

**Untersuchungen zur
sicherheitstechnischen Auslegung
eines generischen Endlagers im Tonstein
in Deutschland**

- GENESIS -

**Anlagenband
Geologie der Referenzregionen im Tonstein**

Projektleiter: M. Jobmann

Zusammengestellt von: P. Amelung

Bearbeiter: P. Amelung
M. Jobmann
L. Uhlig

Dieser Bericht beinhaltet 2 Bände:

- Hauptband: GENESIS - Abschlussbericht
- Anlagenband: GENESIS - Geologie der Referenzregionen im Tonstein

Die diesem Bericht zu Grunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), vertreten durch den Projektträger für Wassertechnologie und Entsorgung im Forschungszentrum Karlsruhe, durchgeführt (FKZ 02 E 9733). Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Dieser Bericht unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts und darf nur mit Zustimmung der DBE TECHNOLOGY GmbH oder ihrer Auftraggeber ganz oder in Teilen vervielfältigt werden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung Executive summary

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Referenzregion Nord-1 | 2 |
| 2.1 | Geologische Situation im Niedersächsischen Becken..... | 2 |
| 2.2 | Paläogeographische Entwicklung des Niedersächsischen Beckens..... | 6 |
| 2.3 | Charakterisierung der Tone und Tonsteine der Unterkreide | 8 |
| 2.4 | Lithologie und Mineralogie der einzelnen Unterkreide-Stufen | 11 |
| 2.5 | Kriterien für die Festlegung des Modellgebietes..... | 17 |
| 2.6 | Festlegung des Modellgebietes Nord-1 | 21 |
| 2.7 | Erdbeben und Vulkanismus..... | 24 |
| 2.8 | Thermische Umgebungsbedingungen | 25 |
| 3 | Referenzregion Süd-1 | 26 |
| 3.1 | Zeitliche Einordnung | 26 |
| 3.2 | Geologische Situation im Süddeutschen Molassebecken | 28 |
| 3.3 | Erdbeben und Vulkanismus..... | 31 |
| 3.4 | Festlegung des Modellgebietes Süd-1 | 32 |
| 3.5 | Thermische Umgebungsbedingungen | 33 |
| 4 | Referenzregion Süd-2 | 35 |
| 4.1 | Lage des generischen Modells | 35 |
| 4.2 | Geologische Situation..... | 37 |
| 4.3 | Tektonik | 41 |
| 4.4 | Erdbeben und Vulkanismus..... | 43 |
| 4.5 | Thermische Umgebungsbedingungen | 44 |
| 5 | Referenzregion Nord-2..... | 46 |
| 5.1 | Lage des generischen Modells | 46 |
| 5.2 | Geologische Situation im südlichen Niedersächsischen Becken | 47 |
| 5.3 | Stratigraphie im Untersuchungsgebiet..... | 48 |
| 5.4 | Erdbeben und Vulkanismus..... | 57 |
| 5.5 | Thermische Umgebungsbedingungen..... | 58 |
| | Literaturverzeichnis | 59 |
| | Tabellenverzeichnis | 65 |
| | Abbildungsverzeichnis | 66 |

Danksagung

Für ihre tatkräftige Unterstützung möchten wir den Berliner Kollegen der BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), allen voran Herrn Dr. Peer Hoth, ganz herzlich danken. Die fachlichen Diskussionen und vor allem die Zusammenstellung und zielgerichtete Aufbereitung aussagekräftiger geologischer Informationen zu den ausgewählten Untersuchungsgebieten bildeten eine solide Grundlage für die in diesem Vorhaben durchgeführten Untersuchungen. Weiterhin möchten wir uns bei Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Lux und seinen Mitarbeitern Oliver Czaikowski und Dr. Plamen Roussev für den Erfahrungsaustausch hinsichtlich der Anwendung rheologischer Stoffgesetze mit Schädigungsansatz in FEM-Berechnungen bedanken.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes GENESIS werden in diesem Anlagenband die Ergebnisse der Suche nach aussichtsreichen Regionen in Deutschland für generische Endlagermodelle im Tonstein aufgezeigt. Diese Modelle bilden die Grundlage für weitere vergleichende Analysen, so dass eine Bewertung der einzelnen Standortregionen vorgenommen werden kann (GENESIS Abschlussbericht).

In Zusammenarbeit mit der BGR-Berlin wurden auf Basis der Mindestanforderungen des AKEND (2002) für endlagerrelevante Ton-Formationen vier repräsentative Modellregionen in Deutschland ausgewählt:

- Nord-1: in den Unterkreide-Tonen im Osten des Niedersächsischen Beckens
- Nord-2: Jura-Tone im südlichen Niedersächsischen Becken
- Süd-1: Jura-Tone im Süddeutschen Molassebeckens nahe Ulm
- Süd-2: Jura-Tone im Süddeutschen Molassebecken in Klettgau

Alle Einlagerungsschichten sind söhlig bis schwach einfallend (maximal 6°). Die generischen Endlager befinden sich in Tiefen zwischen 300 (Mindestanforderung AKEND) und 900 m. Hinsichtlich des geothermischen Temperaturgradienten in den betrachteten Modellregionen wurden nur unwesentliche Unterschiede festgestellt.

Die Schichtenfolge der Modellregion Nord-1 wird von ca. 1.200 m mächtigen Unterkreide Tonen mit rückhaltenden Eigenschaften aufgebaut, während die weiteren Modellregionen nur die ca. 100-150 m mächtigen Jura-Tone aufweisen. Das generische Endlagermodell wurde im Mittleren Apt (in dem Hedbergellen Mergel) in 300-400 m Tiefe entwickelt. Der mineralogische Stoffbestand des Tonmergels lässt eine günstige gebirgsmechanische Situation erwarten.

In der Modellregion Süd-1 im Süddeutschen Molassebecken befindet sich die Einlagerungsschicht Opalinuston (Dogger α) in ca. 750-850 m Tiefe. Im Hangenden schließen sich Tonstein-Mergelschichten mit mächtigen eisenoolithischen Sandsteinen und nachfolgend der Malmkarst an.

Die Modellregion Süd-2 befindet sich im Grenzgebiet zur Schweiz nahe der Sondierbohrung Benken. Anhand der Standortuntersuchungen Benken erbrachte die NAGRA den Entsorgungsnachweis für radioaktive Abfälle. Der Vorteil besteht hier in der Übertragbarkeit der erfassten Gesteinsparameter der NAGRA (2002) auf die Modellregion Süd-2. Das Wirtsgestein besteht aus dem Opalinuston (Dogger α) und den tonig ausgebildeten Murchisonae-Schichten (Dogger β) in 300-400 m Tiefe.

Im südlichen Niedersächsischen Becken zwischen Minden und Hameln befindet sich die Modellregion Nord-2. Wirtsgestein sind die Schichten des unteren Bajociums (Dogger γ) und des Aaleniums (Opalinuston-Dogger α und Ludwigien-Ton-Dogger β) in 800-900 m Tiefe. Die Ablagerungen sind tonig, schwach dolomitisch und bereichsweise schluffig.

Executive summary

The R&D project GENESIS dealt with the safety-related design of a repository in argillaceous rock (clay, claystone and shale) in Germany. The design studies were carried out by means of generic models. This enclosure shows the screening results on potentially suitable regions in Germany. The Lower Cretaceous and the Middle Jurassic argillaceous rocks of Northern Germany and the Middle Jurassic of Southern Germany were taken into consideration. The evaluation was performed in co-operation with BGR (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources) in Berlin.

The screening has been performed with regards to the requirements given by AKEND (2002). Four regions passing the evaluation stage are situated in:

- the Lower Cretaceous in eastern Lower Saxony basin (North-1), northeastern from Hannover
- the Middle Jurassic (Dogger α - γ) in southern Lower Saxony basin (North-2), between the cities Minden and Hameln
- the Middle Jurassic (Dogger α) in the Southern German Molasse basin, close to Ulm (South-1)
- the Middle Jurassic (Dogger α/β) in the Southern German Molasse basin, close to the Swiss border, county Klettgau (South-2).

The host rocks are dipping from horizontal to shallow angles ($<6^\circ$). The generic models are located in depth from 300 (minimum depth given by AKEND) to 900 meters. In terms of the geothermal temperature gradient there are no significant differences between the regions under investigation.

Stratigraphically the model region North-1 consists of 1.200 m thick clayey sediments supposed to have retention properties, whereas the other regions only consist of the 100 – 150 meters thick Jurassic host rock. The generic model was designed in the strata of Middle Aptian age (the Hedbergellen marls) in a depth of 300 – 400 meters. In comparison to formations with higher clay content carbonaceous claystone (marl) is supposed to have an advantageous geomechanical behavior.

In the model region South-1 the host rock, the Opalinus Clay (Dogger α), is located at a depth of 750 – 850 m. The overlying sediments consist of claystones alternating with marls up to the Malmkarst on their top.

The model region South-2 is located at the Swiss border, close to the exploratory borehole Benken. The results of Nagra's site investigations were used to demonstrate the feasibility for disposing of radioactive waste. The benefit for model South-2 is that the complete parameter set obtained from the investigations at Benken can be transferred reliably to the area South-2. The host rock can be subdivided into the lithostratigraphic units Opalinus Clay (Dogger α) and the clayey Murchisonae-strata (Dogger β), located in a depth from 300 – 400 meters.

The model region North-2 is located in the southern Lower Saxony basin between the cities Minden and Hameln. The host rock consists of the Lower Bajocian (Dogger γ) and the Aalenian (Opalinus Clay - Dogger α and Ludwigien Clay – Dogger β) strata in a depth of 800-900 meters. The sediments can be characterised as clayey, slightly dolomitic and sometimes silty.

1 Einleitung

Um für die sicherheitstechnische Auslegung eines generischen Endlagers im Wirtsgestein Ton in Deutschland einen realitätsnahen Bezug herzustellen, beziehen sich alle Untersuchungen auf die Regionen in Deutschland, die potenziell für einen Endlagerstandort geeignet erscheinen. Diese Referenzregionen wurden in Zusammenarbeit mit der BGR-Berlin ermittelt. Geeignete Referenzregionen befinden sich zum einen im süddeutschen Molassebecken innerhalb des sogenannten Opalinustons sowie im Niedersächsischen Becken in den Unterkreide-Tonen und in einem Teil der Jura-Tone. Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) hat Mindestanforderungen zur Identifizierung von Gebieten aufgestellt, in denen die geologischen Strukturen die Anforderungen an das Isolationsvermögen und die Teufenlage erfüllen können. Wesentliche Punkte sind im folgenden aufgeführt (AkEnd 2002).

- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.
- In der Endlagerregion darf kein quartärer oder Anzeichen von zukünftig zu erwartendem Vulkanismus vorliegen.
- Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen, die eine Realisierung des Endlagers zulässt (für Ton mindestens 10 km²).
- Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone 1 nach DIN 4149. Bei der exakten Abgrenzung der ungünstigen Gebiete sollten Randgebiete einer Einzelprüfung unterzogen werden.
- Die Teufe des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.
- Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1500 m liegen. Bei Tonsteinformationen unterhalb von 1.000 m Tiefe ist jedoch mit sehr schwierigen gebirgsmechanischen Verhältnissen zu rechnen, was extreme Aufwendungen bei der Auffahrung und Betrieb eines Endlagers notwendig macht.

Zusätzliche Schwierigkeiten bei der Nutzung von Tonsteinen in einem Tiefenbereich > 1.000 m sind durch die thermischen Umgebungsbedingungen bedingt. Es wurden daher Tonsteinvorkommen nur im Tiefenbereich zwischen 300 und 1.000 m unter Geländeoberkante berücksichtigt.

Im folgenden werden vier Referenzregionen in Deutschland vorgestellt, welche diese Vorgaben erfüllen.

2 Referenzregion Nord-1

2.1 Geologische Situation im Niedersächsischen Becken

Auf Basis aller zugänglichen geologischen Informationen und unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen des AkEnd wurden für den norddeutschen Raum die Mächtigkeiten und die räumliche Verbreitung der Unterkreide-Tone festgestellt und anschließend potenziell geeignete Gebiete für Referenzmodelle weiter regional eingegrenzt.

Die Mitteleuropäische Senke ist tektonisch in eine Anzahl von Teilsenken untergliedert: die Dänische-, die Polnische-, die Niederländische und die Norddeutsche Senke (siehe Abbildung 2-1). In der Norddeutschen Senke gelten als geologische Hauptstrukturen das Niedersächsische Becken und die Pompeckjsche Scholle.

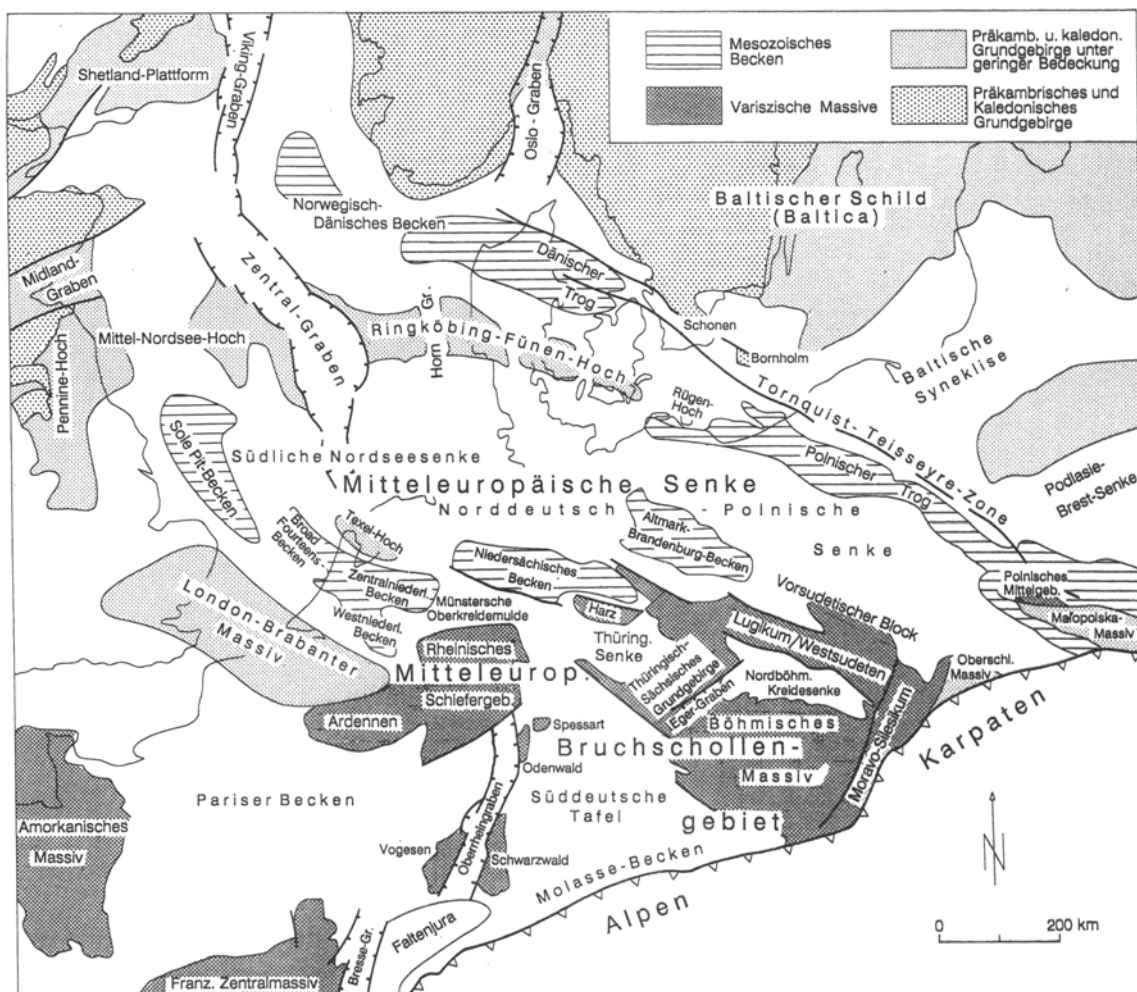


Abbildung 2-1: Geologische Gliederung Mitteleuropas (WALTER 1992).

Im nördlichen Mitteleuropa bestand zur Zeit der Unterkreide ein im einzelnen stark differenzierter Ablagerungsraum, der von Hochgebieten umgeben war. Die Festlandsgebiete, dargestellt in Abbildung 2-2, waren die Mitteleuropäische, die Englisch-Armorkanische und die Fennoskandisch-Sarmatische Landmasse. Der mitteleuropäische Sedimentationsraum bestand aus drei Beckensystemen mit einer weitgehend konkordanten, die gesamte Unterkreide umfassenden Sedimentfolge. Es handelt sich um das kretazische Nordsee-Becken im Nordwesten, dem südlich davon gelegenen Niedersächsischen Becken und den von Nordjüt-

land bis Mittelpolen ziehenden Senkungsraum des Dänisch-Mittelpolnischen Beckens im Osten (KEMPER & ZIMMERLE 1978).

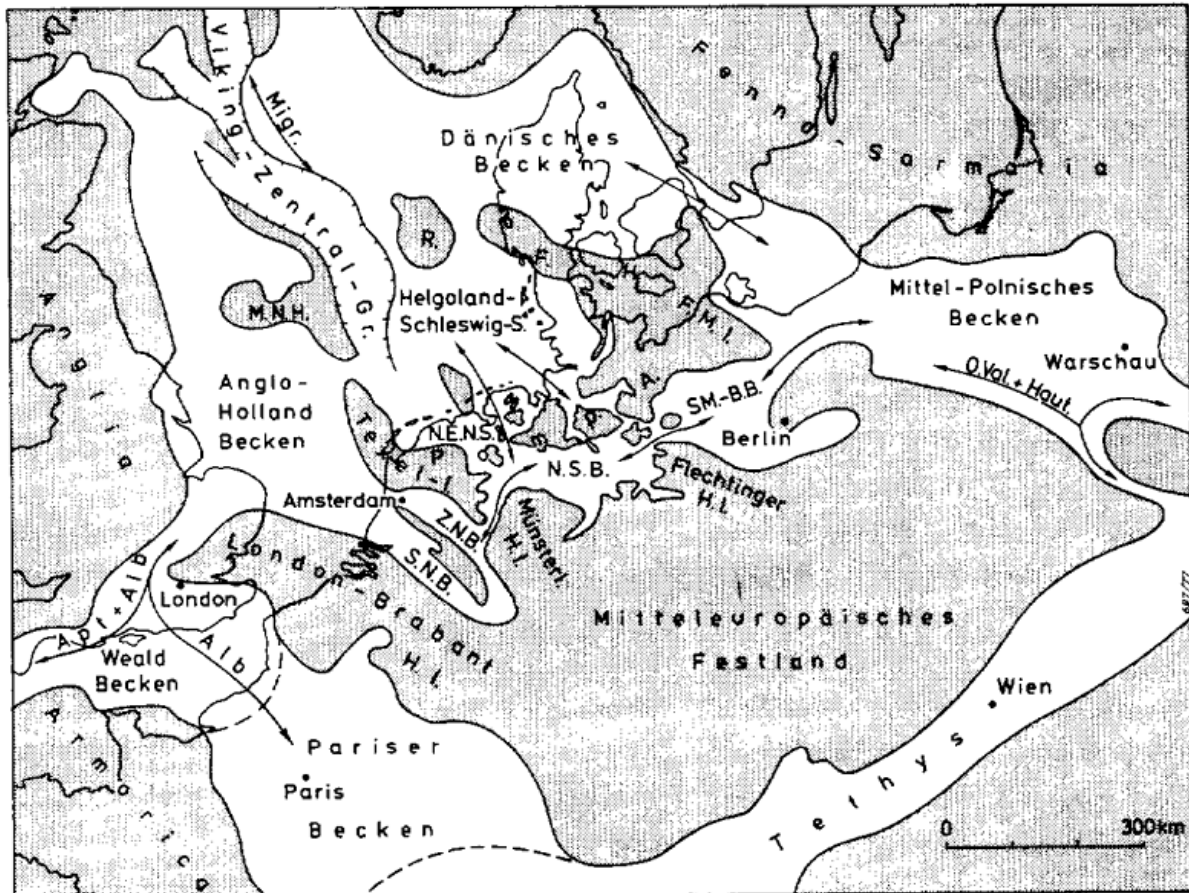


Abbildung 2-2: Generalisierte Paläogeographie der Unterkreide (KEMPER & ZIMMERLE 1978)

Abkürzungen: FMI = Fünen-Mecklenburg-Insel, MNH = Mittel-Nordsee-Hoch, MNR = Mittelniederländischer Rücken, NENS = Nordostniederländisches Sedimentationsgebiet, NSB = Niedersächsisches Becken, Pomp. A. = Pompeckj-Archipel, RFH = Ringkøbing-Fünen-Hoch, S = Sedimentationsgebiet, SM-BB = Südmecklenburg-Brandenburg-Becken, SNB = Südniederländisches Becken, ZNB = Zentralniederländisches Becken

Grundlage der Abbildung 2-2 bilden die Verhältnisse von Hauterive (östliche Bildhälfte) und Apt (westliche Bildhälfte). Die Pfeile demonstrieren die Wege des Wassers und Faunenaustausches (Migrationen). Neben der ständig vorhandenen Nordverbindung bestanden im Hauterive nur Verbindungen nach SE, im Apt nur nach W und im Alb nach W, SW und SE (KEMPER & ZIMMERLE 1978).

Das bedeutendste Element in der Kette der südlich der Nordsee gelegenen Epikontinental-Becken ist der Schollenrandtrog des Niedersächsischen Beckens, das durch besonders große Mächtigkeiten und eine weite Verbreitung der Unterkreide-Sedimente ausgezeichnet ist. Es ist ein relativ kleines Becken mit einer durchschnittlichen Nord-Süd Erstreckung von 80 km und einer Ost-West Länge von etwa 280 km. Dort sind die Unterkreide-Tone weit verbreitet. Das Niedersächsische Becken verdankt seine Entstehung zwei nach Form und Zeit verschiedenen Ausgleichsbewegungen (BOIGK 1968):

1. der Einsenkung des Niedersächsischen Beckens zwischen dem Mitteleuropäischen Festland („Rheinische Masse“) im Süden und der Pompeckjschen Scholle im Norden, die im wesentlichen im Zeitraum des ausgehenden Jura und der Unterkreide verläuft, aber vor Beginn des Alb abgeschlossen ist und

2. der nachfolgenden Heraushebung (Inversion) der Zentralbereiche des Niedersächsischen Beckens und der Umbildung zum Tektogen, die in der Oberkreide beginnt und an der Grenze Oberkreide/Tertiär ausläuft.

Das heutige Strukturbild des Niedersächsischen Beckens ergibt sich aus der paläogeographischen Kontur des Malmtröges sowie aus den bedeutenden Störungen, die z.T. den alten Beckenrändern in nordwestlich-südöstlicher Richtung folgen. Die südlichen Strukturen des Niedersächsischen Beckens sind übertage als Nordwestfälisch-Lippische Schwelle im Osnabrücker und Weserbergland (Weser- und Wiehengebirgs-Flexur) aufgeschlossen. Die Hauptstruktur der Nordwestfälisch-Lippischen Schwelle ist eine 20 km breite und nahezu 100 km lange, aus dem westlichen Osnabrücker Bergland bis in das Weserbergland zu verfolgende Aufwölbungszone der Piesberg-Pyrmonter Achse mit den Karbonhorsten Hüggel, Piesberg und Schafberg. Diese Aufwölbungszone wird, wie in Abbildung 2-3 gezeigt, von der Osning-Zone mit einem südlich vorgelagerten Störungsbündel begrenzt.

