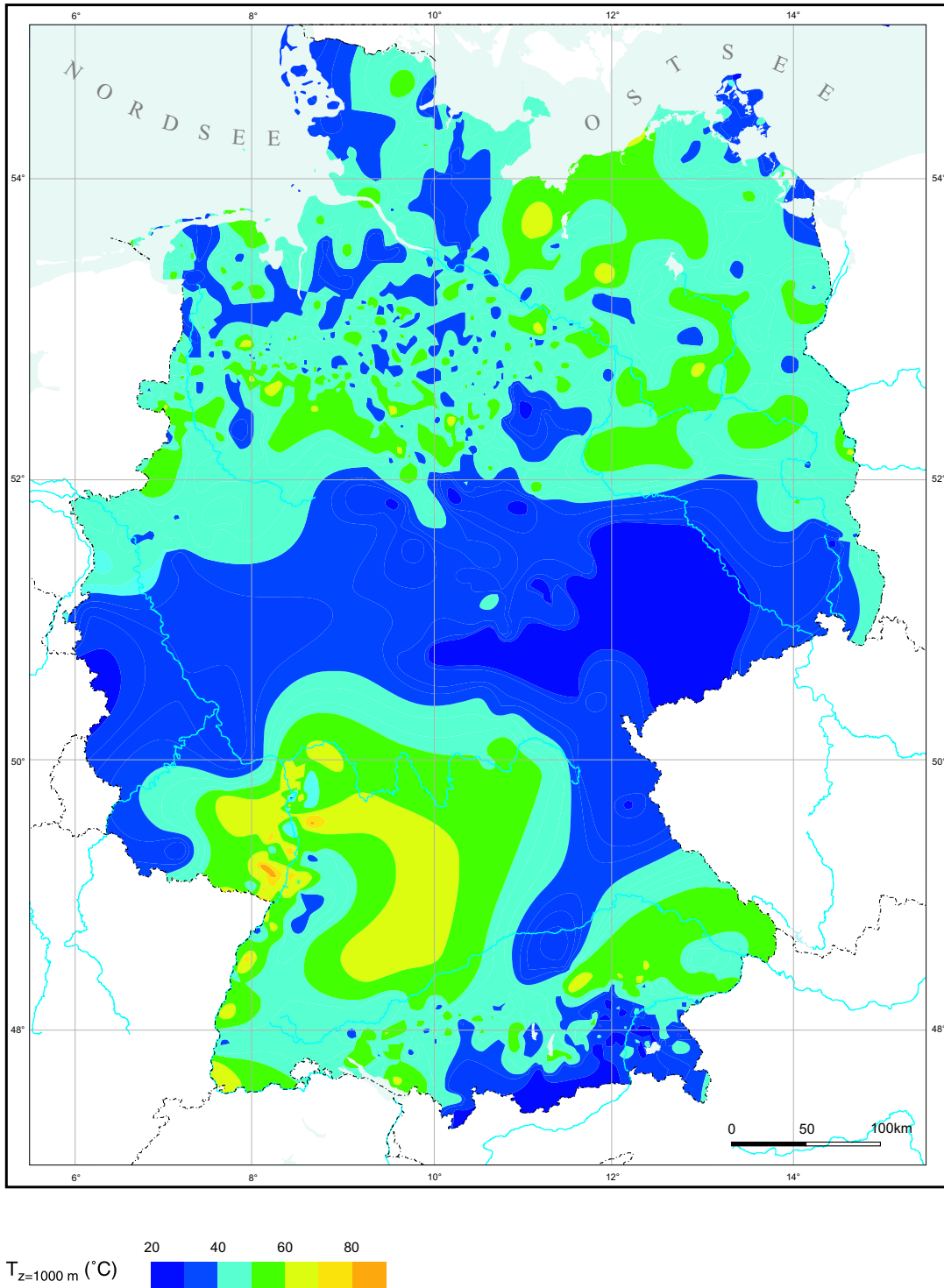


Abbildung 3.12: Temperaturverteilung in 1000 m Tiefe nach JUNG et al. (2002)

4 Ergebnisse

4.1 Tongesteinsformationen in Deutschland

Die geologische Entwicklung Deutschlands führte außerhalb des Alpenraumes zu einer deutlichen Dreigliederung der auftretenden Gesteinsformationen. Verfaltete und geschieferte Formationen, in denen die ursprünglichen sedimentären und magmatischen Gesteine durch entsprechend hohe Druck- und Temperaturbedingungen zu metamorphen Gesteinen umgewandelt worden sind, bilden die ältesten Einheiten. In die schwach- bis hochmetamorphen Gesteine sind in unterschiedlichem Ausmaß jüngere magmatische Tiefengesteine eingedrungen. Zusammen mit den metamorphen Gesteinen bilden diese Magmatite das so genannte Grundgebirge von Deutschland. Altersmäßig sind die Gesteine des Grundgebirges überwiegend dem Zeitraum vom Präkambrium (>550 Mio. Jahre) bis zum Karbon (295 Mio. Jahre) zuzuordnen, jüngere magmatische Gesteine weisen permische und z. T. auch noch jüngere Alter auf.

In den Bereichen des Grundgebirges mit nur gering metamorphisierten Sedimentgesteinen existieren keine Tonsteine, da diese durch die höheren Druck- und Temperaturbedingungen mindestens zu Tonschiefern umgewandelt worden sind. Diese Tonschiefer weisen auf Grund der Schieferung und vorhandener Klüftung sehr oft wesentlich höhere Gebirgsdurchlässigkeiten als die Geforderten ($k_f < 10^{-10}$ m/s) auf. Das Vorhandensein von größeren Bereichen (mind. 10 km²), in denen Tonschiefer das Kriterium der geringen Gebirgsdurchlässigkeit erfüllen, ist deshalb nicht hinreichend nachweisbar. In Regionen mit an der Oberfläche anstehendem bzw. unter sehr geringer Bedeckung liegendem kristallinen Grundgebirge (siehe Abbildung 4.1) sind mächtige und großflächig ausgedehnte Tonsteine ebenfalls nicht vorhanden. Mächtigere Tone treten in diesen Gebieten nur stark lokal begrenzt auf, zumeist handelt es sich um Verwitterungsbildungen (z. B. Kaolinvorkommen in Sachsen).

Über dem Grundgebirge folgt diskordant das Deckgebirge, das aus wenig deformierten und nicht metamorph überprägten Gesteinseinheiten besteht. Im südlichen und mittleren Deutschland, wo das Grundgebirge ein variszisches Alter von ca. 330 Mio. Jahren bis 305 Mio. Jahren besitzt, beginnt das Deckgebirge teilweise schon mit Ablagerungen des Unterkarbon, großflächig aber zumindest mit Ablagerungen des Oberkarbon und des Rotliegend. Im nordostdeutschen Küstengebiet, auf Rügen, Usedom und dem Festland,

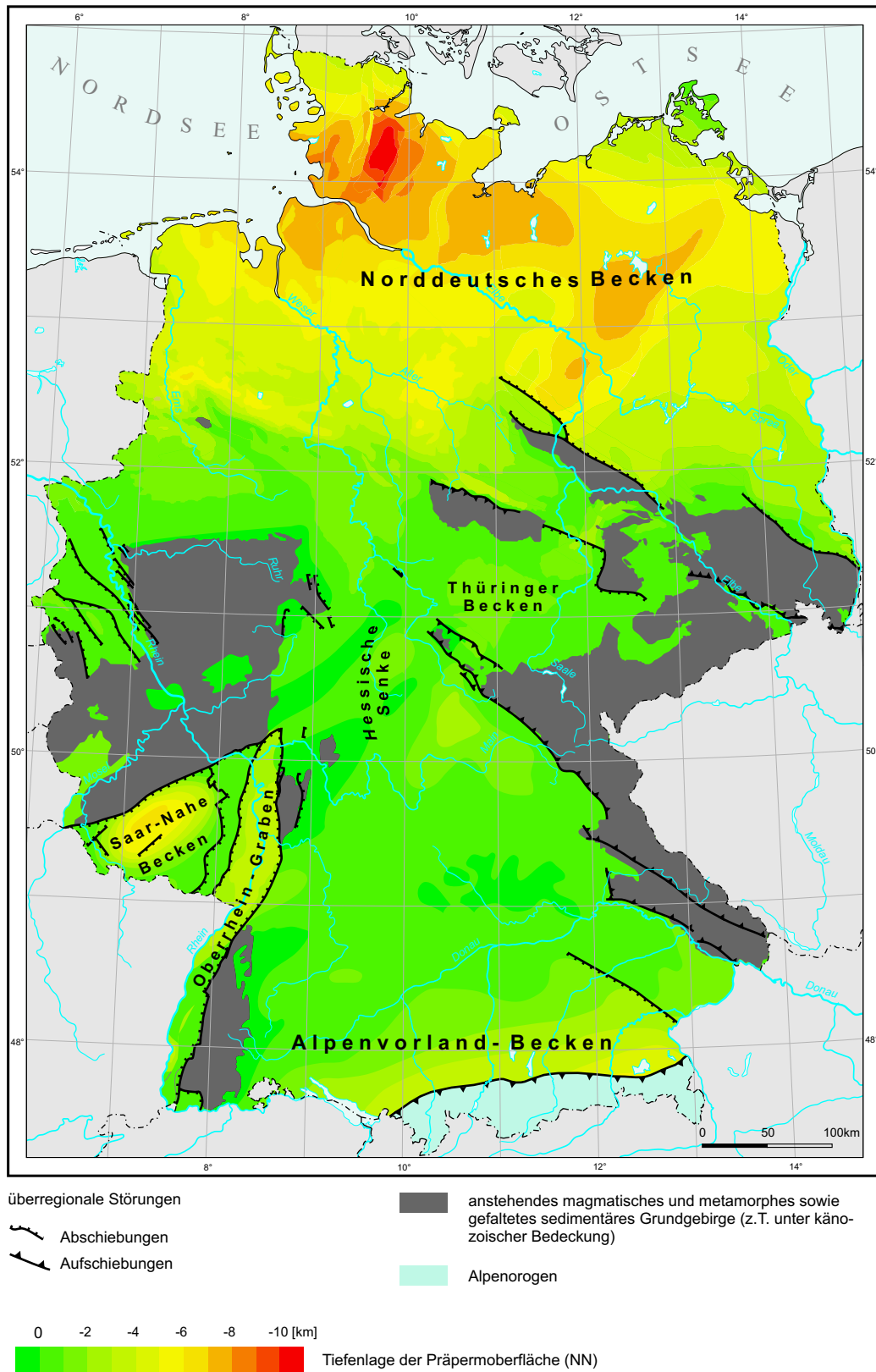


Abbildung 4.1: Tiefenlage der Basis des sedimentären Deckgebirges in Deutschland (Lage der Sedimentbecken)

wo durch Tiefbohrungen kaledonisches Grundgebirge (420 Mio. Jahre) erschlossen wurde, beginnt das Deckgebirge bereits mit dem Mitteldevon, und im Untergrund der Ostsee, nord-östlich Rügen, setzt das Deckgebirge bereits über dem erbohrten Kristallin des baltischen Schildes mit Ablagerungen des Kambrium ein. Von dieser unterschiedlichen Basis erstreckt sich das Deckgebirge bis zu den jüngsten Ablagerungen des Tertiär (ca. 1,8 Mio. Jahre). Die jüngste geologische Einheit bzw. Gesteinsformation wird von den quartären Lockerse-dimenten gebildet, die vor allem im norddeutschen Tiefland und im Alpenvorland verbreitet sind. Quartäre Tonvorkommen besitzen schon auf Grund ihrer zu geringen Tiefenlage besonders ungünstige Voraussetzungen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle, sie werden daher hier nicht weiter betrachtet.

Zusammenfassende Ausführungen zur geologischen Entwicklung Deutschlands, zur Ver-breitung der unterschiedlichen Gesteinsformationen und zur Struktur des Untergrundes finden sich u. a. bei WALTER (1995); BACHMANN & MÜLLER (1996); STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION DEUTSCHLANDS (1997); HENNINGSEN & KATZUNG (2006); MENNING & HENDRICH (2005).

Die Darstellung der Tiefenlage der so genannten Präperm-Oberfläche (z. T. Basisfläche mächtiger jüngerer Deckgebirgs-Ablagerungen über Gesteinen des Karbon und ältere-rer Zeitabschnitte, >300 Mio. Jahre) in Abbildung 4.1 zeigt einerseits die Regionen in Deutschland, in denen das magmatische und metamorphe Grundgebirge an der Ober-fläche ansteht bzw. nur unter geringer känozoischer Überdeckung auftritt. Andererseits geht aus dieser Abbildung die regionale Verbreitung großer Mächtigkeiten von Deck-gebirgsablagerungen hervor. Letztere konzentrieren sich auf Gebiete, die im Laufe der geologischen Geschichte eine Absenkung erfahren haben und in denen deshalb mächtige Sedimentablagerungen akkumuliert worden sind (Sedimentbecken, Gräben). Teilweise erfolgt die Sedimentation sogar heute noch. Die beiden wichtigsten dieser Gebiete in Deutschland sind das Norddeutsche Becken und das Alpenvorlandbecken (Nordalpines Molassebecken). Abbildung 4.2 verdeutlicht die geologische Situation im südlichen Bereich des Norddeutschen Beckens. Aus ihr ist ersichtlich, dass in diesem Bereich bezüglich der Tiefenlage Tongesteinsformationen der Kreide und des Jura für die Endlagerung relevant sind. Der Profilschnitt von der Schwäbischen Alb in das Molassebecken (Abbildung 4.3) zeigt die mächtige Tertiärfüllung über dem Jura im Molassebecken.

Mächtige und im Hinblick auf die Endlagerung untersuchungswürdige Tone und Tonsteine kommen auf Grund der geologischen Entwicklung fast ausschließlich innerhalb der in der Abbildung 4.1 dargestellten Sedimentbecken vor. Tone und Tonsteine treten dabei in

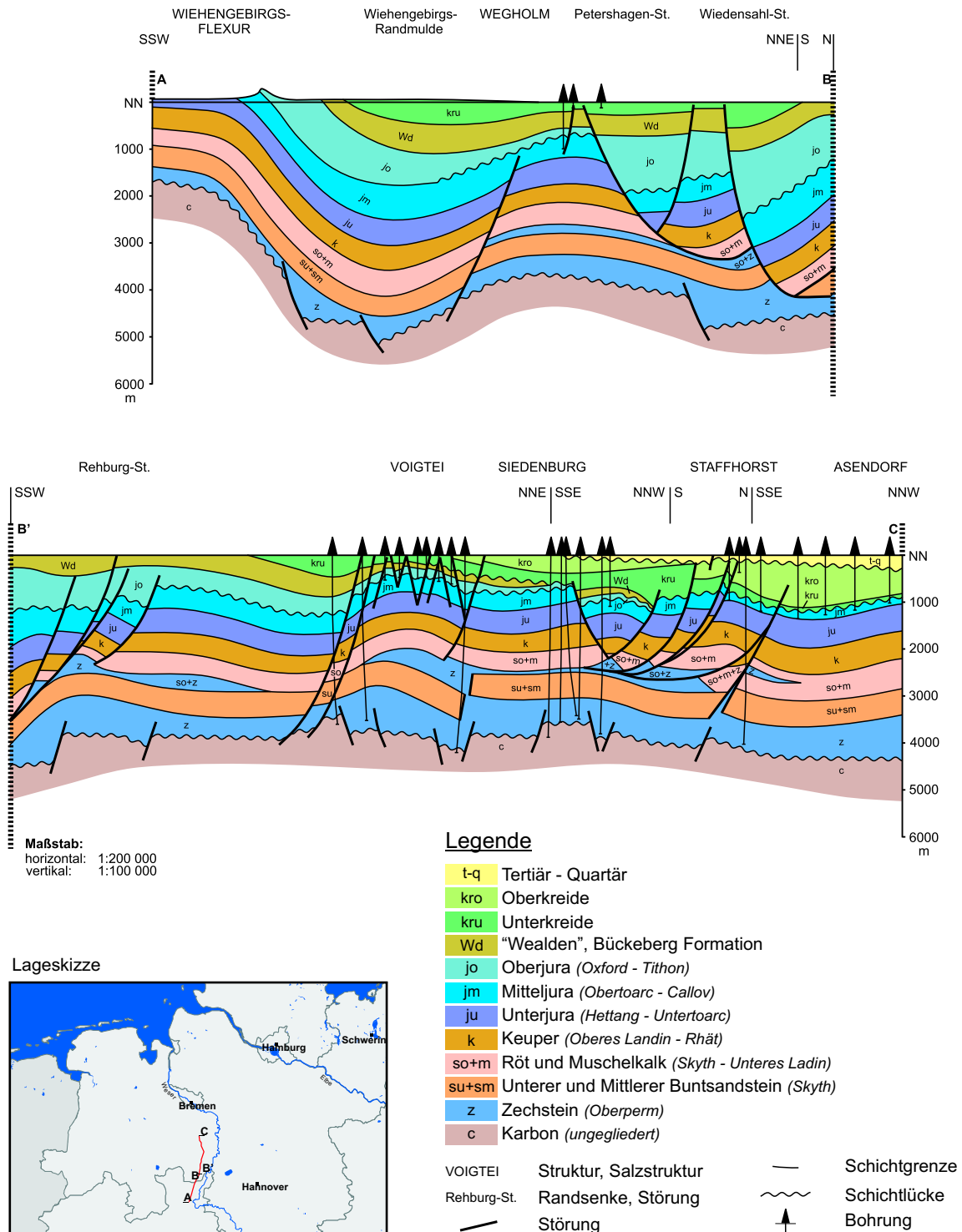


Abbildung 4.2: Profilschnitt aus dem südlichen Teil des Norddeutschen Beckens (Profil nach BALDSCHUHN et al. 2001, modifiziert)

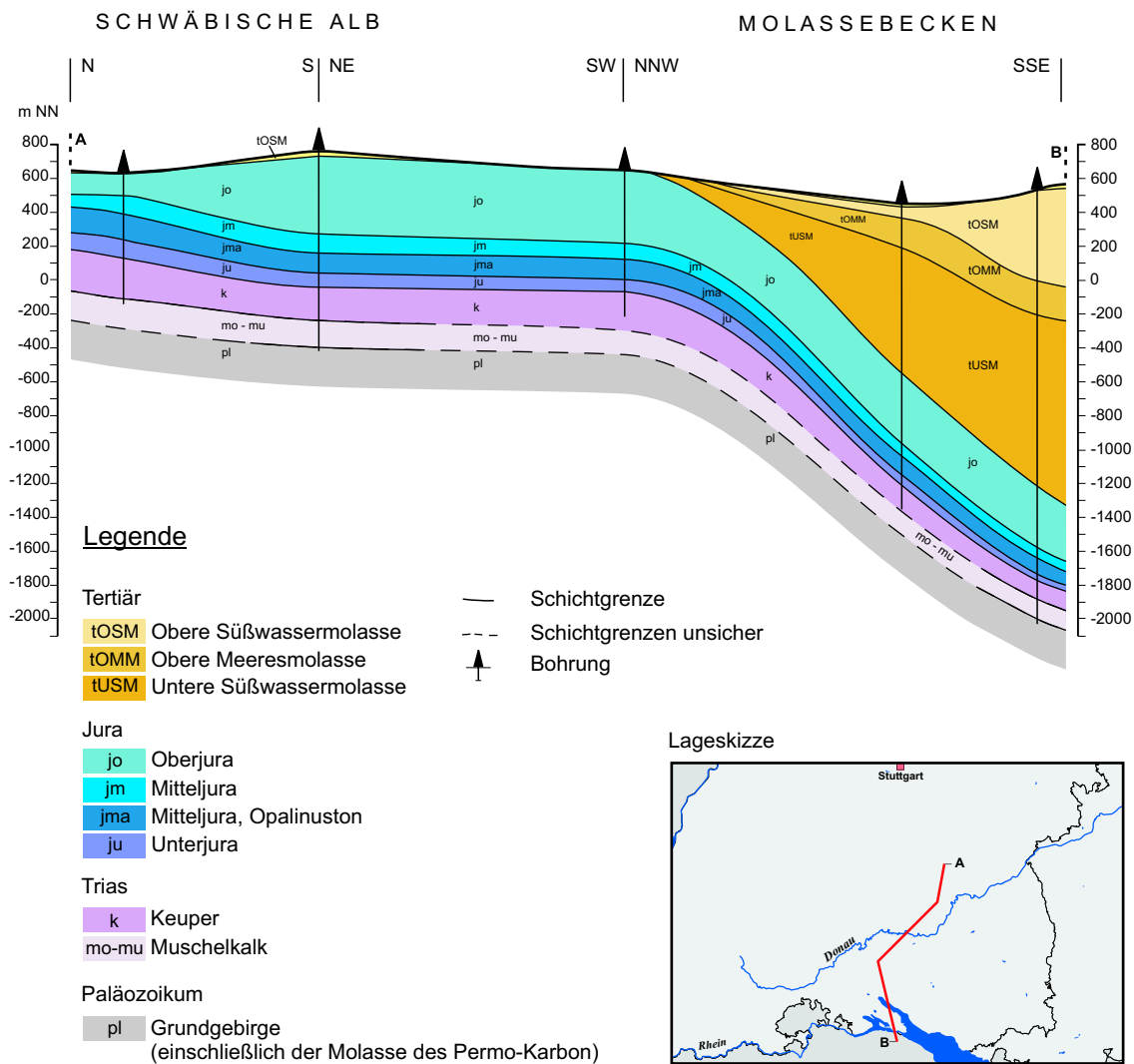


Abbildung 4.3: Profilschnitt Schwäbische Alb–Molassebecken

den verschiedensten stratigrafischen Einheiten auf, ihre Mächtigkeit und flächenmäßige Verbreitung sowie ihre Homogenität und stoffliche Ausbildung variieren jedoch stark.

Die Verbreitung potenzieller toniger Barrieregesteine ist im oberflächennahen Bereich vor allem im Rahmen der Standorterkundung von Deponien erkundet worden (AG DEPONIE-EN 1997). Die dort dargestellten Ergebnisse geben unter Einbeziehung der Erfahrung aller Bundesländer einen guten Überblick über das Auftreten von tonigen Gesteinsformationen des oberflächennahen Bereiches in den verschiedenen Regionen. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, sind die Ergebnisse von Bohrungen, die im Rahmen der Erdöl-, Erdgas-, Salz-, Erz- oder anderer Rohstofferkundung sowie in geringerem Umfang als Forschungs- und Kartierungsbohrungen abgeteuft worden sind, die Grundlage zur Beurteilung entsprechen-

der Ablagerungen im tieferen Untergrund Deutschlands. In Verbindung mit den Bohrungsergebnissen lassen sich zusätzliche Informationen aus reflexionsseismischen und anderen geophysikalischen Messungen ableiten. Aus den bisher verfügbaren Kompilationen und Publikationen zum tieferen Untergrund Deutschlands (siehe z. B. ZGI 1970; KÄMPFE 1984; LEMCKE 1988; GEOPHYSIK LEIPZIG 1989; GEYER & GWINNER 1991; KATZUNG & EHMKE 1993; HOTH et al. 1993; SEIDEL 1995; FREUDENBERGER & SCHWERD 1996; BANDLOWA et al. 1997; BALDSCHUHN et al. 2001; KATZUNG 2004; MENNING & HENDRICH 2005) ist abzuleiten, dass Ton-/Tonsteinformationen, welche die in Kapitel 3.6.2 erwähnten Grundanforderungen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage erfüllen, in folgenden Regionen und stratigrafischen Abschnitten auftreten können (Abbildung 4.4).

1. Tone/Tonsteine des Jura: vorwiegend im Niedersachsen-Becken, in Teilen von Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern, im Süddeutschen Molassebecken sowie der Schwäbisch/Fränkischen Alb.
2. Tone/Tonsteine der Unterkreide (vor allem Valangin bis 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 Tertiär: vor allem in Schleswig-Holstein und in Teilen von Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Niedersachsen (Oberpaläozän bis Miozän) sowie im Süddeutschen Molassebecken und im Oberrheingraben (Eozän bis Miozän).

Die bisherigen Untersuchungen sind auf diese Gesteinsformationen konzentriert worden, da sie nach dem derzeitigen geologischen Kenntnisstand die entsprechenden Grundanforderungen erfüllen. Lokal stärker begrenzte tonige Formationen anderer stratigrafischer Abschnitte (Trias, Permokarbon) erfüllen zum großen Teil die im Kapitel 3.6.2 genannten Mindestanforderungen nicht, da sie in den Beckenbereichen einerseits in zu großen Tiefen liegen und andererseits in den Randbereichen der Becken die Mächtigkeiten nicht erreichen. Lokale Ausnahmen können auftreten, sie werden allerdings auf Grund der ungünstigen räumlichen Charakterisierbarkeit hier nicht weiter betrachtet.

Bei der Bewertung der für die Endlagerung relevanten Mächtigkeiten muss Folgendes beachtet werden: Die Opalinuston-Formationen bestehen fast durchgehend aus Tonsteinen. Dagegen setzt sich z. B. die Tongesteinsformation der marinen Unterkreide aus mehreren mehr oder weniger mächtigen Tongesteinshorizonten mit zwischengeschalteten Sedimenten bzw. Sand- und Siltsteinen zusammen. Beim Opalinuston wird deshalb die gesamte

System / Abteilung		Serie / Stufe	Norddeutschland		Süddeutschland	
			W	E	W	E
Tertiär	Quartär	ca. 1,8				
	Neogen	Pliozän				
		Miozän				
		Oligozän				
	Paläogen	Eozän				
		Paläozän				
Dan						
Kreide	Oberkreide	ca. 65				
		Mastricht				
		Campan				
		Santon				
		Coniac				
	Unterkreide	Turon				
		Cenoman				
		Alb				
		Apt				
		Barrême				
Jura	Oberjura (Malm)	ca. 145				
		"Serpulit"				
		"Münder Mergel"				
		"Eimbeckhäuser P.-K."				
		"Gigas-Schichten"				
		Kimmeridge				
	Mitteljura (Dogger)	"Korallenoolith"				
		"Heersumer Sch."				
		Callov				
	Unteljura (Lias)	Bathon				
		Bajoc				
		Aalen				
		Toarc				
Trias	Keuper	ca. 205				
		O	Rhät			
		M	"Steinmergelkeuper"			
		M	"Oberer Gipskeuper"			
		M	"Schilfsandstein"			
	Muschelkalk	U	"Unterer Gipskeuper"			
		U	"Lettenkeuper"			
	Buntsandstein	O	"Ob. Muschelkalk"			
		M	"Mittl. Muschelkalk"			
		M	"Unt. Muschelkalk"			
U		"Röt"				
U		"Solling-Folge"				
U		"Hardeggen-Folge"				
Perm	Oberperm (Zechstein)	ca. 250				
		"Möln-Zyklus"				
		"Friesland-Zyklus"				
		"Ohre-Zyklus"				
		"Aller-Zyklus"				
		"Leine-Zyklus"				
		"Staßfurt-Zyklus"				
	"Werra-Zyklus"					
Unterperm (Rotliegend)	Oberrotliegend					
	Unterrotliegend					

- Formation mit hohem Ton-/Tonsteinanteil
- regionale/lokale Verbreitung von Tongesteinen mit guter räumlicher Charakterisierbarkeit - besonders endlagerrelevant
- regionale/lokale Verbreitung von Tongesteinen mit stark eingeschränkter räumlicher Charakterisierbarkeit
- Formation mit höherem grobklastischen Anteil (Sandsteine, Siltsteine)

Abbildung 4.4: Stratigraphische Position von Tongesteinsformationen in Deutschland

Formation als Wirtsgestein betrachtet. Bei der marinen Unterkreide bzw. dem Unter- und Mitteljura Norddeutschlands sind die einzelnen Tonsteinhorizonte der Formation, die eine Mächtigkeit von mindestens 100 m aufweisen, getrennt zu betrachten und miteinander zu korrelieren.

4.1.1 Tongesteinsformationen des Jura

In Abbildung 4.5 ist die generelle Verbreitung von Tonen und Tonsteinen des Jura in Deutschland dargestellt. In Norddeutschland treten mächtige Tonsteine innerhalb des unteren und mittleren Jura auf. Bedingt durch eine weltweite Meeresausdehnung an der Wende Trias/Jura war das Norddeutsche Becken zu dieser Zeit fast vollständig ein mariner Ablagerungsraum. Im Verlaufe des unteren Jura kam es dann zu einem Wechsel zwischen Trans- und Regressionen des Meeres. Generell ist in Norddeutschland im unteren Jura 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.

Die marine Entwicklung setzt sich vom unteren in den mittleren Jura hinein fort. Auch hier existieren mehrere hundert Meter 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. Zusätzlich erfolgten Sandschüttungen von einem im Norden liegenden Deltabereich, dessen Sande sich zungenförmig bis fast an die Rheinische Masse erstrecken.

Die wichtigsten potenziellen Barrieregesteine für Süddeutschland wurden in der Studie der AG DEPONIE (1997) aufgeführt. Darin sind für die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern folgende Tonstein führende Schichten aus dem Jura berücksichtigt worden:

- Unterkreide: Baden-Württemberg – Lias β (untere und obere β -Tone)
- Unterkreide: Bayern – Lias δ und ϵ (Amaltheeton und Posidonienschiefer)
- Mittelkreide: Baden-Württemberg und Bayern – Dogger α (Opalinuston)

Die Tonsteine des unteren Jura erfüllen in Süddeutschland nicht 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). Der Opalinuston wurde im flachen, seit dem

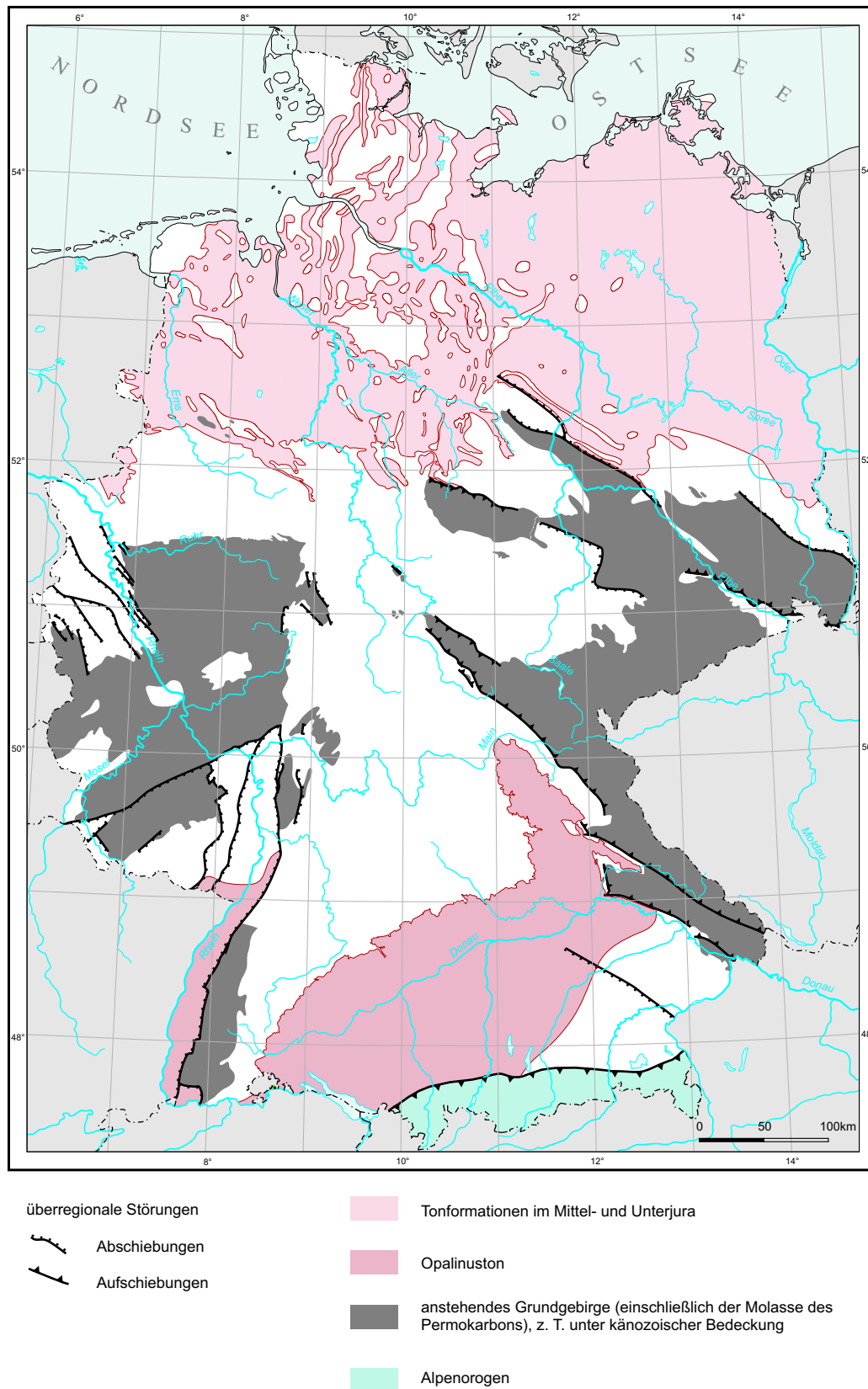


Abbildung 4.5: Schematische Verbreitung von Tonformationen im Jura

Unterjura bestehenden Epikontinentalmeer abgelagert (ZIEGLER 1982). Die nächstgelegenen Landgebiete waren einerseits das Vindelizische Land im Osten, andererseits das Alemannische Land im Bereich des heutigen Aar-Gotthard-Massivs. Das Alemannische Land wurde vermutlich während des Aalenium zumindest teilweise überflutet. Im Westen existierte eine Karbonatplattform, deren Ostrand vom Elsass in Richtung Südwesten bis Burgund verlief (OHMERT & ROLF 1994). Im Bereich des Molassebeckens erstreckt sich der Opalinuston über das südliche Baden-Württemberg nach Osten bis weit nach Bayern, wo die Verbreitungsgrenze (Südostgrenze gegen das Vindelizische Land) etwas östlich einer Linie Coburg, Amberg, Regensburg, München liegt (MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1996).

Der Opalinuston tritt auch im südlichen Teil des Oberrheingrabens auf. Die Grabenfüllung selbst enthält in erster Linie mächtige Sedimentpakete des Tertiär, diese werden von Süden bis zur Höhe von Heidelberg u. a. auch von tonigen Sedimentserien des Jura unterlagert. Der tektonische Bau des etwa 300 km langen und 35 km breiten Grabens ist insbesondere durch die aktiven Grabenrandstörungen östlich und westlich des Rheins sowie durch die zahlreichen Staffelbrüche innerhalb des Grabens charakterisiert. Bedingt durch den stark gestörten tektonischen Bau der Region ist einerseits davon auszugehen, dass die Tongesteine teilweise durch Kluft- und Auflockerungszonen gestört sind und andererseits, bedingt durch die synsedimentäre Wirkung dieser tektonischen Elemente, die entsprechenden Serien auch lithologisch sehr inhomogen ausgebildet sind und ihre Barrierefunktion deshalb ebenfalls schwer räumlich charakterisierbar ist. Auf Grund dieser ungünstigen tektonischen Verhältnisse und des teilweisen Ausschlusses durch die Ausweisung der Erdbebenzone größer eins (siehe auch LGRB 2005) werden sämtliche Tongesteinsformationen des Oberrheingrabens als nicht weiter untersuchungswürdig eingestuft.

4.1.2 Tongesteinsformationen der Kreide

Aus Abbildung 4.6 ist die generelle Verbreitung von Tonformationen der Kreide in Deutschland ersichtlich. Das Hauptverbreitungsgebiet toniger Sedimente dieses stratigrafischen Systems befindet sich in Norddeutschland. 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 Sande in dieses Becken transportiert. An den proximalen Enden der entsprechenden Schüttungsfächer verzahnen sich die mächtigen Sandkörper mit silttonigen Sedimenten, die in Richtung der beckenzentralen Regionen in die sapropelitischen

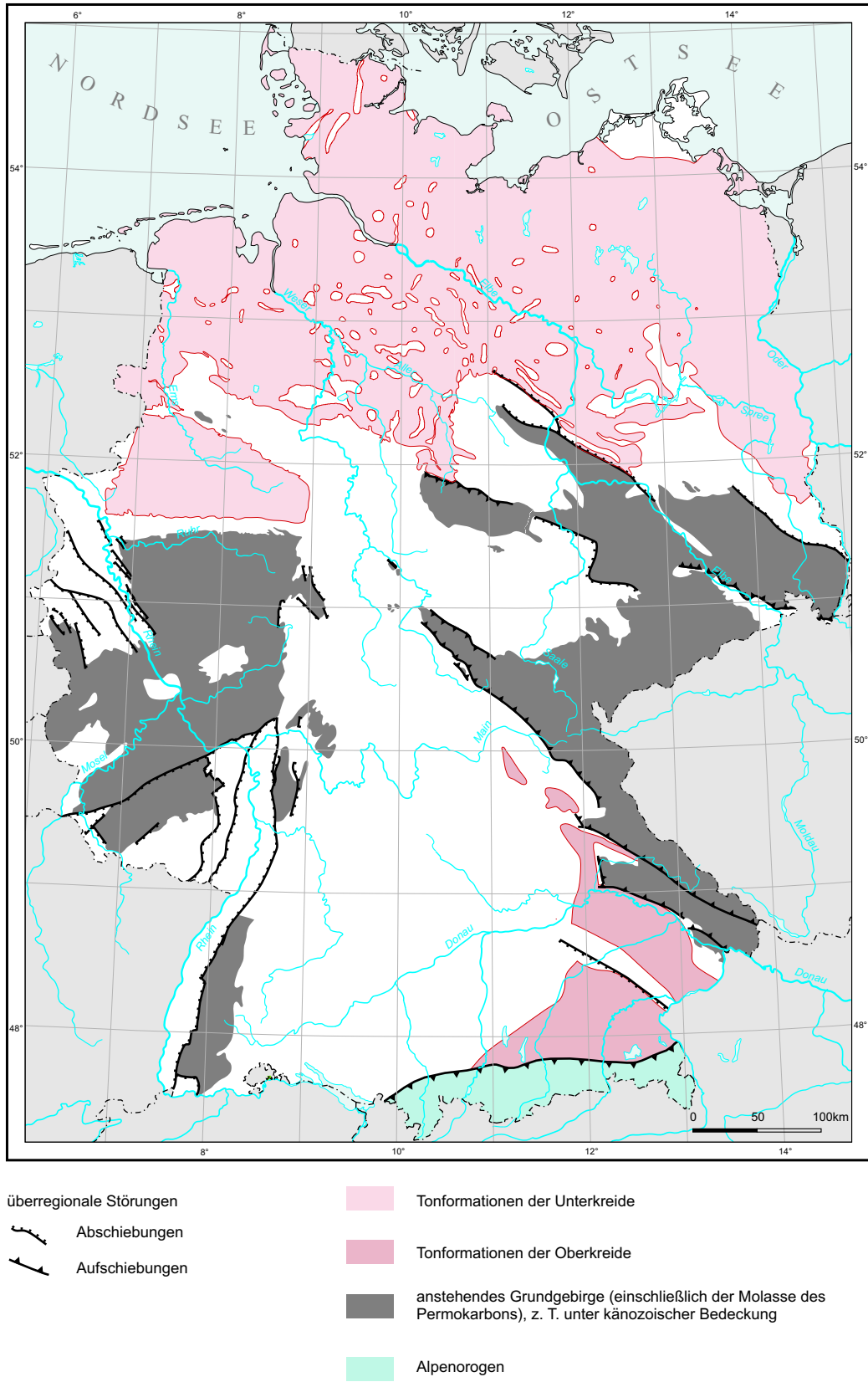


Abbildung 4.6: Schematische Verbreitung von Tonformationen der Kreide

Tonsteine übergehen. Schon gegen Ende des Wealden setzten vereinzelt Meeresvorstöße 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 in Nordwestdeutschland 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 Westen und Süden des Niedersachsen-Beckens auf.

In der nordöstlichen Verlängerung des Niedersachsen-Beckens erstreckte sich ein Sedimentationsraum von Südwestmecklenburg und Nordwestbrandenburg nach Osten bis nach Vorpommern und bis in die Niederlausitz. Ablagerungen des Wealden erreichen hier teilweise Mächtigkeiten bis 900 m (DIENER 1968). 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. In diesen Bereichen handelt es sich bei den entsprechenden Sedimentgesteinen überwiegend um Tonmergel- und Tonsteine. Die nördlichen und östlichen Regionen in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg weisen nur lückenhafte Profile und gleichzeitig einen hohen Anteil an Sandsteinen auf.

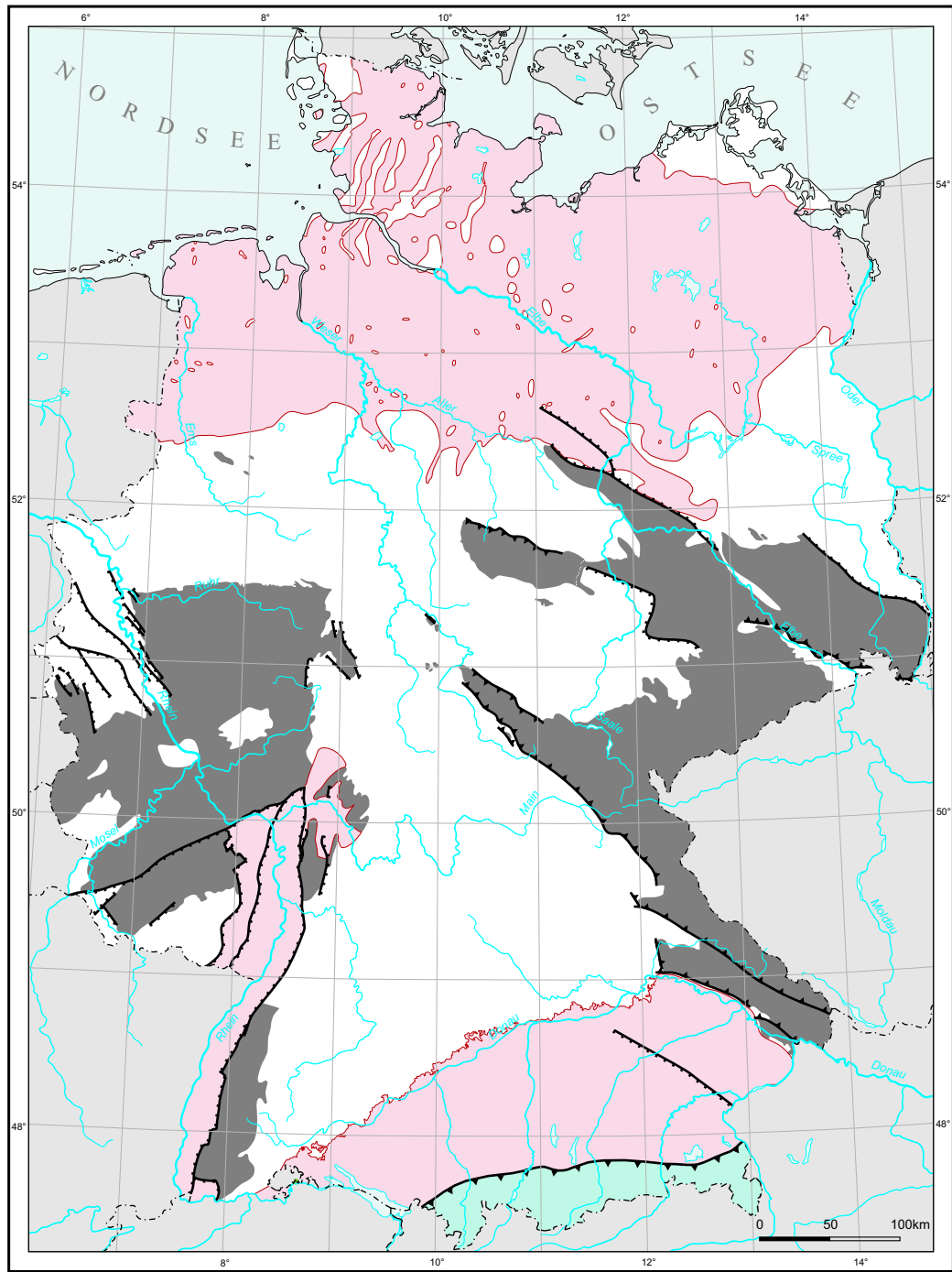
In Süddeutschland treten mächtigere tonige Sedimente in der Oberkreide Bayerns und hier speziell im Bereich der Wasserburger Senke und des Braunauer Troges auf. Nach UNGER & MEYER (1996) konnten in der Wasserburger Senke auch noch Sedimente der Unterkreide nachgewiesen werden. In dieser Senke beträgt die Mächtigkeit der Oberkreidesedimente mehr als 500 m, im Braunauer Trog hingegen bis zu 1000 m. 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 Alpenvorlandes.

Die detaillierte Auswertung von 16 Bohrungen (z. B. die Bohrungen Endorf 2, Albaching 2, Ampfing 1, Thanndorf 1, Birnbach1, Parkstetten 1) aus der Wasserburger Senke und dem

Braunauer Trog mit erbohrter Oberkreide ergab, dass in beiden Becken Tonmergel und Tonmergelsteine mit Mächtigkeiten >100 m vorkommen. Allerdings weisen diese Gesteinshorizonte in den einzelnen Bohrungen mehr oder weniger mächtige Sandsteineinschaltungen auf. Der aus den Profilbeschreibungen und den Bohrlochmessungen abgeschätzte Ton-/Tonsteinanteil des Gebirges beträgt meist nur 65 %. Nach Kapitel 3.2.1 können solche Gesteinsfolgen die Anforderungen hinsichtlich einer sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeit ($k_f < 10^{-10}$ m/s) zwar unter bestimmten Umständen erfüllen. Aus der Kopplung dieses Ton-/Tonsteinanteils mit einer sehr starken faziellen Variabilität der Ablagerungen ergibt sich jedoch die Schlussfolgerung, dass die Erfüllung der Grundanforderungen kaum erreichbar ist. Die Tonmergel der Oberkreide in der Wasserburger Senke liegen zusätzlich in Tiefenbereichen von über 1500 m. Aus diesen Gründen werden die Oberkreideablagerungen Bayerns nicht als eine Wirtsgesteinsoption für die Endlagerung gesehen.

4.1.3 Ton-/Tongesteinsformationen des Tertiär

Mächtige tonige Sedimentgesteine des Tertiär sind im Norddeutschen Becken, dem Oberrheingraben und dem Alpenvorlandbecken vorhanden. Wie aus Abbildung 4.7 hervorgeht, liegt das größte Verbreitungsgebiet tertiärer Tone und Tonsteine in Norddeutschland. Das Tertiär begann in diesem Raum mit einem beckenweiten Meeresrückzug, so dass erst mit den beckenweiten Transgressionen im Oberpaläozän und Eozän wieder marine Sedimente abgelagert wurden. Mächtige und weit verbreitete Tone bzw. Tonsteine treten in Norddeutschland im oberen Paläozän, im Eozän sowie im mittleren Oligozän und im Mittelmiozän auf. Die in Abbildung 4.7 dargestellte Verbreitungsgrenze bezieht sich für den norddeutschen Raum auf die tonigen Gesteinsserien des Oberpaläozän und des Eozän. Abbildung 4.8 zeigt die Tiefenlage der Oberfläche des Untereozän bis Paläozän, welche in etwa der Oberfläche dieser tonigen Gesteinsformationen entspricht. Die roten Farben weisen auf eine Tiefenlage >1500 m unter NN hin, grüne Farben kennzeichnen Gebiete, in denen diese Fläche zwischen 250 m und 1500 m unter NN liegt. Weiß markierte Flächen innerhalb des Verbreitungsgebietes sind zumeist durch Salzstrukturen charakterisierte Gebiete, in denen keine tonigen Sedimente existieren. Unter Beachtung der Geländehöhen ergibt sich aus der Tiefenlage der Oberfläche des Untereozän bis Paläozän einerseits die Schlussfolgerung, dass die entsprechenden Tonsteine wegen zu großer Tiefenlage in Teilen Schleswig-Holsteins und im Raum Hamburg die Mindestanforderungen nicht erfüllen. Andererseits scheiden große Teile von Südniedersachsen, Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern aus, da dort die geforderte Mindesttiefe von 300 m nicht erreicht wird. Zusätzlich geht aus der Analyse der entsprechenden Mächtigkeiten der to-








- | | |
|--|--|
| überregionale Störungen |  wesentliche Tonformationen im Tertiär |
|  Abschiebungen |  anstehendes Grundgebirge (einschließlich der Molasse des Permokarbons), z. T. unter känozoischer Bedeckung |
|  Aufschiebungen |  Alpenorogen |

Abbildung 4.7: Schematische Verbreitung von Tonformationen des Tertiär

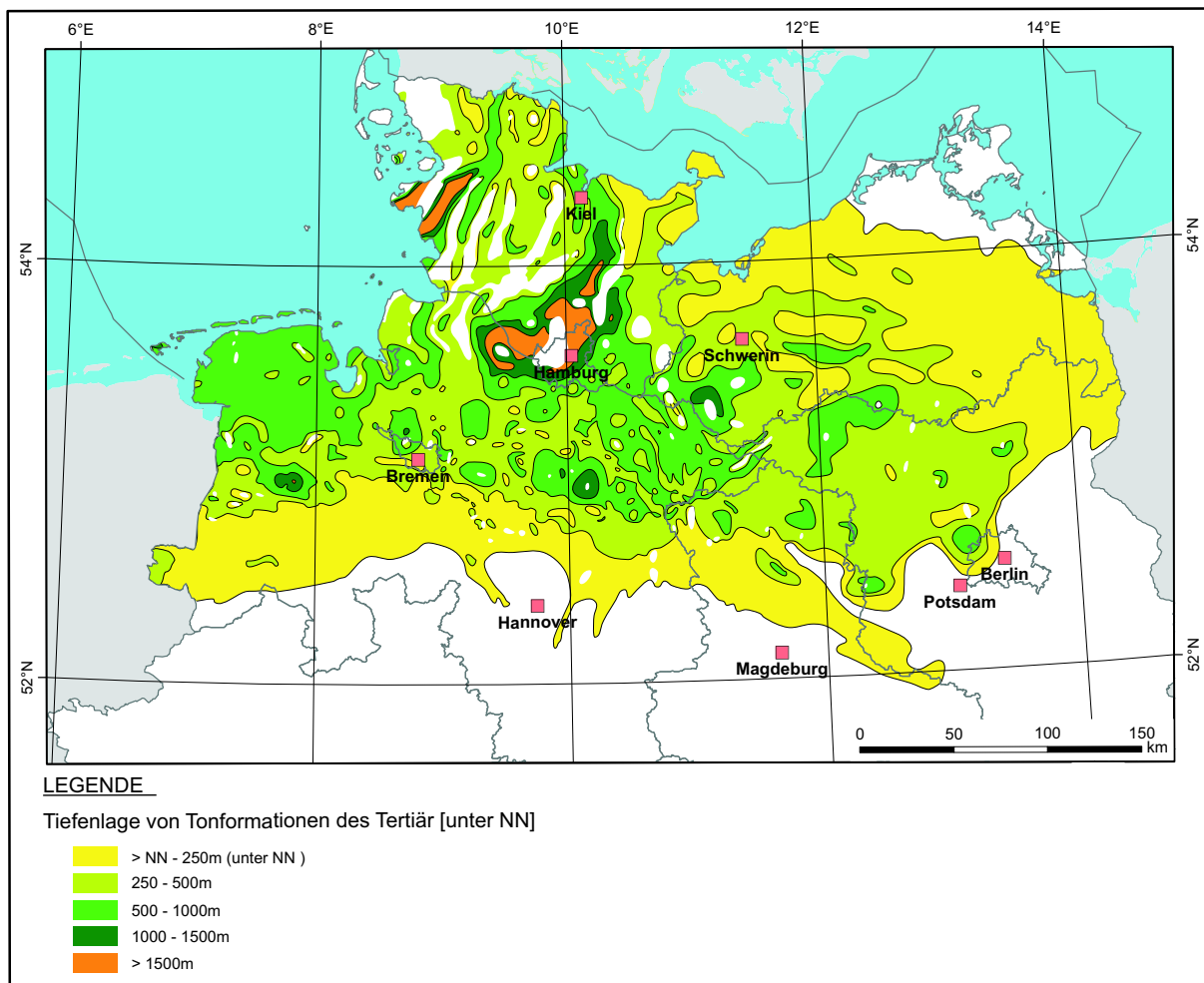


Abbildung 4.8: Tiefenlage von Tonformationen des Tertiär (Oberfläche Untereozän bis Paläozän)

nigen Gesteinsserien hervor, dass die geforderten Mindestmächtigkeiten in den südlichen Randbereichen des Beckens und im Osten Norddeutschlands (Teile von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern) ebenfalls nicht erreicht werden. Im Gegensatz dazu treten besonders hohe Mächtigkeiten vor allem im nördlichen Niedersachsen und in Teilen Schleswig-Holsteins auf.

Bei der Beurteilung der Wirtsgesteinseignung der Rupel-Tone des Oligozän in Norddeutschland muss zusätzlich beachtet werden, dass diese die wichtigste Barriere zwischen dem Salz- und dem Süßwasserstockwerk bilden und somit in der unmittelbaren Nähe zu Schutzgütern liegen.

Ein weiteres bedeutendes Verbreitungsgebiet von tertiären Tonen und Tonsteinen liegt im Oberrheingraben. Die Grabenfüllung selbst enthält in erster Linie mächtige tertiäre Sedimentpakete. Auf Grund der im Kapitel 4.1 beschriebenen ungünstigen tektonischen und

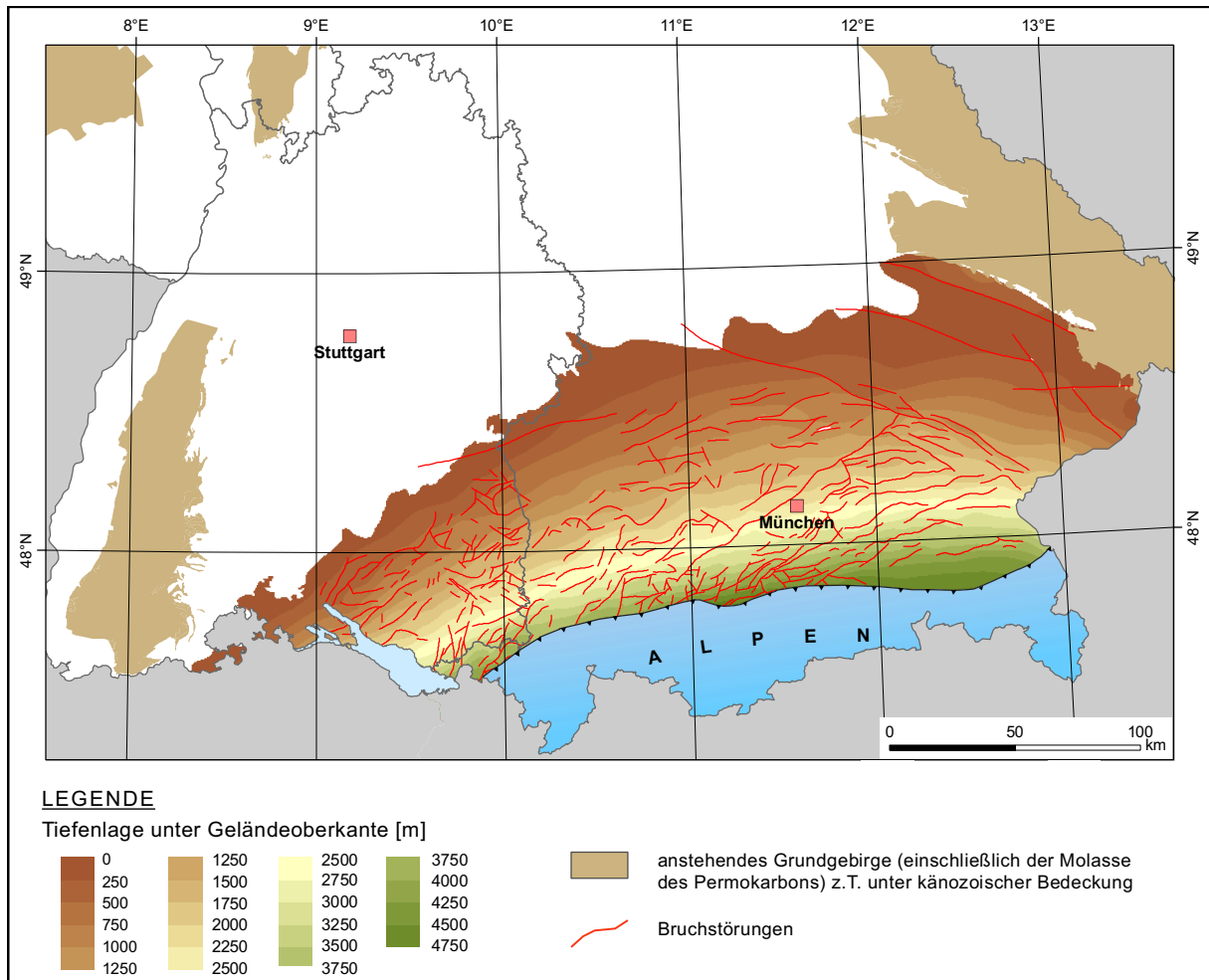


Abbildung 4.9: Tiefenlage der Basis Tertiär im Alpenvorlandbecken

lithologischen Verhältnisse werden diese Ton-/Tongesteinsformationen in den folgenden Darstellungen jedoch nicht weiter betrachtet.

Die tertiären Schichten des Alpenvorlandbeckens (Abbildung 4.9) erreichen im Norden mit etwa hundert Metern ihre geringsten Mächtigkeiten, in Richtung auf den Alpenrand steigen die Mächtigkeiten bis auf etwa 5000 m an (siehe z. B. GEYER & GWINNER 1991; FREUDENBERGER & SCHWERD 1996; ROHRMÜLLER 2003; DRONG 2003). Südlich der Grenze der alpinen Überschiebung sind sogar noch weit höhere Mächtigkeiten erbohrt worden. Durch die Vielzahl von Bohrungen der Erdölindustrie ist nachgewiesen, dass die entsprechenden Ablagerungen neben grobklastischen (Sandsteine, Konglomerate) auch mächtige feinklastische (Ton- und Siltsteine) und untergeordnet auch karbonatische Sedimentgesteine enthalten.

Einen guten Überblick über die gesamte fazielle Entwicklung der Tertiärsedimente geben z. B. SCHWERD et al. (1996). Im unteren Oligozän überwog der marine Einfluss und in der Abfolge der so genannten unteren Meeresmolasse sind vor allem in Alpenrandnähe auch Tonmergelschichten ausgebildet. Die darüber folgende untere Süßwassermolasse (oberes Oligozän) besitzt ebenfalls Tonmergelschichten, allerdings in nicht so großer Mächtigkeit. Zwischen unterer Süßwassermolasse und der später im Untermiozän abgelagerten oberen Meeresmolasse existiert eine Schichtlücke. Tonige und feinsandige Schluff- bzw. Siltsteine repräsentieren die feinklastischen Gesteine dieses Sedimentationsabschnittes. Nach dem Rückzug des Meeres sedimentierte vom Mittel- bis zum Obermiozän die obere Süßwassermolasse. Auch die Ablagerungen dieses Abschnittes enthalten neben sandigen Sedimenten und sehr karbonatreichen Mergelsteinen Silt- und Tonsteine, die allerdings teilweise Braunkohle führen.