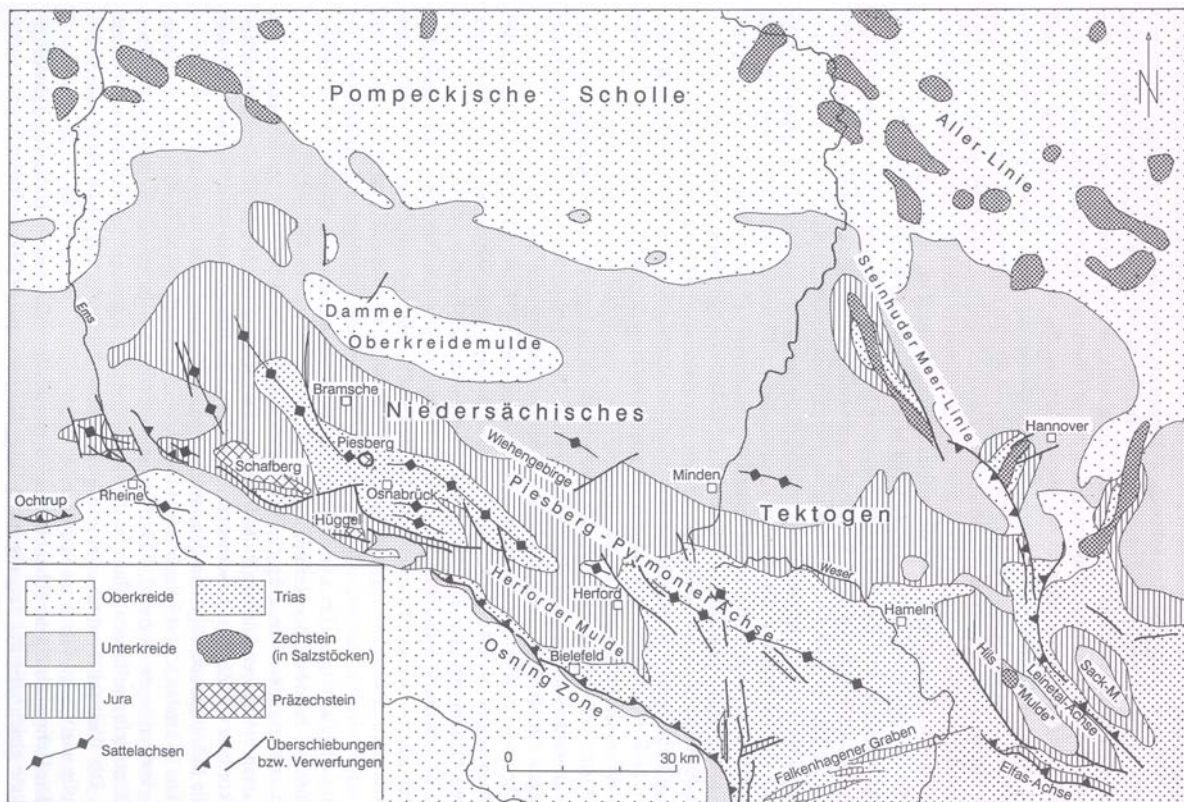


Abbildung 2-3: Der westliche und zentrale Teil des Niedersächsischen Beckens, mit der im Süden gelegenen Aufwölbungszone der Piesberg-Pyrmonter Achse mit dem ibbenbürener Karbonhorsten Piesberg, Schafberg und Hüggel (WALTER 1992).

In der östlichen Fortsetzung des Weserberglandes gehört die im Leinebergland und nördlichen Harzvorland über die Subherzyne Mulde, die Breitsattel Fallstein und Elm bis zum Flechtlinger Höhenzug übertage aufgeschlossene Schichtenfolge von Zechstein bis Kreide ebenfalls noch zur Sedimentfüllung der Norddeutschen Senke bzw. des Niedersächsischen Beckens. Ein bedeutendes Element des östlichen Niedersächsischen Beckens stellt der "Gifhorner Trog" dar, eine durch Salzabwanderung entstandene Randsenke. Der "Gifhorner Trog" ist eine tief eingesenkte Jura-Mulde, die von Wittingen kommend über Braunschweig und Salzgitter südlich bis ins Harzvorland reicht. In Abbildung 2-4 sind die östlichen Strukturen dargestellt.

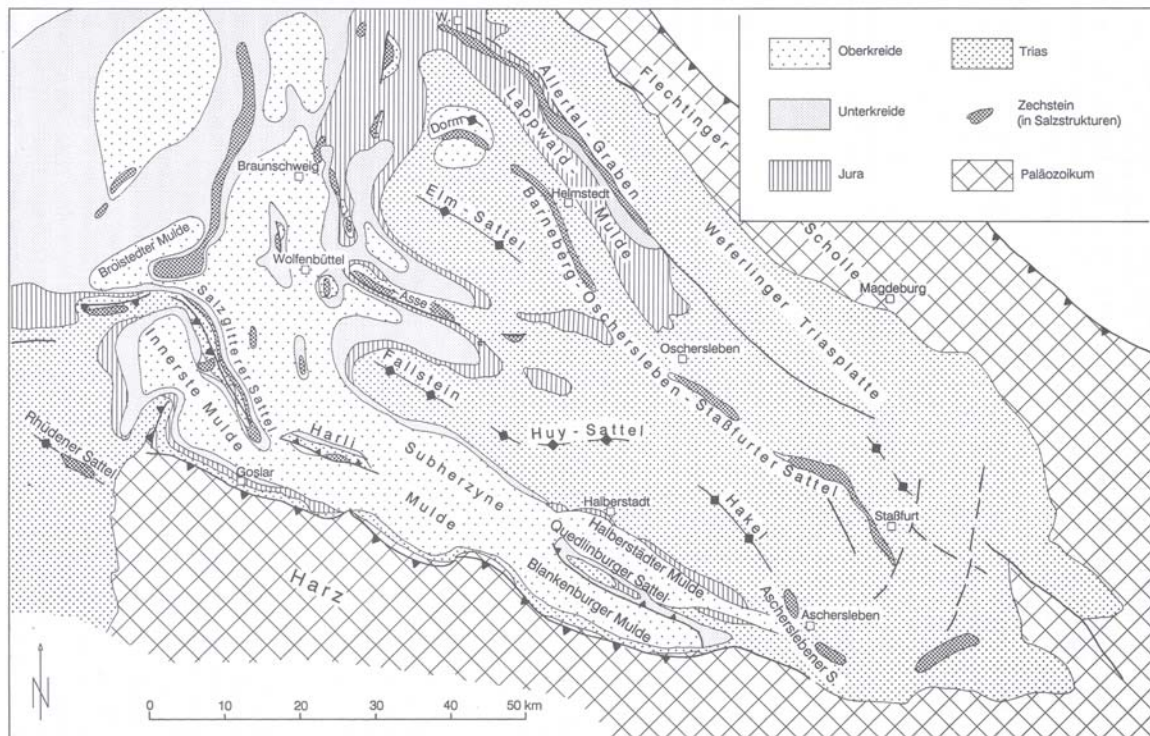


Abbildung 2-4: Die östlichen Strukturen des Niedersächsischen Beckens (WALTER 1992).

Der nördliche Teil des Niedersächsischen Beckens ist dem heutigen Norddeutschen Flachland zuzurechnen. Sein Nordrand ist hier von z.T. mächtigen Quartär- und Tertiärsedimenten bedeckt. Wichtige Teilelemente stellen am Nordrand östlich der Weser die Aller-Linie und westlich der Weser die Weser-Ems Linie dar.

Die Aller-Linie ist, wie in Abbildung 2-3 zu sehen, durch eine kettenförmige Aneinanderreihung einiger Salzstöcke (z.B. Wietze-Hambühren und Nienhagen-Hänigsen) und durch eine Reihe von Strukturen (Sattel von Altencelle-Oppershausen) gekennzeichnet. Das Stadium der Bruchform ist hier gegenüber der Weser-Ems-Linie schwächer ausgeprägt, während die Ausstülpungen des Zechsteinsalzes stärker hervortreten. Die kurze Beschreibung der tektonischen Verhältnisse am Nordrand des Tektogens soll noch durch den Hinweis ergänzt werden, dass gleiche Phänomene auch an der Steinhuder-Meer-Linie auftreten. Die durch Zechsteinsalz z. T. stark überprägte Hebungszone bildet eine der markantesten Fugen, die den Ostteil des Beckens auf eine Länge von 40 km durchsetzt. Westlich der Weser springt der Rand des Tektogens deutlich um 10 – 15 km nach Süden. Hier wird der Nordrand entlang der Linie Nienburg-Vechta-Meppen durch ein System niedrig gegeneinander versetzter WNW-ESE streichender, gegen Norden gerichteter Auf- und Überschiebungen markiert.

Im Westen ist das Tektogen vergleichsweise einfach gebaut. Die Sättel und Mulden klingen in der Ostholländischen Triasplatte aus. Der langgestreckte Sedimentationsraum des Niedersächsischen Beckens ähnelt einem Graben, zumal synsedimentäre, tektonische Bewegungen an den großen Randbrüchen nachgewiesen worden sind.

Eng an diese tektonischen Vorgänge im Niedersächsischen Becken sind magmatische Ereignisse geknüpft. Aufgrund einer starken gravimetrischen und magnetischen Anomalie wurde schon seit Beginn der 50er Jahre auf die Anwesenheit eines größeren Magmenkörpers geschlossen, der als Bramscher Massiv bzw. Pluton bezeichnet wird. Nach geophysikalischen Untersuchungen handelt es sich um einen Lakkolithen, dessen Oberfläche in ca. 5 km Tiefe anzutreffen ist. Der Hauptaufstiegsweg des Materials wird der Osning-Zone zugeordnet. Seine Auswirkungen auf die hangenden Gesteinsschichten sind u.a. durch die hohe temperaturbedingte Inkohlung der organischen Substanz in den Sedimenten des Karbons

und der Unterkreide (M. & R. TEICHMÜLLER 1950; BARTENSTEIN et al. 1971 und DEUTLOFF et al. 1980), durch metasomatische und hydrothermale Erzvorkommen (STADLER 1971) sowie durch die fortgeschrittene Diagenese der Sedimente oberhalb des Intrusivs (FABIAN 1971) belegt. Außer diesem recht gut untersuchten Pluton sind in gleicher Streichrichtung weitere Intrusivkörper anzutreffen. NODOP (1971) nimmt an, dass der Bramscher Pluton Teil eines ausgedehnten Intrusivgürtels ist, der sich von der Ems bis zur Leine erstreckt. Die Intrusion von Vlotho liegt in südöstlicher Richtung des Bramscher Plutons auf der gleichen 150 km langen, tektonischen Fuge, die den Nordabbruch der Rheinischen Masse begleitet. Die Intrusion erfolgte im Raum Bad Oeynhausen dort, wo die WNW-ESE streichende Pyrmonter Achse auf die nördliche Fortsetzung des NS-streichenden Meinberger Grabens stößt. Wie geophysikalische Daten (z.B. refraktionsseismische Messungen) zeigen, sind die Massive von Bramsche und Vlotho mehr oder weniger eigenständige Körper intermediärer bis basischen Charakters zwischen denen keine direkte Verbindung besteht.

Nördlich und nordöstlich der Massive von Bramsche und Vlotho werden im Raum Ellerbürg, Uchte-Loccum und Lauenau ebenfalls Magmatite vermutet wie geothermische Untersuchungen von PATNAIK & FÜCHTBAUER (1964) und refraktionsseismische Messungen von NODOP (1971) zeigen. Mit geothermischen Untersuchungen sind hier in erster Linie Inkohlungsmessungen gemeint, da sie die besten Rückschlüsse auf die geologische Vorgänge in einem Gebiet zulassen.

2.2 Paläogeographische Entwicklung des Niedersächsischen Beckens

Das Unterkreide-System ist sehr komplex, wie der Ablagerungszeitraum von 45 Mio. Jahren auch erwarten lässt. Die Unterkreide (Alter: 144 - 99 Millionen Jahre) wird in 6 Stufen untergliedert:

- Wealden/Berrias (144 – 137 Millionen Jahre)
- Valangin (137 – 132 Millionen Jahre)
- Hauterive (132 – 127 Millionen Jahre)
- Barrême (127 – 121 Millionen Jahre)
- Apt (121 – 112 Millionen Jahre)
- Alb (112 – 99 Millionen Jahre)

Aufgrund unterschiedlicher Sedimentmächtigkeiten und lithologischer Wechsel ist das Niedersächsische Becken in einen Westteil (Emsland), einen Zentralteil (Raum Osnabrück-Bielefeld-Minden-Vechta-Sulingen) und einen Ostteil (Raum Hannover-Braunschweig) unterteilt. Die Abbildung 2-5 zeigt das Niedersächsische Becken in seiner Dreiteilung sowie die angrenzenden Festlandsgebiet bzw. Schwellen zur Zeit der Unterkreide. Es konnten im Niedersächsischen Becken, auch von anderen Systemen bekannte, laterale Faziesunterschiede festgestellt werden. Eine sandige Randfazies ist häufig von einer mergelig-tonigen Beckenfazies zu unterscheiden. Die Ablagerungen der Beckenfazies sind im allgemeinen durch einen geringen Festlandeinfluss homogener aufgebaut.

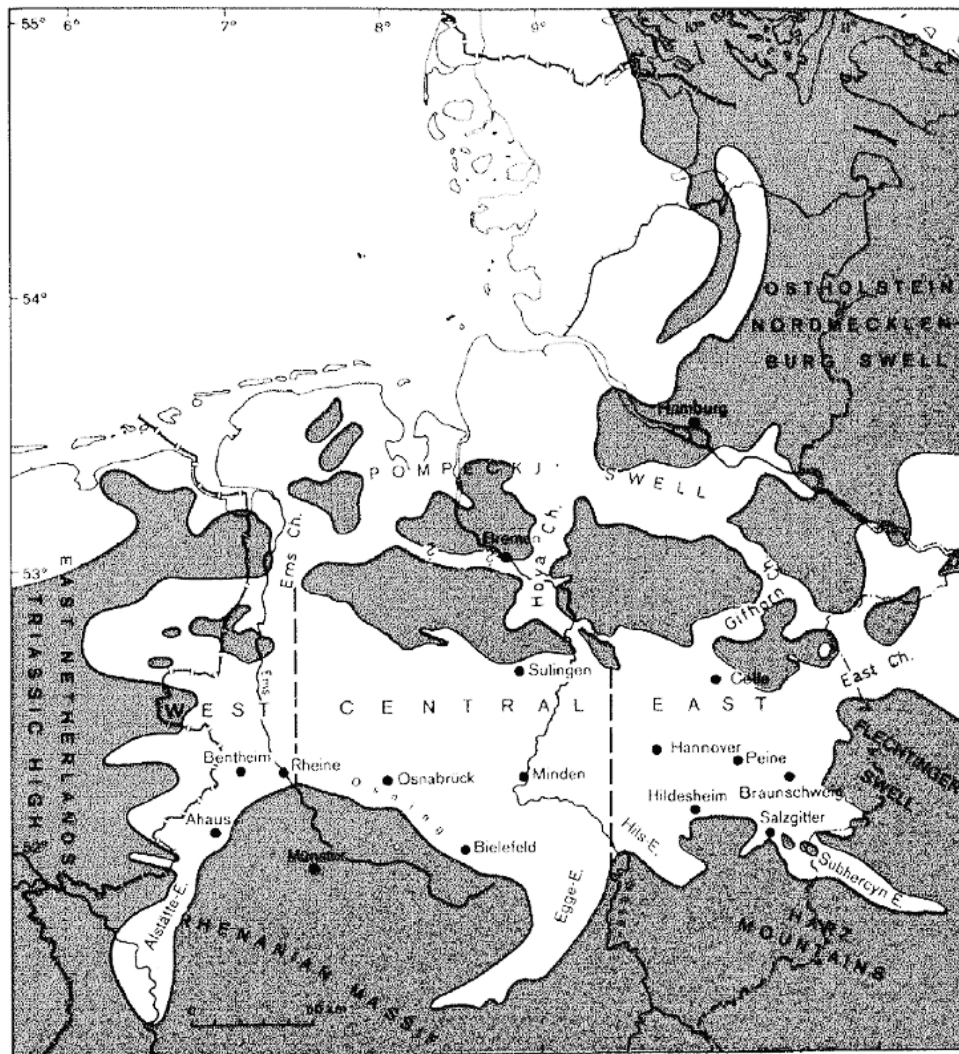


Abbildung 2-5: West-, Zentral- und Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens (KEMPER 1973)

Die paläogeographische Situation während der Ablagerung der Unterkreide-Tone stellt sich nach KEMPER & ZIMMERLE (1978) wie folgt dar:

Die Paläogeographie im Bereich der Nordsee und im Niedersächsischen Becken wurde durch lang andauernde Auf- und Abbewegungen der Kruste (Epirogenese), die zur Bildung von Schwellen (z.B. Pompeckjsche Scholle) und Becken führte, maßgeblich beeinflusst. Die daraus resultierende Anlage, Existenz oder Breite der Meeresstraßen und damit der Grad der Isolierung zur Nordsee sowie über das Polnische Becken zur Tethys waren in den Zeitabschnitten unterschiedlich.

Die Wealden-Schichten kamen in Norddeutschland nur im Niedersächsischen Becken zur Ablagerung. Die das Nordwestdeutsche Wealden-Becken umgebenden Gebiete waren von einem ausgeglichenen Relief gekennzeichnet. Lediglich die im Süden gelegene Rheinische Masse bildete als „Hochgebiet“ das Hauptliefergebiet der Sedimente (STILLE 1909). Ein Charakteristikum während der Wealden-Zeit ist die starke Abschnürung des Beckens von der kretazischen Nordsee, so dass es im mittleren und jüngeren Wealden-Abschnitt zu einer mehr oder weniger starken Aussüßung kam. Im Valangin setzte im NW-deutschen Raum die erste flächenhafte, marine Ingression nach der langen Zeit nicht vollmariner Faziesbedingungen ein. Es wurden die Meeresstraßen zum Nordseebecken angelegt und im Hauterive wesentlich durch Überflutung großer Gebiete auf der Pompeckjschen Scholle erweitert. Ein wesentlicher Wasseraustausch fand zur Zeit des Wealden und Hauterive mit dem Osten, dem Polnisch-Dänischen Becken, statt. Die Verbindung mit dem Nordseebecken erfolgte

durch die Hoya- und Emsstrasse (siehe Abbildung 2-5) und über ein breites Flachmeer-Areal im nordöstlichen Holland.

Vom Barrême ab ist ein Wechsel der Konstellation feststellbar. Regressionen in den südöstlichen Beckenteilen und im östlichen Anschlussbecken führten zu einer Unterbrechung der marinen Einflüsse und Strömungen aus dem Osten. Marine Ingressionen aus dem Osten traten nicht mehr auf. Vermutlich hat zur Zeit des Barrême eine Meeresstraße durch Südholland eine entscheidende Bedeutung gehabt. Zwischen dieser Ahaus-Arnheim-Straße, dem nordostholländischen Flachmeer und den Ems- und Hoya-Straßen konnte sich offenbar ein Strömungssystem entwickeln, das dem Westteil des Niedersächsischen Beckens sauerstoffreiche Wässer aus dem Norden brachte. Da im Bereich der Pompeckjschen Scholle keine bedeutenden Verbindungen oder Meeresstraßen zum offenen Ozean der kretazischen Nordsee existierten, ist es im zentralen und östlichen Teil des Niedersächsischen Beckens kaum zu einem Austausch bzw. Zufluss von Wassermassen aus dem Norden gekommen. Auf Grund der Randlage ohne nennenswerte Meeresströmungen entstanden hier bituminöse Sedimente unter reduzierenden bzw. anoxischen Bedingungen.

Nach einer ersten Bewegungsphase im Ober-Barrême kam es im Unter Apt zur Absenkung der Pompeckjschen Scholle, so dass die Pompeckjsche Scholle ihre trennende Funktion zwischen Niedersächsischem Becken und kretazische Nordsee verlor. Bisher landfeste Areale im Bereich des Niedersächsischen Beckens und der Schwellen wurden überflutet. Die Folge war ein Wechsel der Sedimentationsverhältnisse und damit stärkere Einflüsse des offenen Ozeans im Apt. Die Absenkungsgebiete des Apt sind von unterschiedlicher Art, zu nennen sind der Brechte-Trog (im südwestlichen Emsland) unmittelbar vor dem mitteleuropäischen Festland, der durch große Wassertiefen ausgezeichnet war und nördlich und östlich von Hannover küstenferne Regionen mit starker Absenkung aber nur mäßiger Wassertiefe.

Im Alb setzte sich die im Apt eingeleitete Ausweitung des unterkretazischen Meeresraumes in Nordwestdeutschland in verstärktem Maße fort. Transgressionen spielten wie schon im Apt eine große Rolle. Jedoch herrschten erst ab dem Mittelalb einheitliche Verhältnisse vor. Es wurden die vom Wealden bis Barreme bestehenden Inseln bzw. Hochgebiete mit geringer bzw. ohne Sedimentation fast vollständig überflutet und in das Sedimentationsgebiet mit einbezogen.

2.3 Charakterisierung der Tone und Tonsteine der Unterkreide

Tonige Sedimentgesteine variieren von sehr plastischen Tonen mit einer hohen Tonfraktion sowie geringer Kompaktion und Zementation bis hin zu stark konsolidierten Siltsteinen und Mergeln mit teilweise geringen Anteilen an Tonmineralen. Je nach Art der Beimengungen unterscheidet man im Einzelnen karbonatische, kieselige und bituminöse Tonsteine. Charakteristisch ist bei Sedimentgesteinen (Karbonate, Tonsteine und Sandsteine) ein fließender Übergang ihrer chemisch/mineralogischen Zusammensetzung, wie in Abbildung 2-6 für ton- und kalkhaltige Sedimente dargestellt. Karbonatische und bituminöse Tonsteine sind recht häufig in den Unterkreide Schichten des Niedersächsischen Beckens vertreten, kieselige Tonsteine (z.B. Flammenmergel des Alb) spielen eine untergeordnete Rolle.

Bei den karbonatischen Tonsteinen besitzt besonders der Mergel eine große Verbreitung. Als Mergel werden die Übergangszusammensetzung zwischen kalkarmem Ton und tonhaltigem Kalkstein bezeichnet. Das Karbonat kann als Detritus eingeschwemmt werden; häufiger geht der Karbonatgehalt auf Kalkskelette von Plankton oder auf biochemisch ausgefallenen Calcit zurück. Ein zunehmender Karbonatgehalt in Tonsteinen führt mechanisch zu einer Verfestigung des Materials verbunden mit einer erhöhten Steifigkeit.

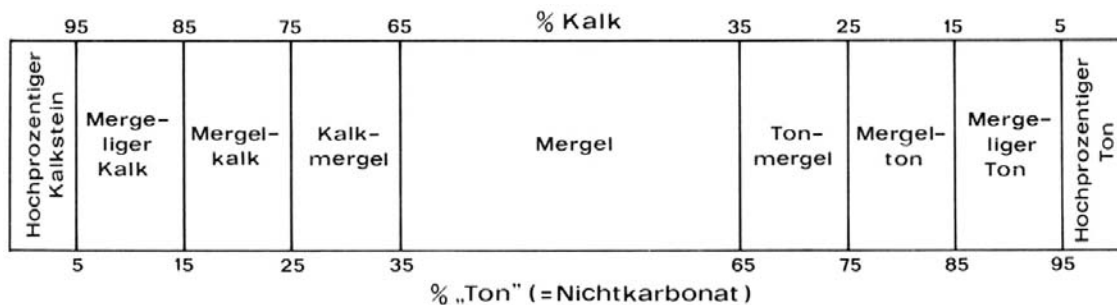


Abbildung 2-6: Benennung der Reihe Kalkstein-Mergel-Ton (MATTHES 1987).

Die bituminösen Tonsteine (z.B. Blätertone, Öl- und Schwarzschiefer) sind gut geschichtet, von dunkelgrauer bis schwarzer Farbe, führen stets Pyrit und besitzen einen größeren Gehalt an organischem Kohlenstoff. Die Bedeutung dieser Gesteine liegt darin, dass sie bei genügender Versenkungstiefe und entsprechenden Temperaturen potentielle Erdölmuttergesteine darstellen. Die Bildung von Kohlenwasserstoffen ist genetisch gebunden an das Vorhandensein von größeren Mengen organischer Substanz ($0,5\% C_{org}$ -Gehalt = Schwellenwert für Erdölmuttergesteine) im Sediment. In vielen Ablagerungsmilieus ist die organische Substanz nicht erhaltungsfähig. Sie wird an der Sedimentoberfläche oxidiert und abgebaut. Die Anreicherung von organischem Material wird durch einen stagnierenden Wasserkörper begünstigt. In der Unterkreide bildeten sich stagnierende Wasserkörper in Zeiten starker Abschnürung des Niedersächsischen Beckens von den offenen Ozeanen, der kretazischen Nordsee im Norden und der Tethys im Süden. Starke Meeresströmungen blieben durch schützende Barrieren/Schwellen (Pompeckjschen Scholle und Rheinische Masse) aus, so dass sich eine sauerstofffreie, reduzierende Zone am Meeresboden ausbildete. Dort reicherte sich organische Substanz an, da unter anaeroben Bedingungen die Oxidation des organischen Materials verhindert und der biologische Abbau reduziert wurde. Es bildeten sich Sapropel, Faulschlämme, aus denen Sapropelite, Erdölmuttergesteine, entstanden. Bei allen Tonsteinen der Unterkreide Stufen liegt der Kohlenstoffgehalt über dem Schwellenwert für Erdölmuttergesteine.

Zur Charakterisierung der Qualität eines Muttergesteins im Hinblick auf sein Potential zur Kohlenwasserstoffbildung dient, neben dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, insbesondere der Wasserstoffindex (HI), der auch die Einteilung in Kerogen-Typen ermöglicht. Kerogene entstehen aufgrund diagenetischer Veränderungen (bevorzugt mikrobiologische Aktivität) in den abgelagerten organischen Substanzen bei Temperaturen von ca. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Kerogen stammt weitgehend aus dem Lipidmaterial (Fette und Fettsäuren) der Algen und weniger von Kohlenhydraten, Ligninen oder Wachsen. Die Bildung von Kerogen erfordert eine Umwandlung der Fettsubstanz zu kohlenwasserstoffähnlichen Materialien. Dies erfolgt bei zunehmend anaeroben Bedingungen durch einen internen biochemischen Abbau der Substanzen. Mit steigender Temperatur und zunehmender Versenkungstiefe entsteht zunächst ein unreifes Gas, das aus biochemisch gebildeten Methan- und Kohlendioxidanteilen besteht. Im folgenden Katagenese-Stadium erfolgt die Bildung von Rohöl zusammen mit Anteilen von Nassgas. Diese Hauptphase der Ölbildung findet bei Temperaturen von $70 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ statt. Durch weitere Zunahme der Temperatur als Folge von tiefer und sehr tiefer Absenkung der Sedimente (Metagenese-Stadium) entsteht Trockengas. Der Typ des vorhandenen Kerogens beeinflusst die Zusammensetzung der gebildeten Kohlenwasserstoffe. So entstehen aus Kerogen, das hauptsächlich aus Pflanzenkutikulae besteht, Erdgas, während Kerogen aus Algensubstanz eher Erdöl liefert. Oxidiertes Material und aufgearbeitetes Material jeglicher Herkunft weisen kein Kohlenwasserstoffpotential auf. Bereiche mit einem hohen thermischen Gradienten scheinen die Bildung von Kohlenwasserstoffen zu begünstigen (TUCKER 1985).

In Tabelle 2-1 sind die Ausgangsmaterialien, die daraus resultierenden Kerogen-Typen und das Kohlenwasserstoffpotential aufgeführt.

Tabelle 2-1: Zusammenstellung des organischen Ausgangsmaterials, des Kerogen-Typs und des Kohlenwasserstoffpotentials.

| Ausgangsmaterial | Kerogen-Typ | Kohlenwasserstoffpotential |
|--|-------------|----------------------------|
| Algen aus Frischwasser und marinem Bereich | I | Erdöl |
| Amorphe Partikel von Phyto- und Zooplankton, Pollen, Sporen und Landpflanzengewebe | II | Erdöl und Erdgas |
| Reste kontinentaler Vegetation, holziges Material | III | Gas |
| Oxidiertes und aufgearbeitetes Material jeglicher Herkunft, Holzkohlen | IV | Kein Potential |

Von sapropelitischen Ablagerungen werden die Unterkreide Stufen Wealden, Barrême und Unter Apt dominiert bzw. unregelmäßig durchsetzt. Das Wealden hat das höchste Kohlenwasserstoffpotential, wie auch etliche produktive Lagerstätten im westlichen und zentralen Teil des Niedersächsischen Beckens zeigen (BINOT et al. 1993). Die C_{org} -Werte des Barrême und Unter Apt liegen zwischen 2 – 10 %, das Kohlenwasserstoffpotential ist hoch.

Für bituminöse Tonsteine ist ein hoher Pyrit-Gehalt charakteristisch. Pyrit entsteht unter reduzierenden Bedingungen (Faziesanzeiger für reduzierende Bedingungen) aus Eisen und freiem Schwefel und zeigt deshalb die herrschenden Redoxbedingungen (Eh-Bedingungen) im Sediment bzw. im Ablagerungsraum an.

Die Bildung ist ein diagenetischer Vorgang, der in Hohlräumen von Meeresböden abläuft. Da solche Hohlräume und mögliche Entstehungszentren in Meeresböden der unterschiedlichsten Milieus vorkommen, bildet sich Pyrit sowohl in hellen und gut durchlüfteten Sedimenten (z.B. in den Mergeln und Tonmergeln des Apt) als auch in den dunklen, bituminösen Tonsteinen des Barrême, die Anzeichen von Sauerstoff-Defiziten unterschiedlichen Ausmaßes erkennen lassen. Die Pyrit-Mengen sind in den letzteren jedoch unvergleichlich höher. Eine Ausnahme von den aufgezeigten Gesetzmäßigkeiten bilden die Laminite, die unter extremem Sauerstoff-Mangel entstanden, in denen Pyrit nur in feinsten Verteilung auftreten kann. Der Grund liegt darin, dass in den Laminiten die für die Pyritbildung notwendigen Hohlräume - z.B. Grabgänge und auch Gehäuse - aufgrund des lebensfeindlichen Milieus fehlen. Dies zeigen auch die Pyrit-Werte in der Bohrung Wiechendorf 1/86. Die höchsten Pyrit-Gehalte von 11 % wurden nicht in den Fischechiefern (Laminite des Unter Apt) selber festgestellt, sondern traten unmittelbar unterhalb der Fischechiefer auf (RACHOLD & BRUMSACK 1995).

In der Tabelle 2-2 sind für die Unterkreide Tone die Maximalwerte der C_{org} - und Pyrit-Gehalte zusammengestellt.

Tabelle 2-2: Zusammenstellung der Maximalwerte der C_{org}- und Pyrit-Gehalte von Unterkreide Tonen im Niedersächsischen Becken

| | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|--|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Wealden | Blätter-schiefer | bis 30 % | I und II | gut bis sehr gut | 3-5 % (Isenstedt) | GAIDA (1981), KEMPER et al. (1978), ERKWOH et al. (1964) |
| Hauterive-Valangin | Tonsteine | 0,6–0,8 % (Sarstedt-Wiedenshal) | k.A. | k.A. | Akzessorischer Bestandteil* | ECKHARDT (1991) |
| Barrême | Blättertone | bis 5 % (Schacht Konrad) | I und II | gut | bis 5 % (Sarstedt) | GAIDA (1981), MÜLLER (1995), KEMPER et al. (1978) |
| Unter Apt | Dunkle Tonstein Folge | bis 3,6 % (Bhrg. Wiechendorf 1/86) | II und III | gut | k.A. | MÜLLER (1995), RULLKÖTER et al. (1995) |
| Unter Apt | Fischschiefer | bis 6,4 % (Bhrg. Wiechendorf 1/86) bis 10 % (Helgoland) | I und II | gut bis sehr gut | bis 11 % (Bhrg. Wiechendorf 1/86) | RULLKÖTTER et al. (1995), RACHOLD et al. (1995) |
| Mittel Apt | Hedbergellen-Mergel | 0,4-0,5 % (Bhrg. Wiechendorf 1/86) | IV, z.T. III | kein Potential | Spuren | MÜLLER (1995), RULLKÖTER et al. (1995) |
| Ober Apt/ Unter Alb | Dunkle Tonstein-Folge | 0,7–1,6 % (Bhrg. Wiechendorf 1/86) | II und III | gut, neigen eher zur Gasbildung | Akzessorischer Bestandteil* | WEHNER (1982) |
| Ober Alb | Bermerode Schichten | 0,25–0,6 % (Kirchrode) | k.A. | k.A. | k.A. | KÜHN (1994) |
| Gesamt | | > 0,5 % | | | | GAIDA (1981) |

Index* = Akzessorische Bestandteile sind Bestandteile eines Gesteins, die zwar nur einen sehr geringen Mengenan- teil des Gesteins ausmachen (< 1 %), aber trotzdem für die Gesteinsvarietät typisch sind, k.A. = keine Angaben.

2.4 Lithologie und Mineralogie der einzelnen Unterkreide-Stufen

Die lithologische Untergrenze der Unterkreide Schichten ist unscharf und liegt im konkordantem Übergang zum Serpulit des Oberen Jura (Malm). Aus den tonig-mergeligen, z.T. auch kalkigen Gesteinsserien des brackisch-marinen Serpulit entwickeln sich die hauptsächlich tonigen Ablagerungen des brackisch-limnischen Wealden.

Wealden (startigraphisches Kürzel: krw)

Im Wealden können in den stark absinkenden Beckenteilen die Mächtigkeiten bis weit über 800 m hinaufgehen. Von der Wealden-Fazies des Beckens ist die terrestrisch dominierte Wealden-Fazies im Osnabrücker Raum, Hannoverschen Bergland und im Ostteil des Beckens zu trennen.

Die Becken-Fazies ist geprägt von tonigen Sedimenten vorwiegend brackisch-limnischer Entstehung. Den Hauptteil der Ablagerungen bilden graue bis olivgrünliche oder lederfarbene Schiefertone und Blättertonsteine. Sie sind meist feinschichtig, feinblättrig, häufig reich an organischem Kohlenstoff (C_{org}-Gehalt, bituminös) und stehen vielfach im Wechsel mit tonsteinartigen, mergeligen Gesteinen, die gelegentlich Schluff- bis Feinsand führen. In den C_{org}-reicheren Paketen wurde ein Kohlenstoffgehalt zwischen 6 und 15 %, vereinzelt bis 30 %, festgestellt. Der C_{org}-Gehalt liegt damit z.T. höher als im Posidonienschiefer (Jura).

Der Posidonienschiefer stellt das weitverbreitete Erdölmuttergestein im Bereich der Nordsee und Mitteleuropa dar.

Die Blättertonsteine des Wealden sind nach dem Gehalt an unlöslichem Anteil organischer Substanzen als gute und z.T. sehr gute Erdölmuttergesteine zu bezeichnen. Sie haben zweifellos, wie mehrere Erdöllagerstätten im westlichen und zentralen Teil des Niedersächsischen Beckens belegen, zur Erdölbildung beigetragen (KEMPER & ZIMMERLE 1978).

In den Tonsteinen der Beckenfazies treten als Einschaltungen Pflaster und Schilllagen von Cyrenen auf. Anreicherungen von Muschelschill sind sehr verbreitet. Sie bilden häufig Lumachellenbänke, die durch karbonatisches oder dolomitisches Bindemittel verfestigt und sekundär zu einem massigen organogenen Kalkstein umgewandelt sind. Ölgeologisch sind diese Lumachellenbänke aber sehr interessant, da die Ölführung des Wealden nicht wie üblich an Sandschüttungen gebunden ist, sondern an diese Schill-Bänken. Die Ablagerungen stellen aber nur mäßige Speicher dar, da sie nicht über große Entfernungen aushalten oder sich zu dünnen, massigen Kalkbänken entwickeln.

Geschlossene Sandsteinpartien fehlen im Westteil des Niedersächsischen Beckens. Es deuten allein dünne Feinsandsteinbänkchen, Sandlinsen und –nester auf eine gelegentliche Zufuhr klastischen Materials hin, dessen Verbreitung sich bevorzugt auf beckenrandnahe Gebiete beschränkt.

In der terrestrisch dominierten Fazies sind Sand und Ton miteinander vermischt oder lagenweise in einem völlig unregelmäßigen Wechsel vorhanden. Im kleineren Ostteil des Niedersächsischen Beckens, im Bereich des Aller-Gebietes sowie des Gifhorner Troges, besteht eine fast durchgehende sandige Fazies, deren Material z.T. von Norden gekommen sein dürfte. Die Sandsteine bilden in den Erdöllagerstätten Eddesse, Ölheim-Süd, Steimbke, Thören und Wietze mehr oder weniger gute Speicher (BOIGK 1981).

Valangin (startigraphisches Kürzel: krv)

Dieser Abschnitt der Unterkreide ist durch eine deutliche laterale Fazies-Gliederung ausgezeichnet. Hellere, kalkreiche zumeist aber sandige Ablagerungen in den randlichen Gebieten stehen dunkelgraue z.T. mergelige, Pyrit führende Tonsteine der zentralen Beckenteile gegenüber. Lokal (z.B. im Raum Diepholz) ist das im Hangenden folgende Hauterive lithologisch vom Valangin nicht zu unterscheiden, so dass die Stufen als Valangin-Hauterive undifferenziert zusammengefasst werden.

In die marinen Tonsteine schalten sich am westlichen und südlichen Beckenrand sandige Ablagerungen ein, die Zeiten einer stärkeren Erosion des Landes entsprechen. Der tiefere Sandstein gehört in das Mittel Valangin und heißt nach der auf ihm gelegenen Ortschaft Bentheimer Sandstein. Der Bentheimer Sandstein, der über 100 m mächtig werden kann, stellt in den Erdölfeldern des Emslandes den besten Förderhorizont dar. Im Ober Valangin treten Sandsteine in den Dichotomiten-Schichten auf.

Die Sandfazies, zu der auch die im Küstensaum abgelagerten Osning- und Hils-Sandsteine gehören, deren Bildung bis in das Unter Alb anhielt, geht östlich der Ems (beckenwärts) generell in tonige Ablagerungen über. Der blaugraue bis mausgraue Ton enthält neben Lagen von Toneisensteingeoden einen merklichen Schluff- bis Feinsandgehalt, der sich in randnahen Profilen bis zur schlierigen Sandführung steigern kann. Die im Wealden häufigen Schill-Lagen und Schill-Kalkbänke fehlen fast vollständig.

Im Ostabschnitt des Niedersächsischen Beckens, der schon im Wealden durch eine stärkere sandige Ausbildung von der normalen Entwicklung im übrigen Becken abwich, greifen Sandschüttungen weit in das Beckeninnere vor. Die Sandsteine des Ober Valangin im Raum östlich und nördlich von Hannover erwiesen sich als Erdölspeichergesteine. Sie wurden u.a.

in den Feldern Leiferde, Nienhagen-Hänigsen und Suderbruch in Förderung genommen (BOIGK 1981).

Hauterive (startigraphisches Kürzel: krh)

Das Niedersächsischen Becken bleibt im Hauterive weiterhin das Hauptsedimentationsgebiet mit erheblichen Schichtmächtigkeiten. Die paläogeographische Situation des Niedersächsischen Beckens zur Zeit des Hauterive ist in Abbildung 2-10 (S. 18) dargestellt.

Die Faziesentwicklung im Hauterive war weitgehend einförmig. Für das Unter Hauterive sind im allgemeinen tonige wie auch sandige Sedimente mit höheren Karbonatgehalten charakteristisch, so dass das Gestein überwiegend als Mergelton- und Tonmergelstein zu bezeichnen ist. Am Ende des Unter Hauterive gehen die Karbonatwerte überall rasch zurück. Diese Entwicklung endete mit einer weit verbreiteten Regression, der eine Lücke in den Randgebieten entspricht. Nach Rückkehr des Meeres wurden zunächst kalkarme Tone von dunkelgrauer bis schwärzlicher Farbe abgelagert, denen wieder Sedimente mit höheren Kalkgehalten folgen. Diese Schwankungen setzen sich im stratigraphisch Jüngeren fort.

Die Beckenfazies ist gekennzeichnet durch bis zu 400 m mächtige, dunkle Tonsteine. Im Ostteil des Niedersächsischen Beckens stehen dieser Fazies hellere Mergelton- und Tonmergelsteine geringerer Mächtigkeit gegenüber.

Barrême (startigraphisches Kürzel: krb)

Das Barrême wird unterteilt in Unter- und Ober Barrême. Die Fazies ist einheitlich marin, vorwiegend tonig bis tonmergelig. Typisch sind feinlamierte, bituminöse Tonsteine mit hohen Kohlenstoffgehalten, die sogenannten Blättertone (Laminite), die eine stabile Wasserschichtung eines nur im Westteil nach Norden offenen Nebenmeeres widerspiegeln. Die Laminite bestehen aus einer Wechsellagerung dünner Karbonat-Lamellen mit dünnen Tonlamellen. Die Karbonate sind ganz oder zumindest überwiegend aus Coccolithen (kalkige Hartteile mariner, pflanzlicher Einzeller) zusammengesetzt. Die Laminit-Bildung tritt in allen Gradationen auf, von wenigen Lamellen bis zu Schichtpaketen bis zu mehr als 20 m. Der Blätterton des Unter Barrême und der Fischschiefer des Unter Apt sind nicht nur die mächtigsten und geschlossensten Folgen, sie sind auch lithostratigraphische Untereinheiten.

Die Neigung zur Laminitbildung ist ein Charakteristikum dieses Zeitabschnittes. Lithologische Untersuchungen zeigen, dass je weiter man im Niedersächsischen Becken nach Osten kommt, um so größer wird die Zahl der laminitischen Einschaltungen. Im stark abgesenkten Beckenteil nördlich von Rheine fehlen sie, so dass man diesen Befund wohl auf den gesamten, heute abgetragenen Beckenhauptteil übertragen kann.

Die Blättertone (Laminite) sind – abgesehen vom Unter Barrême und Unter Apt – besonders häufig noch im tiefen Mittel-Barrême (Bohrungen Konrad 101 und Hoheneggelsen B 19) und im hohen Ober Barrême (Bohrung Wiechendorf 1/86) anzutreffen. Auch die dunklen, pyritreichen Tonsteine, die den Blättertonen zwischengeschaltet sind, weisen auf mangelnde Durchlüftung des Bodenwassers in einem gegliederten Nebenmeer hin. Ein weiteres charakteristisches Phänomen sind das häufige Auftreten von Pyrit sowie Lagen von Konkretionen, deren Größe und Zusammensetzung sehr unterschiedlich und schwankend sein können. Es liegen fast reine Siderit- aber auch reine Calcit-Konkretionen sowie Mischkarbonate vor (KEMPER 1995). Die Karbonatwerte für die Blättertone und den Fischschiefer liegen meist über 10 % und können bis auf weit über 50 % ansteigen.

Das Ober Barrême des Niedersächsischen Beckens wird durch eine ziemlich monotone Abfolge dunkler und oft sogar schwärzlicher Tone repräsentiert, die nur geringe und oben-drein schwankende Karbonat-Gehalte aufweisen. Sie enthalten aber Lagen von Toneisen-

stein-, Calcit- oder Mischkarbonat-Konkretionen sowie gelegentlich Laminit (Blätterschichten-) Einschaltungen.

Apt (stratigraphisches Kürzel: krp)

Die facielle Ausbildung der Apt-Sedimente ist im gesamten Niedersächsischen Becken tonig bis tonig-mergelig. An der Basis treten Tone und Mergeltonsteine auf (Dunkle Tonstein-Folge, DTF), die über den Fischschiefern in mächtige Mergel (z.B. den Hedbergellen-Mergel) übergehen. Den Abschluss des Apt bilden mächtige, dunkle Tone.

Der Fischschiefer des Unter-Apt gehört zu den pyritreichen Blätterschichten des Barrême und stellt die extremste Entwicklung und den Abschluss dieser Reihe dar. Die Hedbergellen-Mergel werden im westlichen und zentralen Teil des Niedersächsischen Beckens z.T. vertreten durch die ewaldi-, clava- und inflexus-Mergel. In diesen Mergel schwanken die Karbonat-Gehalte ebenfalls wie in den Laminiten des Barrême, allerdings auf höherem Niveau. Es liegt eine Wechsellagerung von dunklen, tonigeren und helleren, karbonatreicheren Bänken vor. Die Bänke der Wechsellagerung haben eine überregionale Verbreitung wie geophysikalische Logs und ihre Korrelation beweisen (siehe Abbildung 2-12, S. 23). Für den Raum Hannover ist eine starke Entwicklung der mittelapertischen Schichten zu beobachten, dieses macht die Annahme einer besonders hohen Sedimentationsrate notwendig.

Pyrit tritt in den mittelapertischen Mergeln zurück. Das prägende Mineral der Schlammrückstände ist nunmehr Siderit (FeCO_3). Er bildet jetzt keine massiven Konkretionen wie in der Dunklen Tonstein-Folge (DTF), sondern tritt im Sediment aufgrund des erhöhten Karbonat-Angebots diffus verteilt in Form kleiner Aggregate aus Rhomboedern auf (KEMPER 1995).

Für das Obere Apt und Untere Alb sind dunkle bis schwärzliche, fast karbonatfreie Tone und Tonsteine (z.B. Schwicheldt-Ton und jacobin/nolani-Tone) charakteristisch. Im Grenzbereich Apt/Alb muss es zu einem regressiven Trend gekommen sein, wie am Südrand in das Niedersächsische Becken vorspringende Sandschüttungen (wie z.B. im Emsland der Dörenther Sandstein und der Rothenberger Sandstein sowie die rein sandige Fazies des Osninges) zeigen.

In Anbetracht der enorm mächtigen Sediment-Füllungen der größten Absenkungsgebiete (Brecht-Trog sowie die Tröge nördlich und östlich von Hannover) entsteht die Frage nach der Herkunft und vor allem des Antransportes des Materials. Die Trübstoffe können der Situation nach nur vom mitteleuropäischen Festland („Rheinische Masse“) stammen. Anzeichen für Deltas fehlen jedoch. Die erhaltenen Klastika (z.B. Osning- und Dörenther Sandstein) sind küstennahe Umlagerungssande (KEMPER 1995).

Alb (stratigraphisches Kürzel: krl)

Das Alb ist durch Tonsteine mit dunklen Farben, geringen bis mäßigen Karbonatgehalten und Glaukonitanteilen gekennzeichnet. Im Raum von Hannover ist das Alb im wesentlichen durch hell- bis mittelgraue Mergel gekennzeichnet.

Im Gebiet Salzgitter und auf der ehemaligen Hildesheimer Halbinsel ist im Unter-Alb der Hils-sandstein aufgeschlossen. Dieser markante Sandeintrag ist als Folge einer Heraushebung am Beckenrand zu interpretieren. Im distalen Teil des Sedimentationsraumes äußern sich diese Hebungsprozesse nur noch unmerklich als Feinsandfahnen. Der glaukonitführende, mürbe, stark von Tonlinsen durchsetzte Hils-sandstein kann stratigraphisch das gesamte Unter Alb und auch Teile des Mittel Albs umfassen. Die Grenze Unter-/Mittel Alb ist durch anorganische Vorgänge, nämlich eine Zunahme des Karbonatgehaltes, charakterisiert. Im Ober-Alb gibt es eine Sonderentwicklung, die als Flammenmergel bekannt ist. Der Flammenmergel ist in typischer Ausbildung ein stark kieseliges Karbonat mit sehr ausgeprägter Bioturbation. Im Raum Hannover sind im Alb besonders große Mächtigkeiten festzustellen.