Die während dieser unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen zur Ablagerung gelangten tonigen Gesteine stellen teilweise gute hydrogeologische Barrieren dar. Allerdings bedingten die sehr wechselhaften Ablagerungsbedingungen (fluviale Rinnen, Überschwemmungsebenen, lakustrische und marine Ablagerungsbereiche) im Alpenvorlandbecken eine komplizierte Konfiguration der Sedimentkörper (siehe auch NAGRA 2005). Auf Grund dieser Gegebenheiten ist die räumliche Charakterisierbarkeit von Tonsteinen, welche die Mindestanforderungen erfüllen, als nur sehr eingeschränkt zu beurteilen.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass die Tone und Tonsteine des Tertiär als hydrogeologische Barrieren von großer Bedeutung sind. Neben den bereits erläuterten Einschränkungen hinsichtlich der Erfüllung der Mindestanforderungen und ihrer Charakterisierbarkeit ergeben sich jedoch weitere Einschränkungen im Hinblick auf ihre Wirtsgesteinseignung. Auf Grund des zum großen Teil nur geringen bis sehr geringen Verfestigungsgrades der tertiären Tonsedimente muss zumindest in den oberen Bereichen des in Frage kommenden Tiefenbereiches (zwischen 300 m und etwa 500 m) davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Gesteinen auf Grund des Alters der Sedimente und der bisher erfahrenen nur geringen Temperatur- und Kompaktionsbelastung noch um Tone oder bestenfalls um Gesteine im Übergangsbereich zu Tonsteinen handelt. Auf Grund der sich daraus ableitenden ungünstigen geomechanischen Eigenschaften und der Empfindlichkeit gegenüber deutlichen Temperaturerhöhungen (mineralogische Reaktionen) ist ihre potenzielle Eignung als Wirtsgestein in Deutschland entscheidend eingeschränkt. Tonsteine des Oberpaläozän und des Eozän Norddeutschlands und der unteren Meeres- und unteren Süßwassermolasse Süddeutschlands werden daher nicht weiter betrachtet.

4.2 Abgrenzung untersuchungswürdiger Teilgebiete

Nach den Darstellungen zur generellen Verbreitung von Ton- und Tongesteinsformationen werden im nächsten Schritt die aus geologischer Sicht im Hinblick auf eine mögliche Wirtschaftseignung als weiterhin untersuchungswürdig klassifizierten Tongesteinsformationen der folgenden stratigrafischen Einheiten regional weiter eingegrenzt:

Unterjura (Lias)	Norddeutschland	Kapitel 4.2.1
Mitteljura (Dogger)	Norddeutschland/Süddeutschland	Kapitel 4.2.2/4.2.4
Unterkreide	Norddeutschland	Kapitel 4.2.3

Die Abgrenzung von untersuchungswürdigen Regionen mit Ton-/Tonsteinformationen der oben genannten Gesteinsformationen bzw. stratigrafischen Schichten erfolgt durch eine schrittweise Bearbeitung unter Berücksichtigung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 3.6.2 und 3.6.3).

Zusätzlich ist zu beachten, dass bei Tongesteinsformationen unterhalb von 1000 m Tiefe mit sehr schwierigen gebirgsmechanischen Verhältnissen zu rechnen ist, die extreme Aufwendungen bei der bergmännischen Erschließung und dem Betrieb eines Endlagers nötig machen würden. Neben diesen felsmechanischen Aspekten ist für die Wahl der Maximaltiefe eines Endlagerbergwerkes vor allem auch die Temperatur im Einlagerungsbereich zu berücksichtigen. Aus diesen beiden Gesichtspunkten wird für ein Endlagerbergwerk eine maximale Tiefe von 1000 m bevorzugt (vgl. Kapitel 3.6.3).

Weitere geologische Gegebenheiten, die einer ausreichenden Prognostizierbarkeit und der räumlichen Charakterisierung entgegenstehen, sind extrem steile Lagerungsverhältnisse in der Nähe von Salzstrukturen oder Störungen und lang gestreckte, schmale Flächen. Letztere schränken die Möglichkeiten der Anlegung von Einlagerungsstrecken entscheidend ein und stellen somit keine günstige geologische Gesamtsituation dar.

Für die Ausweisung von untersuchungswürdigen Teilgebieten wurde die Anwendung der in Kapitel 3.6 genannten Kriterien in einzelnen Schritten vollzogen. Das Verfahren wird am Beispiel der Tongesteinsformationen des Unterjura in Norddeutschland und für die Opalinuston-Formation in Süddeutschland exemplarisch dargestellt. Die nachfolgend diskutierten Kartendarstellungen beziehen sich dabei überwiegend auf stratigrafisch und z. T. auch geophysikalisch abgrenzbare Gesteinsformationen, die überwiegend aus tonigen Gesteinen bestehen. Die dargestellten Mächtigkeiten der Schichten verkörpern also keinen hundertprozentigen Anteil an Ton bzw. Tonstein.

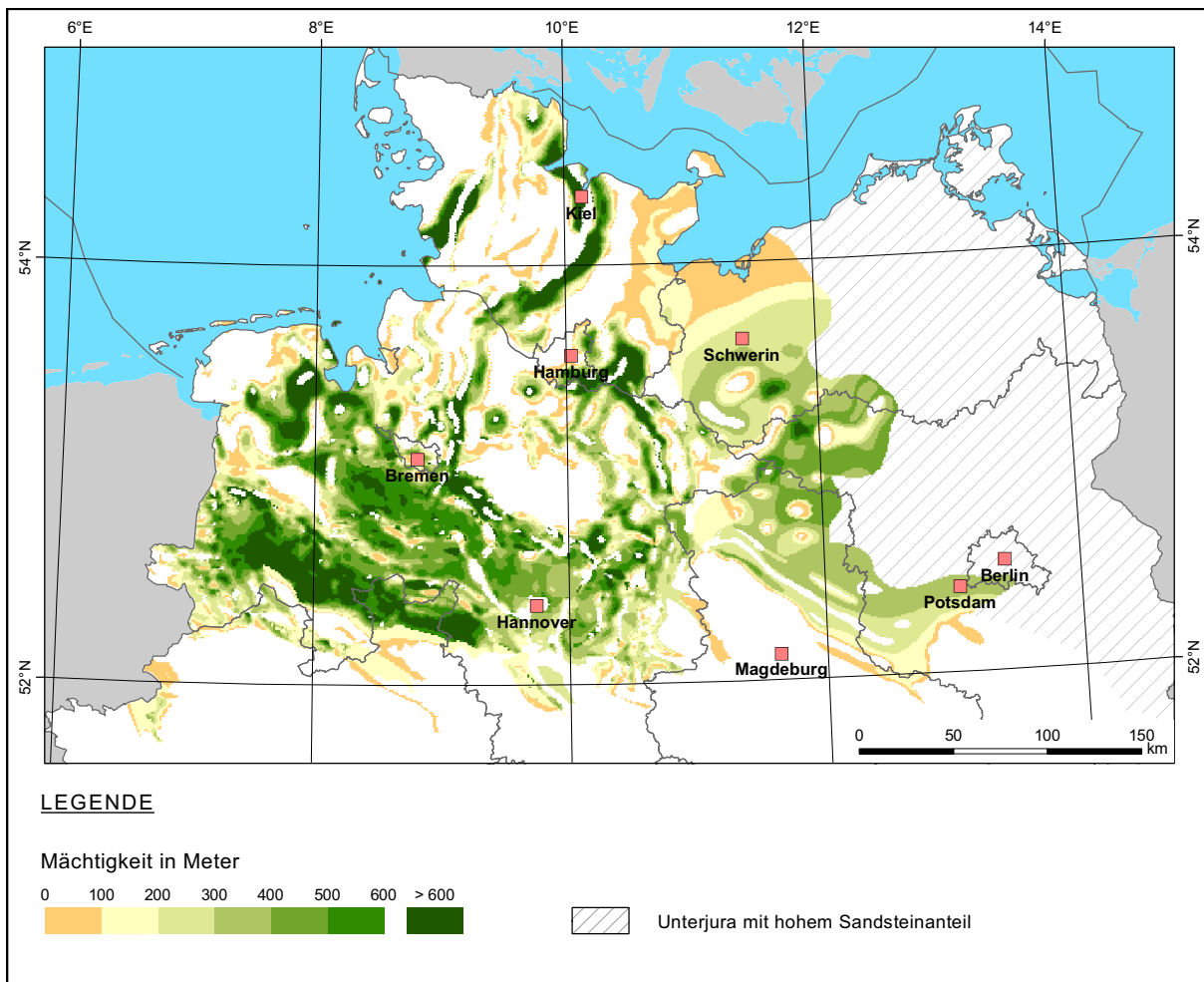


Abbildung 4.10: Mächtigkeit des Unterjura in Norddeutschland

4.2.1 Norddeutschland - Unterjura

Der Unterjura ist in Norddeutschland zwischen 100 m und maximal etwa 1500 m mächtig (siehe Abbildung 4.10). Die größten Mächtigkeiten liegen in Nordwestdeutschland, sie konzentrieren sich dort einerseits auf zwei in etwa Nordwest-Südost streichende und etwa 50 km breite Zonen in Niedersachsen (zentraler nordwestlicher Teil des Norddeutschen Beckens und Niedersachsen-Beckens) und andererseits auf rheinisch (Nordnordost-Südsüdwest) gerichtete Senken bzw. Becken. Die Bildung Letzterer steht zumindest teilweise mit Bewegungsvorgängen der Permsalinare im Zusammenhang. Der so genannte „Gifhorn-Hamburger Trog“ ist ebenfalls durch sehr hohe Mächtigkeiten charakterisiert. Die lokal in diesen Gebieten erbohrten und bis zu 1500 m mächtigen Gesteinsserien enthalten vor allem mehr oder weniger kalkig bis mergelige, dunkel gefärbte Tonsteine. Im Gegensatz dazu sind in vielen anderen Gebieten von Niedersachsen und Schleswig-Holstein nur noch Restmächtigkeiten des Unterjura vorhanden bzw. die Ablagerungen

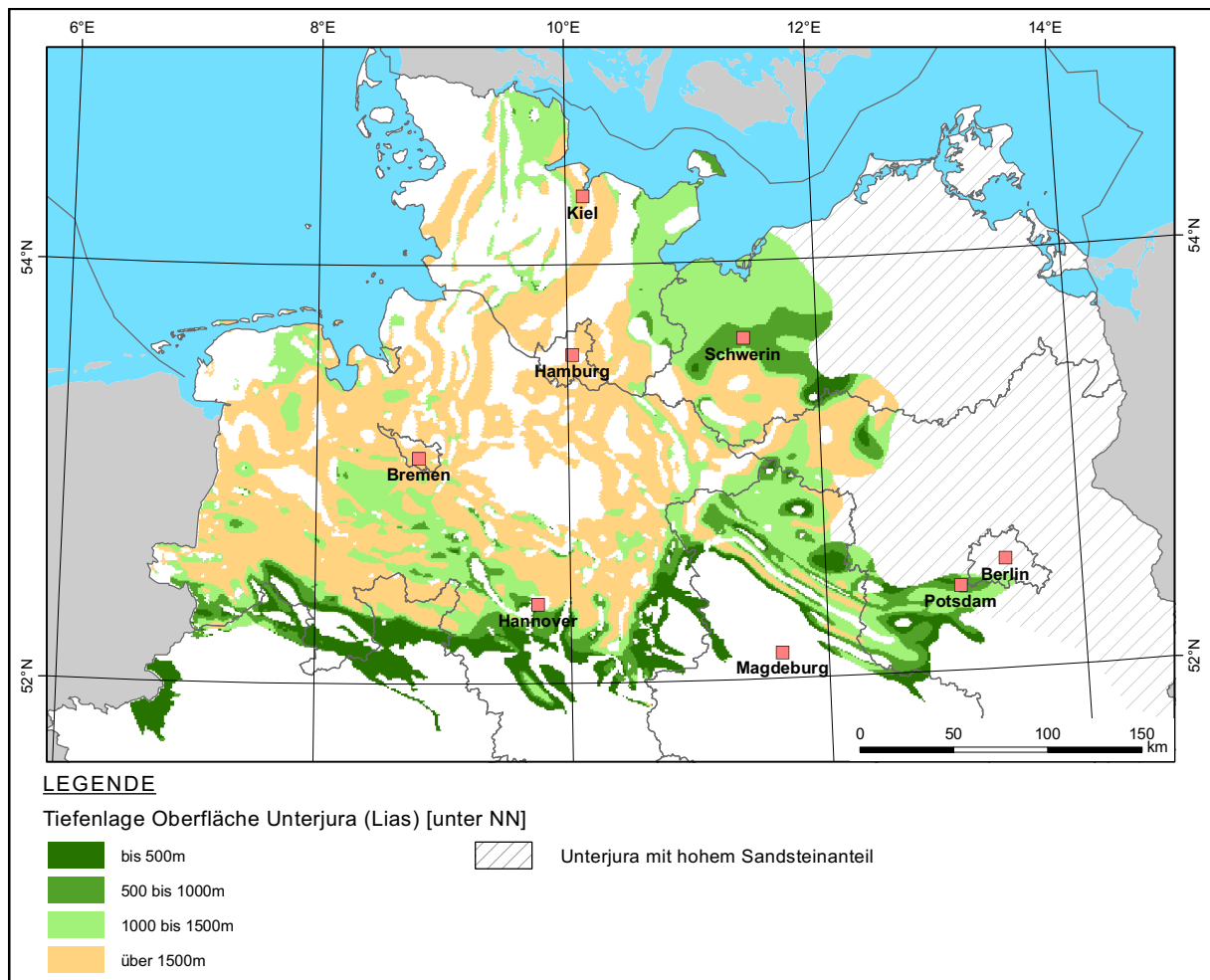


Abbildung 4.11: Tiefenlage der Oberfläche des Unterjura in Norddeutschland

fehlen völlig. Im östlichen Teil Norddeutschlands sind überwiegend Mächtigkeiten zwischen 100 m und 400 m vorhanden, höhere Mächtigkeiten von bis zu 800 m treten im Osten des Norddeutschen Beckens nur lokal stark begrenzt auf.

Generell lassen sich bei den Ablagerungen des Unterjura zwei wesentliche Faziesräume unterscheiden (BRAND & HOFFMANN 1963; KÖLBEL 1968; TESSIN et al. 1975). Einer durch Ton- bis Tonmergelsteine geprägten Beckenfazies steht ein küstennaher und vor allem durch gröber klastische Sedimente geprägter Faziesraum gegenüber. Der wichtigste und auch ökonomisch bedeutendste Leithorizont der Beckenfazies ist der Posidonienschiefer des unteren Toarc. Dabei handelt es sich um einen etwa 20 m bis 40 m mächtigen Ton- bis Mergelsteinhorizont, der bis zu 15 % Anteil an organischem Kohlenstoff besitzen kann. Dieser Horizont ist in den Gamma Ray Logs der Bohrungen auf Grund der erhöhten natürlichen Radioaktivität und auch im seismischen Bild auf Grund seiner unterschiedlichen petrophysikalischen Eigenschaften im Vergleich zu den umgebenden

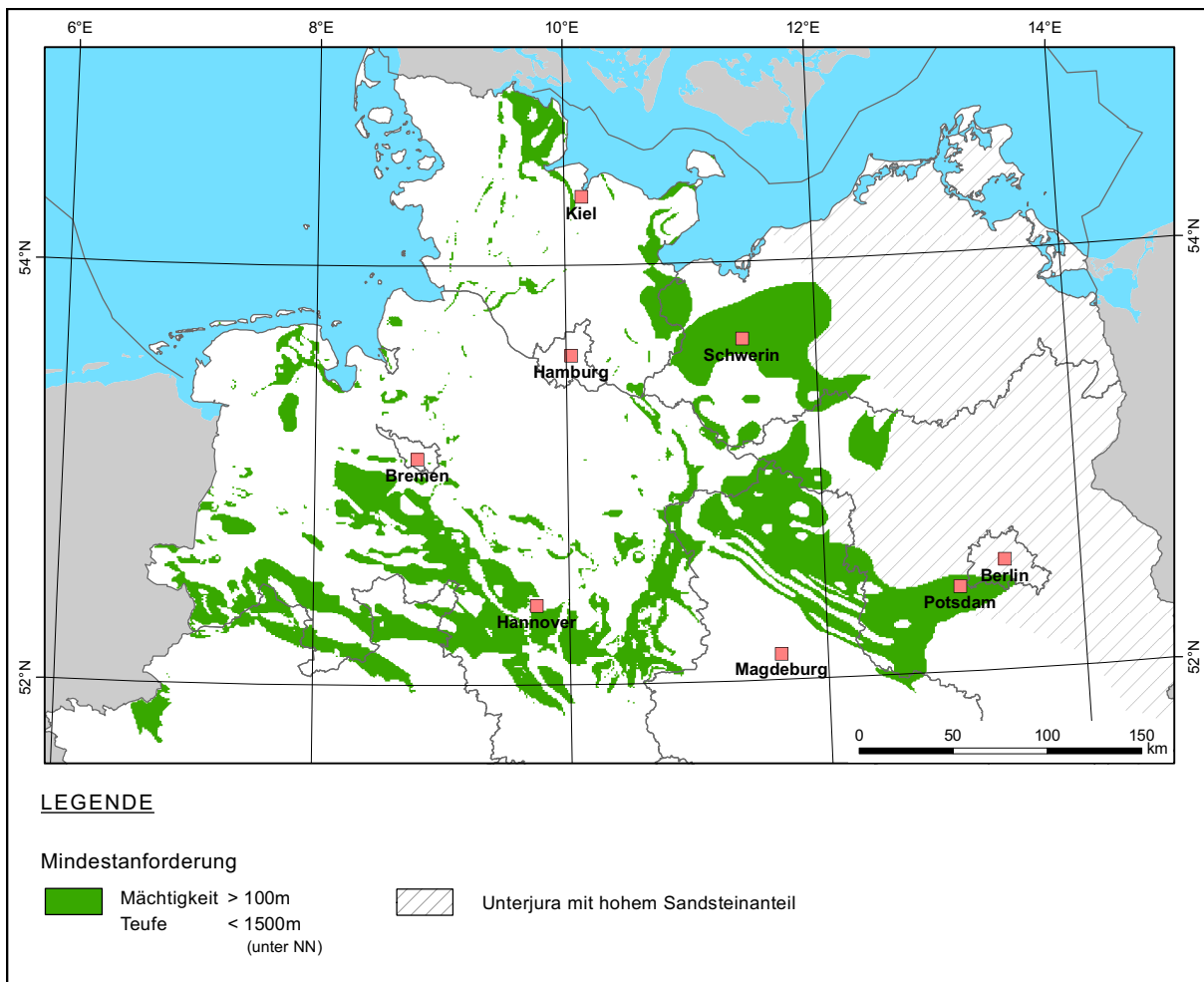


Abbildung 4.12: Unterjura: Anwendung der AkEnd-Kriterien „Mächtigkeit und Tiefenlage“

Gesteinen sehr gut zu erkennen. Er stellt ein wichtiges Erdölmuttergestein dar, welches zur Erdölbildung in Nordwestdeutschland beigetragen hat (BINOT et al. 1993; KOCKEL et al. 1994). Im östlichen Teil des Norddeutschen Beckens ist der Posidonienschiefer in Westmecklenburg, im nordwestlichen Teil Brandenburgs und in der Altmark ebenfalls nachgewiesen. Weiter nach Osten zu nimmt der Gehalt an organischer Substanz immer weiter ab und östlich einer Linie, die in etwa von Rostock nach Brandenburg verläuft, ist der Posidonienschiefer nicht mehr vorhanden. Nach den von TESSIN et al. (1975) erarbeiteten lithologisch-paläogeografischen Karten des Unterjura folgt die Grenze der beiden oben beschriebenen Faziesräume in etwa der Verbreitungsgrenze des Posidonienschiefers bzw. seiner Äquivalente. Im Unterschied zum westlichen (marinen) Faziesraum treten in den östlichen Bereichen zahlreiche Sandsteinhorizonte auf. Die entsprechenden Sande sind sowohl von Nordosten als auch von Süden in den Ablagerungsraum des Norddeutschen Beckens transportiert worden.

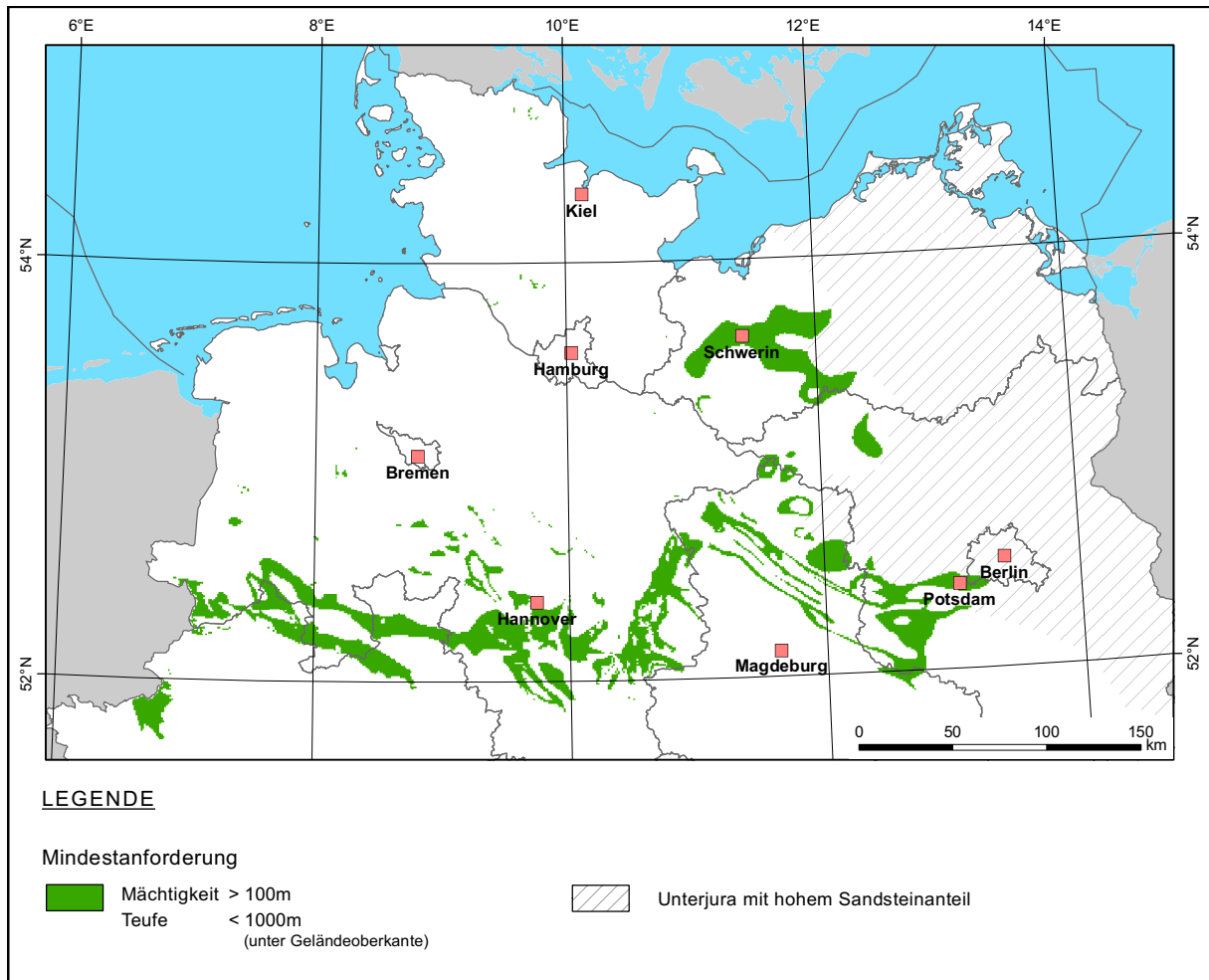


Abbildung 4.13: Unterjura: Anwendung der wirtgesteinsspezifischen Kriterien

Die Auswertung der Bohrungen nach der in Kapitel 3.2.1 dargestellten Methode (siehe Abbildung 3.2) hat gezeigt, dass die vorhandenen lithologisch-paläogeografischen Karten (ZGI 1978) dazu geeignet sind Regionen abzugrenzen, in denen vorwiegend Sand- und Siltsteine und nur untergeordnet Tonsteine auftreten. Deshalb ist davon auszugehen, dass in den östlichen Teilen von Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern auf Grund der zahlreichen und mächtigen Sandsteineinschaltungen keine tonigen Gesteinsformationen auftreten, welche die Mindestanforderung an die homogene Mächtigkeit (>100 m) erfüllen und die geforderte Gebirgsdurchlässigkeit von $k_f < 10^{-10}$ m/s erreichen. Der Unterjura ist daher in diesem Bereich von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen worden. Um einen Sicherheitspuffer zu gewährleisten, ist die entsprechende Grenzlinie in Anlehnung an die Verbreitung der grünen Serie des Toarc (Name wird bestimmt durch das Auftreten grünlich-grauer Tonmergel- und Siltsteine) gezogen worden. In den Abbildungen 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 und 4.14 ist der Unterjura mit einem hohen Sandanteil durch eine Schraffierung gekennzeichnet.

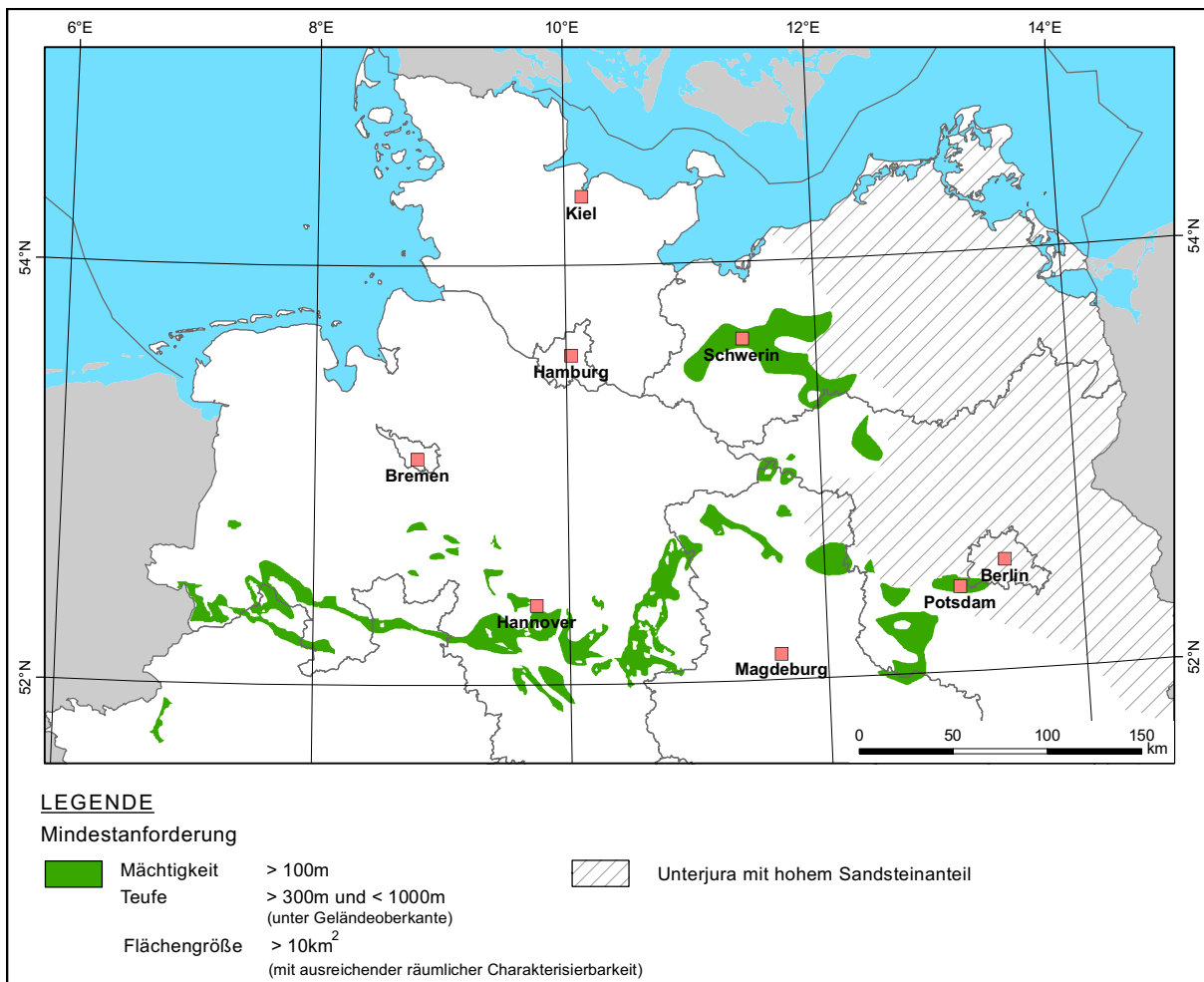


Abbildung 4.14: Unterjura: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6

In Abbildung 4.11 ist die Tiefenlage der Oberfläche des Unterjura dargestellt. Bereiche mit Tiefenlagen kleiner als 1500 m sind in grünen Farben dokumentiert. Aus der Abbildung geht deutlich hervor, dass die Tongesteinsformationen des Unterjura in vielen Regionen Norddeutschlands in zu großen Tiefen liegen und deshalb für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen in einem Bergwerk nicht in Frage kommen. Allein das Kriterium Tiefenlage führt somit zu einer deutlichen Begrenzung der untersuchungswürdigen Teilgebiete.