Im Emsland (Westteil des Niedersächsischen Beckens) sind die Sedimente des Alb überwiegend tonig-mergelig und nur an der Basis der transgredierenden Horizonte treten gelegentlich Aufarbeitungslagen mit konglomeratischen Komponenten auf. Das Unter Alb ist dunkelgrau und überwiegend kalkfrei, das Mittel Alb stärker kalkig, rötlich bis grünlich, z.T. bläulich grau gefärbt. Der untere und obere Teil des Mittel Alb ist wie das Ober Alb tonig-mergelig und von grauer Farbe. Am Nordrand der Rheinischen Masse ist im Unter Alb der Rothenberger Sandstein ausgebildet (MEYER 1969).

Unterkreide/Oberkreide

Die lithologische Obergrenze der Unterkreide-Tone zu den Kalksteinen der Oberkreide ist unscharf. Die Grenze Alb (krl, Unterkreide)/Cenoman (krc, Oberkreide) ist durch die Abnahme des Karbonatgehaltes, nämlich von karbonatreichen zu karbonatarmen Gesteinen gekennzeichnet. Das hohe Unter Cenoman ist überall als Kalkgestein entwickelt und lithologisch klar abgrenzbar von den tonigen Schichten des unteren Cenoman und der Unterkreide.

Tonmineralogie der einzelnen Unterkreide-Stufen (Wealden – Alb)

Tonsteine sind Mineralgemenge, in denen die Tonminerale im Vergleich zu weiteren beigemengten Mineralphasen, wie Quarz, Feldspat, Carbonaten oder auch organischer Substanz dominieren. Sie entstehen durch eine Verfestigung von tonhaltigen Sedimenten, wie marine oder limnische Schlämme. Bei der Verfestigung finden neben der Porositätsabnahme in Folge eines Druck- und/oder Temperatureinflusses auch vielfältige chemisch-mineralogische Wechselwirkungen statt, die unter dem Begriff der Diagenese zusammengefasst werden. Die mineralogische Zusammensetzung der Tonsteine beeinflusst zahlreiche geochemische, thermische und felsmechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins.

In den tonigen Sedimenten wird folgender Mineralbestand beobachtet: Quarz, Feldspat, Calcit, Dolomit, Glimmerminerale, Kaolinit, Illit, Chlorit und Tonminerale mit Wechsellagerungsstruktur. Dolomit/Ankerit und Siderit sind nur untergeordnet und lokal vertreten. Pyrit, ein Faziesanzeiger für die reduzierenden Ablagerungsbedingungen von Tonen, ist in nahezu jeder Stufe identifizierbar, wenn auch z.T. nur in Spuren.

Über die Gesamtzusammensetzung der Unterkreide im Bezirk Salzgitter informiert Abbildung 2-7. Auffallend sind die teilweisen hohen Anteile an organischem Kohlenstoff. Im Durchschnitt liegt der C_{org} -Anteil im Valangin bis Alb über 0,5 %, also über dem Schwellenwert für tonige Erdölmuttergesteine. Im Wealden, Barrême und Unteren Apt sind die Werte in den C_{org} -reichen Blättertonsteinen und im Fischechiefer i.d.R. höher als 2 %, in Ausnahmefällen über 20 % (Wealden).

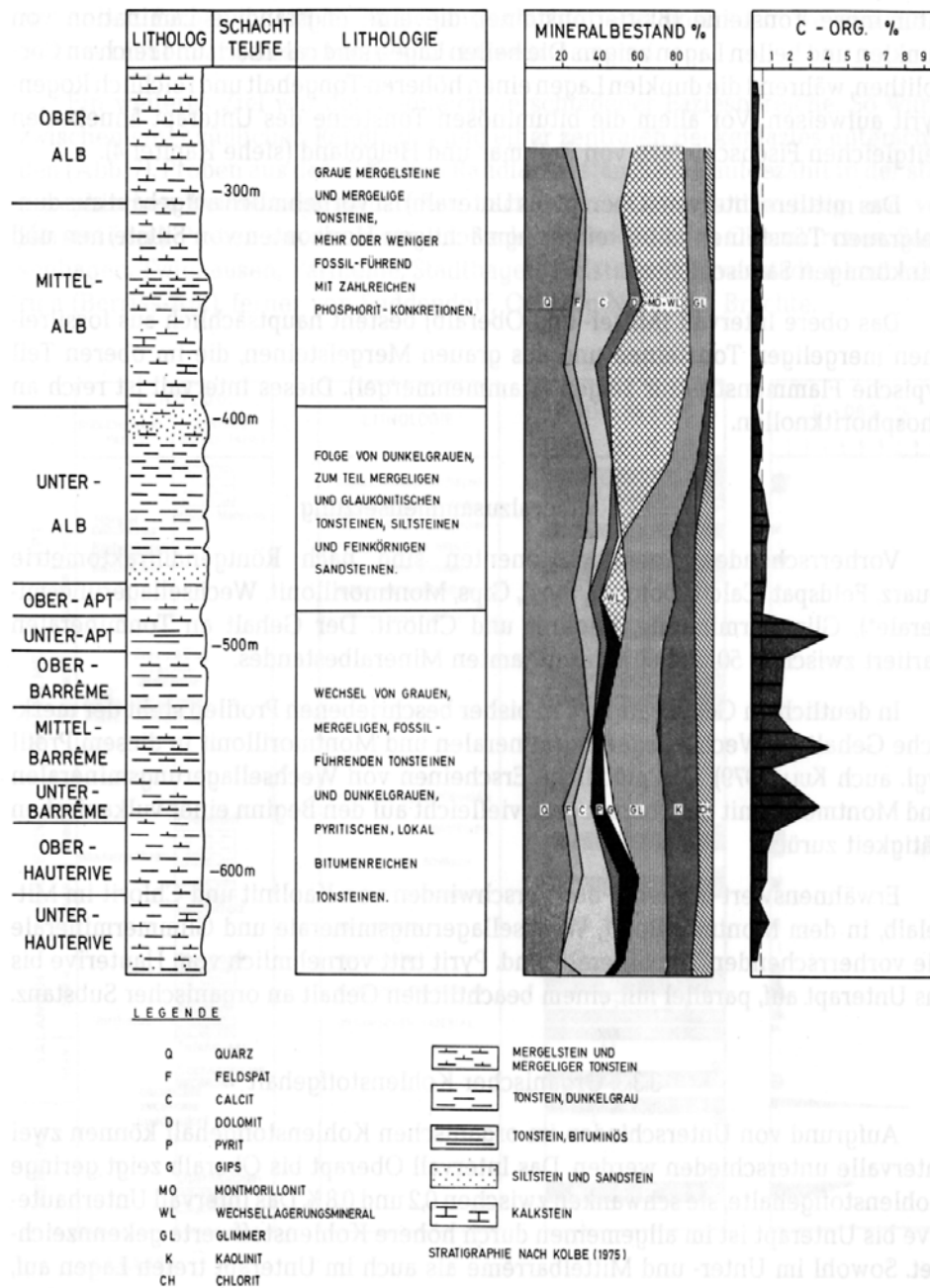


Abbildung 2-7: Lithologie, lithologische Kurzbeschreibung, Mineralbestand und organischer Kohlenstoffgehalt, Hauterive bis Alb, Schacht Konrad II, Salzgitter Bezirk (GAIDA ET AL. 1981)

Bei Untersuchungen der Kreidesedimente Norddeutschlands wurde festgestellt, dass die Tonmineralverteilung der Fraktionen $< 0,63 \mu\text{m}$ und $2 - 0,63 \mu\text{m}$ stark variiert. Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 zeigen die Tonmineralverteilung in den Fraktionen $< 0,63 \mu\text{m}$ und $2 - 0,63 \mu\text{m}$ nach (BROCKAMP 1976).

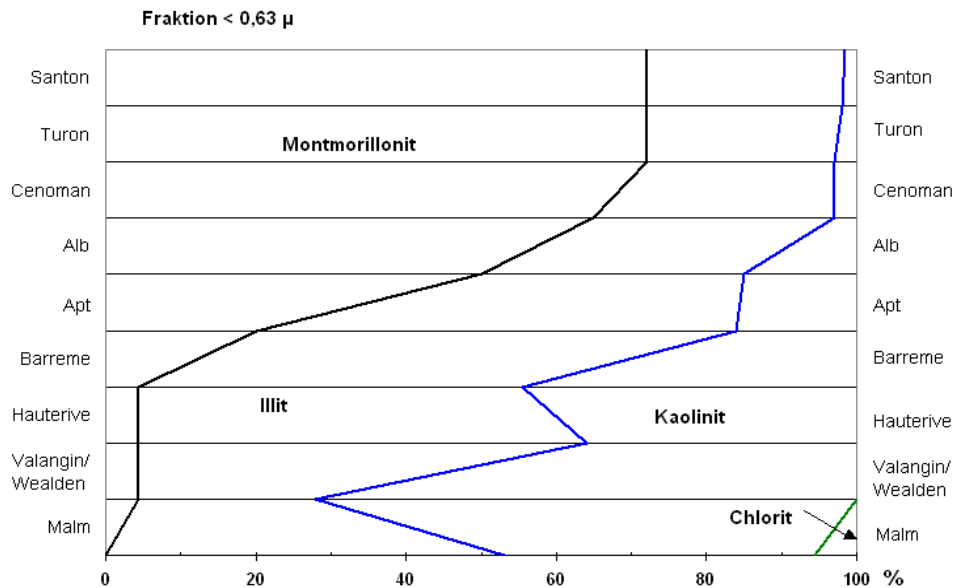


Abbildung 2-8: Tonmineralverteilung der Unterkreide-Tone (Wealden-Alb) in der Fraktion < 0,63 μ m (BROCKAMP 1976)

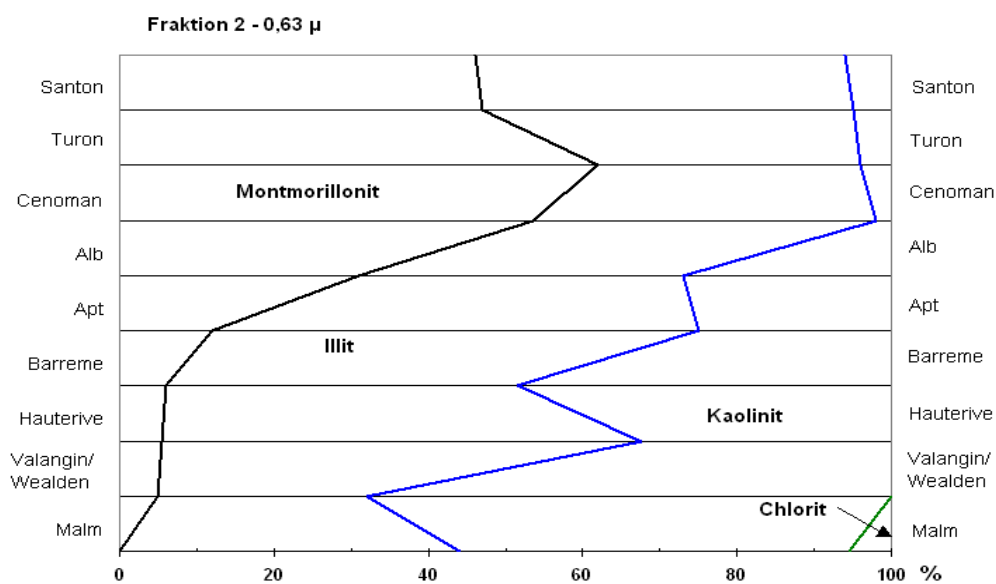


Abbildung 2-9: Tonmineralverteilung der Unterkreide-Tone (Wealden-Alb) in der Fraktion 2 - 0,63 μ m (BROCKAMP 1976)

2.5 Kriterien für die Festlegung des Modellgebietes

Das Modellgebiet wurde anhand der Mindestanforderungen des AkEnd sowie anhand von zusätzlichen Abwägungskriterien festgelegt.

Festlegung an Hand der Mindestanforderungen des AkEnd

Die Unterkreide-Tone sind weiträumig verbreitet und es wurden durchgehende Ton-Profile mit Mächtigkeiten von mehr als 1.500 m festgestellt. Für jede einzelne stratigraphische Einheit der Unterkreide (Wealden – Alb) konnten Tone nachgewiesen werden, die die an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich gestellte Mindestmächtigkeit von mehr als 100 m erfüllen. Anzumerken ist, dass aufgrund Stufen übergreifender, tektonischer Ruhephasen die

lithologische Varianz der Tonsteine z.T. sehr gering ist. Das Wirtsgestein ist also nicht stratigraphisch festgelegt, sondern auf eine tonige Fazies, die z.T. Stufen übergreifend ist.

Südlich der Linie Braunschweig-Peine-Hannover-Neustadt-Rhaden-Bentheim sind die Unterkreide-Tone oberflächennah aufgeschlossen (siehe Abbildung 2-10). Die Unterkreide-Tone erreichen durch Bohrungen nachgewiesene Teufenlagen von bis zu 2.000 m und treten in einzelnen Unterkreide-Stufen mit Mächtigkeiten von bis zu 500 m auf.



Abbildung 2-10: Paläogeographische Situation des Niedersächsischen Beckens zur Zeit des Hauterive, mit Ausbisslinie der Unterkreide Schichten an der Tagesoberfläche.

- 1: Ablagerung unbekannt, 2 : Tone und Tonsteine mächtiger als 400 m,
3: Tone und Tonsteine geringmächtiger als 400 m,
4: vorherrschend Sandsteine. 5: Eisenerze (KEMPER 1973).

Im West- und im Zentralteil des Niedersächsischen Beckens sind Erdöllagerstätten in den Unterkreide Schichten, z.T. stammt das Erdöl aus dem Wealden, und in den Schichten des Jura weit verbreitet (BINOT et al. 1993, BOIGK 1981). Aufgrund dieser Lagerstätten wurde der West- und der Zentralteil des Niedersächsischen Beckens für die Modellgenerierung nicht weiter betrachtet. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass das Ziel der Untersuchungen nicht darin bestand, alle untersuchungswürdigen Tonvorkommen zu erfas-

sen, sondern für die in Norddeutschland aufgeschlossenen Unterkreide-Tone nur einen repräsentativen Modellstandort zu finden.

Es können mehrere Referenzgebiete im östlichen Teil des Niedersächsischen Beckens ausgewiesen werden, so dass eine Optimierung eines Modellstandortes durchgeführt werden konnte.

Festlegung anhand von zusätzlichen Abwägungskriterien

Über die AkEnd-Mindestanforderungen hinaus wurden folgende Abwägungskriterien aufgestellt, die sich auf die geologische Gesamtsituation (Wirtsgestein und Nebengestein) an einem Modellstandort vorteilhaft auswirken:

- Wirtsgestein (Einlagerungsschicht):

- eine stärker konsolidierte oder karbonathaltige Tonschicht z.B. ein Mergel oder ein verfestigter Tonstein (höhere Festigkeitseigenschaften, günstige gebirgsmechanische Situation),
- eine geringe Tiefenlage, mindestens aber 300 m Gebirgsüberdeckung (geringer Überlagerungsdruck sowie niedrige Gebirgstemperaturen in der Einlagerungsschicht),
- geringe Gehalte an Sulfiden (keine Bildung von sauren Lösungen durch Kontakt des Pyrits und Markasits mit Luftsauerstoff) und
- das Wirtsgestein bzw. der organische Kohlenstoff weist nur ein geringes Kohlenwasserstoffpotential auf.

- Nebengestein (Deckgebirgsschichten):

- Tonschichten mit stark reduzierenden Bedingungen gekennzeichnet durch das Auftreten von hohen Gehalten an Sulfiden sowie mit hohen Anteilen an organischem Kohlenstoff (Diffusionssperren für die Nuklid Ausbreitung im Störfallszenarium). Diese Tonschichten sollten sich aus thermischer Sicht in einer ausreichenden Entfernung zu den wärmeentwickelnden Abfällen befinden, um Veränderungen der C_{org} -Anteile möglichst klein zu halten falls Potentiale für einen Kohlenwasserstoffgenese vorliegen.

- Grundsätzlich:

- Flaches, annähernd horizontales Einfallen der Schichten

Flache, horizontale Schichtung

Im genehmigten Plan Konrad wird von einer maximalen Streckenneigung im Endlager von 2,5% ausgegangen. Bei einer nur 100 m mächtigen Tonschicht (wie beim Opalinuston) und unter Annahme des derzeit bevorzugten Konzeptes der vertikalen Bohrlochlagerung mit Bohrlochlängen von etwa 20 bis max. 50 m wären Tonschichten, die ein Einfallen von nicht mehr als 2,5% aufweisen, als eher günstig anzusehen. Je mächtiger eine Tonformation bei horizontaler Schichtung ist, desto weniger spielt das Einfallen eine Rolle. Bei größeren Neigungen kann das untertägige Streckennetz angepasst werden, jedoch nur durch eine Erhöhung des technischen und finanziellen Aufwandes.

Steile Schichtung

Bei steil stehenden Schichten sollte die Mächtigkeit der Tonschicht schon mehrere hundert Meter betragen, da dies einerseits eine aufwendigere, mehrsöhlige Einlagerung erforderlich macht, sofern die Tiefenlage und damit die Gebirgstemperaturen und Gebirgsdrücke dies in

akzeptierbarer Weise überhaupt erlauben. Andererseits ist bei Bohrlochabständen von 50 m bei einer beispielsweise 100 m mächtigen Tonschicht ein extrem langgestrecktes Endlager (50 km und mehr) notwendig. Dies setzt einen entsprechend stofflich ausgebildeten Homogenbereich voraus und macht einen erhöhten Erkundungsbedarf zwingend erforderlich.

Günstige gebirgsmechanische Situation als Abwägungskriterium

Laut EBERTH & LUX (2002) liegt eine als gebirgsmechanisch günstig zu charakterisierende Situation dann vor, wenn das Gebirge als Haupttragelement die einwirkenden Beanspruchungen ohne nachhaltige Endfestigung und damit ohne Ausbildung einer unerwünschten Sekundärpermeabilität aufnehmen kann.

Variationen in der Festigkeit sind vom Kompaktionsgrad, dem Wassergehalt und der Mineralkornzusammensetzung abhängig, wobei die Festigkeit vornehmlich durch den Anteil an Nichttonmineralen bestimmt wird. Dabei ist die Tendenz zu beobachten, dass die Festigkeit mit zunehmendem Tongehalt abnimmt, aber gleichzeitig ein plastisch-duktiler Materialverhalten zu beobachten ist. Tonsteine mit Tonmineralgehalten von mehr als 70 % weisen eher geringe Festigkeitswerte und demzufolge eine größere Endfestigung auf. Mit abnehmendem Tonmineralgehalt und zunehmendem Kalk- oder Quarzgehalt steigt die Festigkeit an. Grundsätzlich kann man aus bergbaulicher Sicht davon ausgehen, dass mergelige Tonsteine auf Grund ihrer höheren Festigkeitseigenschaften als eher günstig anzusehen sind.

Auftreten von Sulfiden und organischem Material als Abwägungskriterium

Sulfide (Pyrit und Markasit) sind nur unter stark reduzierenden Bedingungen stabil. Durch die Auffahrung des Grubengebäudes gelangen die Sulfide oberflächennah mit Luftsauerstoff und O₂-haltige Wasser in Kontakt. Luftsauerstoff und Wasser sind die treibenden Kräfte der Oxidation von Fe(II)- und Mn(II)-Verbindungen sowie von organischer Substanz. Als Beispiel ist die Sulfidoxidation von Pyrit und Markasit (FeS₂) nach (Gl. 1) zu nennen, die für paläozoische Tonschiefer charakteristisch ist (HÖLTING 1996):



Die Sulfide werden demnach in Sulfate überführt, wobei freie Schwefelsäure entsteht, die auf das Gestein einwirkt, das vorherrschende reduzierende Milieu von Tonsteinen verändert, Kationen herauslöst und beispielsweise einer Behälterkorrosion förderlich sein könnte. Diese oberflächennah ablaufenden Prozesse sind ebenso zu erwarten in dilatanten Gebirgsbereichen, die die untertägigen Hohlräume umgeben.

Daraus ergibt sich, dass ein sehr hoher Gehalt an Sulfiden (wie z.B. Pyrit in den Barrême- und Unter Apt-Tonen) in der aufzufahrenden Einlagerungsschicht sich negativ auswirken könnte und damit einen erhöhten Untersuchungsaufwand erfordert.

Andererseits ist die Löslichkeit und Mobilität einiger Radionuklide vom pH-Wert der Lösung und von der Oxidationsstufe abhängig und damit vom Redox-Potential der Lösung.

Reduktionsindikatoren sind die Anwesenheit von reduzierenden Fe^(II)-Mineralen und Schwefel, niedriger Eh-Wert, Vorliegen reduzierter Festphasen, Gehalt an organischem Material und fehlender freier Sauerstoff im Porenwasser bzw. Formationswasser. Reduziertes Eisen (Fe^(II)) kommt vor allem in den Karbonaten Siderit und Ankerit und in Pyrit vor. Oxidiertes Eisen (Fe^(III)) tritt in situ ausschließlich in den wenig reaktiven Silikaten, vor allem Chlorit, auf. Schwefel kommt in den Unterkreide-Tonen vor allem in reduzierter Form im Pyrit vor.

Zu den redoxsensitiven Radionukliden zählen U, Np, Pu und Tc. Das Vorhandensein von Fe^(II) bzw. Sulfid in den Mineralphasen führt zur Reduktion der Actiniden. Die vierwertigen, reduzierten Oxidationsstufen weisen eine geringe Löslichkeit auf und neigen zur Sorption. Daher ist das Auftreten von hohen Gehalten an Sulfiden, solange sie nicht während der Betriebsphase eines

Endlagers mit Luftsauerstoff in Kontakt gelangen, aufgrund des Rückhaltevermögens als positives Kriterium zu bewerten.

Die qualitative Bewertung der Barrierewirkung sowie die Langzeitsicherheit von Endlagern beruht im allgemeinen auf der konservativen Annahme von Störfällen (KIM et al. 2001). Ein solcher Störfall sieht beispielsweise tatsächlich den Zutritt von Formationswasser vor, das innerhalb kurzer Zeit das Abfallgebäude erreicht. Als Formationswässer werden Grundwässer bezeichnet, die – an eine bestimmte geologische Formation gebunden – weitgehend stagnierend sind und aufgrund von sehr kleinen hydraulischen Gradienten in einem nur sehr geringen Austausch mit Wässern anderer Formationen stehen.

Die Tonschichten der niedersächsischen Unterkreide sind für das Transportmedium Wasser sehr gering durchlässig. Die im Falle eines Störfalles im Poren- bzw. Formationswasser gelösten Radionuklide werden deshalb nicht advektiv aufgrund des hydraulischen Gradienten, sondern vor allem durch Diffusion aufgrund des chemischen Gradienten fortbewegt. Organisches Material weist als Huminsäure (Polyelektrolyte mit hohem Molekulargewicht) geringe Mobilität innerhalb der Tonsteine auf und kann Actiniden reduzieren bzw. komplexieren und somit als Diffusionssperre zurückhalten. Hohe Gehalte an organischem Material sind aufgrund des Rückhaltevermögens positiv zu beurteilen.

Andererseits ist durch den thermischen Einfluss von wärmeentwickelnden Abfällen mit einer Temperaturbelastung von bis zu 90 °C auf das Wirtsgestein zu rechnen. In diesem Temperaturbereich ist eine Bildung von Kohlenwasserstoffen (thermogene Gase und Erdöl) durch Zersetzung der organischen Substanz möglich. Jedoch stehen die organischen Bestandteile der Tone sicher nicht vollständig einer mikrobiellen Zersetzung in Kohlendioxid und/oder Methan zur Verfügung.

Im Rahmen einer gesonderten Studie sollen thermisch induzierte Veränderungen der Tonformation unter besonderer Berücksichtigung des organischen Materials untersucht werden.

Für ein generisches Modell werden Einlagerungsschichten gesucht, die in der Homogenität und in der stofflichen Ausbildung nicht stark variieren sowie geringe C_{org} - und Sulfid-Gehalte aufweisen. Aus diesem Grund wurde davon abgesehen, ein generisches Endlagermodell in den Tonen des Wealden, Barrême und Unter Apt zu entwickeln. Andererseits wäre es von Vorteil, wenn Schichten mit hohen C_{org} - und Sulfid-Gehalten die Einlagerungsschicht - außerhalb des Temperaturimpulses und der Veränderungen durch Luftsauerstoff - unter- und überlagern, da dort die positiven Eigenschaften der Radionuklid-Zurückhaltung zum tragen kommen.

2.6 Festlegung des Modellgebietes Nord-1

Der Ostteil des Niedersächsischen Beckens ist durch Salzstöcke in Schwellen und Becken geteilt. In diesen Teilbecken halten die tonigen Unterkreide-Schichten weiträumig aus. An Hand der AkEnd-Mindestanforderungen konnten mehrere Referenzgebiete ausgewiesen werden. Die Festlegung des Modellstandortes erfolgte durch die Anwendung der in Kapitel 2.5 beschriebenen Abwägungskriterien, so dass weitere Untersuchungen und Analysen im Bereich nördlich von Hannover am sinnvollsten erscheinen.

Die Abbildung 2-11 (S. 22) zeigt das generisches Modell Nord-1 im Niedersächsischen Becken nordöstlich von Hannover. Das Profil wurde an Hand der Bohrprofile Großburgwedel 6 und Fuhrberg E2 (siehe Abb. 2-12) sowie den Profilen 122 und 127 des „Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (BGR)“ konstruiert. Es ist 4-fach überhöht. An Hand der Abbildung 2-13 konnte die flächenhafte Verbreitung sowie die Mächtigkeit der Schichten abgeleitet werden.

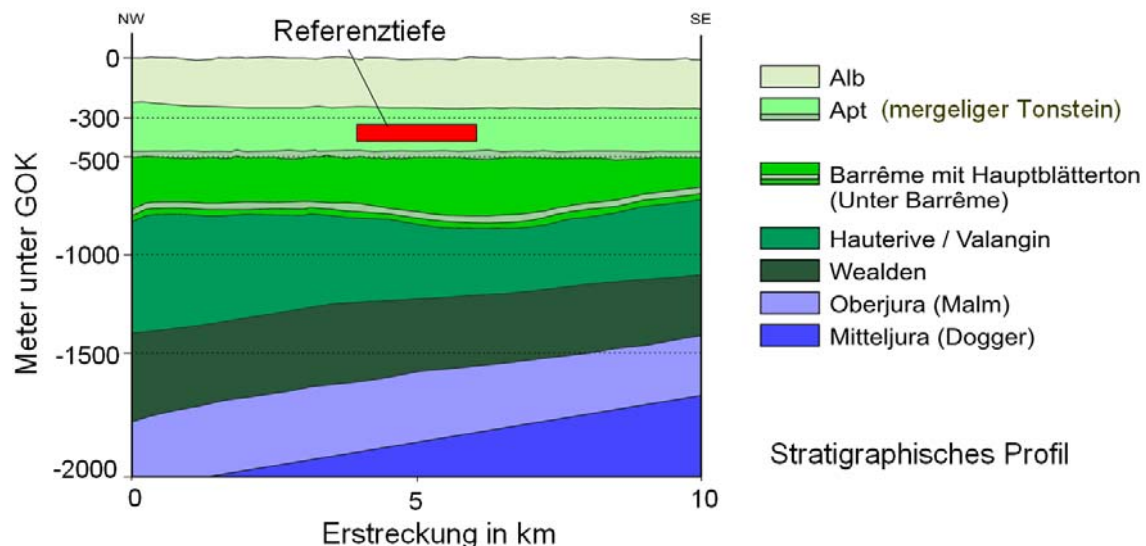


Abbildung 2-11: Generisches Modell Niedersächsisches Becken (Nord-1) nordöstlich von Hannover

Im Profil sind die 6 Unterkreide Stufen (Alb-Wealden, grün eingefärbt) aufgeschlossen. Die Schichten lagern horizontal bei einer flachen Topographie. Die Schichtenfolge am Modellstandort lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Die tonig-mergeligen Schichten des Alb stehen oberflächennah bis 250 m Tiefe an. Im Grenzbereich Alb / Apt ist die sogenannte Dunkle Tonstein-Folge aufgeschlossen, die sich auf Grund der hohen C_{org} -Gehalte (bis 1,6 Massen-%, siehe auch Tabelle 2) und Pyrit (akzessorischer Bestandteil) im Störfallszenarium als Diffusionssperre für die Radionuklidenausbreitung auszeichnen könnte.
- Das generische Endlagermodell wurde in den Schichten des Mittel Apt, in den Hedbergellen-Mergel, in einer Referenz-Tiefe von 300 - 400 m entwickelt. Für den Hedbergellen-Mergel ist einerseits auf Grund der zu erwartenden höheren Festigkeit gegenüber Tonen und dem geringen Überlagerungsdruck resultierend aus geringen Referenz-Tiefe eine gebirgsmechanisch günstige Situation zu erwarten. Andererseits sind nur Spuren von Pyrit- und geringe C_{org} -Gehalte mit einem unbedeutenden Kohlenwasserstoff-Potential festgestellt worden, so dass die Bildung von sauren Lösung bei Kontakt des Pyrits mit Luftsauerstoff als unbedeutend angesehen werden kann.

Die Abbildung 2-12 zeigt eine Korrelation von physikalischen Logs der Bohrungen Fuhrberg E2 (im Bereich des Modellstandorts) und Heeßel 1, die sich beide im Hauptsenkungsraum des Mittel Apt (nördlich von Hannover) befinden. Die ca. 10 km voneinander entfernten Bohrprofile zeigen, dass die Mächtigkeit des Mittleren Apts weiträumig ca. 200 m beträgt und stellenweise auf bis zu 250 m ansteigt. Die Schichten fallen flach nach SE ein. Damit ist die vom AkEnd (2002) geforderte, flächenhafte Ausdehnung von mindestens 10 km² für Tone und Tonsteine nachgewiesen.

- In einer Tiefe von ca. 470 - 700 m folgen die Tone des Unter Apt (mit den Fischschiefern) und des Barrême (mit dem Hauptblättertong des Unter Barrême). Diese Tone variieren in der stofflichen Ausbildung sehr stark, haben hohe Pyrit- und C_{org} -Gehalte mit großen Kohlenwasserstoffpotentialen, so dass sie nicht als Einlagerungsschicht betrachtet wurden. Andererseits könnten sich diese Tone durch ihr hohes Rückhaltevermögen im Störfallszenarium als Diffusionssperre auszeichnen.

- Die in der Literatur als sehr homogen beschriebenen Hauterive Tone liegen aus thermischer und geomechanischer Sicht in einer eher ungünstigen Tiefenlage, da hier sowohl die Gebirgstemperatur als auch der Überlagerungsdruck wesentlich höher ist als in der Referenz-Tiefe des generischen Endlagers (300 – 400 m).
- Die Ablagerungen des Wealden sind im Bereich des Profils (Teufe ca. 1.200 – 1.700 m) sandig ausgebildet.

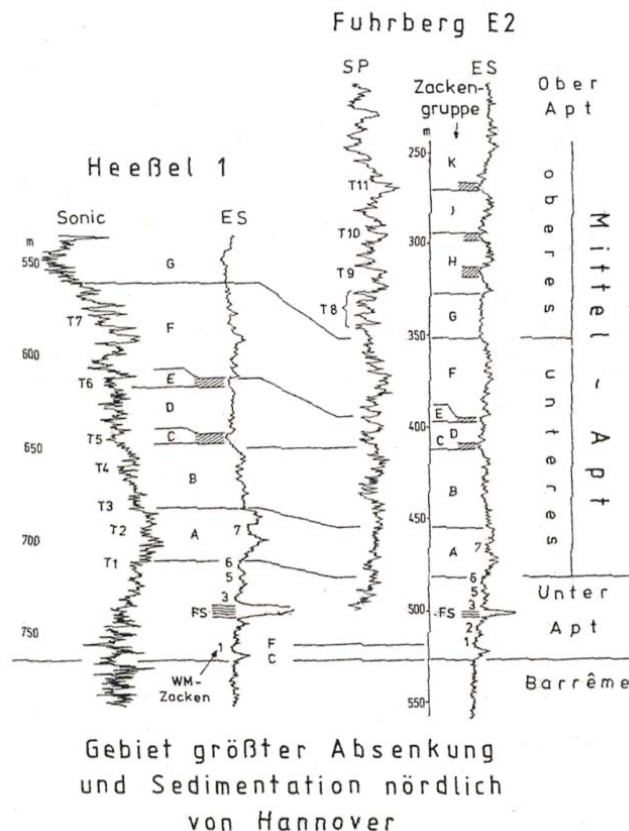


Abbildung 2-12: Typische geophysikalische Logs für Unter- und das gesamte Mittel Apt

Profile der Bohrungen Heeßel 1 (530-720 m) und Fuhrberg E2 (250-480 m) im Gebiet der größten Absenkung und Sedimentation, Abkürzung: FS = Fischechiefer; aus KEMPER (1995). Die Lokalitäten sind in Abbildung 2-13 zu finden.

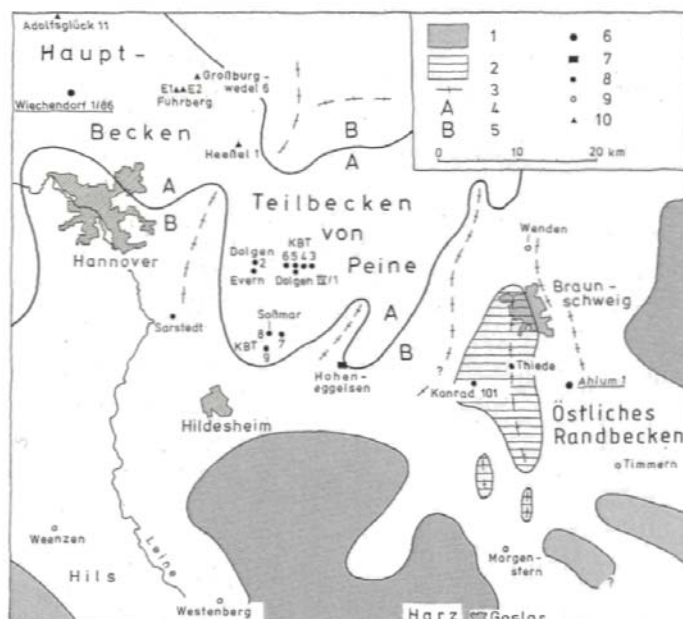


Abbildung 2-13: Der südöstliche Beckenteil des Niedersächsischen Beckens zur Zeit des Apt mit den Tiefbohrungen Heeßel 1, Fuhrberg E2 und Großburgwedel 6 (nordöstlich von Hannover).

Erläuterung der Zeichen:

A: Sedimente des Unter- und Mittel Apt vollständig erhalten und von großer Mächtigkeit (mehr als 200 m),

B: Sedimente des Unter- und Mittel Apt mit Lücken und in einer Mächtigkeit von weniger als 100 m,

1: Landgebiet oder Flachwassersedimente durch spätere Erosion abgetragen,

2: Schwellengebiete,

3: Strukturachsen, 6 – 10 = Lokalitäten und Bohrungen mit multidisziplinärer Untersuchung der Apt-Abfolge aus (KEMPER 1995).

2.7 Erdbeben und Vulkanismus

Bei der Errichtung kerntechnischer Anlagen wird der Seismizität große Beachtung geschenkt. Sowohl die Kenntnis der seismischen Gefährdung (einschließlich historischer Beben) des vorgesehenen Objektstandortes, als auch das Wissen über die Wirkung von Erdbeben sind Voraussetzungen für eine risikoarme Standortauswahl, d.h. einer geringeren Eintrittswahrscheinlichkeit eines Bebens von bestimmter Stärke.

Basis für eine Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten in Deutschland bildet die „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands (DIN 4149)“. Dabei wurden Zonen entsprechend der in einem Zeitraum von ca. 500 Jahren maximal zu erwartenden Intensitäten abgegrenzt. Als Grundlage dienten der historische deutsche Erdbebenkatalog, der alle Erdbeben seit dem Jahre 800 aufführt, die Karte der seismotektonischen Einheiten Deutschlands und die Verteilung der beobachteten Schadenbeben in Deutschland. Der AkEnd kam vor diesem Hintergrund überein, dass eine Grenzziehung für ungünstige Gebiete erst ab Erdbebenzone 2 der DIN 4149 sinnvoll ist. Dies entspricht einer maximalen beobachteten Erdbebenintensität ab 7.0 an der Oberfläche.

Aus der „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands (DIN 4149)“ geht weiterhin hervor, dass im Gegensatz zum Niederrhein-Gebiet, dem Oberrhein-Gebiet und der Schwäbischen Alb sowie Sachsen die Erdbebendichte und –frequenz im Bereich der Norddeutschen Senke außerordentlich gering ist.

Schadenbeben wurden in Priegnitz im Jahre 1410 und in Alfhausen (nördlich von Ibbenbüren) 1770 festgestellt. In diesem Raum überwiegen zusätzlich auch Beben, die auf Einsturzereignisse (Hamburg, Alfhausen ?) oder Bergbau (Ibbenbüren ?) zurückzuführen sind. Das Beben bei Salzwedel in der Altmark am 21.12.1984 mit einer Intensität von < 3,0 könnte möglicherweise mit der Erdgasförderung in der Lagerstätte Salzwedel-Peckensen in Verbindung stehen. Nur in Ausnahmefällen (Soltau) kann auf Beben mit größerer Herdtiefe geschlossen werden (LEYDECKER & STEINWACHS 1980).

Damit kann Erdbebengefährdung im Bereich der Norddeutschen Senke als Negativkriterium für die Untersuchungswürdigkeit weitgehend ausgeschlossen werden (KOCKEL & KRULL 1995).

Im Bereich des östlichen Niedersächsischen Beckens und der Pompeckjschen Scholle sind mächtige, evaporitische Gesteinsfolgen des Perm und der Oberjura zu Salzstöcken und –kissen aufgestiegen. Untersuchungen haben gezeigt, dass es kaum eine Salinarstruktur gibt, die nicht von einer Sockelstörung unterlagert ist. An diesen Sockelstörungen besteht potentiell eine erhöhte Erdbebengefahr. Dass derzeit und in der überschaubaren Vergangenheit Bewegungen an diesen Störungen nicht auftreten, zeigt die Karte der historisch belegten Erdbeben in Norddeutschland. Die historisch belegten Beben sind den bekannten Sockelstörungen im allgemeinen nicht zuzuordnen.

Bei der Endlagerstandortauswahl ist eine zu erwartende, vulkanische Aktivität im Zeitraum von einer Millionen Jahren zu berücksichtigen.

In Deutschland müssen außer den Gebieten Eifel und Vogtland/Egergraben keine weiteren Gebiete mit einer vulkanischen Gefährdung benannt werden (AkEnd 2002). Mit einem Wiederaufleben des Vulkanismus in der Norddeutschen Senke ist im Zeitraum von einer Millionen Jahre nicht zu rechnen.

2.8 Thermische Umgebungsbedingungen

Im Modellgebiet beträgt die Temperatur an der Geländeoberfläche 8,0°C. Der Temperaturanstieg wurde aus Berechnungen mit 38,0 mK m⁻¹ bestimmt. Einen Überblick über die Gebirgstemperaturen im Modellgebiet zeigt die Abbildung 2-14.

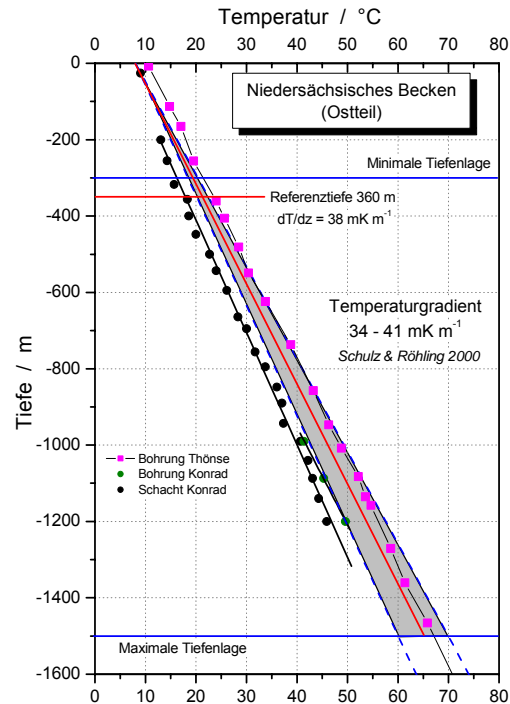


Abbildung 2-14: Untergrundtemperaturen in der relevanten Region in dem gemäß AKEnd zulässigen Tiefenbereich

3 Referenzregion Süd-1

3.1 Zeitliche Einordnung

Als älteste Formation des Doggers entspricht der Opalinuston definitionsgemäß der biostratigraphischen Zone des *Leiceras opalium* und umfasst damit einen Zeitabschnitt von knapp 1 Ma. Der unterste Abschnitt umfasst die Subzone des *Pachylytoceras torulosum* ($\alpha 1$). Im wesentlich mächtigeren Ober- α ($\alpha 2$) fehlt dieser Ammonit; neben *Leioceras opalium* findet sich im Profil *Leioceras costosum*. Das Verhältnis von $\alpha 1$ zu $\alpha 2$ ist etwa 1:5. Die lithologische Untergrenze ist mit dem Dach der Jurensis-Mergel im gesamten Untersuchungsgebiet klar definiert. Ohne scharfe Grenze gehen die Jurensis-Mergel in den Opalinuston über.

Die paläogeographische Situation während der Ablagerung des Opalinustons (Braunjura α) stellt sich wie folgt dar (siehe Abbildung 3.1): Das frühe Jurameer hatte im nordschweizer-südschwäbischen Ablagerungsraum den Charakter eines flachen Epikontinentalmeeres mit Wassertiefen von wenigen Dekametern. Es wurde begrenzt von einer mächtigen Karbonatplattform im Westen, den Alemannischen Inseln im Bereich des heutigen Aar-Gotthard-Massivs im Süden, dem Böhmisches-Vindelizischen Land im Osten und dem Germanischen Becken im Norden. Durch detritische Zufuhr von Süden und Osten wurden 100 m tonreiche Sedimente abgelagert, was durch eine entsprechend rasche Subsidenz im Untergrund ermöglicht wurde. Die faziell wie auch von der Mächtigkeit her stark unterschiedliche Ausbildung des Dogger α deutet auf einen von Schwellen (Randen-Klettgau Gebiet) und Senken geprägten Ablagerungsraum hin. Die Mächtigkeit der Tone des Dogger α beträgt 80 – 130 m, doch herrschen allgemein recht konstante Werte zwischen 90 und 110 m vor.

Der Opalinuston besteht aus einer relativ monotonen Folge dunkelgrauer, z.T. kalkiger, glimmerreicher, siltiger Tonsteine. Nach den publizierten Daten ist die Tonmineral-Zusammensetzung sehr unterschiedlich: 18-36 % Illit, 6-12 % Chlorit, 10-20 % Kaolinit, 6-12 % Wechsellagerungsminerale Illit/Smectit-Typ. Der freie Wassergehalt (ohne innerhalb der Minerale gespeichertes Wasser) schwankt zwischen 4 und 12 Prozent (SCHMIDT 1996).

Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung des Opalinustons Süddeutschlands zeigt Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons Süddeutschlands nach HEKEL (1989) und RIEDEL (1989) sowie SCHMIDT (1996).

| Mineral | HEKEL & RIEDEL (1989) | SCHMIDT (1996) |
|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Illit | 25 | 18 - 36 |
| Kaolinit | 16 | 10 - 20 |
| Illit / Smectit | 13 | 6 - 12 |
| Chlorit | 4 | 6 - 12 |
| Quarz | 30 | - |
| Calcit | 6 | - |
| Siderit | 3 | - |
| Pyrit | 1 (≤ 3) | - |
| Akzessorien | 2 | - |
| Organischer Kohlenstoff | $\leq 1,6$ | - |

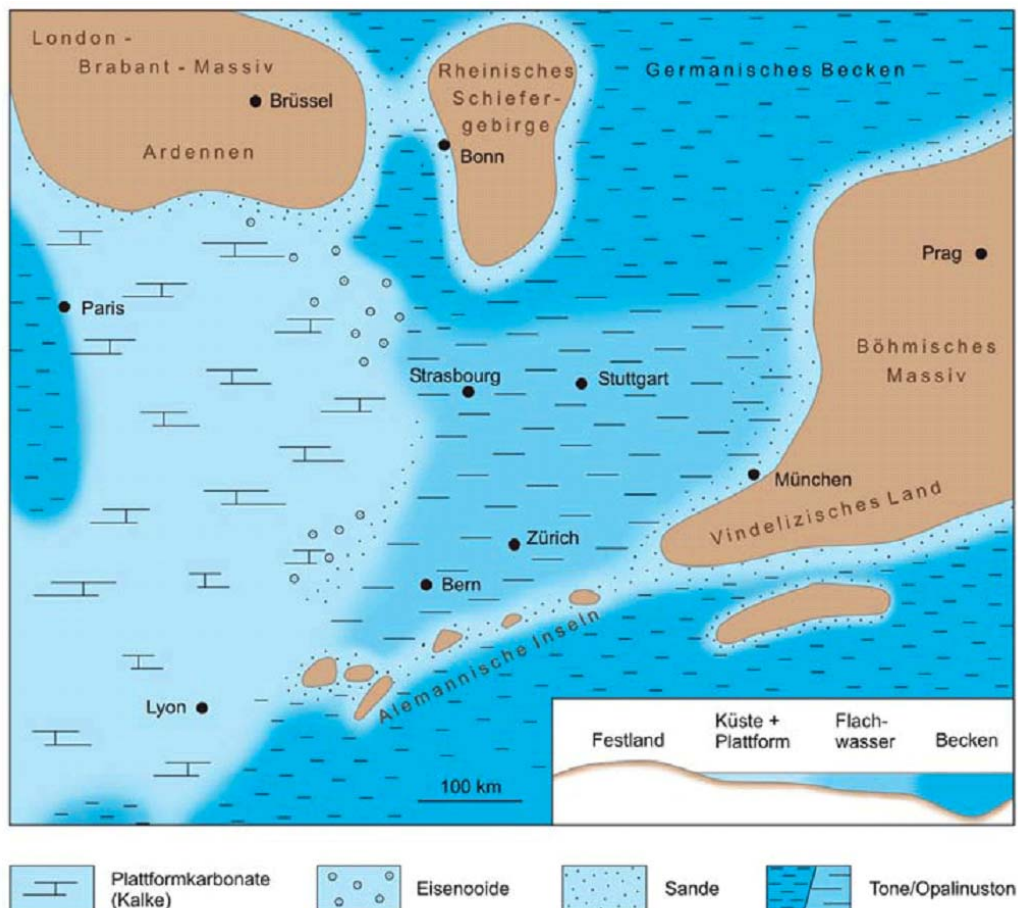


Abbildung 3-1: Paläogeographische Situation zu Beginn der Ablagerung des Opalinustons (NAGRA, 2002a)

Im Tonstein liegen eingeschaltet bis zu 20 cm mächtige, kalkig zementierte Feinsandstein- bzw. Siltsteinlagen, -linsen und -laminae sowie sandige Mergelhorizonte, biotritische Kalkbänke, knollige Hartgründe, Siderit- und Kalkkonkretionen und einzelne Ammoniten. Pyrit in fein verteiltem Zustand und in Form von Konkretionen findet sich vor allem im unteren und mittleren Teil des Opalinustons. Der Sand-/Quarzgehalt, die Glimmerführung und der Karbonatgehalt nehmen zum Hangenden hin zu. Der zunehmende Quarzgehalt zeigt, dass die Verfrachtung von größerem Material ins Beckeninnere gegen Ende des Aalenium zunahm.