Eine weitere regionale Abgrenzung kann durch die Kombination der Daten zur Tiefenlage der Unterjura-Oberfläche mit den Mächtigkeitsdaten erfolgen (Abbildung 4.12). Aus der Überlagerung beider Darstellungen ergeben sich die Teilgebiete, die den sicherheitsgerichteten Mindestanforderungen zur Mächtigkeit (100 m) von Gesteinstypen mit einer geringen Gebirgsdurchlässigkeit ($k_f < 10^{-10}$ m/s) sowie zur Tiefenlage (1500 m) entsprechen. Die verbleibenden Flächen liegen in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und untergeordnet auch in Schleswig-Holstein und Nordrhein-Westfalen.

In einem nächsten Schritt der Abgrenzung wurden folgende weitere Gesichtspunkte und Kriterien berücksichtigt:

- Tiefe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von mindestens 300 m;
- maximale Endlagertiefe von 1000 m;
- der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung von mindestens 10 km² verfügen und ausreichend räumlich charakterisierbar sein;
- keine steilen Lagerungsverhältnisse in der Nähe von Salzstrukturen oder Störungen.

Berücksichtigt man diese Kriterien, so verbleiben die in Abbildung 4.14 dargestellten Teilgebiete in Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern als weiterhin untersuchungswürdig im Hinblick auf das Wirtsgestein Tonstein im Unterjura Norddeutschlands.

4.2.2 Norddeutschland - Mitteljura

Im Vergleich zu den tonigen Formationen des Unterjura ist der Mitteljura durch wesentlich inhomogenere Verhältnisse (häufige lithofazielle Wechsel in lateraler und vertikaler Richtung) gekennzeichnet. Daher erfordert die Analyse des Mitteljura im Hinblick auf die Bewertung von Tonsteinen als mögliche Wirtsgesteine für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle eine besonders detaillierte Bearbeitung.

Die in Abbildung 4.15 dargestellte Verbreitung des Mitteljura in Norddeutschland basiert auf verschiedenen Quellen (SCHÖN et al. 1988; DIENER et al. 1989, 1990; DIENER & WORMBS 1990; DIENER et al. 1992b, a, 1991; WORMBS 1989; GEOPHYSIK LEIPZIG 1989; BALDSCHUHN et al. 2001). Mit Hilfe von Bohrdaten wurden die daraus abgeleiteten Verbreitungsgrenzen überprüft und gegebenenfalls korrigiert.

Nach den Untersuchungen sind die mächtigen Tongesteinsformationen in Nordwestdeutschland sehr weitflächig verbreitet, im Gegensatz zum Nordosten Deutschlands, wo sie eher regional und teilweise nur lokal auftreten. Die Mächtigkeit des Mitteljura variiert zwischen 10 m und mehr als 1000 m. Sehr große Mächtigkeiten treten im östlichen und westlichen Glückstadtgraben, in der Braunschweig-Gifhorn-Zone sowie in den primären und sekundären Randsenken einiger Salzstöcke auf. Im südlichen Niedersachsen wird der

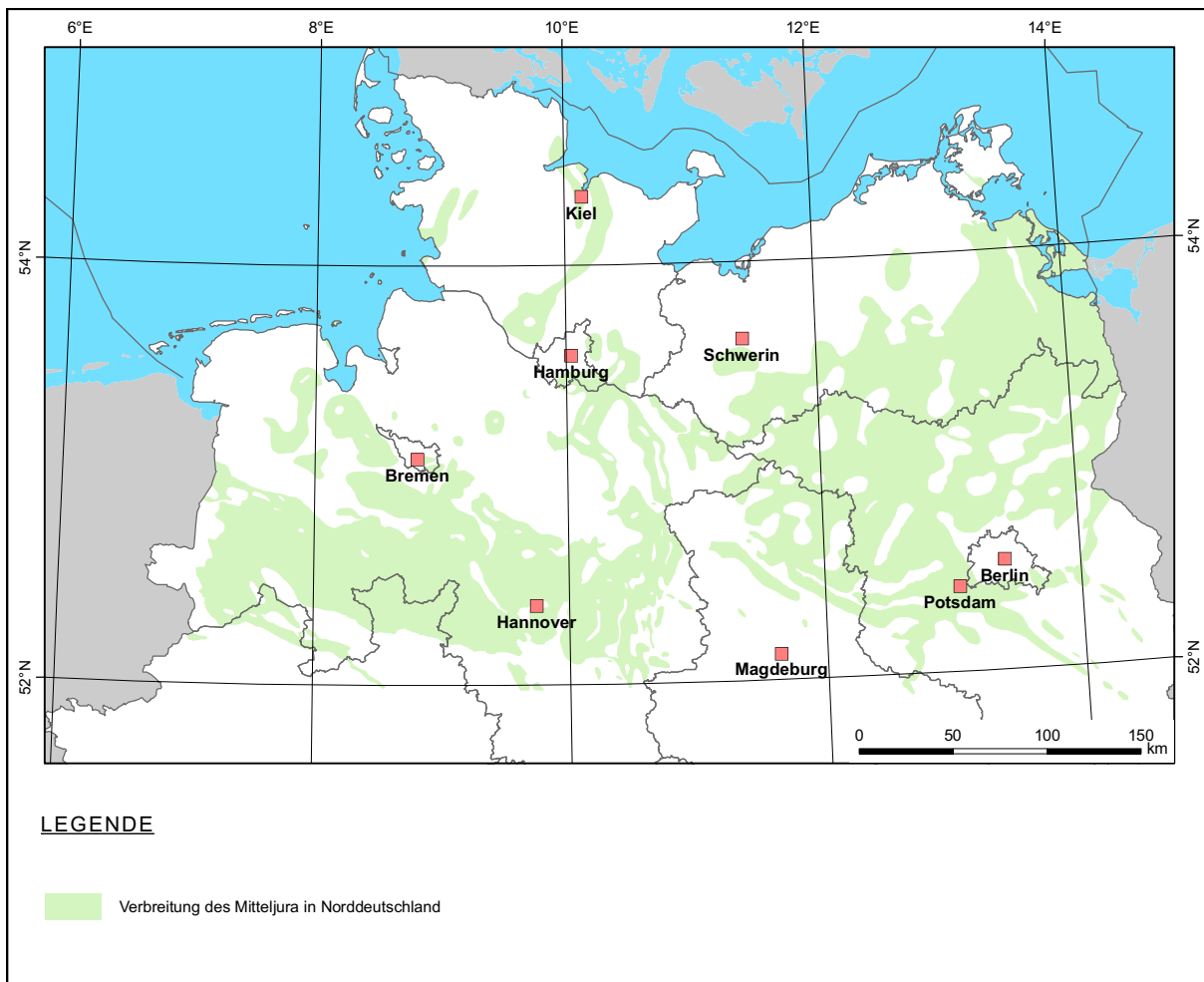


Abbildung 4.15: Verbreitung des Mitteljura in Norddeutschland

Mitteljura lokal ebenfalls über 800 m mächtig. Geringe Mächtigkeiten (bis 100 m) treten im Wesentlichen nahe der Ausbisslinie des Mitteljura auf. Außerdem sind die östlichen Gebiete Mecklenburg-Vorpommerns und Brandenburgs durch geringere Mächtigkeiten (bis maximal 220 m) gekennzeichnet.

Die Analyse der Bohrungen ergab, dass über 100 m mächtige Tongesteinsformationen in unterschiedlichen Stufen des mittleren Jura auftreten und dass diese sich im Hinblick auf ihre fazielle Ausbildung stark unterscheiden. Tonsteine sind zwar die dominierenden Gesteinstypen der erbohrten Sedimentfolgen. Die zahlreichen Einlagerungen und Einschaltungen von Siltsteinen, Sandsteinen und Kalksteinen führen jedoch dazu, dass in vielen Regionen der Ton- bzw. Tonsteinanteil des Gebirges unterhalb von 60 % liegt. Damit sind diese entsprechenden Regionen von weiteren Untersuchungen auszugrenzen, da die geforderte geringe Gebirgsdurchlässigkeit nicht flächendeckend vorliegt bzw. nicht gesichert ist.

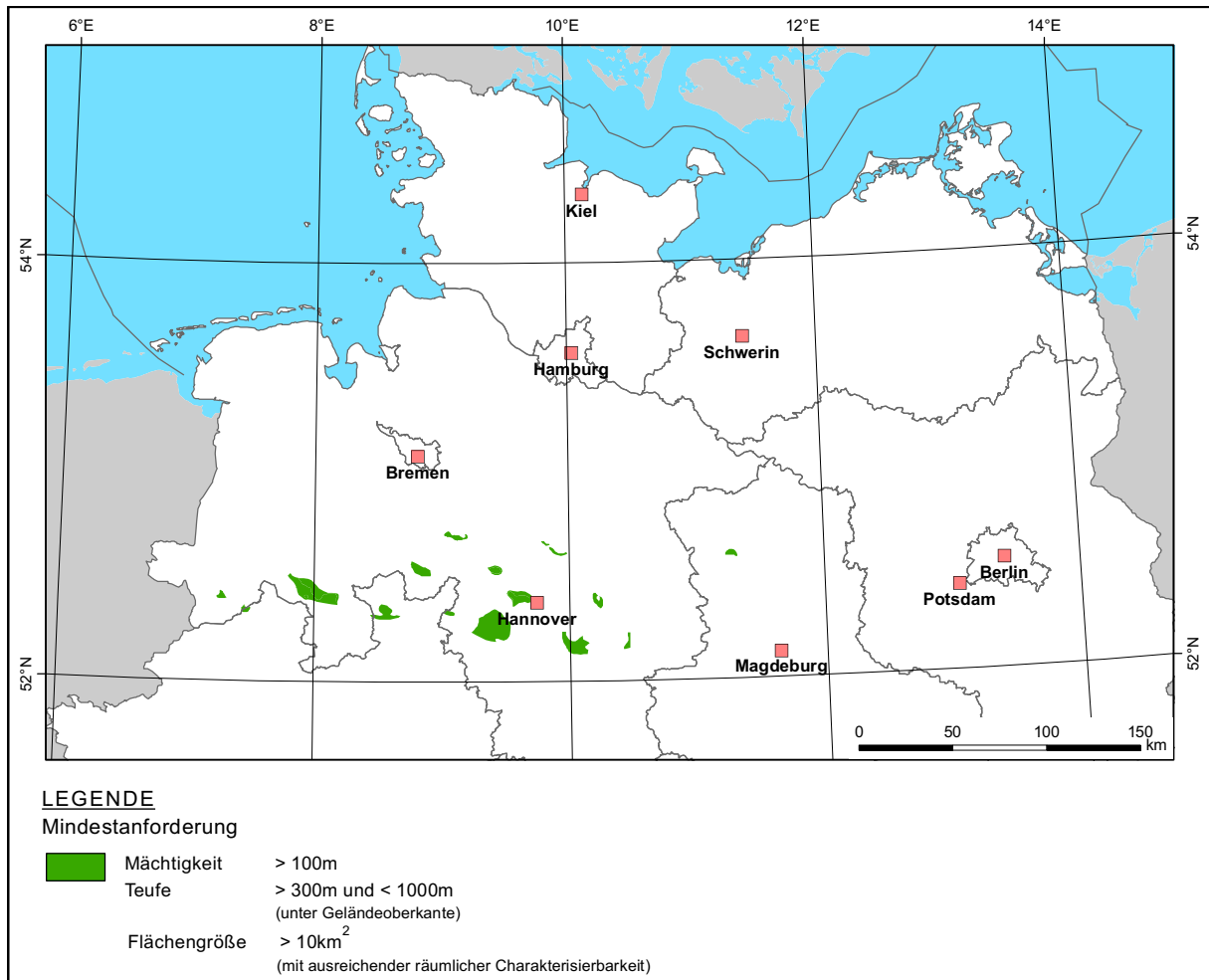


Abbildung 4.16: Mitteljura: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6

Die Oberfläche des Mitteljura liegt in weiten Teilen Nordwestdeutschlands in Tiefen größer als 1400 m unter Geländeoberkante. Die größten Tiefen (>3000 m) treten im östlichen und im westlichen Glückstadt-Graben auf. Im Bereich der Niedersachsen-Scholle liegt die Oberfläche des Mitteljura vielfach zwischen 300 m und 1400 m tief. In Nordostdeutschland liegt die Oberfläche in Tiefen zwischen 500 m und 1500 m. Tiefenlagen oberhalb 300 m treten im äußersten Süden und Südosten auf, also in den Randbereichen des ehemaligen Sedimentationsbeckens, bzw. sie sind an Salzstrukturen gebunden.

Mittels des gleichen iterativen Vorgehens wie in Kapitel 4.2.1 lassen sich die Teilgebiete abgrenzen, in denen die Tongesteinsformationen des Mitteljura die geowissenschaftlichen Mindestanforderungen (Mächtigkeit, Tiefenlage, Verbreitung und Durchlässigkeit bzw. Tonanteil) erfüllen. Die in Abbildung 4.16 dargestellten Flächen sind im Vergleich zu denen des Unterjura räumlich wesentlich stärker begrenzt und es verbleiben Teilgebiete in einer

Flächenerstreckung zwischen 15 km² und 500 km², die sich überwiegend im südlichen Niedersachsen befinden.

4.2.3 Norddeutschland - Unterkreide

Die generelle Verbreitung von Tongesteinsformationen der Kreide ist aus Abbildung 4.6 ersichtlich. Wie bereits in Kapitel 4.1.2 dargestellt, kommen für die weitere Abgrenzung nur Regionen mit tonigen Unterkreideablagerungen in Betracht. Vereinfachend lässt sich die Unterkreide in Norddeutschland in drei große zeitliche Abschnitte unterteilen. Der erste Abschnitt stellt einen Übergang von der Entwicklung im jüngsten Jura dar. Dabei wurden Sedimente in brackischen und evaporitischen Faziesräumen abgelagert (Münder Mergel, Serpultit). Später folgten stark limnisch beeinflusste sandig-tonige Sedimente (Wealden) mit teilweise marinen Horizonten. Der zweite Abschnitt beginnt mit dem Valangin bzw. Hauterive. In diesem Zeitabschnitt erfolgten Transgressionen des Meeres, die zur Ablagerung von marinen Sedimenten führten. Über einem charakteristischen sandig-kalkigen Transgressionshorizont sind in den beckenzentralen Bereichen im Zeitraum Valangin bis Apt deshalb vor allem marine tonig-mergelige Sedimente abgelagert worden. In den randnahen Beckenbereichen überwiegen sandige Gesteinstypen, die gelegentlich Eisenoxid- und Trümmererzhorizonte aufweisen. Der dritte Abschnitt der Unterkreide beginnt in etwa mit dem mittleren Alb (Zunahme der mergeligen und karbonatischen Sedimente), er leitet zur Entwicklung in der Oberkreide über.

Auf Grund dieser Entwicklung wird der Abschnitt vom Valangin bis zum mittleren Alb generell als marine Unterkreide bezeichnet. In die charakteristischen dunkel gefärbten Tonsteine dieses Unterkreideabschnittes sind gelegentlich so genannte „Blättertone“ (Barrême) und „Fischschiefer“ (Apt) zwischengelagert. Die beckenzentralen Bereiche werden von Regionen mit Randfaziesausbildung (Hiss et al. 2005) umgeben. Typisch für diese Randfazies sind mächtige eingeschaltete Sandsteine (z. B. Bentheimer-, Gildehäuser-, Osning- und Hils-Sandstein). Diese besitzen vor allem im Emsland Bedeutung als Erdölspeichergesteine. Bei den entsprechenden Lagerstätten östlich und westlich der Weser sowie westlich der Ems bilden die marinen Tonsteine der Unterkreide die abdeckenden Schichten (Lagerstätten-„seals“). Detaillierte Beschreibungen zur Lithostratigraphie und zur Lithologie der marinen Unterkreide finden sich in zahlreichen Publikationen (z. B. DIENER 1967; JARITZ et al. 1967; DIENER et al. 1970; KEMPER 1973; BARTENSTEIN 1977; KEMPER 1982; KEMPER & WEISS 1995; ELSTNER & MUTTERLOSE 1996; STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION DEUTSCHLANDS 2000).

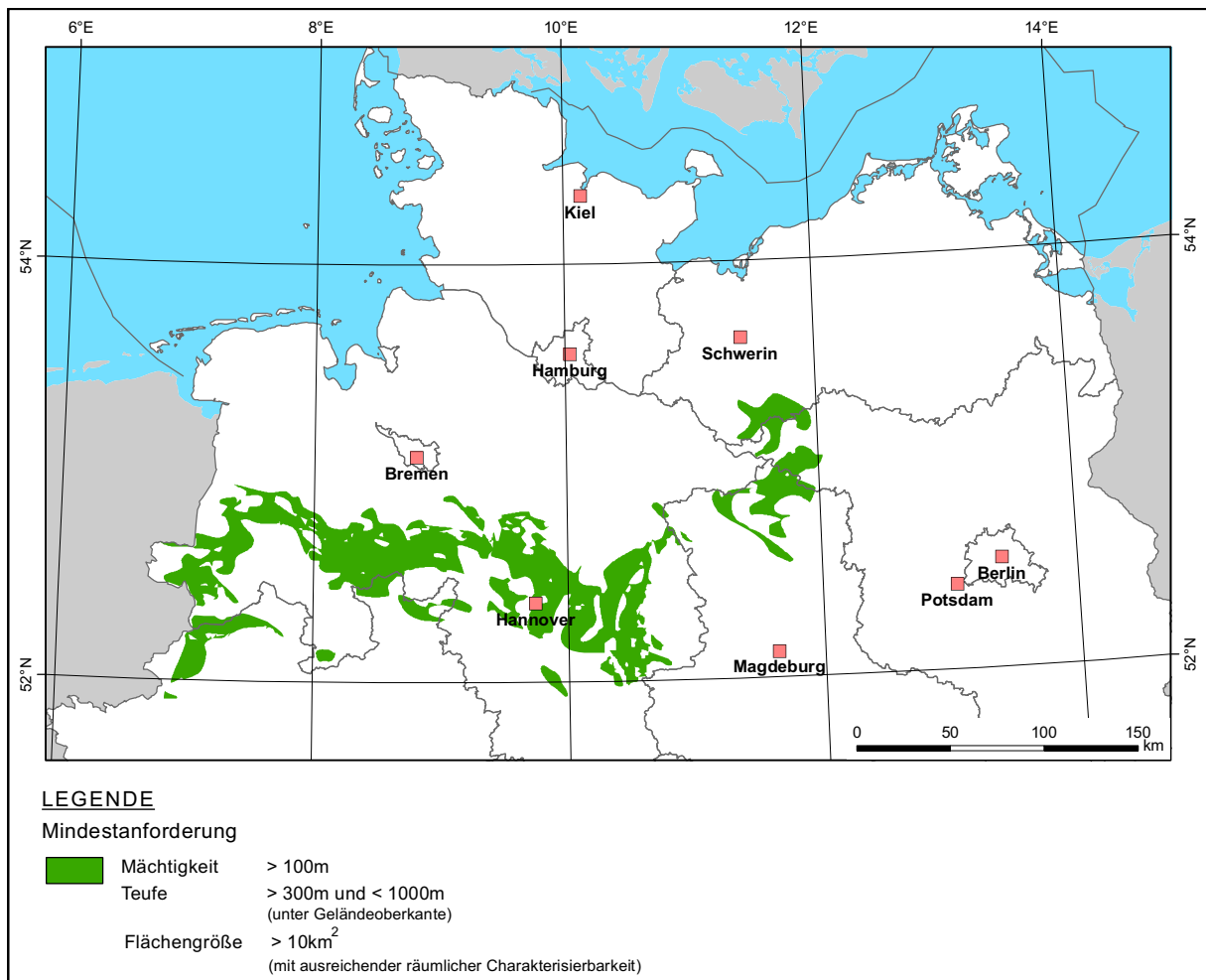


Abbildung 4.17: Unterkreide: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6

Die Mächtigkeiten der gesamten Unterkreide erreichen im Niedersachsen-Becken maximale Werte von über 2000 m (KEMPER 1979). In den entsprechenden Regionen Niedersachsens weisen auch die Ablagerungen der marinen Unterkreide sehr hohe Mächtigkeiten von mehreren hundert und stellenweise bis zu über 1000 m auf.

In den östlich an das Niedersachsen-Becken anschließenden Regionen nimmt die Mächtigkeit der marinen Unterkreide stark ab. Die nördlichen und östlichen Regionen des Ostteils des Norddeutschen Beckens weisen zusätzlich nur lückenhafte Profile und gleichzeitig einen sehr hohen Anteil an Sandsteinen auf. Aus Nordostmecklenburg sind z. B. bis zu 100 m mächtige Sandsteine bekannt. Nach den derzeit verfügbaren Daten bzw. Kompilationen ist eine Aushaltung von Regionen mit mächtigen Tonsteinformationen für diese Regionen daher 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.

Auch in den überwiegenden Teilen von Schleswig-Holstein und Teilen von Nordwestniedersachsen existieren keine homogenen Tonsteinhorizonte mit Mächtigkeiten ≥ 100 m. Zusätzlich können weitere Regionen durch die Tiefenlage der Oberkante der marinen Unterkreide ausgegrenzt werden. Als Ergebnis verbleiben die in der Abbildung 4.17 enthaltenen Teilgebiete, die in Bezug auf Tonsteine der Unterkreide als weiterhin untersuchungswürdig klassifiziert werden können.

4.2.4 Süddeutschland - Mitteljura

Wie in Kapitel 4.1.1 dargelegt, ist in Süddeutschland für eine weitergehende Analyse von Regionen mit Tongesteinsformationen nur die Opalinuston-Formation relevant. Der Opalinuston besteht aus dunkelgrauen bis schwarzen Tonsteinen mit eingelagerten Silt- und Sandlinsen sowie Karbonatkonkretionen. Die Tone wurden in einem ständig absinkenden Stillwasserbecken abgelagert (MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1996; ALLIA 1996). Während im Nordschweizer Jura der Opalinuston stratigrafisch vollständig dem frühen Aalen zugeordnet werden kann, ist in Süddeutschland der Übergang von den Jurensismergeln (oberes Toarc) ohne scharfe Grenze. Nach OHMERT & ROLF (1994) sind Tonsteine der Opalinuston-Fazies bereits im späten Toarc abgelagert worden. Nach GAUTSCHI (1997) und NAGRA (2005) kann der Opalinuston in den entsprechenden Bohrungen der Nordschweiz als ein gut verfestigter, dunkelgrauer, glimmerführender, siltiger Tonstein charakterisiert werden.

Die mineralogische Zusammensetzung lässt sich in diesen Bohrungen wie folgt charakterisieren (NAGRA 2005):

Illit: 9 % bis 29 % und Illit/Smektit-Wechselagerungen: 4 % bis 12 %;

Chlorit: 3 % bis 10 % und Kaolinit: 6 % bis 20 %;

Quarz: 15 % bis 30 % und Feldspäte: 1 % bis 7 %;

Calcit: 6 % bis 40 % und Siderit: 2 % bis 3 %;

Pyrit: 1 % bis 3 % und organischer Kohlenstoff 0,5 % bis 1,0 %.

Die laterale Variabilität der Fazies und der Lithologie ist sowohl in der Nordschweiz als auch in den angrenzenden Regionen von Baden-Württemberg sehr gering. Das Gestein wird als ausgesprochen homogen charakterisiert (NAGRA 2005; LEMCKE 1988; MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1996; ALLIA 1996). Der Wassergehalt außerhalb von Auflockerungs- und Verwitterungszonen schwankt nach den verfügbaren Publikationen zwischen 4 % und etwa 20 %. Als Besonderheit sind in einigen Bohrungen, in denen der Opalinuston sehr stark versenkt ist, Hinweise auf Gasspuren angegeben (siehe auch LEMCKE 1988).

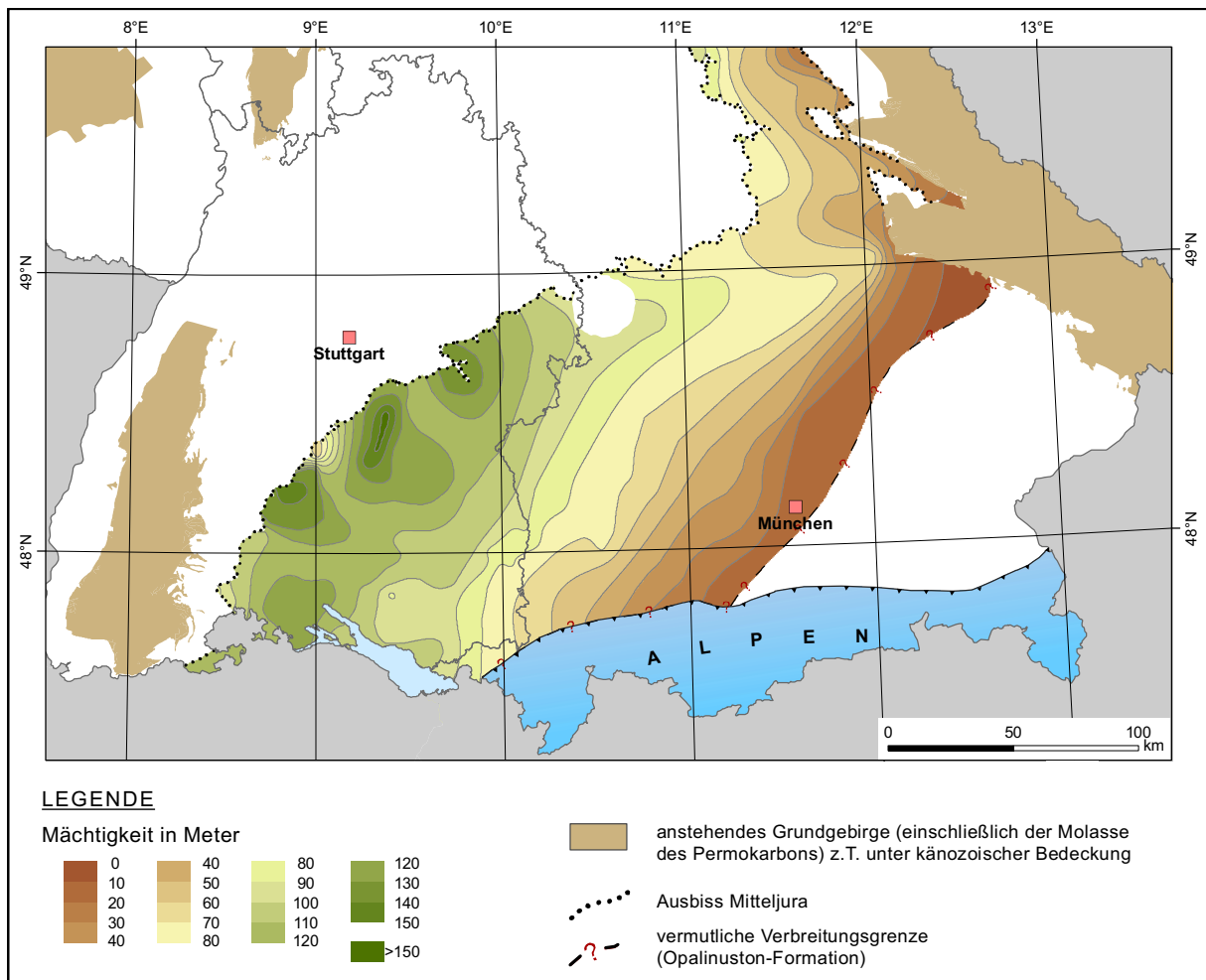


Abbildung 4.18: Mächtigkeit der Opalinuston-Formation im Alpenvorlandbecken

Durch die intensiven Untersuchungen der NAGRA (2002) ist nachgewiesen, dass der Opalinuston die im AkEnd aufgestellte Mindestanforderung zur Gebirgsdurchlässigkeit von $k_f < 10^{-10}$ m/s in vielen Regionen erfüllt.

Der nördliche bzw. westliche Ausbiss der Opalinuston-Formation, als älteste Einheit des Mitteljura in der Schwäbischen und Fränkischen Alb, ist in den entsprechenden geologischen Karten sehr gut dokumentiert (siehe Abbildung 4.18). Die mesozoischen Schichten fallen generell flach nach Süden ein und werden im Molassebecken von mächtigen tertiären Sedimenten überdeckt. Die Mitteljura-Schichten tauchen konform mit den anderen Ablagerungen mehrere 1000 m ab und wurden durch die nordwärts vorgestoßenen alpinen Decken überschoben bzw. durch die Hebung der Alpen aufgeschleppt. In südöstlicher Richtung erreichen die Tonsteine der Opalinuston-Formation die Region der Alpen nicht, sondern streichen auf einer Südwest-Nordost verlaufenden Linie (München-Landshut-Straubing) aus.

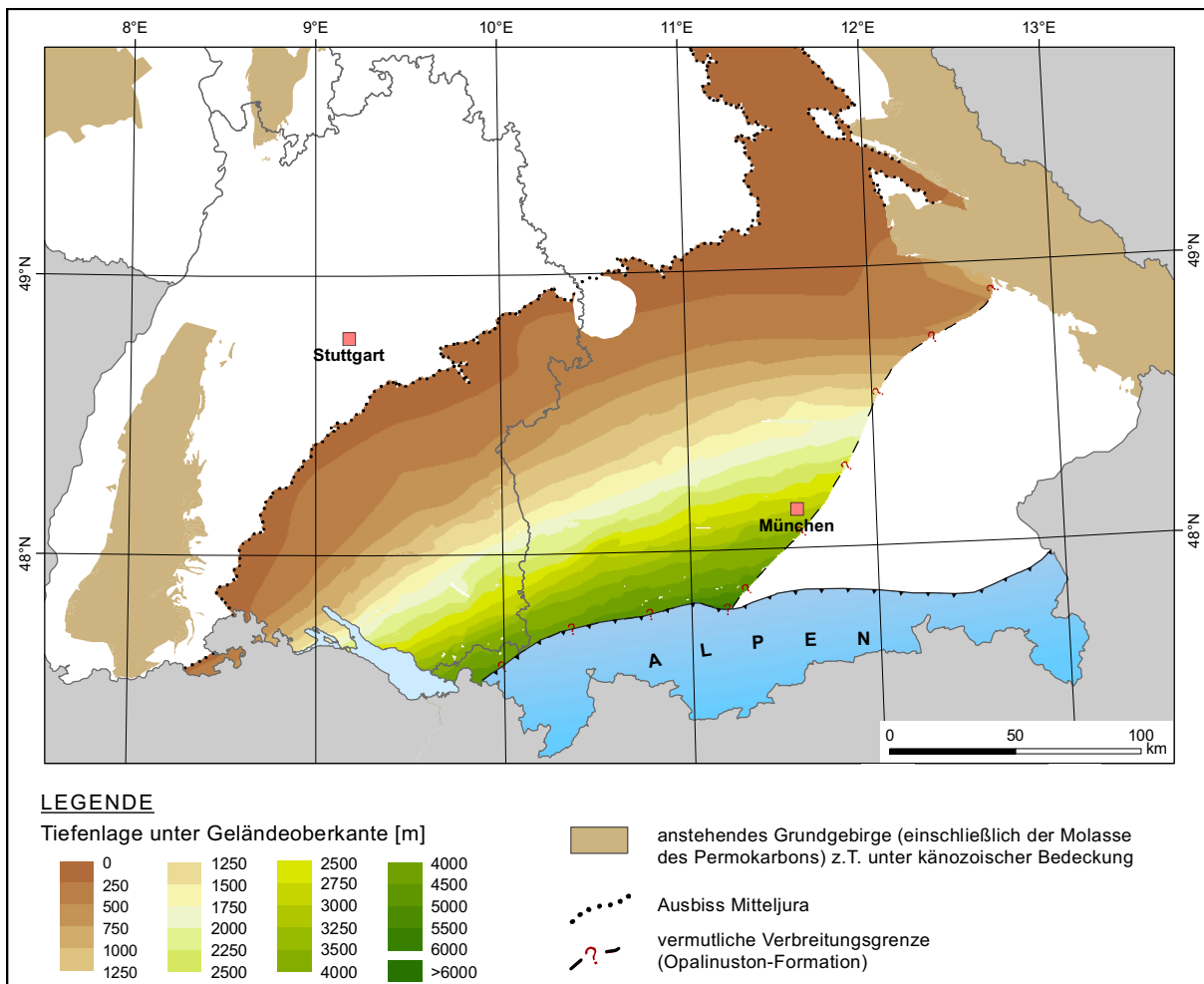


Abbildung 4.19: Tiefenlage der Oberfläche der Opalinuston-Formation im Alpenvorlandbecken

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 ihren größten Wert, während in der Region der Fränkischen Alb nur im äußersten Norden bei Bamberg Mächtigkeiten von knapp 100 m erreicht werden (Abbildung 4.18). Generell kann daraus geschlossen werden, dass der Opalinuston von den geforderten Mächtigkeiten sowie von den vorgegebenen Tiefenintervallen her südlich des Nordrandes der Schwäbischen Alb als weiter untersuchungswürdig klassifiziert werden kann. Mit Ausnahme eines kleinen Teilgebietes ist der Opalinuston in Bayern dagegen, auf Grund der sehr geringen Mächtigkeit, nicht weiter zu berücksichtigen.

Wie bei den anderen Tongesteinsformationen wurde eine Verschneidung der Mächtigkeitskarte (Abbildung 4.18) mit der Karte zur Tiefenlage der Opalinuston-Formation (Abbildung 4.19) vorgenommen. Daraus ergibt sich die Ausweisung von Teilgebieten, welche die sicherheitsgerichteten Mindestanforderungen zur Mächtigkeit (100 m), Gesteinstypen

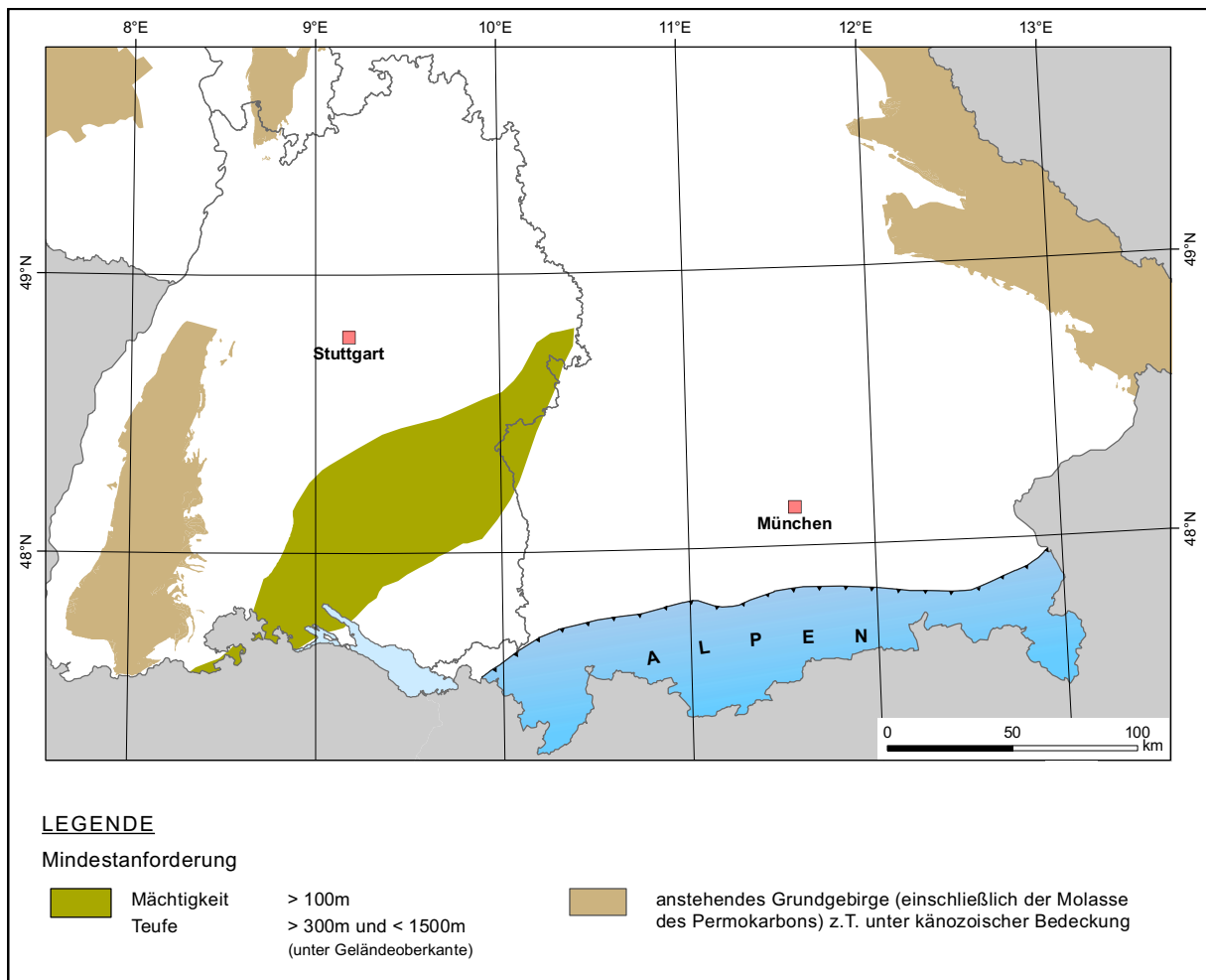


Abbildung 4.20: Opalinuston-Formation: Anwendung der AkEnd-Kriterien „Mächtigkeit und Tiefenlage“

mit einer Gebirgsdurchlässigkeit ($k_f < 10^{-10}$ m/s) sowie zur Tiefenlage (1500 m) erfüllen (Abbildung 4.20).

Für die Opalinuston-Formation in Süddeutschland gelten dieselben felsmechanischen und temperaturbedingten Einschränkungen wie für die Regionen in Norddeutschland (vgl. Kapitel 3.6.3 und 4.2.1). Insofern sind auch hier nur die Regionen weiter zu betrachten, in denen die Opalinuston-Formation in dem in Frage kommenden Tiefenbereich zwischen 300 m und 1000 m unter Gelände auftritt und zusätzlich auch die Mindestanforderungen hinsichtlich der flächenmäßigen Ausdehnung (≥ 10 km²) und der räumlichen Charakterisierbarkeit erfüllt. Wie Abbildung 4.21 zeigt, ist dies in einem ca. 40 km breiten Südwest-Nordost streichenden Streifen der Fall.

Bei der detaillierten Betrachtung der verbleibenden untersuchungswürdigen Tonsteinregion ergeben sich durch die vorgegebenen Ausschlusskriterien weitere Einschränkungen.

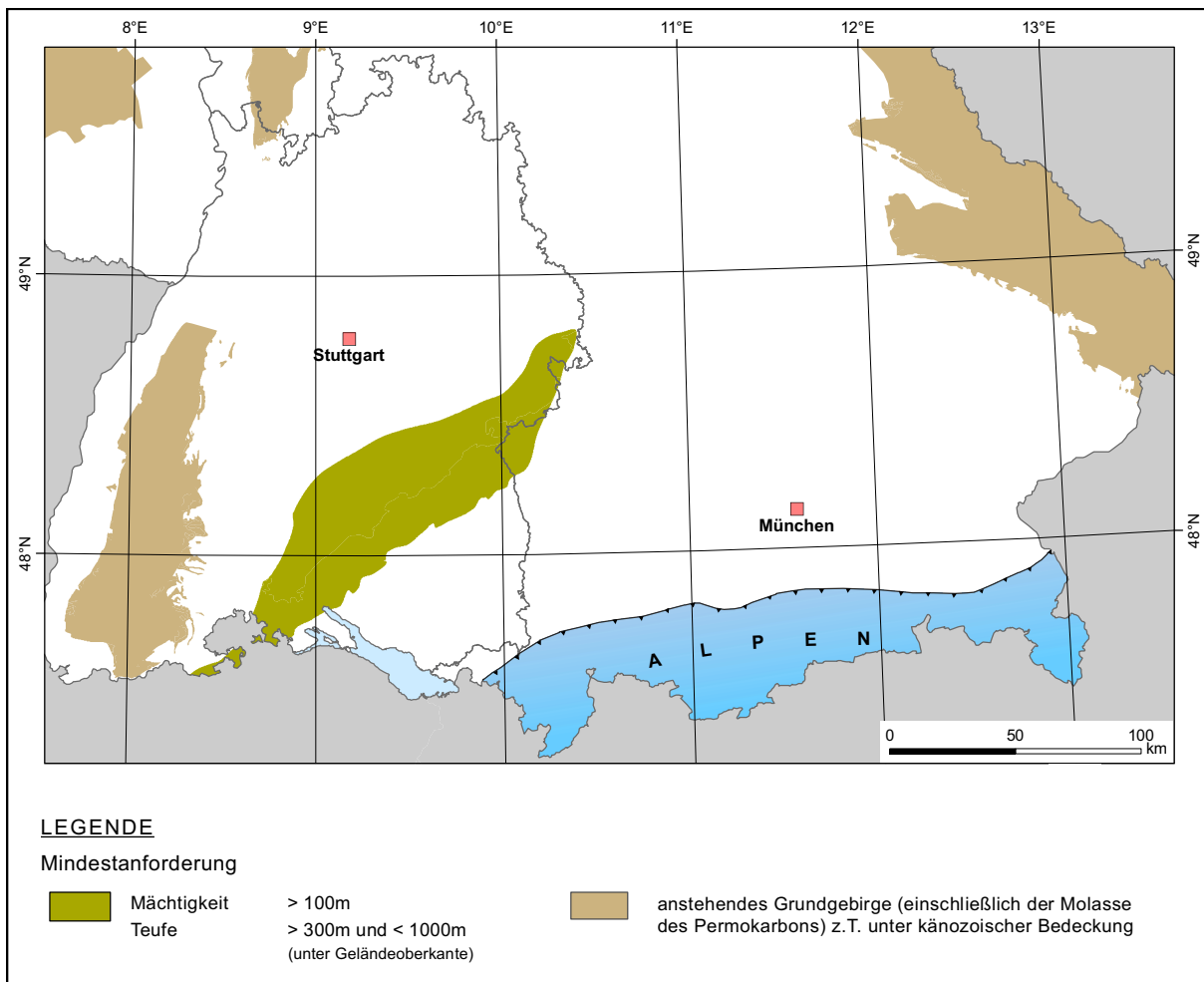


Abbildung 4.21: Opalinuston-Formation: Anwendung der wirtsgesteinsspezifischen Kriterien

Speziell der westliche Teil der Schwäbischen Alb ist neben dem Oberrheingraben ein in Deutschland vergleichsweise seismisch sehr aktives Gebiet. Zu nennen wäre hier in erster Linie die Region des Hohenzollern-Grabens und seine südliche Verlängerung. Nach den Ausschlusskriterien des AkEnd sind Gebiete innerhalb von Erdbebenzonen größer eins nicht in weitere Untersuchungen einzubeziehen. Dieses Kriterium reduziert die verbleibende Fläche erheblich (siehe Abbildung 4.22). 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 Abbildung 4.22 sind die Bereiche, in denen dieser Karstgrundwasserleiter nicht durch tertiäre Sedimente abgedeckt ist und somit nahe an bzw. direkt an die Oberfläche tritt, gesondert ausgewiesen. Auf Grund dieser besonderen hydrogeologischen Bedingungen sind bei möglichen weiteren Analysen zur Wirtsgesteinseignung des Opalinuston gesonderte Detailuntersuchungen durchzuführen.

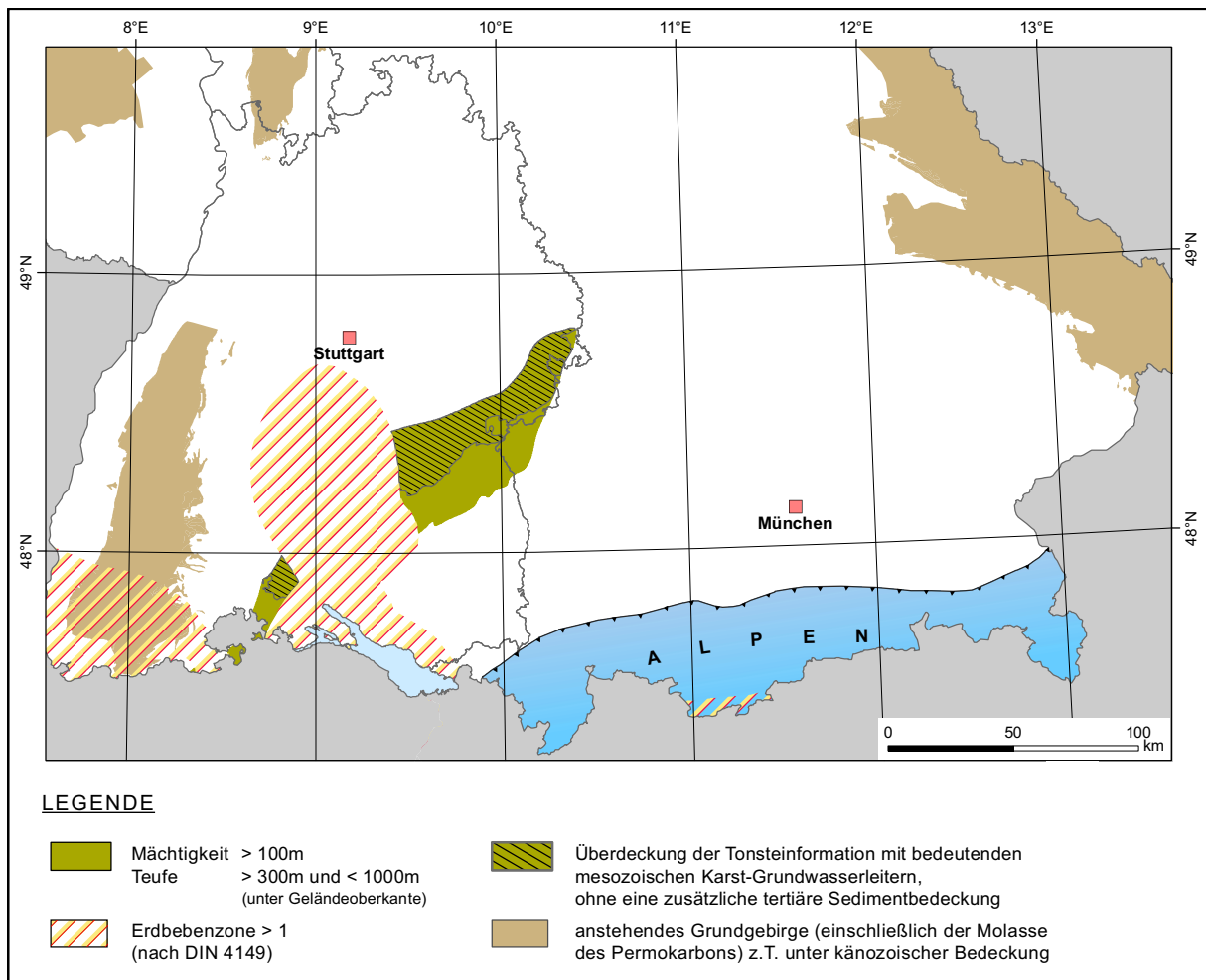


Abbildung 4.22: Opalinuston-Formation: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6

4.3 Weitergehende Charakterisierung von untersuchungswürdigen Gebieten

Auswertung von Bohrlochmessungen

Zur Überprüfung der Vertrauenswürdigkeit der zugrunde gelegten Daten wurden im Rahmen dieser Studie weitergehende Analysen von Teilgebieten und detaillierte Charakterisierungen von Tongesteinen an verschiedenen Beispielgebieten durchgeführt. Diese lagen in den unter Kapitel 4.1 und 4.2 als untersuchungswürdig eingestuften Teilgebieten in Nord- und Süddeutschland. Ziel dieser weitergehenden Analysen war es zu überprüfen, ob in diesen Teilgebieten innerhalb der Tongesteinsformationen das Vorhandensein von mindestens 100 m mächtigen, homogenen und auch weit aushaltenden Tongesteinen nachgewiesen werden kann. Bei dieser Plausibilitätskontrolle sollte zusätzlich gezeigt werden, ob bei Vorliegen entsprechender geophysikalischer Messungen weitere

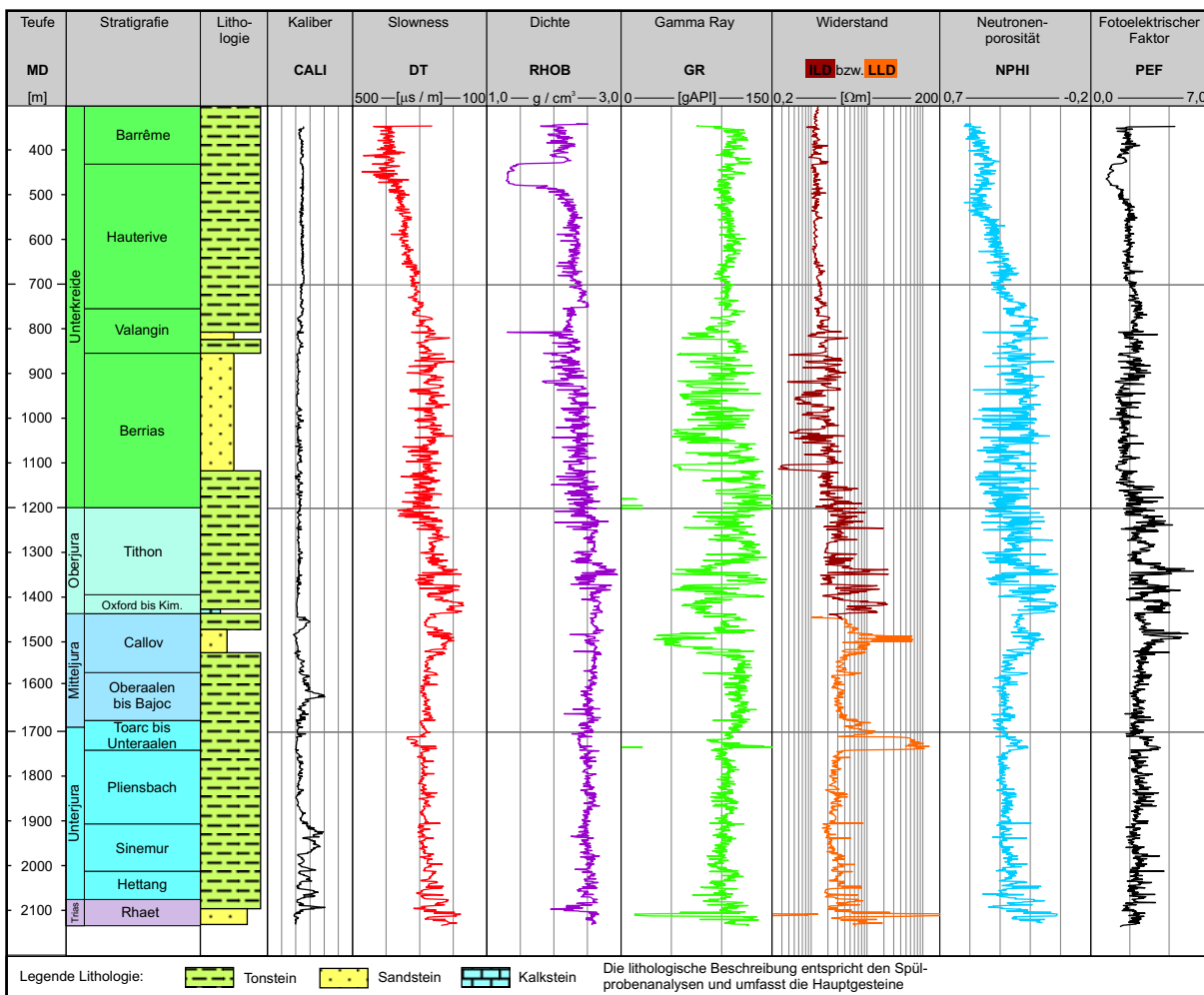


Abbildung 4.23: Bohrlochlogs, stratigraphische und lithologische Schichtbeschreibung am Beispiel einer nord-deutschen Bohrung

Einschränkungen möglich sind. Im Folgenden wird dies anhand eines Beispiels näher erläutert.

In Abbildung 4.23 ist das Bohrprofil einer Tiefbohrung dargestellt. Auf der linken Seite der Grafik finden sich die stratigraphische Unterteilung der erbohrten Schichtenfolge und die Gesteinsansprache des Erstbearbeiters. Wie aus der lithologischen Gliederung hervorgeht, sind sowohl in der Unterkreide als auch im Jura Tongesteine vorhanden, die weit über 100 m mächtig sind. In anderen Bohrungen des Teilgebietes sind ähnliche Verhältnisse angetroffen worden. Auf der rechten Seite der Grafik sind die für die Analyse verfügbaren Bohrlochmessungen dargestellt.

In dem für die Untersuchungen relevanten Tiefenbereich liegen das Kaliberlog (CALI und BS), das Akustiklog (DT), das Dichtelog (RHOB) das Gamma Ray Log (GR), zwei Widerstandslogs (ILD und LLD), die Neutronenporosität (NPHI) und das P_e -Log (PEF) vor.

Aus dem Kaliberlog (CALI) und dem Meißeldurchmesser (BS) wurde eine prozentuale Kaliberabweichung berechnet. Sie ergibt sich mit

$$\Delta d_{\text{DCAPC}} = \frac{d_{\text{CALI}} - d_{\text{BS}}}{d_{\text{BS}}} \cdot 100 \%, \quad (4.1)$$

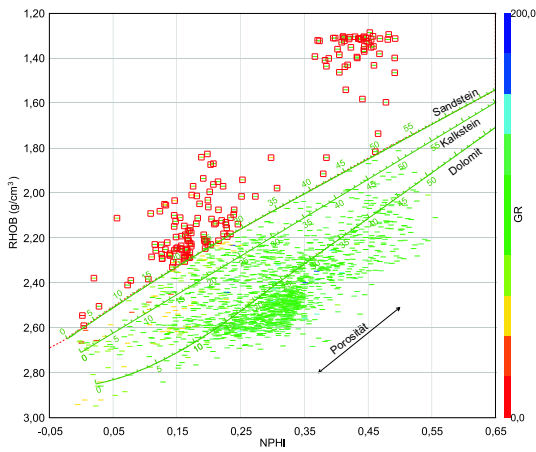
wobei Δd_{DCAPC} die prozentuale Kaliberabweichung, d_{CALI} der Durchmesser des Bohrlochs entsprechend der Kalibermessung und d_{BS} der Meißeldurchmesser bedeuten. Für den gesamten analysierten Tiefenbereich kann auf Grund der geringen Kaliberabweichung von einer guten Ankopplung der anderen Messsonden an das Gebirge ausgegangen werden.

Zur ersten Interpretation der Bohrlochmessungen wurden verschiedene Crossplots herangezogen. In den folgenden Abbildungen sind die aus der Erdöl-/Erdgasindustrie bekannten Crossplots der DT-, RHOB-, NPHI-Logs zueinander dargestellt. Damit kann eine erste Klassifizierung der Gesteine erfolgen.

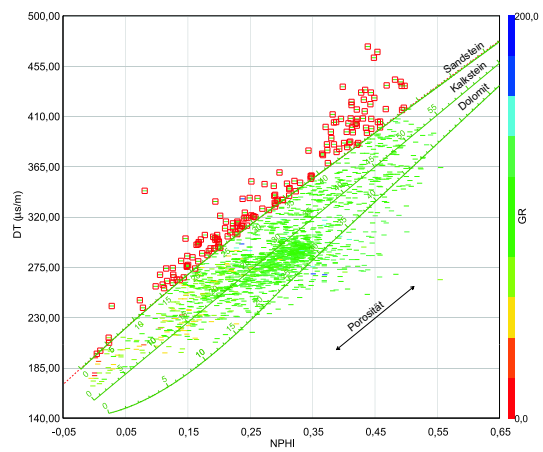
Die Abbildungen 4.24(a) und 4.25 zeigen die Formationsdichte (RHOB) über der Neutronenporosität (NPHI). Als Klassifikationsschema wurden zum einen Porositätsmodelle von Sandstein, Kalkstein und Dolomit und zum anderen ein Modell für die verschiedenen Tonsteinkomponenten (Abbildung 4.25) gewählt. Weiterhin wurde als farbige Kodierung das Gamma Ray Log genutzt. Bezüglich des Gamma Ray Logs liegt der Großteil der Werte um 80 gAPI bis 120 gAPI. Diese Tatsache bestätigen die Ergebnisse der Untersuchungen der Spülproben, wonach es sich im Wesentlichen um Tonsteine bis Tonmergelsteine handelt. Abbildung 4.24(a) zeigt Messpunkte, die sehr stark vom Sandsteinmodell zu geringeren Dichtewerten hin abweichen (rot hervorgehoben). Bei diesen Abschnitten handelt es sich vermutlich, mindestens teilweise, um Gas führende Schichten (Tonsteine und Sandsteine).

Generell stimmt die lithologische Charakterisierung der Erstbearbeiter mit unseren Analysen überein, allerdings lässt sich durch die Auswertung der Bohrlochmessungen eine wesentlich stärkere lithologisch-mineralogische Differenzierung der Tiefenbereiche vornehmen.

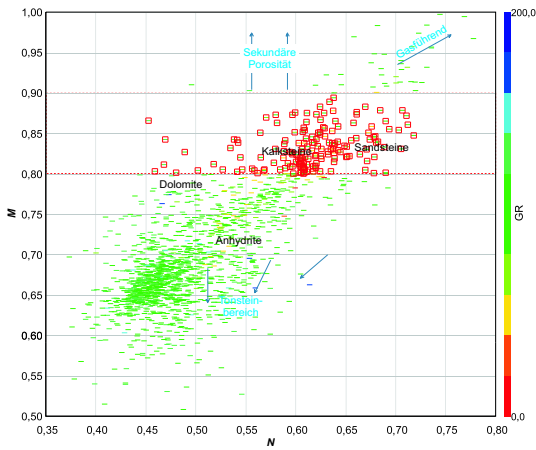
Da die Bohrung entsprechend der Spülproben und des Gamma Ray Logs vorrangig toniges Gestein aufweist, kann der Crossplot (Abbildung 4.25) zur Abgrenzung verschiedener Tonsteinkomponenten genutzt werden. Hier wurden als Messwerte die Logs mit den Originalmesspunktabständen (Messpunkteabstand: 0,1 m) und ein Modell für die verschiedenen Tonsteinkomponenten benutzt.