In Baden Württemberg und Bayern geht der Opalinuston graduell über in die Wasserfall-schichten (dem jüngsten Schichtglied des Dogger α), in die sandigen Zopfplatten und die Donzdorfer Sandsteinen (Dogger β). Bei den Wasserfall-schichten, eine mehr oder weniger geschlossene Folge von Sandmergelbänken, handelt es sich sehr wahrscheinlich um eine asynchrone Fazies, die während des Dogger α beckenwärts (Richtung W) wandert (SCHMIDT 1996). Auf dem Niveau der Wasserfall-schichten sind demnach drei Faziesbereiche zu unterscheiden: eine kalkreiche Fazies der Murchisonae-Schichten im Westen der Schweiz (z.B. Mont Terri), eine tonreiche Fazies der Murchisonae-Schichten im Gebiet Klettgau-Randen-Wutachtal und die sandreiche Fazies der Wasserfall-schichten im Bodenseegebiet und Süddeutschland, die zur mittleren Schwäbischen Alb bis zu einer Mächtigkeit von 65 m ansteigt. Darüber folgen wiederum Tone, die aber bereits in den Braunen Jura β gestellt werden. Der Dogger β zeichnet sich durch regressive Zyklen aus, die mit Tonsteinen beginnen, in sandige und/oder bioklastische Mergel und Kalke übergehen und häufig mit einer eisenoolithischen Dachbank enden. Die Sequenzen wurden wahrscheinlich von eustatischen Meeresschwankungen verursacht, die im gesamten Ablagerungsraum gleichförmig, d.h. zeitgleich verliefen.

In Süddeutschland fallen die mesozoischen Schichten sehr gleichmäßig und flach nach Süden ein und werden im Molassebecken von den mächtigen Sedimenten der tertiären Molasse überdeckt. Die Doggerschichten tauchen konform mit den anderen Ablagerungen mehrere 1000 m ab und sind durch die nordwärts vorgestoßenen alpinen Decken überschoben bzw. durch die Hebung der Alpen aufgeschleppt worden. In südöstlicher Richtung erreichen die Tonsteine des Dogger α die Region der Alpen nicht. Sie streichen nach Bohrerergebnissen in etwa auf einer SW-NE verlaufenden Linie (München-Landshut-Straubing) aus. Von dieser Linie aus nimmt die Mächtigkeit des Opalinustons in nordwestlicher Richtung kontinuierlich zu und erreicht auf der Schwäbischen Alb mit 150 m westlich von Ulm seine größte Mächtigkeit (HOTH et al. 2002a)

3.2 Geologische Situation im Süddeutschen Molassebecken

Baden Württemberg gehört zum größten Teil zur sog. Süddeutschen Großscholle, einem Krustenstück, das vor allem in seiner jüngeren tektonischen Geschichte und dem tektonischen Zustand eine gewisse Einheit darstellt. Die Großscholle kann fast durchweg durch auffällige tektonische Linien umgrenzt, werden wie in Abbildung 3-2 zu sehen ist:

Im W bildet das System der östlichen Randstörungen des Oberrheingrabens, im Tertiär entstanden und bis heute wirksam, eine markante Trennlinie. Im N stößt die Scholle dann an die Südbegrenzung des Rheinischen Schiefergebirges, die gleichfalls eine tektonische Störungslinie von hohem Rang darstellt. Die Grenzlinie verschwindet nach NE unter den tertiären Vulkaniten des Vogelberges. An der NE-Seite ist die Süddeutsche Großscholle durch eine seitlich ablösende Schar NW-SE streichender Abbrüche mit hohen Sprunghöhen vom Thüringer Wald, Frankenwald und Fichtelgebirge sowie der Bayerisch-Böhmischen Masse getrennt. Die Grenzlinie wird jeweils entlang der Störungen gezogen, die an der gegenwärtig bestehenden Erdoberfläche Grundgebirge gegen Deckgebirge versetzen.

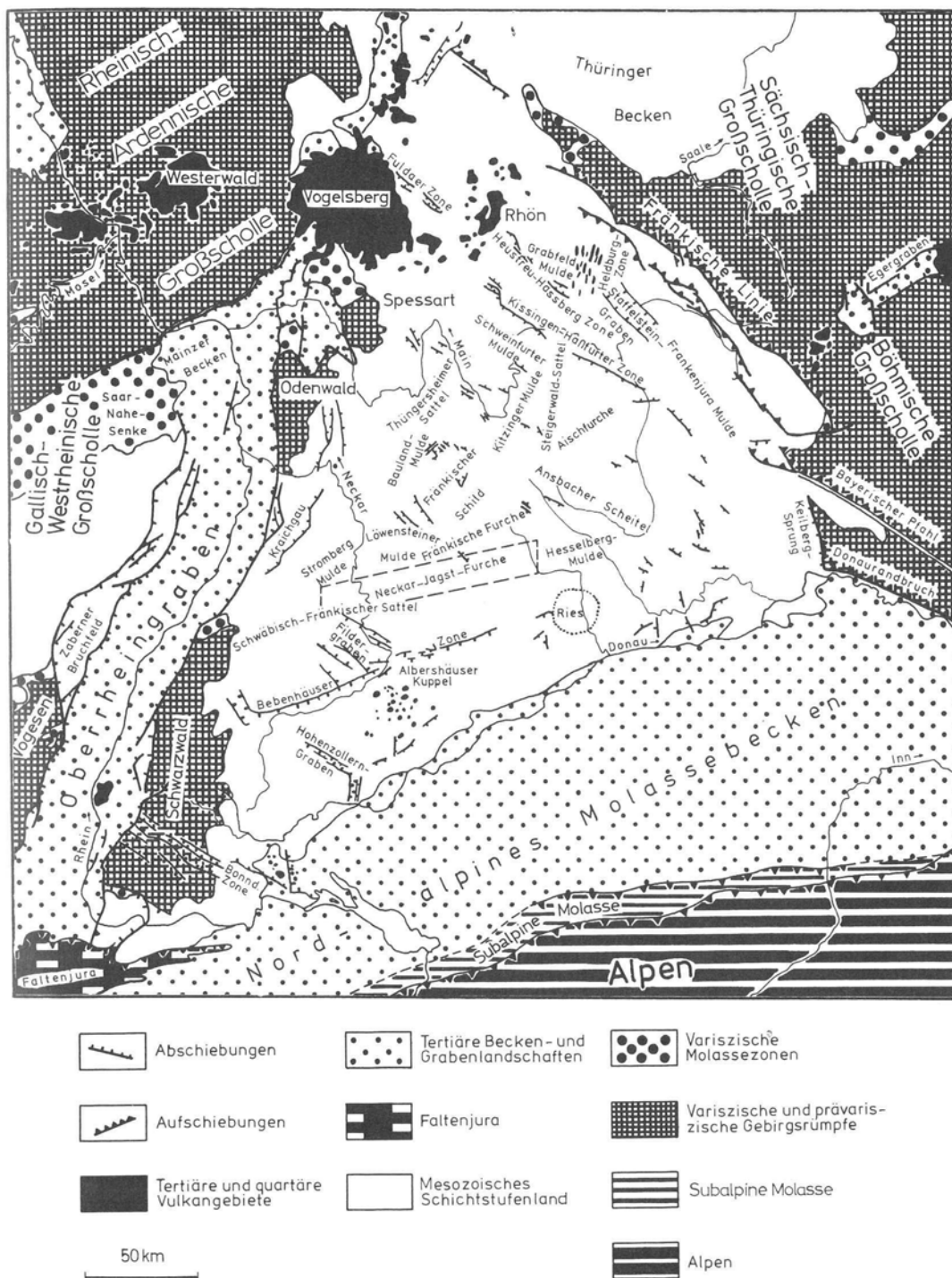


Abbildung 3-2: Süddeutsche Großscholle und angrenzende Gebiete. Aus R. DÜRR 1982, nach W. CARLÈ 1950 (GEYER et al. 1991)

Im S sind die tektonischen Einheiten der Alpen mit nordvergenten Überschiebungen auf die darunter abtauchende Großscholle bewegt worden, womit an sich eine scharfe Grenze gegeben ist. S des Hochrheins tritt dann der Schweizer Faltenjura als Faltengebirge in Erscheinung. Die Schweizer Faltenjura wurde von seinem kratonischen Untergrund abgescher, gefaltet und nach N auf die nicht gefalteten Tafeljura, einem Teil der Großscholle, aufgeschoben. Im Bereich der Großscholle gehört deren Grundgebirgssockel zu verschiedenen Zonen des variskischen Gebirges.

Die Unterlage der permischen und mesozoischen Gesteine des Deckgebirges wird in Baden-Württemberg weithin von kristallinem Grundgebirge gebildet, d.h. von älteren, durch Kristallisationsprozesse (Metamorphose bzw. Erstarrung von Schmelzen) geprägten Gesteinen.

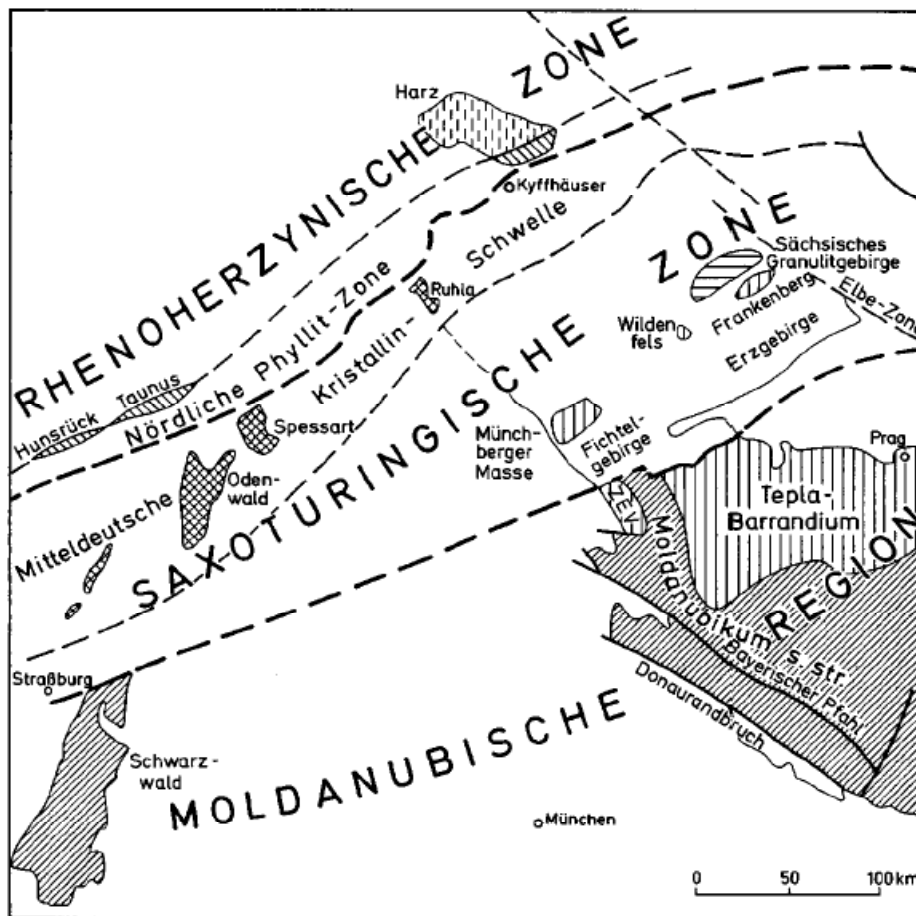


Abbildung 3-3: Zonengliederung des mitteleuropäischen Varizikums (BGL 1996)

Grundgebirge steht in Baden-Württemberg vor allem im Schwarzwald zutage an. In den übrigen Landesteilen beruhen die Kenntnisse über das im Untergrund verborgene Grundgebirge auf lückenhaften Daten. Im Nördlinger Ries wurden Grundgebirgsschollen an die Oberfläche gepresst; Ortho- und Paragneise zeigen Ähnlichkeit mit entsprechenden Gesteinen des Bayrischen Waldes. Weiterhin geben Bohrungen Aufschluss, die auf der Suchen nach Wasser und Erdöl abgeteuft wurden. Aus den Bohrrdaten ergibt sich, wie der Grundgebirgssockel der süddeutschen Scholle gegen die Alpen zu in immer größeren Tiefen abtaucht. Südlich der Donau sinkt das Grundgebirge rasch unter das Molassebecken ab. So liegt die Grenze Grundgebirge/Deckgebirge bei Dingelsdorf am Bodensee 2702 m unter Oberfläche, d.h. 2252 m unter dem Meeresspiegelniveau.

Das im Untersuchungsgebiet zu erwartende Grundgebirge ist der Moldanubischen Region (siehe Abbildung 3-3) zuzuordnen. Die Moldanubische Region nach (SUESS 1903) ist sehr komplex aufgebaut. Sie umfasst große Areale mit vorwiegend Paragneisen und Zonen mit gehäuftem Auftreten von Metabasiten, leukokraten Orthogneisen und Metakarbonaten. Vor allem im Oberkarbon sind vielfach granitische Plutone in ältere Gesteinskomplexe intrudiert und auskristallisiert. N-S gerichtet Störungssysteme trennen Gesteine unterschiedlichen Metamorphosegrades voneinander, so in einem ca. 25 km breiten Streifen östlich der Iller, in dem nur Zweiglimmergneise erbohrt wurde, während sonst höher metamorphe Biotitgneise ohne Muskovit verbreitet sind (BGL 1996).

3.3 Erdbeben und Vulkanismus

Basis für eine Abgrenzung von erdbebengefährdeten Gebieten in Deutschland bildet die „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands (DIN 4149)“. Dabei wurden Zonen entsprechend der in einem Zeitraum von ca. 500 Jahren maximal zu erwartenden Intensität abgegrenzt. Als Grundlage dafür dienten der historische deutsche Erdbebenkatalog, der alle Erdbeben in Deutschland seit dem Jahre 800 aufführt, die Karte der seismotektonischen Einheiten Deutschlands und die Verteilung der beobachteten Schadenbeben in Deutschland. Mit eingeflossen in die Zonenkarte sind auch Annahmen über maximal mögliche Beben in den entsprechenden Gebieten.

Laut AkEnd ist eine Grenzziehung für ungünstige Gebiete sinnvoll erst ab Erdbebenzone 2 der DIN 4149. Dies entspricht einer maximal beobachteten Erdbebenintensität ab 7.0 an der Oberfläche. Ab dieser Intensität treten merkliche Schäden an Gebäuden auf (AKEND 2002).

Das Gebiet des Hohenzollerngrabens (siehe Abbildung 3-2) ist seit dem Jahre 1911 als eines der aktivsten Erdbebenzentren Mitteleuropas anzusehen. Andere, heute in ihrer Bedeutung hinter der Westalb zurücktretende Erdbebengebiete in Baden-Württemberg sind der Oberrheingraben, der Dinkelberg, die „Freiburg-Bodensee-Zone“ mit Bonndorfer Graben und Hegau, die Münsinger Alb, das „Schwäbische Lineament“ mit dem Fildergraben im Bereich von Tübingen-Stuttgart-Plochingen und einzelne, verstreut liegende Herde in Oberschwaben. In allen Fällen handelt es sich um tektonische Beben. Die seismische Aktivität im Bereich des Hohenzollerngrabens zeigt eine Nordwärtsverlagerung der Herde im Laufe des Jahrhunderts. Die meisten Herde liegen auf einem NNE verlaufenden, nur wenige Kilometer breiten Streifen, der sich zwischen Ebingen und dem Starzeltal bei Jungingen erstreckt. Insgesamt wurden in diesem Gebiet von 1911 bis 1984 etwa 170 Erdbeben (mit Bebenstärke größer 4, nach der Mercalli-Sieberg-Skala) registriert. Stärkegrade von 6 – 8, die schon zu teilweise schweren Gebäudeschäden führen, wiesen im gleichen Zeitraum 29 größere Beben auf. Besonders zu erwähnen sind die 3 Hauptbeben vom 16.11.1911, vom 25.05.1943 und vom 03.09.1978, alle mit Bebenstärken von 7 – 8 oder 8 (GEYER et al. 1991).

Der tertiäre Vulkanismus Südwestdeutschlands ist vornehmlich an den Oberrheingraben und die ihn begleitenden Strukturen gebunden. Die vulkanische Aktivität ist offensichtlich mit der Intensivierung der tektonischen Vorgänge in der Tertiärzeit, im Zuge der alpidischen Gebirgsbildungen, verknüpft. Die alpidische Geosynklinale wurde geschlossen, gefaltet, ihr Inhalt teils unter die gegen Europa stoßende, afrikanische Kontinentalplatte subduziert, teils auf die europäische Platte überschoben. Dabei wurde diese einer Beanspruchung ausgesetzt, die zum Zerreißen entlang von Fugen führte, welche bis in die Mantelregion der Erde hinunterreichte. Magma aus subkrustalen Bereichen, teils nach Reaktion mit Nachbargesteinen chemisch verändert, wurde so eine Wegsamkeit zur Oberfläche geschaffen (GEYER et al. 1991).

Baden-Württemberg: Der Vulkanismus im Hegau (nordwestlich des Bodensees) setzte vor etwa 14 Millionen Jahren ein und dauerte ungefähr 7 Millionen Jahren an. Damit kommt ihm ein mittel- bis obermiozänes Alter zu. Der Hegau liegt inmitten einer von herzynisch streichenden Brüchen geprägten Störungszone. Bodenseebrüche und Bonndorfer Grabensystem sind über den Hegau miteinander verknüpft.

Die Ausbrüche im Urach-Kirchheimer Vulkangebiet (im Nordteil der Mittleren Alb, nordwestlich von Ulm) fanden im Miozän statt. Der Durchmesser des Gebiets, mit Urach im Zentrum, beträgt fast 40 km. Heute kennt man etwa 300 mit Tuff sowie Grund- und vor allem Deckgebirgstrümmern erfüllte Ausbruchsröhren (GEYER et al. 1991).

Bayern: Der Vulkanismus tritt nur in Nordbayern und sporadisch in einzelnen Abschnitten der Alpen auf. Die Basalte und Tuffe sind räumlich an die (NW-SE/NE-SW-gerichteten) tertiären

Senkungs- und Bruchzone gebunden. In der Rhön, dem Hauptverbreitungsgebiet, setzt die Eruptionsfolge mit Tuffen im Miozän ein, dann folgt die Haupteruption mit Hornblendenbasalten. Der aktive Vulkanismus klingt im Unterpliozän aus. Im Spessart und nördlichen Odenwald treten kleine, an NW-SE/NE-SW-gerichteten Störungszonen gebundene Vorkommen von Eruptiva (u.a. Olivinbasalte und Hornblendenbasalte) auf. Der südlichste Vulkan ist der Parkstein bei Weiden. Die Vulkantätigkeit ist die Antwort auf die im Jungtertiär immer heftiger werdende tektonischen Zerreißen des tiefen Untergrundes. Dort, wo Bruchsysteme des Rheintalgrabens sich mit der verlängerten Pfahl-Linie kreuzen, kommt es zu starken Förderungen (Beispiel Rhön) (BGL 1996).

3.4 Festlegung des Modellgebietes Süd-1

Der nördliche bzw. westliche Ausbiss der Doggerbasis in der Schwäbischen und Fränkischen Alb kann aus den existierenden geologischen Karten entnommen werden. Die mesozoischen Schichten fallen gleichmäßig und flach nach Süden ein. Generell kann daher für den Opalinuston angenommen werden, dass die geforderten Mindestanforderungen (Mächtigkeit, Tiefenlage) nur südlich des Nordrandes der Schwäbischen Alb erfüllt werden. In dieser Region liegt auch keine Einschränkung der Nutzung durch den ausgedehnten Malmkarst-Grundwasserleiter im Deckgebirge - wie in der Schwäbischen Alb - vor.

Für Deutschland sind laut (NAGRA 2002a) außer den Gebieten Eifel und Vogtland/Egergraben keine weiteren Gebiete mit vulkanischer Gefährdung benannt. Da intensive tektonische Aktivitäten nur im Bereich des Hohenzollerngrabens, der „Freiburg-Bodensee-Zone“ mit Bonndorfer Graben und Hegau, die Münsinger Alb und das „Schwäbische Lineament“ mit dem Fildergraben zu erwarten sind, erscheint für die durchzuführenden Modelluntersuchungen der Bereich südlich von Ulm sinnvoll. Die Mächtigkeit des Opalinustons im Raum Ulm beträgt die geforderte Mindestmächtigkeit von 100 m (Abbildung 3-4). Abbildung 3-5 zeigt eine Schnittdarstellung des Referenz-Modellgebietes Süd-1. Der Opalinuston ist in einer Tiefenlage von 700 bis 850 Metern bezogen auf die Geländeoberkante aufgeschlossen.

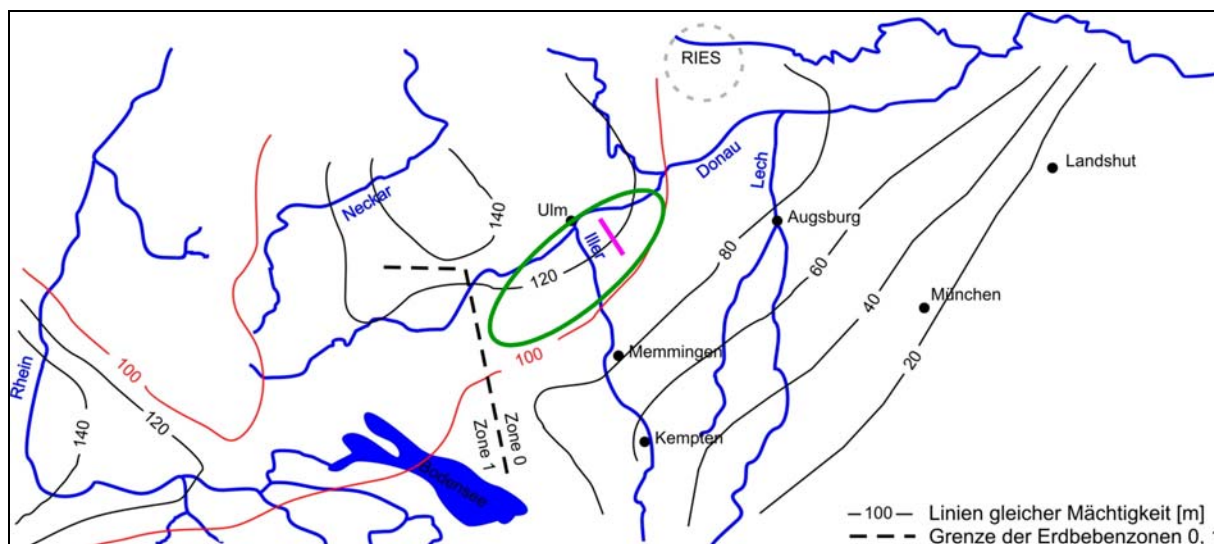


Abbildung 3-4: Mächtigkeitsverteilung des Opalinuston in Süddeutschland mit Angabe des festgelegten Modellgebietes und des Profilschnittes, erstellt auf Basis von (NAGRA 2002a), (SCHMIDT 1996), (BGL 1996).

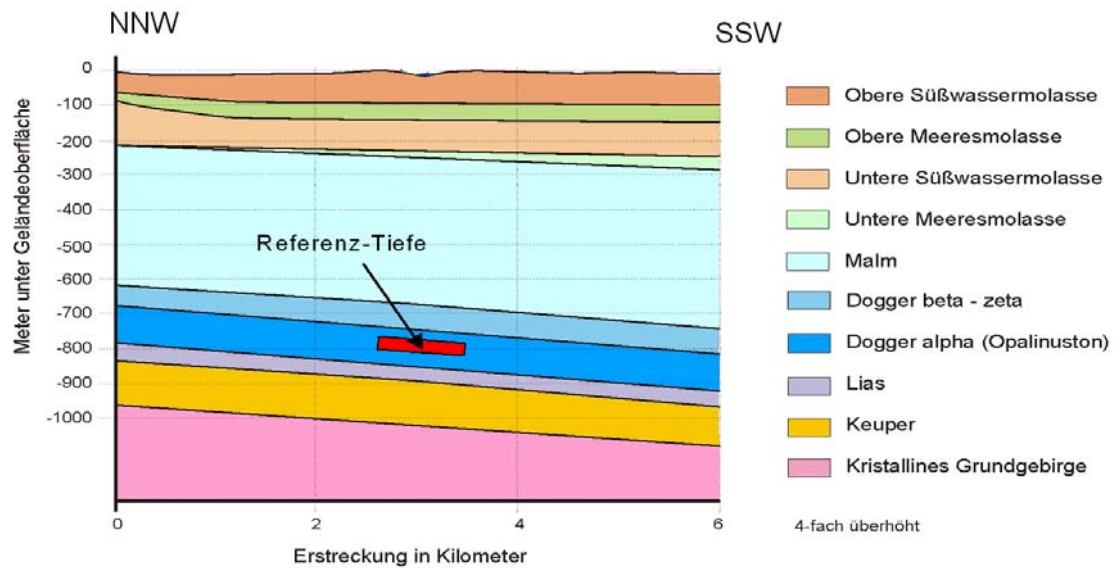


Abbildung 3-5: Schnitt A-B durch das Referenz-Modellgebiet für Süddeutschland (JOBMANN 2004)

3.5 Thermische Umgebungsbedingungen

Da es sich bei dem Kriterium zur thermischen Auslegung um einen absoluten Temperaturwert handelt (vgl. Kapitel 2.3.2), spielen die regionalen Temperaturverhältnisse im Untergrund eine nicht unbedeutende Rolle. Abbildung 3-6 zeigt die regionalen Temperaturgradienten im süddeutschen Molassebecken, die im Bereich zwischen Erdoberfläche und dem Malm ermittelt wurden (JOBMANN et al. 1989). Für das oben eingegrenzte Gebiet ergeben sich Temperaturgradienten im Bereich von 30 - 45 mK m⁻¹. Gemäß den Auswahlkriterien des AkEnd (Kap. 3.1) bezüglich der Teufenlage eines Endlagers ergeben sich Gebirgstemperaturen von 19 - 24°C in der Mindestteufe von 300 m und 61 - 84°C in der maximalen Teufenlage von 1500 m (Abbildung 3-7).

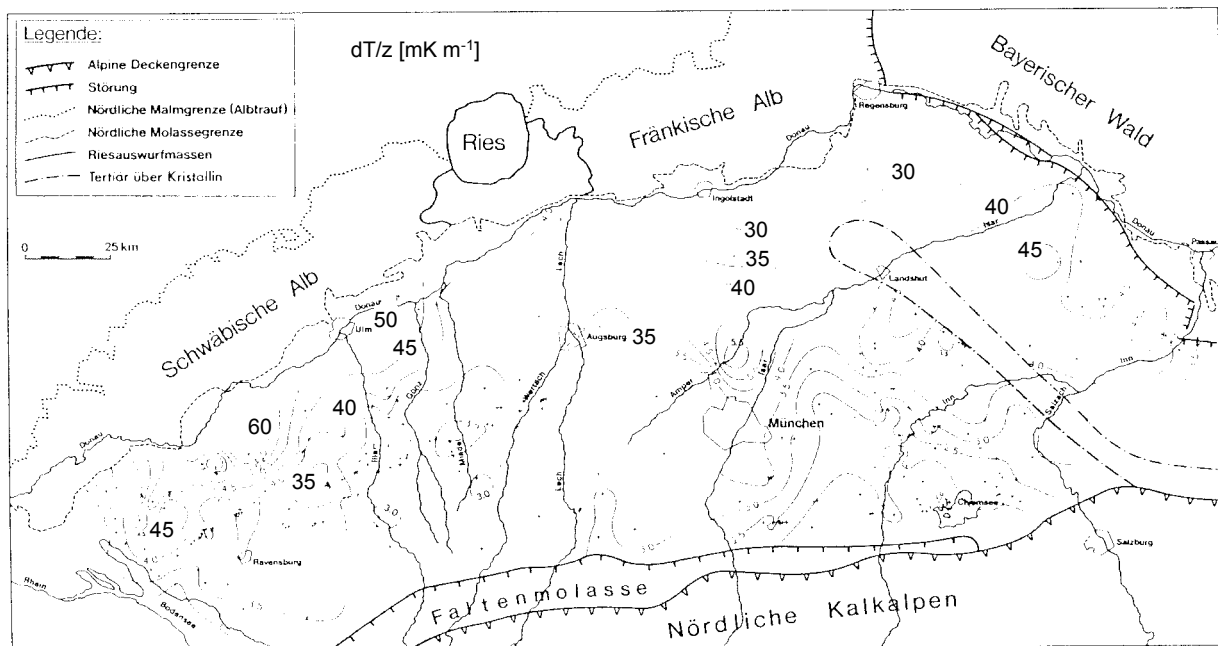


Abbildung 3-6: Temperaturgradienten im süddeutschen Molassebecken (JOBMANN et al. 1989)

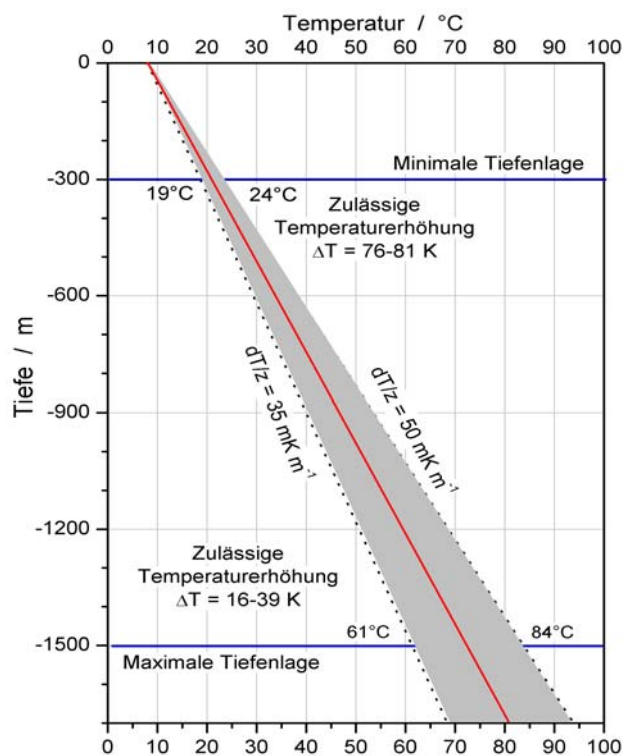


Abbildung 3-7: Untergrundtemperaturen in der relevanten Region in dem gemäß AKEnd zulässigen Tiefenbereich.

4 Referenzregion Süd-2

4.1 Lage des generischen Modells

Alternativ zu dem Modellgebiet Süd-1 im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens (JOBMANN et al. 2004) wurde seitens der BGR-Berlin zwei weitere Modellgebiete (Süd-2) vorgeschlagen. Die Referenz-Modellgebiete befinden sich im Klettgau im Südosten des Bundeslandes Baden Württemberg, grenznah südwestlich des Kantons Schaffhausen (Schweiz). Aufgrund des vom AkEnd (2002) prognostizierten Flächenbedarfs ($> 10 \text{ km}^2$) zur Errichtung eines Endlagers im Tonstein kommen hier zwei Untersuchungsgebiete - Jestetten und Stetten - in Frage. Da das Untersuchungsgebiet Stetten nach DIN 4149 in der Erdbebenzone 2 liegt, wurde es als Referenzgebiet zur Modellbildung nicht weiter betrachtet.

Das Untersuchungsgebiet Jestetten, die Lage ist in Abbildung 4-2 dargestellt, stellt fast eine „Enklave“ oder Insel auf dem Gebiet der Schweiz dar, die nur im Westen eine wenige Kilometer breite Verbindung nach Deutschland aufweist. Das Modellgebiet liegt in der Nähe der Sondierbohrung Benken (Nordschweiz), so dass davon ausgegangen wird, dass die dort von der NAGRA (2002a) erfassten Gesteinsparameter auf die Schichtenfolge von Jestetten übertragbar sind. Die Beschreibung der geologischen Entwicklung des Untersuchungsgebietes Süd-2 ist aus dem Geosynthese-Bericht (NAGRA 2002a) der NAGRA zum benachbarten Züricher Weinland mit der Sondierbohrung Benken abgeleitet.

Die Abbildung 4-1 zeigt das generisches Modell im Raum Jestetten und dem Grenzgebiet zur Nordschweiz mit der Sondierbohrung Benken. Das Profil wurde an Hand der Bohrprofile der Sondierbohrung Benken sowie des Profils 3 des NAGRA-Berichtes NTB 02-03 (2002a) konstruiert. Der Profilschnitt ist 4-fach überhöht.

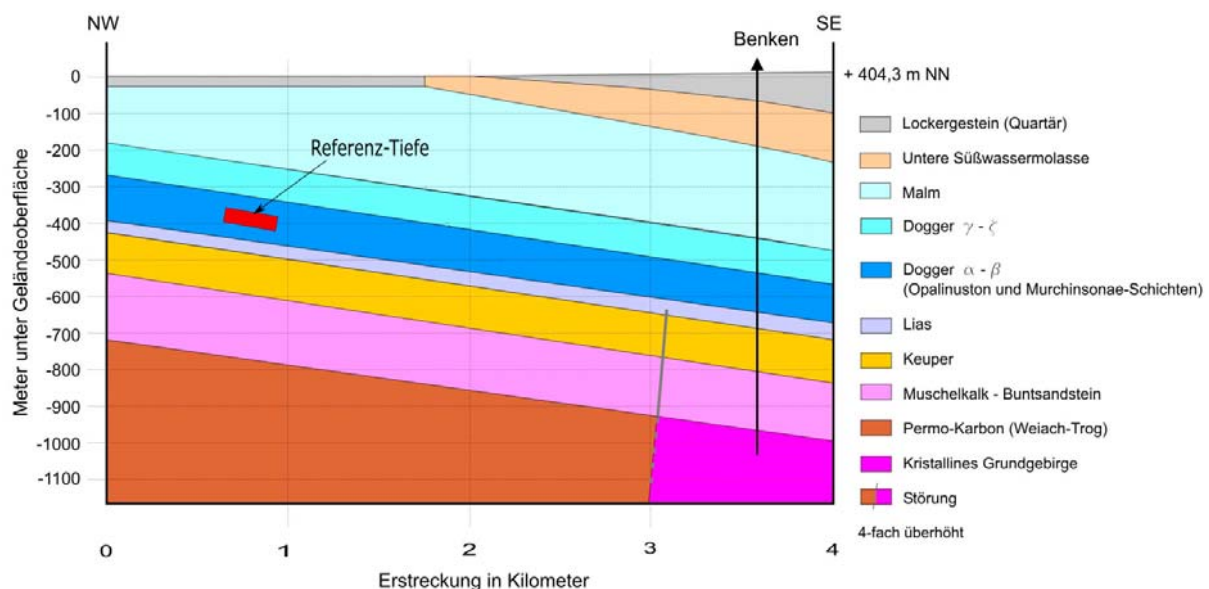
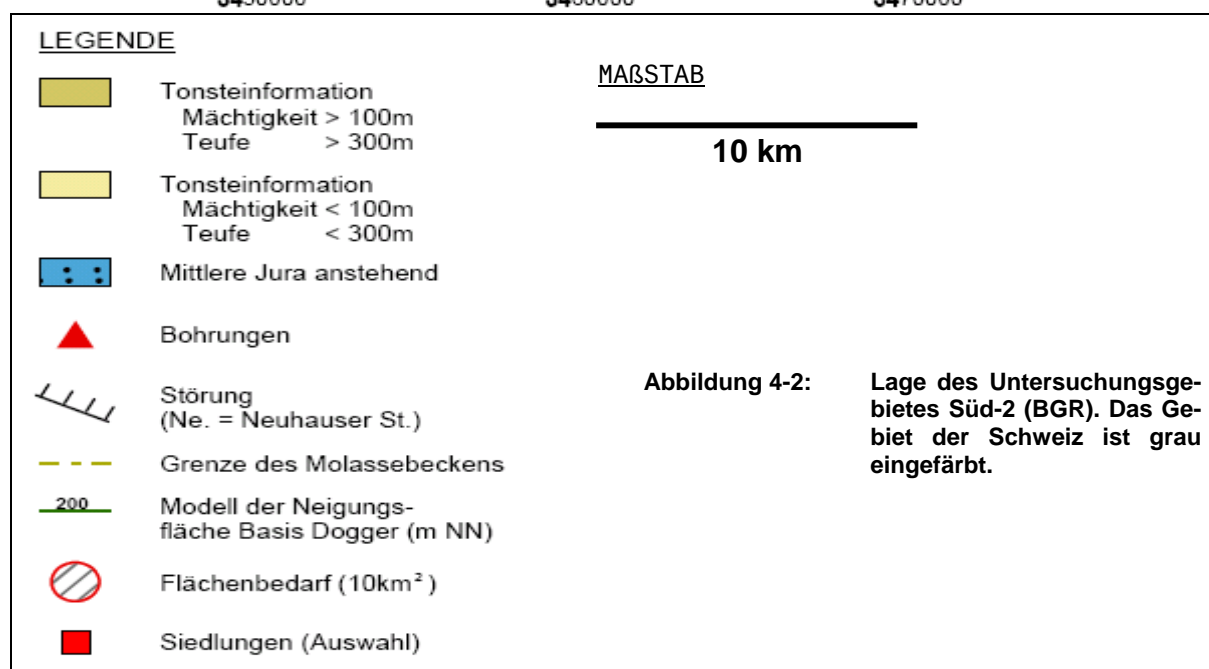
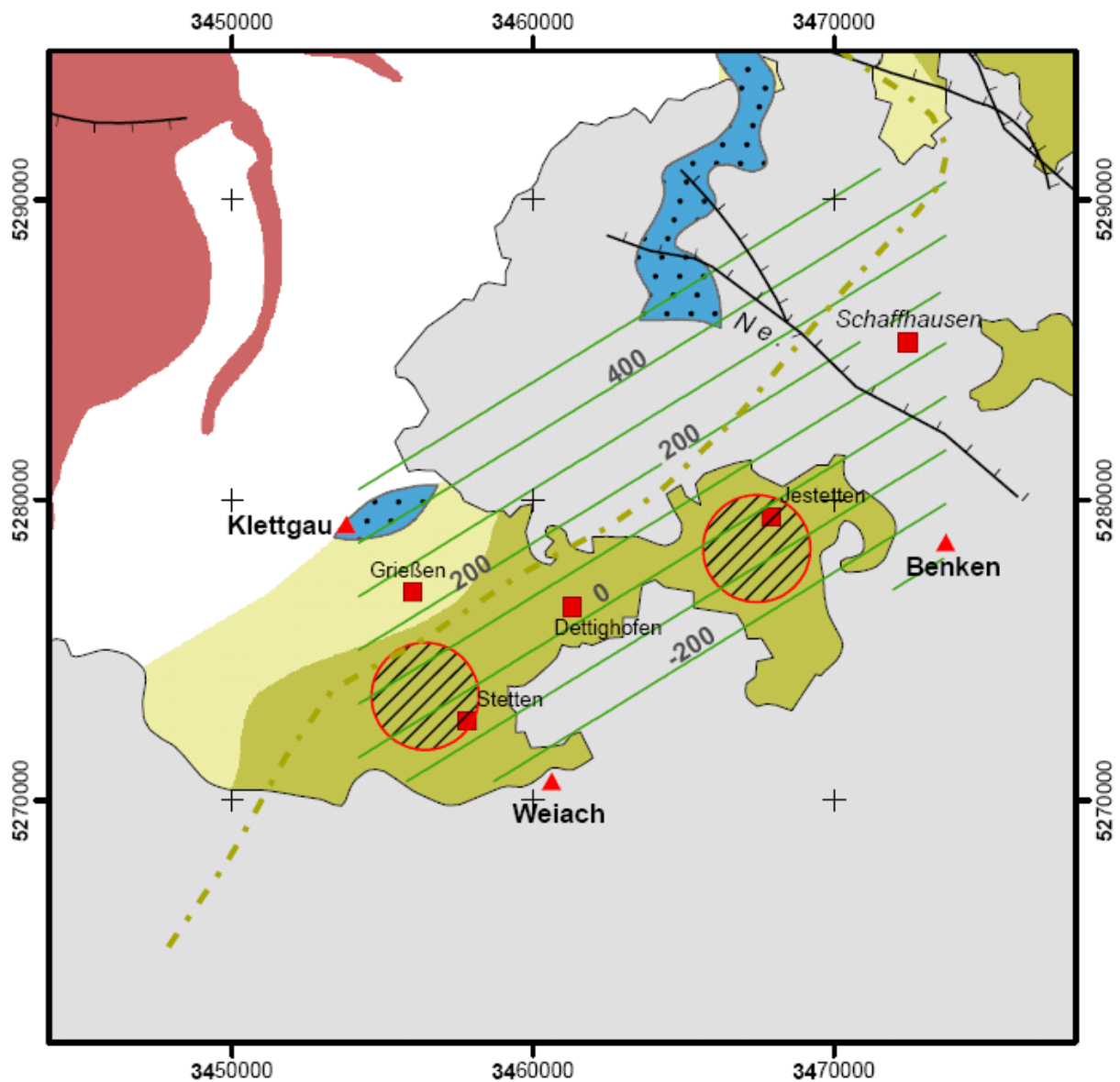


Abbildung 4-1: Generisches Modell Süd-2 im Raum Jestetten und dem Grenzgebiet zur Nordschweiz mit der Sondierbohrung Benken



Der Opalinuston (Dogger α) mit den Murchisonae-Schichten (Dogger β) erfüllen die endlager-spezifischen Mindestanforderungen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage (> 100 m Mächtigkeit, Tiefenlage > 300 m und < 1.500 m Tiefe). Das generische Endlagermodell wurde in einer Referenz-Tiefe von 350 - 400 m entwickelt. Die mesozoischen Schichtenfolge (Buntsandstein – Malm) weist ein generelles Schichteinfallen von ca. 3-4 Grad in Richtung SE auf.

4.2 Geologische Situation

Regionalgeologisch gehört sowohl das Modellgebiet Süd-2 als auch das Modellgebiet Süd-1 zum Randbereich des außeralpinen Molassebeckens (siehe Abbildung 4-3).

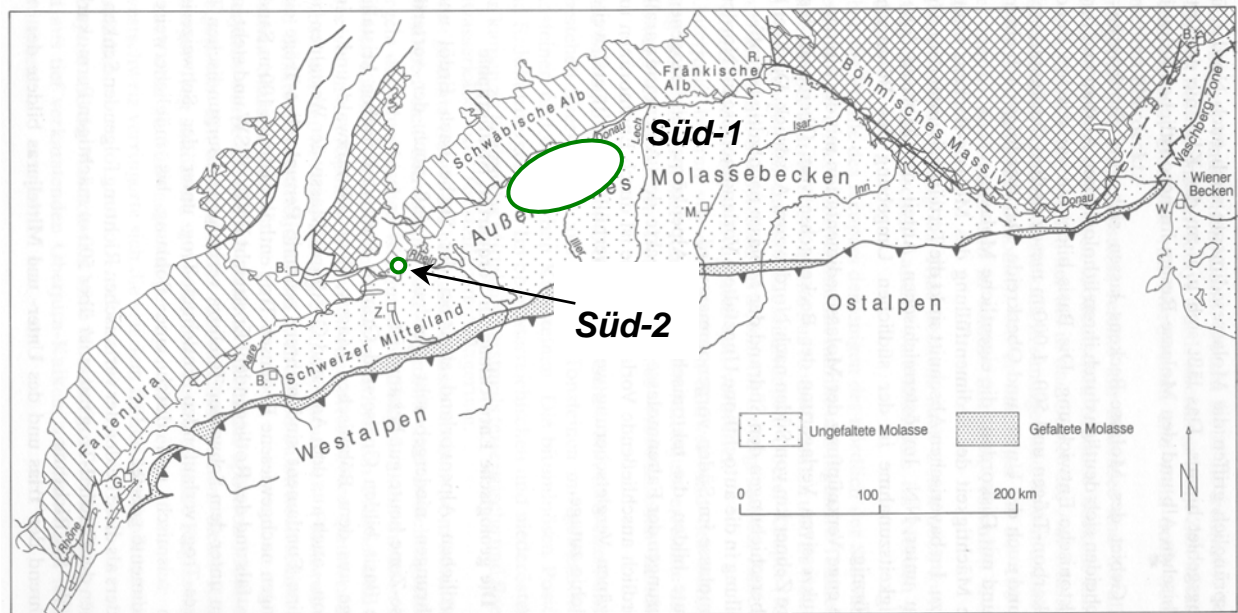


Abbildung 4-3: Geologische Übersichtskarte der den Alpen vorgelagerten Molasse-Zone (Außeralpines Molassebecken auf dem Gebiet von Deutschland = Süddeutsches Molassebecken) mit der Lage der Modellgebiete Süd-1 und Süd-2 (WALTER 1995).

Für die tektonische Gliederung des Untersuchungsgebietes Süd-2 sind folgende lithologischen Groseinheiten zu berücksichtigen:

- kristallines Grundgebirge, inkl. paläozoische Sedimente (Nordschweizer Permokar-bontrog, zu dem auch der Weiach-Trog zählt),
- mesozoisches Deckgebirge mit dem Wirtsgestein Opalinuston und
- Molasse bzw. tertiäres Deckgebirge

sowie deren Beeinflussung durch die alpine Kompression bzw. einer daraus resultierenden Vorlanddeformation.

Der nicht genauer definierbare Nordrand dieser alpinen Kompressionszone verläuft nördlich der Hochzone von Benken nach ENE in den süddeutschen Raum hinein. Interne Zersche-rung und Bildung von zahlreichen Kleinstrukturen, die für eine ausgesprochene Verdichtung der Formationen sorgte, sind auf die alpine Kompression im Bereich der Ostschweiz und des Untersuchungsgebietes zurückzuführen.

Kristallines Grundgebirge

Das Kristallin, Teil des Moldanubikums, besteht aus mehrfach überprägten und deformierten Paragesteinen wie Metapeliten und Metagrauwacken, Graniten, K-reichen Intrusiva sowie untergeordnet auch Orthogneisen. Teilweise wurden Aufschmelzungen älterer Kristallgesteine beobachtet, wodurch neue Granitkörper und zahlreiche Ganggesteine entstanden. Das Grundgebirge streicht Übertage in weiten Bereichen des Schwarzwaldes und der Vogesen aus.

Permokarbon

Im unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes konnte durch Bohrungen die Struktur des Bodensee Troges (bzw. „Nordschweizer Permokarbondrog“) nachgewiesen werden. Die hier auftretenden Sedimente des Permokarbons weisen zumindest in den zentralen Trogbereichen z.T. ausgedehnte Kohlevorkommen und Schuttfächerserien auf. Das ca. 600 m mächtige Oberkarbon der Bohrung Weiach wird im unteren Teil dominiert von zyklischen Sandstein-/Konglomerat-Serien und im oberen Teil von Sandstein-/Ton-Serien, in denen auch die meisten Kohleflöze vorkommen. Diese Schichten gehen nach oben in vorwiegend feinklastische Sand-, Silt- und Tonsteine des frühen Perms über, die abschnittsweise reichlich biogenes Material enthalten. Die Zeit zwischen dem frühen und dem späten Perm wurde von mittel- bis grobklastischen, kontinentalen Rotsedimenten (dem Rotliegenden) dominiert. Den Abschluss des Rotliegenden bilden feinkörnige Ablagerungen, gebildet in Schwemmlanebenen.