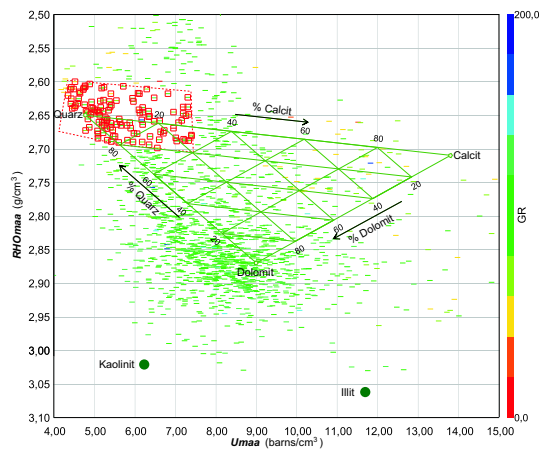
(a) Formationsdichtelog (RHOB) über Neutronenporositätslog (NPHI)



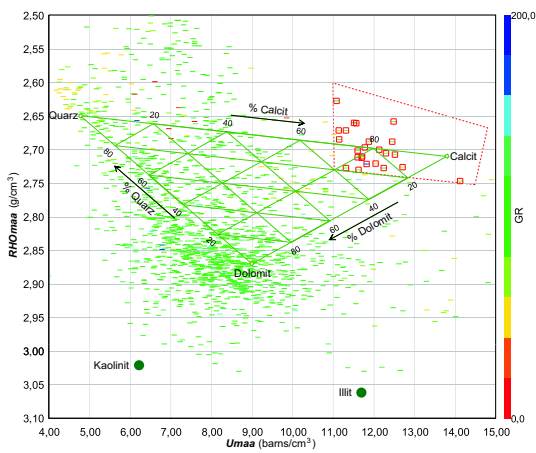
(b) Akustiklog (DT) über Neutronenporositätslog (NPHI)



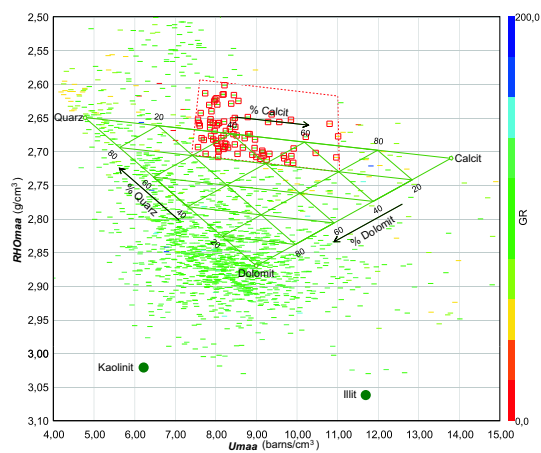
(c) *M-N*-Plot



(d) *RHOMaa-Umaa*-Plot



(e) *RHOMaa-Umaa*-Plot



(f) *RHOMaa-Umaa*-Plot

Abbildung 4.24: Crossplots am Beispiel einer norddeutsche Bohrung, hervorgehoben sind jeweils Bereiche spezieller lithologisch-mineralogischer Zusammensetzung. Klassifizierung entsprechend den Modellen von SCHLUMBERGER (1991)

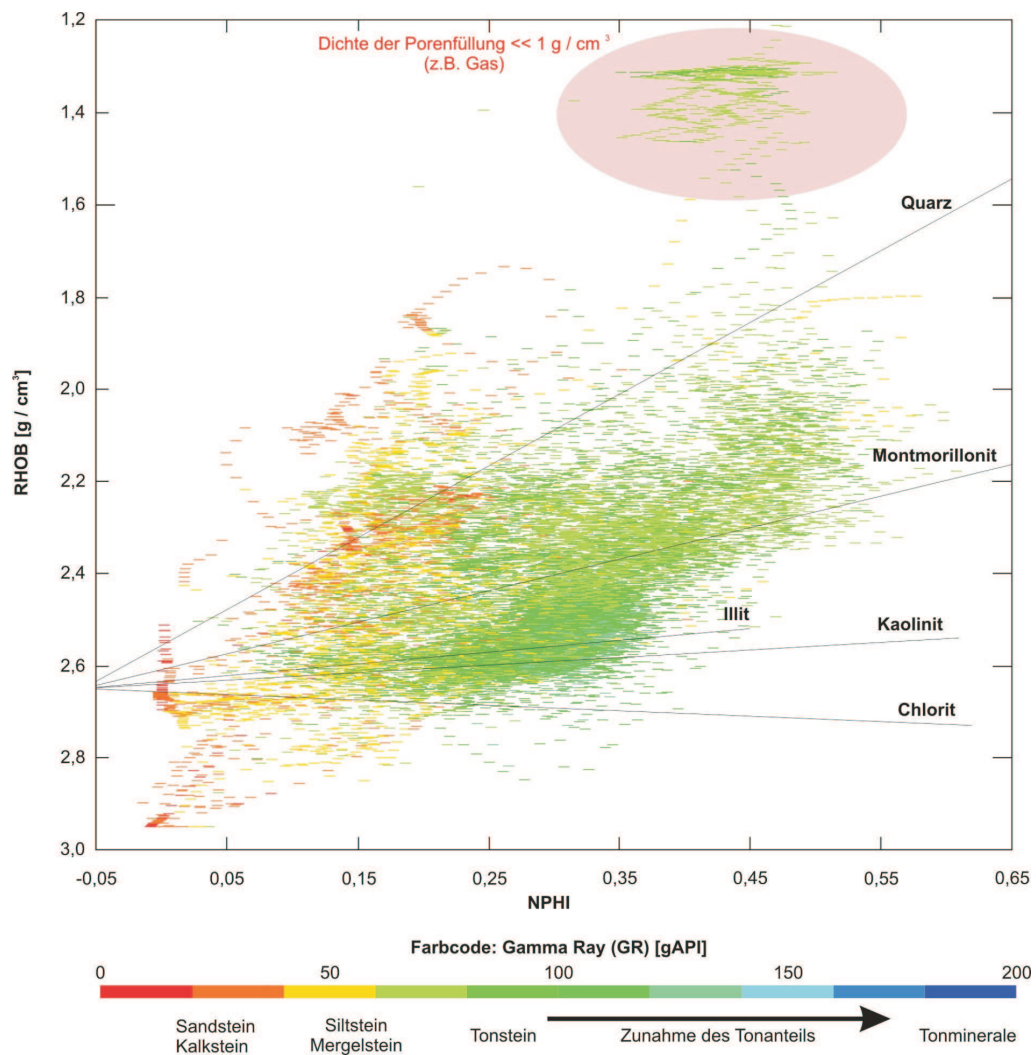


Abbildung 4.25: Formationsdichtelog (RHOB) über Neutronenporositätslog (NPHI) am Beispiel einer nord-deutschen Bohrung, Klassifikation von Tonsteinkomponenten entsprechend SCHLUMBERGER (1991)

Ein Großteil der Messpunkte der tonigen Gesteine, die durch Gamma Ray Werte >80 gAPI charakterisiert sind, weisen Dichtewerte von $2,4 \text{ g/cm}^3$ bis $2,6 \text{ g/cm}^3$ auf. Die entsprechenden Neutronenporositätswerte dieser Gesteine variieren zwischen 0,25 und 0,35. Gesteine mit Gamma Ray Werten von ≥ 100 gAPI, bei denen es sich um relativ reine Tonsteine handelt, sind im Diagramm zumeist ebenfalls in diesen Wertebereichen zu finden. Messpunkte mit wesentlich niedrigeren Dichtewerten und höheren Neutronenporositäten weisen bei gleichzeitig vorliegenden Gamma Ray Werten von >80 gAPI auf einen höheren Illit-Montmorillonit- bzw. Montmorillonit-Anteil hin. Höhere Anteile an diesen quellfähigen Tonmineralen sind aus der Kreide Norddeutschlands bekannt und aus vielen Aufschlüssen beschrieben (siehe z. B. BROCKAMP 1976; GAIDA et al. 1978; ECKHARDT 1991). Eine Zunahme dieser Komponenten vom Berrias bis zum Alb und sogar weiter bis in die

Oberkreide hinein scheint für viele Regionen charakteristisch zu sein. Generell lässt sich aus Abbildung 4.25 ableiten, dass die in der Bohrung erbohrten Tonsteine als Tonminerale vorwiegend Illite aufweisen. Weitere Tonmineralkomponenten in der Reihenfolge ihrer Bedeutung sind Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsminerale und Kaolinit.

In Abbildung 4.24(b) sind die Messwerte des Akustiklogs (DT) über der Neutronenporosität (NPHI) dargestellt. Als Overlay sind wiederum die Porositätsmodelle von Sandstein, Kalkstein und Dolomit verwendet. Die Messwerte mit den hohen Laufzeiten (geringe Formationsgeschwindigkeiten), die rot hervorgehoben sind, weisen auf besondere Eigenschaften der Gesteine hin, die zu einer geringen Ausbreitungsgeschwindigkeit akustischer Wellen führen. Dazu zählen ein besonders lockeres Mineralgerüst (z. B. gering kompaktierte Tonsteine mit hohem quellfähigem Tonmineralanteil oder Sandsteine mit geringem Kompaktions- und Diageneseegrad) sowie ein gasgefüllter Porenraum.

Obwohl diese Bereiche nur anhand des Akustiklog-Neutronenporositätslog-Plots nicht eindeutig zu klassifizieren sind, ist es wahrscheinlich, dass es sich um Tonsteine mit speziellen Eigenschaften (hoher Anteil an quellfähigen Tonmineralen bzw. hoher Anteil an organischen Verbindungen) handelt.

Die Abbildung 4.24(c) zeigt den ***M-N***-Plot und die Abbildungen 4.24(d), 4.24(e) und 4.24(f) den ***RHO_{maa}-U_{maa}***-Plot. Die Plots können zur Charakterisierung der mineralogischen Zusammensetzung der Formationen verwendet werden und berücksichtigen die Ergebnisse aller Porositätslogs (RHOB, DT, NPHI) in einer Darstellung. Im ***M-N***-Plot in Abbildung 4.24(c) sind Bereiche mit Sandsteinen, Kalksteinen und Kalkmergelsteinen hervorgehoben.

In den Abbildungen 4.24(d), 4.24(e) und 4.24(f) werden mittels des ***RHO_{maa}-U_{maa}***-Plots Sandsteine (<25 % Calcit-Anteil), Kalksteine (>75 % Calcit-Anteil) und ihre Übergänge näher unterschieden.

Aus den bisherigen Betrachtungen wird deutlich, dass es nicht möglich ist, mittels der Analyse einzelner Crossplots (Abbildungen 4.24(a), 4.25 und 4.24(b)) auf eine detaillierte lithologische Charakterisierung eines Bohrprofils zu schließen. Dafür ist zumindest die gleichzeitige Betrachtung aller drei Porositätsgrößen (DT, RHOB, NPHI) notwendig.

In Abbildung 4.26(a) ist anhand des ***RHO_{maa}-U_{maa}***-Plots die stoffliche Zusammensetzung der Gesteine abgeschätzt worden. Die Analyse zeigt, dass am Profilaufbau überwiegend Tonsteine beteiligt sind. Übergangsbereiche zu Silt- und Mergelsteinen lassen sich

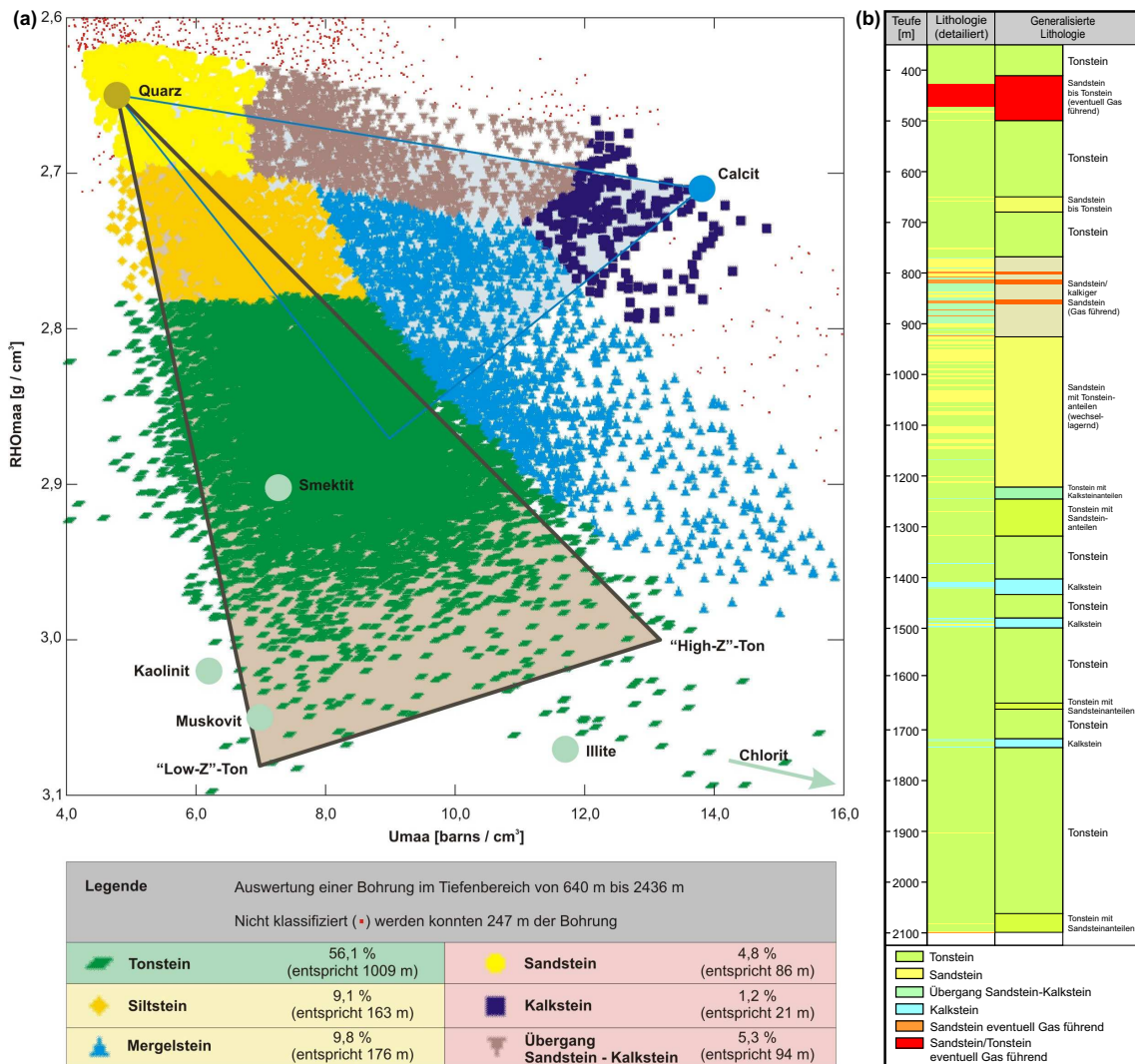


Abbildung 4.26: Klassifikation der Gesteinstypen am Beispiel einer norddeutschen Bohrung: (a) entsprechend des *RHOmaa-Umaa*-Plots; (b) auf der Grundlage der Porositätslogs (RHOB, DT, NPHI), des P_e -Logs und des Gamma Ray Logs. Darstellung der Ergebnisse entsprechend der Bohrlochmessungen (detailliert und generalisiert)

gut ausweisen. Zusätzlich sind generell auch stoffliche Differenzierungen der Tonsteine möglich. Um diese abzusichern wären aber zumindest einige mineralogisch-geochemische Analysen von Gesteinsmaterial notwendig. Aus der kompletten Analyse der Bohrlochmessungen ergibt sich die detaillierte lithologische Klassifizierung (Abbildung 4.26(b)). Im Vergleich mit der lithologischen Schichtbeschreibung der Erstbearbeiter dieser Bohrung fällt auf, dass die generelle Gesteinsansprache weitgehend übereinstimmt. Allerdings ergibt sich aus der Analyse der Bohrlochmessungen ein wesentlich feiner aufgelöstes Bild. In einigen Bereichen zeichnen sich Sandsteinzwischenlagen innerhalb der Tongesteine ab. Dabei

handelt es sich einerseits um sehr geringmächtige Sandsteine und andererseits aber auch um eine Bündelung solcher Lagen und somit mächtigerer Bereiche. Eine weitere Besonderheit in dieser Bohrung sind Gebirgsabschnitte, die vermutlich eine Gasführung aufweisen.

Korrelation von Bohrlochmessungen und seismischen Daten

Neben einer detaillierten Charakterisierung der Tongesteine in einzelnen Bohrungen ist es für die Einschätzung der Barriere- und Wirtsgesteinseignung von Tonsteinen sehr wichtig, ihre Homogenität und die flächenhafte Ausdehnung von Homogenbereichen und somit bei einer möglichen Erkundung ihre räumliche Charakterisierbarkeit beurteilen zu können. Um dieser Frage nachzugehen, sind Untersuchungen zur Korrelation von Bohrlochmessungen mit dem Softwarepaket CORRELATOR (OLEA & SAMPSON 2002) in Beispielgebieten durchgeführt worden. In dem hier näher dargestellten Gebiet ist bei der Korrelation zwischen den Bohrungen wie folgt vorgegangen worden:

- Verwendung des Gamma Ray Logs und des Akustiklogs für die Tiefenbereiche, in denen diese Logs bei den Bohrungen vorhanden waren;
- Berechnung aller Korrelationen zwischen den Bohrungen mit variierenden Korrelationsintervallen (5 m bis 30 m);
- Bestimmung des Tonanteils mittels Gamma Ray Index (siehe Kapitel 3.3.2) für die zu korrelierenden Horizonte;
- Verwendung des Eigenpotenziallogs für die Tiefenbereiche, in denen kein Gamma Ray Log zur Verfügung stand. Berechnung eines synthetischen Gamma Ray Logs unter Verwendung einer theoretischen Sand- und Tonlinie; Korrelation dieses synthetischen Logs.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Untersuchungen ist in der Abbildung 4.27 dargestellt. In dieser Abbildung ist der aus dem Gamma Ray Log bzw. Eigenpotenziallog abgeschätzte Ton- bzw. Tonsteinanteil für den Gesamtbereich der Bohrungen dargestellt.

Um die Lücke für die oberen Bereiche der Bohrungen, in denen kein Gamma Ray Log gemessen wurde, zu schließen, ist ein synthetisches Gamma Ray Log unter Verwendung des Eigenpotenziallogs berechnet worden. Aus der Abbildung lässt sich entnehmen, dass die mächtigen Tonsteine relativ homogen ausgebildet und gut korrelierbar sind. Tonsteine im oberen Bereich weisen stärker mergelige Horizonte auf.

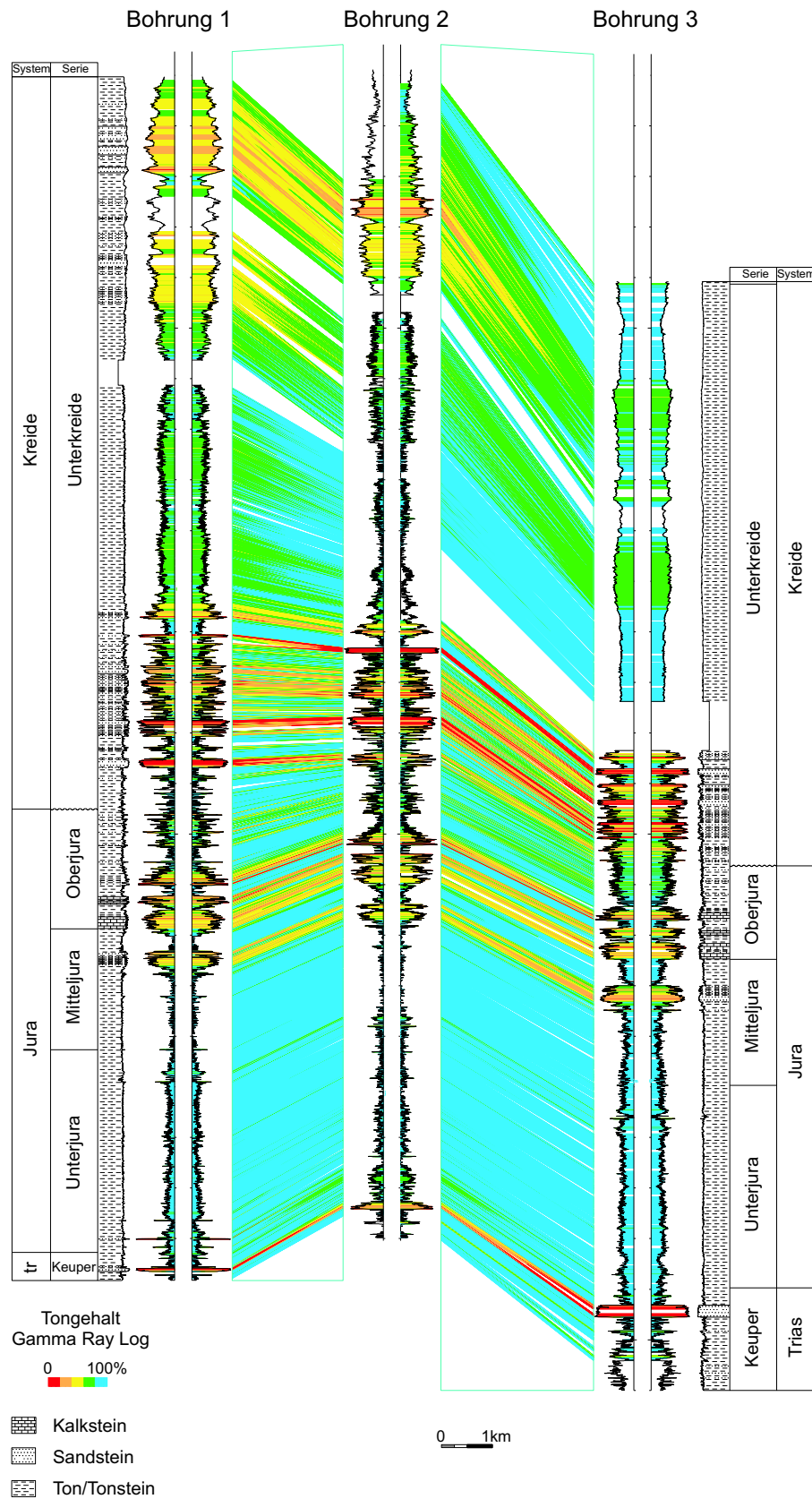


Abbildung 4.27: Korrelation der Bohrlochmessungen (Gamma Ray Log) am Beispiel von drei norddeutschen Bohrungen mit farbiger Kodierung des Ton-/Tonsteingehaltes

Ähnlich wie schon bei der Bearbeitung anderer Untersuchungsgebiete kann auch hier festgestellt werden, dass sich die gewählte Methodik gut zur Einschätzung der Homogenität und der räumlichen Charakterisierbarkeit von mächtigen Tonsteinen eignet. Bei gut vermessenen Bohrungen sind damit sehr gute Verbindungen zu den seismischen Daten und somit zur räumlichen Charakterisierung von Tonsteinformationen zu erreichen.

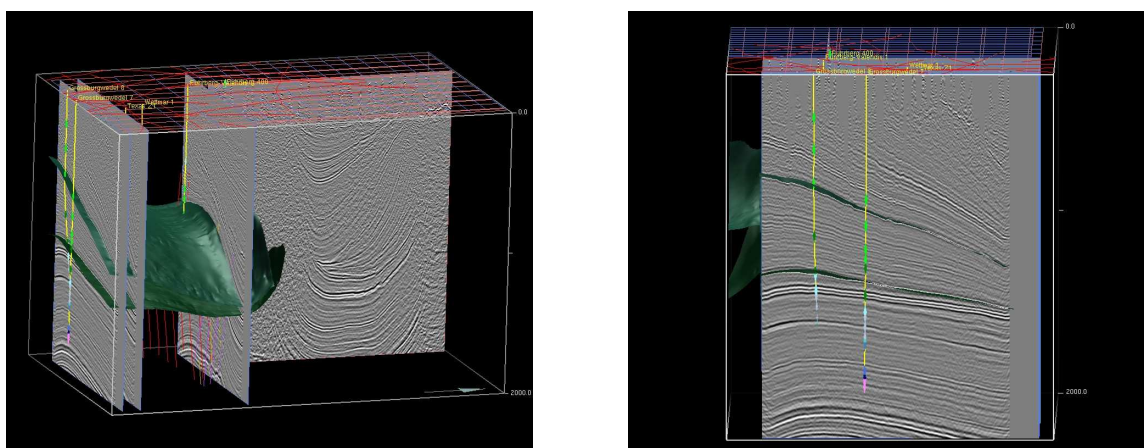
Bei der Interpretation der seismischen Daten standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Aushalten von charakteristischen Reflexionshorizonten;
- Identifikation von Störungen;
- Beurteilung der Lagerungsverhältnisse der Tonsteine;
- Korrelation der seismischen Daten mit den Bohrlochmessungen.

Im gesamten Gebiet lassen sich folgende Hauptreflexionshorizonte im Bereich Unterkreide bis Jura aushalten:

- Top Unterkreide;
- im Unterhalb;
- etwa Basis Apt;
- etwa Basis Barrême;
- im Unterhauterive;
- Grenzbereich Wealden (Berrias)/Tithon;
- im Oberjura (etwa Basis Kimmeridge);
- im Toarc (etwa Oberfläche sehr C_{org} -reicher Tonsteine/Posidonienschiefer);
- im Rhätkeuper.

In Abbildung 4.28 sind seismische Profile und die entsprechenden Bohrungen zusammen mit den Horizonten Grenzbereich Wealden/Tithon und Basis Barrême räumlich dargestellt. Durch die Korrelation mit den Bohrlochmessungen ergibt sich, dass mehrere homogene Tonsteinbereiche in der Unterkreide und im Jura flächenmäßig aushaltbar sind. In der Abbildung sind markante Begrenzungen des Tonsteinpaketes dargestellt. Insgesamt war es in dem Beispielgebiet mit den seismischen Untersuchungen möglich, die räumliche



(a) Blickrichtung von E nach W

(b) Blickrichtung von S nach N

Abbildung 4.28: Ausgewählte seismische Profile aus Norddeutschland mit der Darstellung der Horizonte Grenzbereich Wealden/Tithon (unterer Horizont) und Basis Barrême (oberer Horizont)

Verbreitung der mittels Bohrlochmessung nachgewiesenen homogenen Tongesteine besser abzugrenzen und flächenhaft einzugrenzen. Weiterhin ließ sich der Einfluss der Salztektunik auf die Lagerungsverhältnisse der Tongesteine näher analysieren. Homogene und ungestörte Tongesteine konzentrieren sich in dem hier vorgestellten Beispielgebiet auf Bereiche mit flacher Lagerung. In der Nähe von Salzstrukturen weisen die Tonsteinhorizonte einerseits große Neigungen und andererseits auch stark gestörte Bereiche auf.

Durch die Detailanalysen von verschiedenen Gebieten hat sich die Ausweisung der untersuchungswürdigen Teilgebiete (siehe Kapitel 4.1 und 4.2) generell als plausibel erwiesen. In fast allen untersuchten Teilgebieten lassen sich homogene und flächenmäßig aushaltende Tongesteine in ausreichender Mächtigkeit nachweisen. Dabei gibt es einige wenige Ausnahmen. Diese betreffen vor allem Randbereiche der ausgewiesenen Flächen. Hier hat sich, insbesondere bedingt durch Einschaltungen von Sandsteinen, das Auftreten von 100 m mächtigen homogenen Tongesteinen nach der detaillierten Analyse als fragwürdig erwiesen. Ein Beispiel dafür ist in HOTH et al. (2005) dokumentiert, ein weiteres Beispiel betrifft die Region Potsdam. Da diese Detailuntersuchungen innerhalb der Studie aber nicht für alle ausgewiesenen Teilgebiete im gleichen Umfang möglich waren, kann somit nur darauf verwiesen werden, dass weitere regionale Einschränkungen der Teilgebiete möglich sind. In der Kartendarstellung im Kapitel 4.4 kann dies nicht berücksichtigt werden, da das Kriterium mit „Seismik und Bohrlochmessung nachgewiesene korrelierbare homogene Tonsteine“ nicht flächenmäßig und deutschlandweit anwendbar ist.

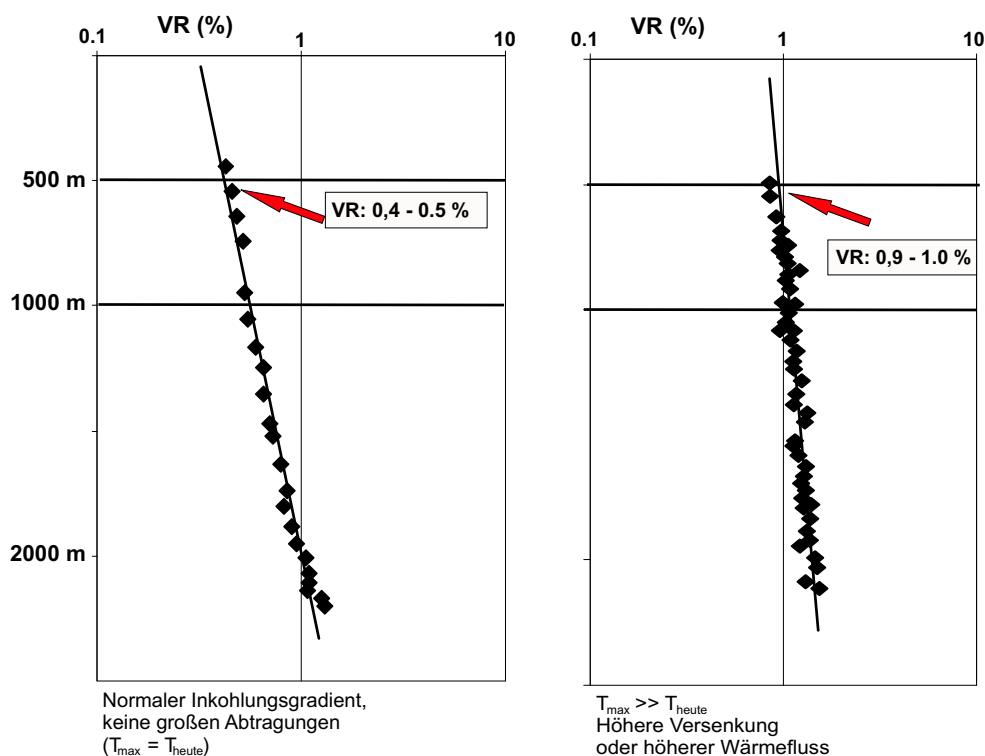


Abbildung 4.29: Inkohlungstrend am Beispiel von Bohrungen aus zwei norddeutschen Teilgebieten

Abschätzung des Diagenesegrades

Im Kapitel 3.5 wird auf die Bedeutung des Diagenesegrades der Tongesteine verwiesen. Für die Beispielgebiete ist ebenfalls evaluiert worden, welche Daten zur Einschätzung des Diagenesegrades vorhanden sind. Nach den Recherchen handelt es sich fast ausschließlich um Vitrinitreflexionswerte. Ein Großteil davon ist in der Inkohlungsdatenbank der BGR digital verfügbar. Mittels dieser Daten und den aus den genannten Archiven erhobenen Messwerten kann der Inkohlungsgrad der entsprechenden Tongesteine für Tiefenniveaus abgeschätzt werden. Für einen Tiefenschnitt in 500 m ergaben sich dabei erhebliche Inkohlungsunterschiede. Für Norddeutschland liegen die Werte zwischen 0,25 % und 5,00 %. Die sehr hohen Werte sind allerdings auf spezielle Regionen im südwestlichen Niedersachsen beschränkt, in denen in der geologischen Vergangenheit sehr hohe Hebungen des Gebirges oder Aufheizungen des Gebirges durch magmatische Tiefenkörper stattgefunden haben (BARTENSTEIN et al. 1971; BUNTEBARTH & TEICHMÜLLER 1979; SENGLAUB et al. 2005). In den anderen Regionen Norddeutschlands liegt der abgeschätzte Inkohlungsgrad zumeist zwischen 0,25 % und 0,80 %. Ausnahmen von bis zu 1,00 % finden sich vor allem in den südlichen Randbereichen des Norddeutschen Beckens. In der Abbildung 4.29 sind für zwei Teilgebiete die aus Bohrungen verfügbaren Vitrinitreflexionswerte in Bezug zur Tiefenlage dargestellt. Aus dem Vergleich der beiden Diagramme wird deutlich, dass sich

sehr starke Unterschiede im Inkohlungsgrad für das Tiefenniveau 500 m ergeben und die in diesem Tiefenniveau auftretenden Tonsteine demnach eine sehr unterschiedliche Temperaturbelastung während ihrer geologischen Geschichte erfahren haben. Verwendet man die in Kapitel 3.5 genannten einfachen empirischen Modelle zur Abschätzung der maximalen Temperaturbelastung, so ergeben sich überwiegend Werte zwischen 30 °C und 70 °C, stellenweise werden auch etwas darüber liegende Temperaturen erreicht. In den Gebieten mit extrem hoher Inkohlung muss von sehr hohen maximalen Temperaturen (100 °C bis 200 °C) und von einer wesentlichen Einschränkung der Barriereigenschaften der Tonsteine ausgegangen werden (z. B. durch Mikrokluftung). Mittels der Auswertung von Akustiklogs lassen sich Einschätzungen zum Diageneseegrad weiter untermauern.

4.4 Gesamteinschätzung der untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Deutschland

Für die Ausweisung von untersuchungswürdigen Teilgebieten mit Tongesteinsvorkommen als Endlager-Wirtsgesteine in Deutschland wurden entsprechend der in Kapitel 3.6 formulierten Kriterien folgende zusätzliche regionale Einschränkungen berücksichtigt:

- Sämtliche Tongesteinsformationen des Oberrheingrabens sind, neben dem teilweisen Ausschluss durch die Lage in der Erdbebenzone größer eins, auch auf Grund der tektonischen und lithologischen Verhältnisse (komplizierter geologischer Bau, stark gestörter Schichtverband) als nicht weiter untersuchungswürdig eingestuft worden.
- Die Tertiär-Tone Norddeutschlands stellen zwar wichtige hydrogeologische Barrieren des Untergrundes dar, ihre Wirtsgesteinseignung ist auf Grund des geringen Verfestigungsgrades im Vergleich mit den Tonsteinen der Unterkreide und des Jura jedoch als sehr eingeschränkt zu beurteilen (siehe Kapitel 3.6.3 und 4.1.3). Sie werden daher für die hier zu betrachtende Wirtsgesteinsoption nicht berücksichtigt und in der Karte nicht dargestellt (Abbildung 4.30).
- Die tertiären Tone und Tonsteine des Alpenvorlandbeckens sind auf Grund ihrer starken lithologischen Variabilität im Vergleich zu den übrigen Vorkommen nur mit einem unverhältnismäßig hohen Erkundungsaufwand explorierbar, um zu vergleichbaren Aussagen zu gelangen. Da sie außerdem zum großen Teil nur einen geringen Verfestigungsgrad aufweisen, werden sie in dieser Studie nicht berücksichtigt.
- Teilbereiche des Opalinustons in Süddeutschland werden durch die Erdbebenzone größer eins ausgeschlossen.

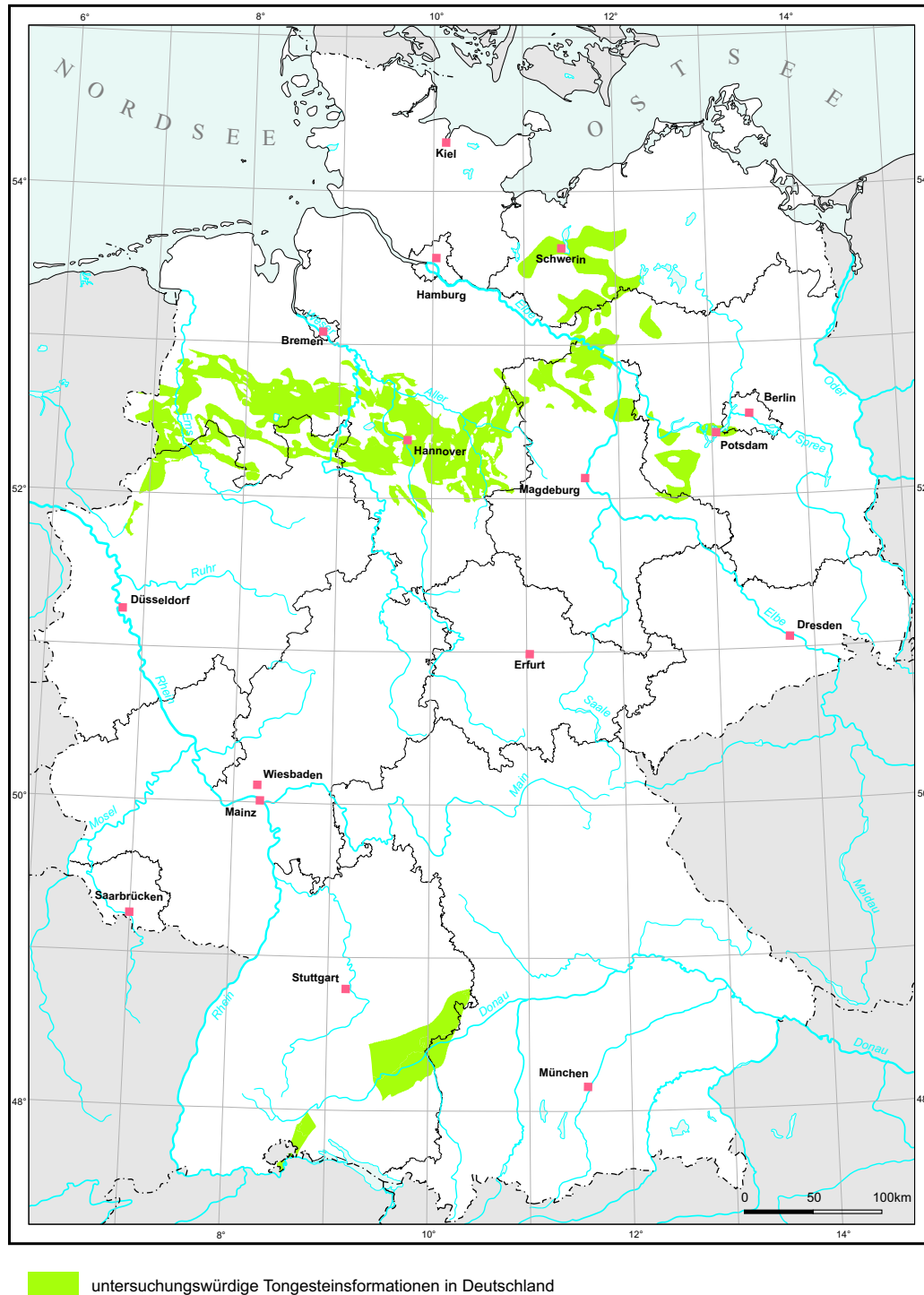


Abbildung 4.30: Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Deutschland

- In Teilbereichen des Verbreitungsgebietes des Opalinustons in Süddeutschland schränkt ein bedeutender und genutzter Karstgrundwasserleiter im Deckgebirge eine potenzielle Nutzung des Opalinustons als Wirtsgestein ein. Diese Einschränkung gilt zumindest für die Regionen, in denen dieser Grundwasserleiter als Trinkwasserreservoir oder zur Gewinnung von Thermalsolen bzw. geothermischer Energie genutzt wird. In Abbildung 4.22 sind insbesondere die Gebiete zusätzlich ausgewiesen, in denen der Malmkarst keine geschlossene Tertiärbedeckung aufweist und deshalb sehr oberflächennah ansteht bzw. die Geländeoberfläche erreicht und somit auch heute noch einer Verkarstung unterliegt. Bei einer weiteren Evaluierung der möglichen Eignung des Opalinustons wären insbesondere die hydrogeologischen Verhältnisse detailliert zu analysieren. Dies würde eine hydrogeologisch-petrophysikalische Charakterisierung des etwa 100 m bis 200 m mächtigen Sedimentpaketes zwischen dem Opalinuston und dem oberen Jura einschließlich einer dreidimensionalen Grundwassermodellierung erfordern (siehe auch BERTLEFF 1986; FRISCH & HUBER 2000; CLAUSER et al. 2001).
- Gebiete mit extrem steiler Lagerung in der Nähe von Salzstrukturen wurden wegen ihres komplizierten geologischen Baus, ihrer mangelnden Charakterisierbarkeit und dem damit verbundenen unverhältnismäßigen Erkundungsaufwand als nicht untersuchungswürdig eingestuft.
- In Teilgebieten mit lang gestreckten, schmalen Flächen ist die Anlegung von Einlagerungsstrecken entscheidend eingeschränkt. Auch wegen des damit verbundenen unverhältnismäßig hohen Erkundungsaufwands sind diese Teilgebiete deshalb als nicht untersuchungswürdig bewertet worden.
- Im Hinblick auf den Diagenese- und Verfestigungsgrad der in Deutschland in Frage kommenden Tongesteine lässt sich aus der vorgelegten Analyse schlussfolgern, dass Tongesteine mit einem mittleren Diagenese- und Verfestigungsgrad am ehesten als Wirtsgesteine für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Frage kommen. Gegenüber gering verfestigten Tonsteinen bieten sie einerseits den Vorteil besserer geomechanischer Eigenschaften für den Bau eines Endlagers. Andererseits haben diese Tongesteine im Verlaufe ihrer geologischen Geschichte eine höhere Temperaturbelastung als die gering diagenetisch überprägten Tonsteine erfahren. Bei sehr hoch diagenetisch beanspruchten Tongesteinen besteht dagegen das Risiko, dass diese ihre gute Barrierewirkung unter anderem auf Grund von Mikrokluftung verloren haben.

Im Ergebnis verbleiben Teilgebiete mit mächtigen Tonsteinvorkommen in der Kreide Norddeutschlands und im Jura Nord- und Süddeutschlands. Sie sind in Abbildung 4.30 dargestellt. Neben den hydrogeologischen Einschränkungen für Süddeutschland können zusätzliche, in Kapitel 4.5 erwähnte Abwägungskriterien herangezogen werden, die zu weiteren Eingrenzungen der Teilgebiete führen können.

4.5 Weitere mögliche regionale Einschränkungen

Neben den bisher genannten und angewandten Kriterien gibt es weitere, für Tongesteine relevante Gegebenheiten, welche die Untersuchungswürdigkeit von Regionen aus geowissenschaftlicher Sicht einschränken. Dazu zählen die im Folgenden genannten Punkte:

- Die konkurrierende Nutzung durch, z. B. Erdöl-/Erdgasförderung, Gasspeicherung, geothermische Nutzung oder Salzbergbau kann Teilgebiete weiter einschränken. Auch wenn diese Nutzung in einem anderen Tiefenstockwerk erfolgt, sollte der Sicherheitsabstand definiert werden.
- In Gebieten mit in der geologischen Geschichte erfolgter starker Hebung bzw. starker thermischer Aufheizung besteht das Risiko der Ausbildung einer Klüftung in den Tongesteinen. Dies kann eine erhöhte hydraulische Leitfähigkeit zur Folge haben und somit die Wirtsgesteinseignung einschränken.
- Insbesondere bei Tonsteinen mit einem hohen Anteil an organischem Kohlenstoff muss damit gerechnet werden, dass diese Tonsteine und die angrenzenden Gesteine durch eine erhöhte Gasführung (Kohlendioxid und/oder Kohlenwasserstoffe) gekennzeichnet sind.
- Die Einschaltungen von porösen und permeablen Sandsteinen in den Tonsteinen bzw. die Über- oder Unterlagerung durch solche Gesteine kann zu weiteren regionalen bis lokalen Einschränkungen hinsichtlich der Eignung der entsprechenden Tongesteine als Wirtsgestein führen.
- In einem Teilgebiet treten tertiäre Vulkangesteine (Vulkangebiet Hegau) auf, die den Opalinuston mit zahlreichen Eruptionsröhren durchschlagen haben. Zumindest in der Nähe der Aufstiegswege muss damit gerechnet werden, dass der Opalinuston seine guten Barriereigenschaften verloren hat. In dieser Region erfordert die Exploration und räumliche Charakterisierung der Eigenschaften des Opalinustons einen unverhältnismäßig großen Aufwand, da um jeden vulkanischen Körper ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten werden muss.

- Teilgebiete, die durch Störungen mit größeren Versatzbeträgen in den entsprechenden Tongesteinen (z. B. bei Versatzbeträgen von >100 m im Falle eines 100 m mächtigen Tongesteins) charakterisiert sind, bergen das Risiko, dass diese Störungen hydraulische Wegsamkeiten bedingen können. Häufig sind sie Teil einer breiten Störungszone mit mehreren Parallelstörungen und Auflockerungsbereichen.

5 Grenzen der Studie

Das Ergebnis der Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen in Deutschland ist direkt abhängig von der Quantität und Qualität der zur Verfügung stehenden geowissenschaftlichen Daten. Vorhandene Datenlücken konnten zwar größtenteils durch Extrapolation entsprechend der geschilderten Methodik geschlossen werden, es verbleiben jedoch bezüglich der Aussagekraft und der Darstellungsmöglichkeiten Bearbeitungsgrenzen. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Allgemeines

- Die Studie liefert als Ergebnis keine Standorte. Sie gibt eine Gesamtübersicht der Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland.
- Die Studie bezieht sich in der Bewertung auf die im deutschen Endlagerkonzept zugrunde gelegten Anforderungen und auf die geologischen Verhältnisse in Deutschland. Ein Urteil über die international verfolgten, auf die länderspezifischen geologischen Verhältnisse ausgerichteten Konzepte kann nicht abgeleitet werden und war auch nicht Ziel der Studie.
- Als Basis für die Untersuchungen und die Bewertung diente der derzeitige Kenntnisstand über die geologischen Verhältnisse in Deutschland. Dabei waren Datendefizite und Datenlücken zu berücksichtigen. Eine Extrapolation der Untersuchungsergebnisse auf Gebiete mit geringerer Datendichte konnte dann vorgenommen werden, wenn es geowissenschaftlich begründbare Indikatoren gab.
- Als Bewertungsgrundlage werden nur sicherheitsgerichtete geowissenschaftliche Kriterien herangezogen. Planungswissenschaftliche Kriterien, wie z. B. Schutzgebiete, oder sozialwissenschaftliche Kriterien, wurden nicht berücksichtigt.
- In Bezug auf die Einschätzung der Eignung von Tongesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wird davon ausgegangen, dass im Wesentlichen Formationen mit einem Tonanteil größer 80 % mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die geforderte Mindestanforderung der geringen Gebirgsdurchlässigkeit erfüllen.

Datenbasis

- Die Kenntnisse über Tongesteine sind im Vergleich zu anderen möglichen Wirtsgesteinen begrenzt. Daten über Tongesteine aus übertägigen Aufschlüssen sind für die Endlagerthematik nur wenig relevant.
- Als Datengrundlage der Untersuchungen dienten im Wesentlichen Literatur und Archivmaterial. Vor-Ort-Untersuchungen wurden für die Erstellung der Studie nicht durchgeführt. Als Datenquelle standen Angaben von ca. 25 000 Bohrungen zur Verfügung. Es existieren neben den Bohrungsdaten nur wenige Daten über Untertageaufschlüsse.
- Bei den Daten der Kohlenwasserstoff-Exploration fehlte häufig eine detaillierte Beschreibung der Lithologie der Tongesteine, da dies nicht unmittelbares Untersuchungsziel war.
- Hinsichtlich der Einschätzung von großräumigen Hebungstendenzen konnte nur auf die Übersichtsdarstellung von FRISCHBUTTER & SCHWAB (2001) zurückgegriffen werden. Unsicherheiten dieser Darstellung, insbesondere im Südteil Deutschlands, waren für die weiteren Betrachtungen nicht relevant.

Darstellung der Ergebnisse

- Die Ergebnisse der Studie werden in kleinmaßstäblichen Übersichtskarten dargestellt. Die Ausstrichlinien der ausgewiesenen Tonformationen werden dabei von der untertägigen geologischen Situation mit ihren durch die Datenquantität und -qualität bedingten Ungenauigkeiten an die Geländeoberfläche projiziert.
- Bei der Darstellung der Teilgebiete sind im Wesentlichen die Ausstrichlinien der stratigrafischen Grenzen der Tonformationen ausgewiesen. Lithologisch gleichförmige Homogenbereiche können erst bei Kenntnis der standortspezifischen geologischen Verhältnisse angegeben werden (z. B. 3D-Seismik, Bohrungen).
- Es wurden, stratigrafisch gesehen, nur postkarbone Tongesteinsformationen berücksichtigt. Ältere Formationen in endlagerrelevanter Tiefe sind durch tektonische Vorgänge intensiv überprägt (z. B. Ruhrkarbon). Entsprechende Formationen wurden deshalb als nicht untersuchungswürdig eingestuft.

6 Zusammenfassung

Mit vorliegender Studie werden Tongesteine als potenzielle Endlagerwirtsgesteinsformationen in Teilgebieten Deutschlands ausgewiesen und bewertet. Grundlage der Arbeiten waren die verfügbaren und nutzbaren Daten aus Karten, Archivmaterial und ca. 25 000 Bohrungen. Zusätzliche Feld- und Laboruntersuchungen wurden nicht durchgeführt.

Die im Jahr 2002 vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) empfohlenen wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen dienten als Grundlage zur Abgrenzung der untersuchungswürdigen Teilgebiete. In Bezug auf die in der Studie vorgenommene Einschätzung der Eignung von Tongesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurde dabei davon ausgegangen, dass im Wesentlichen Formationen mit einem Tonanteil größer 80 % mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die geforderte Mindestanforderung der geringen Gebirgsdurchlässigkeit erfüllen. Zusätzlich zu den Mindestanforderungen wurden international anerkannte wirtsgesteinsabhängige Auswahlkriterien und speziell unter den deutschen Gegebenheiten zu berücksichtigende Abwägungskriterien herangezogen.

Die Studie liefert als Ergebnis keine Darstellung von Endlagerstandorten. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass mächtige und homogene Tonsteine, welche die Anforderungen an Wirtsgesteine erfüllen, in der Unterkreide sowie in Gesteinsformationen des Unter- und Mitteljura Norddeutschlands vorkommen. In Süddeutschland werden stärker regional begrenzt Gesteine des Mitteljura als untersuchungswürdig ausgewiesen. Die Tonformationen des Tertiär werden wegen ihrer ungünstigen mechanischen Eigenschaften in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

Die ausgewiesenen Teilgebiete liegen vor allem in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Baden-Württemberg und in geringem Umfang auch in Bayern, Brandenburg und Nordrhein-Westfalen. Auf weitere mögliche regionale Einschränkungen wird im Bericht verwiesen.

Eine weitergehende Bewertung der Tonsteine in den verbleibenden Gebieten würde im Hinblick auf die Auswahl von Standorten zur Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle ein aufwändiges Untersuchungsprogramm erfordern.

Literaturverzeichnis

- ADDIS, M.A. ; JONES, M.E.: Volume changes during diagenesis. In: *Marine and Petroleum Geology* (1985), Nr. 2, S. 241–245
- AG DEPONIEN: Ad hoc Arbeitsgruppe Deponien der Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesrepublik Deutschland: Geowissenschaftliche Rahmenkriterien zur Standorterkundung von Deponien. In: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) HANNOVER (Hrsg.): *Geologisches Jahrbuch G* Bd. 4. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1997
- AKEND (Hrsg.): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd*. Köln : AkEnd (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte), 2002
- ALLIA, V.: *Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz*, Universität Basel, Diss., 1996
- ANDRA (Hrsg.): *Dossier 2001 argile – Sur l'avancement des études et recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de déchets a haute activité et a vie longue en formation géologique profonde*. Paris : ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), 2001 (Rapport de synthèse)
- APLIN, A.C. ; FLEET, A.J. ; MACQUAKER, J.H.S.: Muds and Mudstones: Physical and Fluid-Flow properties. In: *Geological Society Special Publication* (1999), Nr. 158
- APPEL, D. ; HABLER, W.: *Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung – Phase 1: Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit*. 2001. – Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), unveröffentlichter Bericht, Salzgitter
- APPEL, D. ; HABLER, W.: *Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung – Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. Datenbank „Gebirgsdurchlässigkeit“*. 2002. – Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), unveröffentlichter Bericht, Salzgitter
- ASQUITH, G. ; KRYGOWSKI, D.: *Basic Well Log Analysis (Second Edition)*. Tulsa, Oklahoma : The American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 2004 (AAPG Methods in Exploration Series 16)

- BACHMANN, G.H. ; MÜLLER, M.: Die Entwicklung des süddeutschen Molassebeckens seit dem Variszikum: Eine Einführung. In: *Zeitschrift für geologische Wissenschaften* 24 (1996), Nr. 1/2, S. 3–20
- BALDSCHUHN, R. ; BEST, G. ; KOCKEL, F. ; KOCKEL, F. (Hrsg.): *Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:300 000*. Hannover : Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1996
- BALDSCHUHN, R. ; BINOT, F. ; FLEIG, S. ; KOCKEL, F.: Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor. In: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) HANNOVER (Hrsg.): *Geologisches Jahrbuch A* Bd. 153. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2001, S. 3–95
- BANDLOWA, T. ; FISCHER, M. ; KRULL, P. ; SCHULZ, P. ; STIEWE, H.: *Tiefversenkung von Abwässern und flüssigen Abfällen in den östlichen Bundesländern*. 1997. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht, Berlin
- BARKER, C.E.: Influence of time on metamorphism of sedimentary organic matter in liquid-dominated geothermal systems, western North America. In: *Geology* (1983), Nr. 11, S. 389–393
- BARKER, C.E. ; PAWLEWICZ, M.J.: Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories and peak temperatures. (1994), Nr. 570, S. 216–229
- BARTENSTEIN, H.: Stratigraphic parallelisation of the Lower Cretaceous in the northern hemisphere. In: *Newsletter on Stratigraphy* Bd. 19. Berlin, Stuttgart : Gebrüder Borntraeger, 1977, S. 30–41
- BARTENSTEIN, R. ; TEICHMÜLLER, R. ; TEICHMÜLLER, M.: Die Umwandlung der organischen Substanz im Dach des Bramscher Massivs. In: *Fortschr. Geol. Rheinl. und Westfalen* (1971), Nr. 18, S. 501–538
- BENDER, F. (Hrsg.): *Angewandte Geowissenschaften*. Bd. 2: *Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften*. Stuttgart : Enke im Thieme Verlag, 1985
- BERTLEFF, B.W.: Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. In: *Abhandlungen des Geologischen Landesamtes in Baden-Württemberg* Bd. 12. Freiburg : Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, 1986

- BFS (Hrsg.): *Jahresbericht 2005*. Salzgitter : BfS (Bundesamt für Strahlenschutz), 2006
- BGR (Hrsg.): *Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle – Katalog geeigneter geologischer Formationen in der Bundesrepublik Deutschland*. Hannover : BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), 1977 . – Bericht zum Studienvertrag 025-76-9-WASD
- BGR (Hrsg.): *Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen*. Hannover : BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), 2006
- BINOT, F. ; GERLING, P. ; HILTMANN, W. ; KOCKEL, F. ; WEHNER, H.: The Petroleum System in the Lower Saxony Basin. In: SPENCER, M. (Hrsg.): *Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 1993 (Annual Conference of the European Association of Petroleum Geoscientists in Florence 3), S. 121–139
- BOIGK, H.: *Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland*. Stuttgart : Enke, 1981
- BOYER, S ; MARI, J.-L.: *Seismic Surveying and well logging*. Paris : Editions Technip, 1997
- BRAND, E. ; HOFFMANN, K.: Stratigraphie und Fazies des nordwestdeutschen Jura und Bildungsbedingungen seiner Erdöllagerstätten. In: *Erdöl u. Kohle* 16 (1963), S. 437–450
- BRAUNER, H.-J.: Fachinformationssystem der Kohlenwasserstoffgeologie des LBEG Hannover. In: HOTH, P. (Hrsg.) ; KRULL, P. (Hrsg.): *12. Jahrestagung der GGW „Mitteleuropäische Senke – Nordsee: Entwicklungsgeschichte, Nutzung und Vorsorge“*. Husum : Gesellschaft für Geowissenschaften (GGW), 2003, S. 54–58
- BRAUNER, H.-J. ; KOSCHYK, K.: Benennung und Zählung von Kohlenwasserstoff-Bohrungen in der Bundesrepublik Deutschland. In: *Erdöl, Erdgas, Kohle* 116 (2000), Nr. 10, S. 480–481
- BROCKAMP, O.: Nachweis von Vulkanismus in Sedimenten der Ober- und Unterkreide in Norddeutschland. In: *Geol. Rdsch.* 65 (1976), Nr. 1, S. 162–174
- BRYANT, W.R.: Permeability of clays, silty-clays and clayey-silts. In: SCOTT, E.D. (Hrsg.) ; A.H., Bouma (Hrsg.) ; BRYANT, W.R. (Hrsg.): *Siltstones, mudstones and shales: Depositional processes and characteristics (publ. on CD-ROM)*. Tulsa : SEPM & GCAGS, 2003, S. 76–84

- BRÄUER, V. ; REH, M. ; SCHULZ, P. ; SCHUSTER, P. ; SPRADO, K.-H.: *Endlagerung stark Wärme entwickelnder Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen*. 1994. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht, Hannover
- BUNTEBARTH, G. ; TEICHMÜLLER, R.: Zur Ermittlung der Paläotemperaturen im Dach des Bramscher Massivs aufgrund von Inkohlungsdaten. In: *Fortschr. Geol. Rheinl. und Westfalen* (1979), Nr. 27, S. 171–182
- BURKE, J.A. ; CAMPBELL, Jr. R.L. ; SCHMIDT, A.W.: The lithoporosity crossplot. In: *Transactions of the Society of Professional Well Log Analysts, 10th Annual Symposium, Paper Y*, 1969
- CLAUSER, C. ; HÖHNE, F. ; HARTMANN, A. ; RATH, V. ; DEETJEN, H. ; RÜHAAK, W. ; SCHELLSCHMIDT, R. ; ZSCHOCKE, A.: *Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe*. 2001. – Bericht RWTH Aachen und GGA-Institut Hannover
- DEWAN, J.: *Essentials of Modern Open-Hole Log Interpretation*. Tulsa, Oklahoma : Penn-Well Publishing Company, 1983
- DEWHURST, D.N. ; YANG, Y. ; APLIN, A.C.: Permeability and fluid flow in natural mudstones. In: APLIN, A.C. (Hrsg.) ; FLEET, A.J. (Hrsg.) ; MACQUAKER, J.H.S. (Hrsg.): *Muds and mudstones: Physical and Fluid Flow Properties*. London : Geological Society, 1999, S. 23–43
- DIENER, I.: Die Paläogeographie der Kreide im Nordteil der DDR in Beziehung zu den Nachbargebieten. In: *Ber. Deutsche Gesellschaft für Geologische Wissenschaften A12* (1967), Nr. 3/4, S. 289–313
- DIENER, I.: Kreide. In: *Grundriß der Geologie der Deutschen Demokratischen Republik*. Berlin : Akademie-Verlag, 1968
- DIENER, I. ; NÖLDEKE, W. ; SÖLLIG, A.: *Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Unterkreide 1:500 000*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1970
- DIENER, I. ; PASTERNAK, G. ; STOLLBERG, K.: *Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordostdeutschland (Kartenwerk 1:200 000) – Blatt Magdeburg/Brandenburg*. Berlin : Gesellschaft für Umwelt- und Wirtschaftsgeologie (UWG), 1991

- DIENER, I. ; PASTERNAK, G. ; STOLLBERG, K. ; TESCH, M. ; TESSIN, R. ; TOLEIKIS, R. ; WORMBS, J.: *Geothermische Perspektivitätsbewertung für die Geothermienutzung in Nordostdeutschland – Blatt Berlin/Frankfurt Oder*. Berlin : Gesellschaft für Umwelt- und Wirtschaftsgeologie (UWG), 1990
- DIENER, I. ; TESCH, M. ; PASTERNAK, G.: *Geologische Grundlagen für die Geothermienutzung in Nordost-Deutschland – Blatt Finsterwalde/Cottbus*. Berlin : Gesellschaft für Umwelt- und Wirtschaftsgeologie (UWG), 1992
- DIENER, I. ; WORMBS, J.: *Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (II) – Blatt Eberswalde/Bad Freienwalde – Teilbericht Stufe A3*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1990
- DIENER, I. ; WORMBS, J. ; PASTERNAK, G. ; STOLLBERG, K. ; TESCH, M. ; TESSIN, R.: *Geologische Grundlagen zur Geothermienutzung in Nordost-Deutschland 1:200 000 – Blatt Rostock/Stralsund*. Berlin : Gesellschaft für Umwelt- und Wirtschaftsgeologie (UWG), 1992
- DIENER, I. ; WORMBS, J. ; RUSITZKA, I. ; PASTERNAK, G. ; TOLEIKIS, R. ; TESSIN, R. ; TROTTNER, D. ; WUNDERLICH, H.: *Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (1) – Blatt Schwerin/Bad Doberan*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1989
- DIN 4149 (Hrsg.): *DIN 4149:2005-04 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessungen und Ausführung üblicher Hochbauten“*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2005
- DOMINIK, M. ; HAERTLÉ, T. ; HOFFERS, B. ; HOFMANN, M. ; PREUSS, H.: *Symbolschlüssel Geologie – digital (Stand der Bearbeitung: Oktober 2003)*. Hannover : Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLFb), 2003
- DOTT, R.H.: Sandstone types and their associated depositional environments. In: *Journal of Sedimentary Petrology* 34 (1964), S. 625–632
- DOVETON, J.H.: *Geologic log analysis using computer methods*. Tulsa, Oklahoma, U.S.A : The American Association of Petroleum Geologists, 1994 (AAPG Computer Applications in Geology 2)
- DRESSER ATLAS (Hrsg.): *Log Review 1*. Houston, Texas : Dresser Industries Inc., 1974
- DRONG, H.-J.: Das kristalline Grundgebirge in Bohrungen des nordwestlichen Alpenvorlandes. In: *Geologica Bavarica* (2003), Nr. 108, S. 13–110

- DSIN (Hrsg.): *Règle Fondamentale de Sûreté III.2.f, Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage*. Paris : DSIN (Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires), 1991
- ECKHARDT, F.-J.: Geotechnische Probleme der marinen Unterkreide Niedersachsens. In: *Mitteilungen des Institutes für Bodenforschung und Baugeologie, Heft 1, Tonmineralogie und Geotechnik*. Wien : Institutes für Bodenforschung und Baugeologie, 1991, S. 123–158
- ELLIS, D.V.: *Well logging for Earth Scientists*. New York : Elsevier, 1987
- ELSTNER, F. ; MUTTERLOSE, J.: The Lower Cretaceous (Berriasian and Valanginian) in NW-Germany. In: *Cretac. Res.* (1996), Nr. 17, S. 119–133
- ENGELHARDT, von W.: *Sedimentpetrologie, Teil III – Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1973
- EU (Hrsg.): *European catalogue of geological formations having favourable characteristics for the disposal of solidified high-level and/or long-lived radioactive wastes*. Paris : EU (Commission of the European Communities), 1979 (EU-Bericht)
- FRANZ, M. ; SIMON, T. ; MEYER, R.K.F. ; DOPPLER, G.: Die Thermalwasserbohrung „Donautherme“, Neu-Ulm. In: *Geologica Bavarica* Bd. 106. München : Bayerisches Geologisches Landesamt, 2001, S. 81–106
- FREUDENBERGER, W. ; SCHWERD, K.: *Geologische Karte von Bayern 1:500 000*. München : Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996
- FRISCH, H. ; HUBER, B.: Ein hydrogeologisches Modell und der Versuch einer Bilanzierung des Thermalwasservorkommens für den Malmkarst im Süddeutschen und im angrenzenden Oberösterreichischen Molassebecken. In: *Hydrogeol. u. Umwelt (IV. Würzburger Hydrogeol. Koll.)* Bd. 20, 2000, S. 25–43
- FRISCHBUTTER, A. ; SCHWAB, G.: Neogeodynamica Baltica – Recent vertical movements (Map number 4). In: *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge* 8 (2001)
- FÜCHTBAUER, H. (Hrsg.): *Sedimente und Sedimentgesteine – Sediment-Petrologie 2*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1988

- GAIDA, K.-H. ; KEMPER, E. ; ZIMMERLE, W.: Das Oberapt von Sarstedt und seine Tuffe. In: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) HANNOVER (Hrsg.): *Geologisches Jahrbuch A* Bd. 45. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1978, S. 43–123
- GAUTSCHI, A.: Hydrogeologie des Opalinustons – Bedeutung für den Radionuklidtransport. In: *Bulletin der Nagra – Nagra informiert* Bd. 31. Wettingen, Schweiz : Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), 1997, S. 24–32
- GEOPHYSIK LEIPZIG (Hrsg.): *Geophysikalisches Kartenwerk von Ostdeutschland (Reflexionsseismik im Maßstab 1:500 000 bis 1:100 000), Regionales Kartenwerk, verschiedene interne Berichte zwischen 1980–1989*. Leipzig : Geophysik Leipzig (Reinhardt und Gruppe), 1989
- GERARDI, J.: *Bohrung Konrad 101*. 1986. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht, Hannover
- GEYER, O. F. ; GWINNER, M.: *Geologie von Baden-Württemberg*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1991
- HAMILTON, E.L.: Variations of density and porosity with depth in deep-sea sediments. In: *J. Sediment. Petrol.* (1976), Nr. 46, S. 280–300
- HEASLER, H.P. ; KHARITONOVA, A.: Analysis of Sonic Well Logs Applied to Erosion Estimates in the Bighorn Basin, Wyoming. In: *AAPG Bulletin* (1996), Nr. 80, S. 630–646
- HELING, D.: Ton- und Siltsteine. In: FÜCHTBAUER, H. (Hrsg.): *Sedimente und Sedimentgesteine* Bd. 2, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1988 (Sediment-Petrologie), S. 185–231
- HENNINGSEN, D. ; KATZUNG, G.: *Einführung in die Geologie Deutschlands*. Heidelberg, Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 2006
- HEROUX, Y. ; CHAGNONG, A. ; BERTRAND, R.: Compilation and Correlation of Major Thermal Maturation Indicators. In: *AAPG Bull.* (1979), Nr. 63, S. 2128–2144
- HISS, M. ; MUTTERLOSE, J. ; NIEBUHR, B. ; SCHWERD, K.: Die Kreide in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. In: *Newsletter on Stratigraphy: Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2005 (ESTD 2005)* Bd. 41. Berlin, Stuttgart : Gebrüder Borntraeger, 2005, S. 307–312

- HOTH, K. ; RUSBÜLT, J. ; ZAGORA, K. ; BEER, H. ; HARTMANN, O.: Die tiefen Bohrungen im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke – Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962–1990. In: *Schriftenreihe für Geowissenschaften 2* (1993), Nr. 7, S. 1–145
- HOTH, P.: Fazies und Diagenese von Präperm-Sedimenten der Geotraverse Harz–Rügen. In: *Schriftenreihe für Geowissenschaften*. Berlin : Verlag der Gesellschaft für Geowissenschaften (GGW), 1997
- HOTH, P. ; WIRTH, H. ; KRULL, P. ; OLEA, R. ; FELDRAPPE, H. ; REINHOLD, K.: Tonstein-Formationen – eine mögliche Alternative für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland? In: *Zeitschrift geologische Wissenschaften 33* (2005), Nr. 4/5, S. 209–241
- IAEA (Hrsg.): *Report on Radioactive Waste Disposal*. Wien : IAEA (International Atomic Energy Agency), 1993 (Technical Reports Series 349)
- IAEA (Hrsg.): *Siting of Geological Disposal Facilities*. Wien : IAEA (International Atomic Energy Agency), 1994 (Safety Series 111-G-4.1)
- IAEA (Hrsg.): *Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes*. Wien : IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003 (Technical Report Series 413)
- JARITZ, W. ; KOCKEL, F. ; SAMES, W. ; STACKELBERG, von U. ; STETS, J. ; STOPPEL, D. ; SCHOTT, W. (Hrsg.): *Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa*. Hannover : Bundesanstalt für Bodenforschung, 1967
- JOBMANN, M. ; AMELUNG, P. ; POLSTER, M. ; SCHMIDT, H. ; SCHONEBECK, M. ; UHLIG, L.: *GENESIS – Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein*. Peine, 2006. – Abschlussbericht, FKZ 02E9733, DBE Technology
- JUNG, R. ; RÖHLING, S. ; OCHMANN, N. ; ROGGE, E. ; SCHELLSCHMIDT, R. ; SCHULZ, R. ; THIELEMANN, T.: *Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland*. 2002. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)/GGA-Institut, Bericht für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag
- KATSUBE, T.J. ; CONNELL, S.: Shale permeability characteristics. In: *Current Research 1998-E* (1998), S. 183–192

- KATSUBE, T.J. ; ISSLER, D.R. ; COX, W.C.: Shale permeability and its relation to pore-size distribution: Eastern Canada. In: *Current research 1998-E* (1998), S. 51–57
- KATSUBE, T.J. ; MUDFORD, B.S. ; BEST, M.E.: Petrophysical characteristics of shales from the Scotian Shelf. In: *Geophysics* 56 (1991), Nr. 10, S. 1681–1689
- KATZUNG, G. (Hrsg.): *Geologie von Mecklenburg-Vorpommern*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2004
- KATZUNG, G. ; EHMKE, G.: *Das Prätertiär in Ostdeutschland – Strukturstockwerke und ihre regionale Gliederung*. Köln : Verlag Sven von Loga, 1993
- KEMPER, E.: The Boreal Lower Cretaceous: The Valanginian and Hauterivian stages in northwest Germany. In: *Geological Journal* (1973), Nr. 5, S. 327–344
- KEMPER, E.: Die Unterkreide Nordwestdeutschlands – Ein Überblick. In: *Intern. Union Geol. Sciences A6* (1979), S. 1–9
- KEMPER, E.: Das späte Apt und frühe Alb Nordwestdeutschlands – Versuch einer umfassenden Analyse einer Schichtenfolge. In: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (BGR) HANNOVER (Hrsg.): *Geologisches Jahrbuch A* Bd. 65. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1982, S. 1–73
- KEMPER, E. (Hrsg.) ; WEISS, W. (Hrsg.): *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie – Abhandlungen*. Bd. 196: *Dark-coloured interbeds of the late Middle Aptian of Northwest Germany – A contribution to the analysis of carbonate and colour cycles*. 2. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1995
- KOCH, J. ; SCHELLSCHMIDT, R.: Vitritreflexion in Abhängigkeit von der Temperatur – Zum Zusammenhang zwischen Inkohlung und Temperatur speziell bei der Kohlenbildung. In: *Erdöl, Erdgas, Kohle* 117 (2001), Nr. 4, S. 182–188
- KOCKEL, F.: *Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland 1:300 000, Teil 18: Die paläogeographische und strukturelle Entwicklung*. Hannover : Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1999
- KOCKEL, F. ; KRULL, P.: *Endlagerung stark Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen*. 1994. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht, Hannover

- KOCKEL, F. ; WEHNER, H. ; GERLING, P.: Petroleum systems of the Lower Saxony Basin, Germany. In: MAGOON, L.B. (Hrsg.) ; DOW, W.G. (Hrsg.): *The petroleum system – from source to trap* Bd. 60. Tulsa : American Association of Petroleum Geologists (AAPG), 1994, S. 573–586
- KRUMM, H. ; PETSCHIK, R. ; WOLF, M.: From Diagenesis to Anchimetamorphism, Upper Austroalpine Sedimentary Cover in Bavaria and Tyrol. In: *Geodynamica Acta* (1988), Nr. 2, S. 33–47
- KÄMPFE, C.: *Tiefbohrungen in Baden-Württemberg und Umgebung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 1984
- KÖLBEL, H.: Regionalgeologische Stellung der DDR im Rahmen Mitteleuropas. In: ZENTRALES GEOLOGISCHES INSTITUT (ZGI) (Hrsg.): *Grundriß der Geologie der Deutschen Demokratischen Republik*. Berlin : Akademie-Verlag, 1968, S. 18–66
- KÜBLER, B.: Les indicateurs des transformations physiques et chimiques dans la diagenèse, température et calorimétrie. In: LAGACHE, M. (Hrsg.): *Thérométrie et barométrie géologiques*. Paris : Soc. Franc. Minér. Crist., 1984, S. 489–596
- LA FRENIER, J.E. ; DUNKELBERG, J.: Depth conversion; application and verification of depth conversion of 3D and 2D seismic data; case histories. In: *American Association of Petroleum Geologists 1997 annual convention, Annual Meeting Abstracts*, 1997
- LEMCKE, K.: *Geologie von Bayern: Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit – Erdgeschichte-Bau-Bodenschätze*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1988
- LGRB ; LANDESAMT FÜR GEOLOGIE, ROHSTOFFE UND BERGBAU (Bearb.), INNENMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG UND DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (Hrsg.): *Karte der Erdbebenzonen und geologischen Untergrundklassen für Baden-Württemberg 1:350 000 (nach DIN 4149:2005-04 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessungen und Ausführung üblicher Hochbauten“*. Stuttgart, Freiburg, Berlin : Innenministerium Baden-Württemberg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) und Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), 2005
- LUX, K.-H.: *Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzung“, Teil A und B*. 2002. – Berichte für den Arbeitskreis Endlagerung (AkEnd)

- MAGARA, K.: Compaction and migration of fluids in Miocene mudstone, Nagaoka Plain, Japan. In: *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* (1968), Nr. 52
- MAGARA, K.: Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada Basin. In: *AAPG Bulletin* 60 (1976), S. 554–566
- MATTER, A.: *Sondierbohrung Riniken: Geologie*. Bern : Bundesamt für Umweltschutz, 1988
- MATTER, A. ; PETERS, A. ; PETERS, T. ; BLÄSI, H.R. ; SCHENKER, F. ; WEISS, H.P. ; BISCHOFF, K. ; HAMMERSCHMIDT, K. ; HUNZIKER, J.C. ; HURFORD, A.J. ; MAGGETTI, M.: *Sondierbohrung Schafisheim: Geologie*. Bern : Bundesamt für Umweltschutz, 1988
- MEADE, R.H.: Factors influencing the early stages of compaction of clay and sands. In: *J. Sediment. Petrol.* (1966), Nr. 36, S. 1085–1101
- MENNING, M. ; HENDRICH, A.: Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2005 (ESTD 2005). In: *Newsletter on Stratigraphy* Bd. 41. Berlin, Stuttgart : Gebrüder Borntraeger, 2005
- MEYER, K.F. ; SCHMIDT-KAHLER, H.: Gesteinsfolge des Deckgebirges nördlich der Donau und im Molasseuntergrund -Jura-. In: *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000*. München : Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996, S. 90–111
- MILITZER, H. (Hrsg.) ; WEBER, F. (Hrsg.): *Angewandte Geophysik*. Bd. 3: *Seismik*. Wien, New York : Springer Verlag, 1987
- MOE, H. ; MCNEISH, J.A. ; MCCORD, J.P. ; ANDREWS, R.W.: *Interpretation of hydraulic testing at Schafisheim borehole*. Wettingen : Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), 1990
- NAGRA (Hrsg.): *Sondierbohrung Schafisheim*. Wettingen : Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), 1992 (Untersuchungsbericht)
- NAGRA (Hrsg.): *Sondierbohrung Benken*. Wettingen : Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), 2001 (Untersuchungsbericht)
- NAGRA (Hrsg.): *Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse*. Wettingen : Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), 2002 (Technischer Bericht NTB 02-03)

- NAGRA (Hrsg.): *Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle – Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtgesteine und Gebiete*. Wettlingen : Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), 2005 (Technischer Bericht NTB 05-02)
- NEA (Hrsg.): *Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Log-term Isolation of Radioactive Waste*. Köln, Braunschweig : NEA (Nuclear Energy Agency), 2004 („Clay Club“ Workshop Proceedings)
- NLFB (Hrsg.): *Geowissenschaftliche Vorsorgeuntersuchungen zur Standortfindung für die Ablagerung von Sonderabfällen*. Hannover : NLfB (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung), 1986
- OHMERT, W. ; ROLF, C.: The Aalenian boundaries at Wittnau (Oberrhein area, South West Germany). In: CRESTA, S (Hrsg.) ; PAVIA, G. (Hrsg.): *Proceedings of 3rd International Meeting on Aalenian and Bajocian Stratigraphy*. Rom : Ist. Poligraf. e Zecca dello Stato, 1994
- OLEA, R. A.: High-resolution characterization of subsurface geology by computer-assisted correlation of wireline logs. In: HOTH, P. (Hrsg.) ; KRULL, P. (Hrsg.): *12. Jahrestagung der GGW „Mitteleuropäische Senke – Nordsee: Entwicklungsgeschichte, Nutzung und Vorsorge“*. Husum : Gesellschaft für Geowissenschaften (GGW), 2003, S. 74–77
- OLEA, R.A. ; SAMPSON, R.J.: CORRELATOR 5.2 – Computer program and users manual. In: *Open-File Report 2002-51*. Lawrence, Kansas : Kansas Geological Survey, Mathematical Geology Section, 2002
- OSIPOV, V.I. ; SOKOLOV, V.N. ; EREMEEV, V.V.: *Clay Seals of Oil and Gas Deposits*. Lisse/Abingdon/Exton/Tokio : Balkema Publishers, 2004
- PETTIJOHN, F.J. ; POTTER, P.E. ; SIEVER, R.: *Sand and Sandstone*. Berlin : Springer Verlag, 1973
- PREUSS, H. ; VINKEN, R. ; VOSS, H.-H.: *Symbolschlüssel Geologie*. Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB) und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 1991
- PROSHLYAKOV, B.K.: Reservoir properties of rocks as a function of their depth and lithology. In: *Geol. Neft* 4 (1960), Nr. 12, S. 24–29

- QUIGLEY, T.M. ; MACKENZIE, A.S.: The temperature of oil and gas formation in the subsurface. In: *Nature* (1988), Nr. 333, S. 549–552
- RAYMER, L.L. ; HUNT, E.R. ; GARDNER, J.S.: An improved sonic transit time-to-porosity transform. In: *21st Annual Logging Symposium, Transactions, Paper P*, Society of Professional Well Log Analysts, 1980
- REISER, H.: Unterkompaktion und Porenwasserdrücke in jurassischen Tonsteinen der Struktur Thönse. In: *Das Gasfeld Thönse in Niedersachsen –Ein Unikat–*. Hannover : Niedersächsische Akademie der Geowissenschaften, 1991 (Niedersächsische Akademie der Geowissenschaften – Veröffentlichungen 6), S. 123–131
- REUTER, E.: Entwurf, Prüfung und Eigenschaften mineralischer Basisabdichtung. In: *Mitteilungen des Institutes Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig* (1985)
- ROHRMÜLLER, J.: Bohrungen in den kristallinen Untergrund der Süddeutschen Scholle – ein Überblick. In: *Geologica Bavarica* (2003), Nr. 108, S. 5–12
- SATTLIGGER, J.: Simultaneous interactive migration and modelling of seismic reflection horizons and fault systems. In: BROWNE, I. (Hrsg.) ; ST. JOHN, P. (Hrsg.): *Oil and gas; the exploration story*. Melbourne, Australia : Aust. Soc. Explor. Geophys., 1984
- SATTLIGGER, J.: Map migration and modeling algorithm. In: *Society of Exploration Geophysicists, 55th annual meeting*, 1985, S. 553–554
- SATTLIGGER, J.: Transformation of faults in seismic migration and modelling. In: EMERSON, D.W. (Hrsg.) ; MIDDLETON, M.P. (Hrsg.): *ASEG/ SEG international geophysical conference & exhibition; extended abstracts*, 1988, S. 148–150
- SCHLUMBERGER (Hrsg.): *A guide to wellsite interpretation for the Gulf Coast*. Schlumberger Offshore Services, 1975
- SCHLUMBERGER (Hrsg.): *Schlumberger – Log interpretation charts*. U.S.A. : Schlumberger Educational Services, 1991
- SCHWERD, K ; DOPPLER, G. ; UNGER, H.J.: Gesteinsfolgen des Molassebeckens und der inneralpinen Tertiärbecken. In: *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000*. München : Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996, S. 141–187
- SCHÖN, J. ; FRICKE, S.: *Praktische Bohrlochgeophysik*. Stuttgart : Enke im Thieme Verlag, 1999

- SCHÖN, M. ; BÖTTGE, T. ; WITTMANN, H. ; LAUTERBACH, M. ; GATTIG, K. ; WEGNER, U. ; MEYER, P.: *Eignungsnachweis Geothermie Neuruppin*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1988
- SEIDEL, G. (Hrsg.): *Geologie von Thüringen*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1995
- SENGLAUB, Y. ; BRIX, M.R. ; ADRIASOLA, A.C. ; LITCKE, R.: New information on the thermal history of the southwestern Lower saxony Basin, northern germany, based on fission track analysis. In: *Int. J. Earth Sci.* (2005), Nr. 94, S. 878–896
- STACH, E.: *Textbook of Coal Petrology*. Stuttgart : Gebrüder Bornträger, 1982
- STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION DEUTSCHLANDS (Hrsg.): *Ordovizium, Kambrium, Vendium, Riphäikum – Teil 1 Thüringen, Sachsen, Ostbayern*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1997 (Stratigraphie von Deutschland II (Courier Forschungsinstitut Senckenberg) 220)
- STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION DEUTSCHLANDS (Hrsg.): *Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2000 (Stratigraphie von Deutschland III (Courier Forschungsinstitut Senckenberg) 226)
- SWEENEY, J.J. ; BURNHAM, A.K.: Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. In: *AAPG Bull.* (1990), Nr. 74, S. 1559–1570
- TAVENAS, F. ; JEAN, P. ; LEBLOND, P. ; LEROUEIL, S.: The permeability of natural soft clays, part 2: Permeability characteristics. In: *Canadian Geotechnical Journal* (1983), Nr. 20, S. 645–660
- TEICHMÜLLER, M.: Organic material and very low grade metamorphism. In: FREY, M. (Hrsg.): *Low Temperature Metamorphism*. Glasgow, London : Blackie, 1987, S. 114–161
- TESSIN, R. ; BAUSS, R. ; NÖLDEKE, W.: *Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR – Lias 1:500 000*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1975
- THEYS, P.: *Log data acquisition and quality control*. Paris : Editions Technip, 1999
- UNGER, H.J. ; MEYER, K.F.: Kreide im Untergrund des Molassebeckens. In: *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000*. München : Bayerisches Geologisches Landesamt, 1996, S. 125–128

- WALTER, R.: *Geologie von Mitteleuropa (6. Aufl.)*. Stuttgart : E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1995
- WEAVER, C.E.: *Shale-slate Metamorphism in the Southern Appalachians*. Amsterdam : Elsevier, 1984 (Develop. in Petrology 10)
- WORMBS, J.: *Abschlußbericht Geothermische Ressourcen im Nordteil der DDR (2) – Blatt Neubrandenburg/Torgelow*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1989
- WYLLIE, M.R.J. ; GREGORY, A.R. ; GARDNER, G.H.F.: An experimental investigation of the factors affecting elastic wave velocities in porous media. In: *Geophysics* 23 (1958), S. 459–493
- YANG, Y. ; APLIN, A.C.: Influence of lithology and compaction on the pore size distribution and modelled permeability of some mudstones from the Norwegian margin. In: *Marine and Petroleum Geology* (1998), Nr. 15, S. 163–175
- YILMAZ, Ö: Seismic Data Processing. In: DOHERTY, S.M. (Hrsg.): *Investigations in Geophysics* Bd. 2. Tulsa, OK : Society of Exploration Geophysicists (SEG), 1987
- ZGI (Hrsg.): *Strukturkarten geologischer Systeme (1968–1970)*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1970
- ZGI (Hrsg.): *Lithologisch-paläogeographische Karten der DDR (1970–1978)*. Berlin : Zentrales Geologisches Institut (ZGI), 1978
- ZIEGLER, P.A.: *Geological atlas of western and central Europe / Shell International Petroleum*. Amsterdam : Elsevier, 1982

Abbildungsverzeichnis

2.1	Klassifikationsschemas klastischer Gesteine	6
2.2	Porositäten in Abhängigkeit von der Versenkungstiefe von Tonen und Tongesteinen	7
3.1	Lokationen von Bohrungen mit Aufschluss des für die Endlagerung relevanten Tiefenbereiches in Deutschland	10
3.2	Abschätzung des Ton-/Tonsteinanteils für die Bohrung Rhinow 5	14
3.3	Abschätzung des Ton-/Tonsteinanteils für die Bohrung Donautherne Neu-Ulm	15
3.4	Gebirgsdurchlässigkeit von Gesteinsformationen in Abhängigkeit vom abgeschätzten Tonanteil	19
3.5	Der <i>M-N</i> -Plot	30
3.6	Der <i>RH</i> <i>Omaa-Umaa</i> -Plot	31
3.7	Korrelation von Bohrlochmessungen eines Profilschnittes	35
3.8	Schematische Darstellung der Bearbeitung von seismischen Daten und Bohrlochmessungen	37
3.9	Möglichkeiten der Abschätzung der maximalen Temperaturbelastung von Tonsteinen während ihrer Versenkungsdiagenese	39
3.10	Vertikale Krustenbewegungen (Hebungen) in Deutschland	42
3.11	Ausschlusskriterien: Erdbebenzone größer eins und potenzielle Gefährdungsgebiete durch Vulkanismus	43
3.12	Temperaturverteilung in 1000 m Tiefe	47
4.1	Tiefenlage der Basis des sedimentären Deckgebirges in Deutschland	49
4.2	Profilschnitt aus dem südlichen Teil des Norddeutschen Beckens	51
4.3	Profilschnitt Schwäbische Alb–Molassebecken	52
4.4	Stratigrafische Position von Tongesteinsformationen in Deutschland	54
4.5	Schematische Verbreitung von Tonformationen im Jura	56
4.6	Schematische Verbreitung von Tonformationen der Kreide	58
4.7	Schematische Verbreitung von Tonformationen des Tertiär	61
4.8	Tiefenlage von Tonformationen des Tertiär (Oberfläche Untereozän bis Paläozän)	62
4.9	Tiefenlage der Basis Tertiär im Alpenvorlandbecken	63
4.10	Mächtigkeit des Unterjura in Norddeutschland	66
4.11	Tiefenlage der Oberfläche des Unterjura in Norddeutschland	67
4.12	Unterjura: Anwendung der AkEnd-Kriterien „Mächtigkeit und Tiefenlage“	68

4.13	Unterjura: Anwendung der wirtsgesteinsspezifischen Kriterien	69
4.14	Unterjura: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6	70
4.15	Verbreitung des Mitteljura in Norddeutschland	72
4.16	Mitteljura: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6	73
4.17	Unterkreide: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6	75
4.18	Mächtigkeit der Opalinuston-Formation im Alpenvorlandbecken	77
4.19	Tiefenlage der Oberfläche der Opalinuston-Formation im Alpenvorlandbecken	78
4.20	Opalinuston-Formation: Anwendung der AkEnd-Kriterien „Mächtigkeit und Tiefenlage“	79
4.21	Opalinuston-Formation: Anwendung der wirtsgesteinsspezifischen Kriterien	80
4.22	Opalinuston-Formation: Anwendung aller Auswahlkriterien aus Kapitel 3.6	81
4.23	Bohrlochlogs, stratigrafische und lithologische Schichtbeschreibung am Beispiel einer norddeutschen Bohrung	82
4.24	Crossplots am Beispiel einer norddeutsche Bohrung	84
4.25	Formationsdichtelog (RHOB) über Neutronenporositätslog (NPHI) am Beispiel einer norddeutschen Bohrung	85
4.26	Klassifikation der Gesteinstypen am Beispiel einer norddeutschen Bohrung	87
4.27	Korrelation der Bohrlochmessungen am Beispiel von drei norddeutschen Bohrungen	89
4.28	Ausgewählte seismische Profile aus Norddeutschland	91
4.29	Inkohlungstrend am Beispiel von Bohrungen aus zwei norddeutschen Teilgebieten	92
4.30	Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinsformationen in Deutschland	94

Tabellenverzeichnis

3.1	Schlüssel für die Abschätzung des Tonanteils in untersuchungswürdigen tonigen Gesteinen (Tonstein bis Tonmergelstein)	16
3.2	Schlüssel für die Festlegung des Tonanteils in Wechselfolgen bzw. bei der Angabe mehrerer Lithologien mit unbestimmten Mengenverhältnissen	17
3.3	Hydraulische Tests in tonigen Gesteinsformationen in Bohrungen von Norddeutschland und der Schweiz	20
3.4	Übersicht der Bohrlochmessverfahren	22
3.5	Typische Werte der Gesteinsmatrix zur Berechnung der Porosität	29



Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Geozentrum Hannover
Stilleweg 2
30655 Hannover

www.bgr.bund.de