Die ältere Serie des Permokarbon-Vorkommen einschließlich Unterrotliegendes wird als untere Trogfüllung bezeichnet, die sich im Wesentlichen auf die tiefen Teile des Weiach-Trogs beschränken (DIEBOLD et al. 1991). Die obere Trogfüllung (Oberrotliegendes) ist erheblich weiter verbreitet und liegt in den Trogschulter-Bereichen direkt über dem kristallinen Grundgebirge. Die Sedimente des Permokarbons sind auf der Hochzone von Benken nicht angetroffen worden. Hier folgen über dem kristallinen Grundgebirge geringmächtige triassische Sedimente.

Trias

Die kontinentalen Ablagerungen des Perms setzen sich vorerst im Buntsandstein fort, gehen dann aber in die vorwiegend marinen Ablagerungen des Muschelkalks über. Den Abschluss der Trias bilden wiederum weitgehend kontinentale Sedimente des Keupers. Die Ablagerungen der triassischen Sedimente erfolgte am Südrand des Germanischen Beckens (intracontinental).

Charakteristisch für den Buntsandstein sind fluviatile Sandsteine, die aber nur wenige Meter mächtig werden. Der Muschelkalk besteht aus zunächst kalkigen, dann evaporitischen Ablagerungen, die wiederum in kalkige Sedimente übergehen. Der Keuper wird dominiert von einer Wechsellagerung von Kalk- und Mergelsteinen, Tonsteinen und Sandsteinen.

Jura

Die Sedimentation zur Zeit der Jura erfolgte epikontinental im Bereich der nördlichen Tethys. Lias und Dogger sowie der unterste Teil des Mals sind geprägt von tonreichen, teilweise auch sandigen Serien mit karbonatischen Einschaltungen. Der jüngere, größte Teil des Mals besteht dagegen aus mächtigen, gebankten bis massigen Kalkstein-Abfolgen, die im Bereich Benken eine Mächtigkeit von 250 m erreichen. Großräumig werden zwei Faziesbereiche unterschieden, nämlich die keltische, generell karbonatreiche Plattformfazies (Nordwestschweiz) und die schwäbische, generell tonreichere Beckenfazies (Süddeutschland). Das Modellgebiet Süd-2 liegt im Übergangsbereich dieser Faziesräume.

Die Lias-Ablagerungen des Untersuchungsgebietes sind im allgemeinen geringmächtig (ca. 40 m) und bestehen überwiegend aus tonreichen, z.T. auch sandigen Sedimenten und untergeordnet marinen Kalkbildungen.

Die Mächtigkeit des Doggers nimmt von Mont Terri (westlich der Aare) in Richtung südliches Randen-Klettgau-Gebiet ab. Im südlichen Randen-Klettgau-Gebiet scheint ein lokales Minimum zu sein, wobei vor allem der Opalinuston sehr geringmächtig entwickelt ist, jedoch immer noch eine Mächtigkeit von über 90 m aufweist (HOFMANN 1981, BAUSCH & SCHÖBER 1997). Nach Norden zur Schwäbischen Alb hin nimmt aber die Mächtigkeit dann wieder generell zu.

Die geringeren Mächtigkeiten des Opalinustons im Modellgebiet Süd-2 im Vergleich zum Raum Mont Terri ist in Abbildung 4-4 zu sehen. Die Mächtigkeitsreduktion kann mit einer Rand- oder Schwellenlage im ehemaligen Sedimentationsraum erklärt werden. Jedoch reicht hier die Opalinuston-Fazies bis in stratigraphisch jüngere Schichten, da die Murchisonae-Schichten (Dogger β) in ihrer typischen, kalkreichen Ausbildung des keltischen Faziesbereiches fehlen. Auf dem biostratigraphischen Niveau der Murchisonae-Schichten sind also regional drei Faziesbereiche zu unterscheiden: eine kalkreiche Fazies im Westen, eine tonreiche Fazies im Gebiet Benken-Randen-Wutachtal (Modellgebiet Süd-2) und eine sandreiche Fazies im Osten (Bodenseegebiet), die zur mittleren Schwäbischen Alb (Modellgebiet Süd-1) bis zu einer Mächtigkeit von 65 m ansteigt, wobei zunehmend sandreiche Lithologien dominieren z.B. Wasserfallsschichten im Dogger α sowie Zopfplatten und Donzdorfer Sandsteine im Dogger β (GEYER & GWINNER 1991).

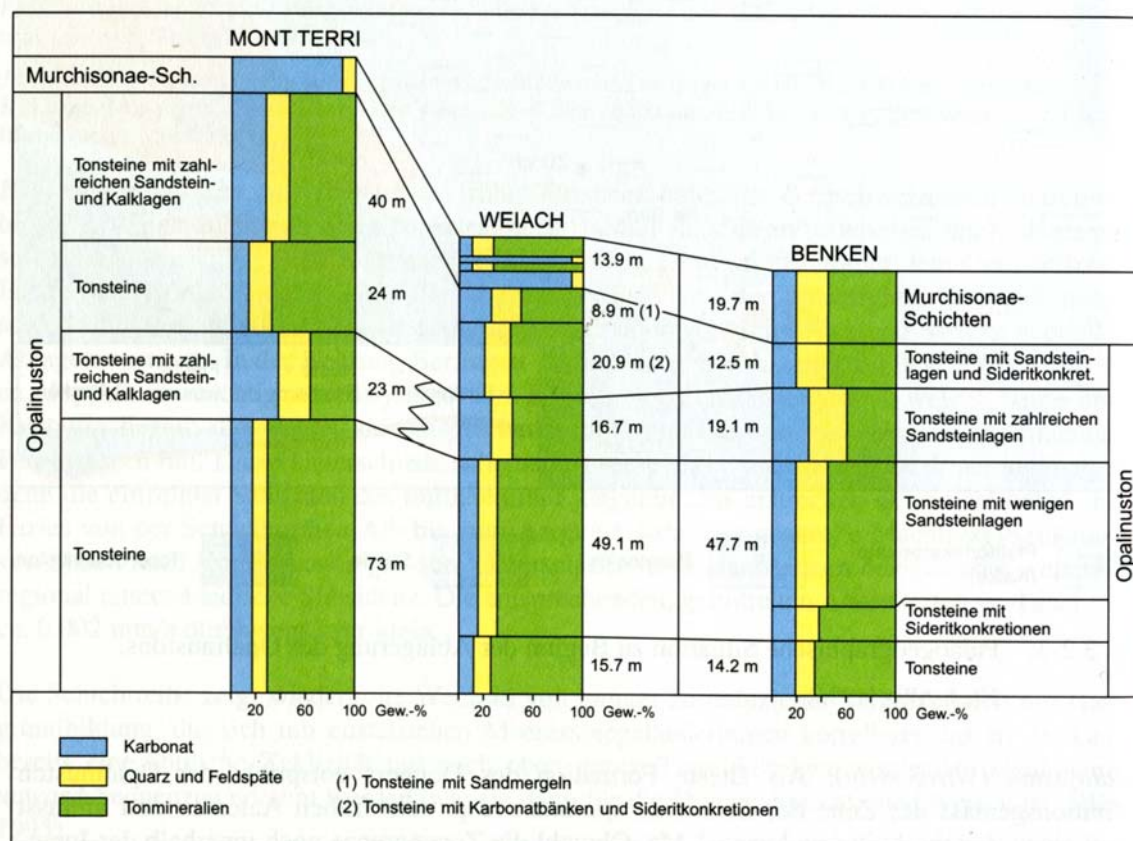


Abbildung 4-4: Gliederung und Korrelation des Opalinuston von Weiach, Benken und Mont Terri aufgrund der Lithologie und der mineralogischen Zusammensetzung (NAGRA 2002a)

Die Charakterisierung der Tonformationen des Untersuchungsgebietes kann mittels der Bohrungen Benken und Weiach sowie anhand von Aufschlüssen erfolgen. Als Opalinuston

wird der lithostratigraphische Dogger α aus dunkelgrauen Tonsteinen bezeichnet, der zwischen den Kalk- und Tonmergeln der liassischen Jurensis-Mergel-Formation und der teilweise tonig ausgeprägten Murchisonae-Formation vorkommt. Die Untergrenze der Opalinuston-Formation wird vom obersten Kalkmergel der Jurensis-Mergel bestimmt. Sie tritt wegen des deutlichen Gesteinswechsels auch in den petrophysikalischen Logs klar hervor. Die Murchisonae-Schichten (obere Formationsgrenze) sind im Raum Wutach-Randen-Zürcher Weinland mindestens zum Teil oder vollständig in Opalinuston-Fazies ausgebildet, und deshalb weder makroskopisch noch in den petrophysikalischen Logs abzutrennen (NAGRA 2002a).

Die Tonsteine des Dogger α führen in unterschiedlichem Ausmaß dünne Silt- und Sandsteinlagen bzw. Sandsteinlinsen sowie bräunliche Sideritkonkretionen. Die Ähnlichkeit des Opalinustons in der Sondierbohrung Benken und in der weiter westlich gelegenen Bohrung Weiach wird auch in der Abbildung 4-4 durch den insgesamt nach oben zunehmenden Anteil an Karbonat und Sandsteinlagen deutlich.

Aufgrund der An- bzw. Abwesenheit von Sand- und Siltsteinlagen, bzw. von Sideritkonkretionen kann der Opalinuston in makroskopisch und mikroskopisch fünf unterscheidbare Abschnitte gegliedert werden (von unten nach oben bzw. vom Älteren zum Jüngeren):

- sandarmer, fossilreicher Opalinuston,
- sandarmer Opalinuston mit gelblichen Sideritkonkretionen und wenig Sandsteinlagen,
- Opalinuston mit zahlreichen Sandeinlagen,
- Opalinuston mit knolligen Karbonatbänken und relativ wenig Sand und
- Opalinuston mit Sandmergel.

Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung des Opalinustons Süddeutschlands und der Nordschweiz zeigt Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Mineralogischer Zusammensetzung (Mittelwert und Standardabweichung) des Opalinustons der Nordschweiz im Bereich des Modells Süd-2 nach (NAGRA 2002b)

| Mineral | Mittelwert | Standardabweichung |
|-------------------------|------------|--------------------|
| Illit | 18 | 6 |
| Kaolinit | 17 | 6 |
| Illit / Smektit | 14 | 4 |
| Chlorit | 5 | 2 |
| Quarz | 20 | 5 |
| Calcit | 16 | 10 |
| Dolomit / Ankerit | 1 | 0,4 |
| Siderit | 4 | 2,4 |
| Feldspat | 3 | 1,3 |
| Pyrit | 1,1 | 1 |
| Organischer Kohlenstoff | 0,6 | 0,3 |

In der Abbildung 3-4 (S. 32) ist im Bereich des Modellgebietes Süd-2 (Raum Klettgau-Zürcher Weinland) die Mächtigkeitsverteilung der Opalinuston-Fazies (Opalinuston und Murchisonae-Schichten) dargestellt. Dahingegen ist in Süddeutschland ausschließlich die Mächtigkeit des auf den Dogger α begrenzten Opalinustons zu sehen.

Die Murchisonae-Schichten unterliegen ausgeprägten regionalen und bis lokalen Lithologie- und Fazieswechseln. In der Region Benken-Randen-Wutach bestehen sie aus kalkigen, siltigen bis feinsandigen Tonsteinen mit wenigen, kalkig zementierten Feinsandsteinlagen. Sie weisen also die tonige Opalinuston-Fazies auf und werden dem Wirtsgestein zu gerechnet. In der Bohrung Weiach hingegen bestehen die Murchisonae-Schichten aus Spatkalkbänken, eisenoolithischen Lagen sowie feinsandigen Tonsteinen, die lithologisch eher der karbonatreichen Westfazies der Murchisonae-Schichten zuzuordnen sind.

Die obere Grenze des Wirtsgesteins bilden die sandigen Mergel und mergeligen Sandsteine der Weselsandstein-Formation, die hier dem Dogger γ zuzuordnen sind. Den Abschluss des Doggers bildet ein geringmächtiges Schichtpaket aus eisenoolithischen Kalk- und Tonsteinen sowie untergeordnet z.T. sandige Mergel.

Der Malm (Oxfordium, Kimmeridge und Thitonium) ist generell die Einheit der hellen Jura-kalk-Formationen. Starke Mächtigkeitsschwankungen konnten im Bereich des Untersuchungsgebietes festgestellt werden. Der untere Teil des Malms (Oxfordium) ist tonig ausgebildet und primär in einer sehr geringen Mächtigkeit abgelagert worden. Dahingegen weisen die Plattformkarbonate des späten Malms (Kimmeridge und Thitonium) hohe Mächtigkeiten auf, die auf bis zu 300 m Mächtigkeit im Bodensee-Gebiet zunehmen. Diese kalkreichen Abfolgen bilden den regionalen Malm-Aquifer. Die Gesamtmächtigkeit des Malms wird im Untersuchungsgebiet mit ca. 250 m angegeben.

Tertiär/Quartär

In der Sedimentabfolge des Untersuchungsgebietes klafft eine große Schichtlücke, die etwa den Zeitraum zwischen Ende Malm und Mitte Eozän umfasst. Für den Zeitraum spätes Eozän bis zum Ende des frühen Oligozän sind die Molasseablagerungen charakteristisch. Die Molasseablagerungen lassen sich auf Grund ihrer Lithologie, Fazies und Paläogeographie in vier Großzyklen unterteilen: Untere Meeresmolasse, Untere Süßwassermolasse, Obere Meeresmolasse und Obere Süßwassermolasse. Im Modellgebiet ist nur die Untere Süßwassermolasse aufgeschlossen.

Die Untere Meeresmolasse wird gebildet aus Erosionsmaterial der aufsteigenden Alpen, das sich in mächtigen Deltaschüttungen in der nordalpinen Vortiefe ablagerte. Dominierend sind tonreiche Sand- und Siltsteine, untergeordnet kommen Konglomeratschüttungen vor. Zur Zeit der Unteren Süßwassermolasse herrschten terrestrische Verhältnisse vor, so dass grobklastische Schuttfächerserien im alpennahen Bereich und siltig-sandige Sedimente von Flüssen und Überschwemmungsebenen im alpenfernen Bereich abgelagert wurden. Bereichsweise wurden auch limnische Bildungen (Knollen- und Krustenkalke) beobachtet. Die Obere Meeresmolasse wird von marinen Sanden und bedeutenden Schichtlücken geprägt. Wohingegen sich das Meer zur Zeit der Obere Süßwassermolasse wieder weitestgehend zurückzog. Es kamen Sande (Graupen- und Glimmersande) zur Ablagerung, die sich mit grobdetritischen, konglomeratreichen Schüttungen verzahnten.

Die postmolassische Zeit ist geprägt von einem fortschreitenden, flächenhaften Abtrag und einer zunehmenden Reliefentwicklung im Alpenvorland. Infolge Um- und Zwischenlagerung blieben in diesem Regime teilweise mächtige, vor allem grobdetritische, fluviatile Sedimentkörper erhalten. Die Vorlandgletscher der vor ca. 2,6 Ma einsetzenden quartären Eiszeiten bewirkten eine flächenhafte Verteilung von Erosionsschutt sowie zahlreiche mächtige Seeablagerungen als zwischeneiszeitliche Füllungen übertiefer Täler.

4.3 Tektonik

Die lithologischen Baueinheiten (Kristallin mit Permokarbon, mesozoisches Deckgebirge und Molasse) sind durch Grenzen und Diskordanzen von überregionaler Bedeutung gegeneinander abgegrenzt. Zwei tektonische Elemente sind im Hinblick auf den lokalen Bau des Untersuchungsgebietes wichtig:

- der Freiburger-Bonndorfer-Hegau-Bodensee-Graben und
- der Nordschweizer Permokarbondgraben (Weiach Trog).

Die tektonische Situation im Untersuchungsgebiet (gelb umrandet) und im Zürcher Weinland mit Umgebung ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

Der Freiburger-Bonndorfer-Hegau-Bodensee-Graben trennt als eigenständige tektonische Einheit des Deckgebirges den im Südwesten angrenzenden Tafeljura von der im Nordosten gelegenen Schwäbischen Alb.

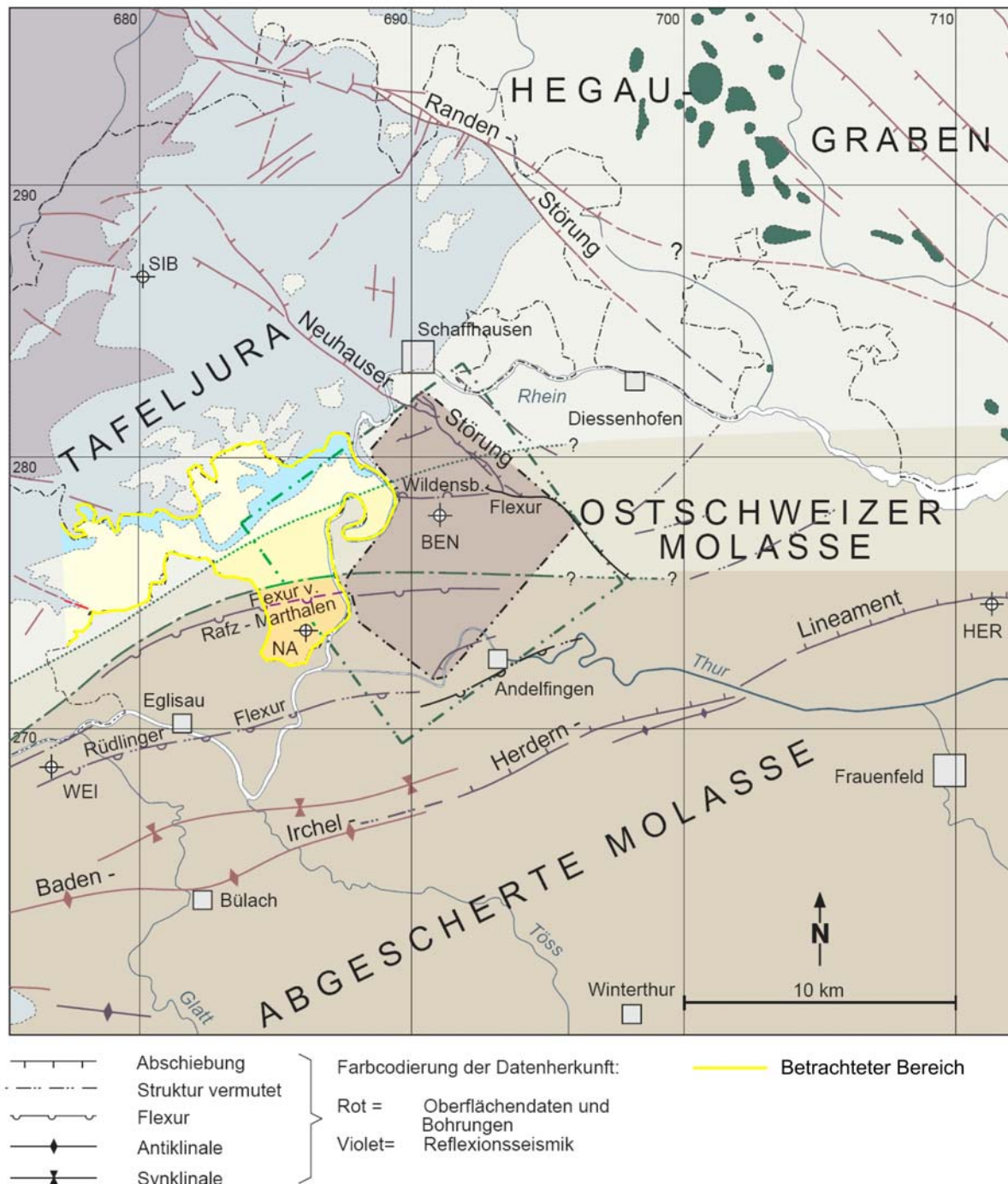


Abbildung 4-5 : Tektonische Karte des Untersuchungsgebietes (gelb umrandet) und des Zürcher Weinlandes abgewandelt aus (NAGRA 2002c)

Wichtigste Struktur ist die Randen-Störung nördöstlich des Kantons Schaffhausen mit einem Maximalversatz von ca. 250 Metern. Die nordöstlich des Untersuchungsgebietes nach NW-SE streichende Neuhauser Störung (siehe auch Abbildung 4-2, S. 36) ist auch eine junge Störungszone, die als Westbegrenzung des Hegau-Bodensee-Grabens zu betrachten ist.

Die Neuhauser Störung weist einen maximalen Vertikalversatz von ca. 100 m auf. Sie hat eine vorrangige Bedeutung, weil sie unmittelbar nordöstlich des Untersuchungsgebiets liegt. Anhand der geologischen Karten von Jestetten (HERGESELL & FRANZ 2002) und Klettgau (BAUSCH & SCHÖBER 1997) können keine weiteren bedeutenden Störungen mit Sprunghöhen von über 100 m festgestellt werden.

In einem genetischen Zusammenhang mit der Neuhauser Störung steht die Wildensbucher Flexur, ein E-W verlaufendes Element. Die Wildensbucher Flexur markiert den Nordrand der in Benken erbohrten Hochzone und die Flexur von Rafz-Marthalen den Südrand. Die Flexuren weisen nur minimale Vertikalversätze auf. Die Wildensbucher Flexur setzt sich aus Einzelstrukturen zusammen, an denen die Schichten nach NNE bis NE versetzt oder abgebogen sind. Die Flexur von Rafz-Marthalen ist ein einige hundert Meter breites Strukturelement, das von WSW kommend in den südlichen Teil des Untersuchungsgebietes Süd-2 streicht (siehe Abbildung 4-5).

Im Bereich des Nordschweizer Permokarbondrogs, der auf der deutschen Seite dem Bodensee Trog entspricht, werden verschiedene Kristallin-Hochzonen vermutet. Diese Hochzonen stellen die direkte Fortsetzung des Schwarzwälder Grundgebirges unter dem Tafeljura dar. In Benken wurde ein Sockelhoch von 3 km Breite erbohrt. Die Abgrenzung zum Nordschweizer Permokarbondrog ist aufgrund von Tiefbohrungen und Reflexionsseismik in groben Zügen bekannt. Nördlich des Sockelhochs von Benken wird Permokarbon vermutet, während im Süden sein Vorkommen sehr wahrscheinlich ist.

Die tektonische Beanspruchung der mesozoischen Schichtenfolge (Tafeljura) weist im Bereich des Untersuchungsgebietes keine Anzeichen von tektonischer Deformation auf. Das dem Tafeljura zugehörige Teilgebiet fällt – infolge der Heraushebung des südlichen Schwarzwaldes – mit regional ruhiger Schichtlage flach mit ca. 3 ° nach SE unter die außeralpine Molasse ein.

4.4 Erdbeben und Vulkanismus

Im südwestlichen Baden Württemberg wurde eine Konzentration von Beben (Erdbebenzone > 1 nach DIN 4149) in der Region um den südlichen Teil des Oberrheingrabens und in der Freiburg-Bodensee-Zone mit dem Bonndorfer Graben festgestellt. Da in dieser Region das Untersuchungsgebiet Stetten liegt wurde es nicht weiter berücksichtigt. Eine weitere Zone erhöhter Erdbebenaktivität erstreckt sich vom unteren Teil des Bodensees bis in die Zentralschweiz hinein. Der zentrale Teil der Nordschweiz inklusive dem Züricher Weinland hat sich dagegen in den letzten 25 Jahren seismisch vergleichsweise weniger bemerkbar gemacht, so dass das Untersuchungsgebiet Süd-2 Jestetten zu den seismisch ruhigeren Gebieten im Grenzgebiet Deutschland zur nordöstlichen Schweiz zu zählen ist. Die Abbildung 4-6 zeigt die Erdbebenkarte Deutschlands mit den im Rahmen des Projektes untersuchten Modellregionen.

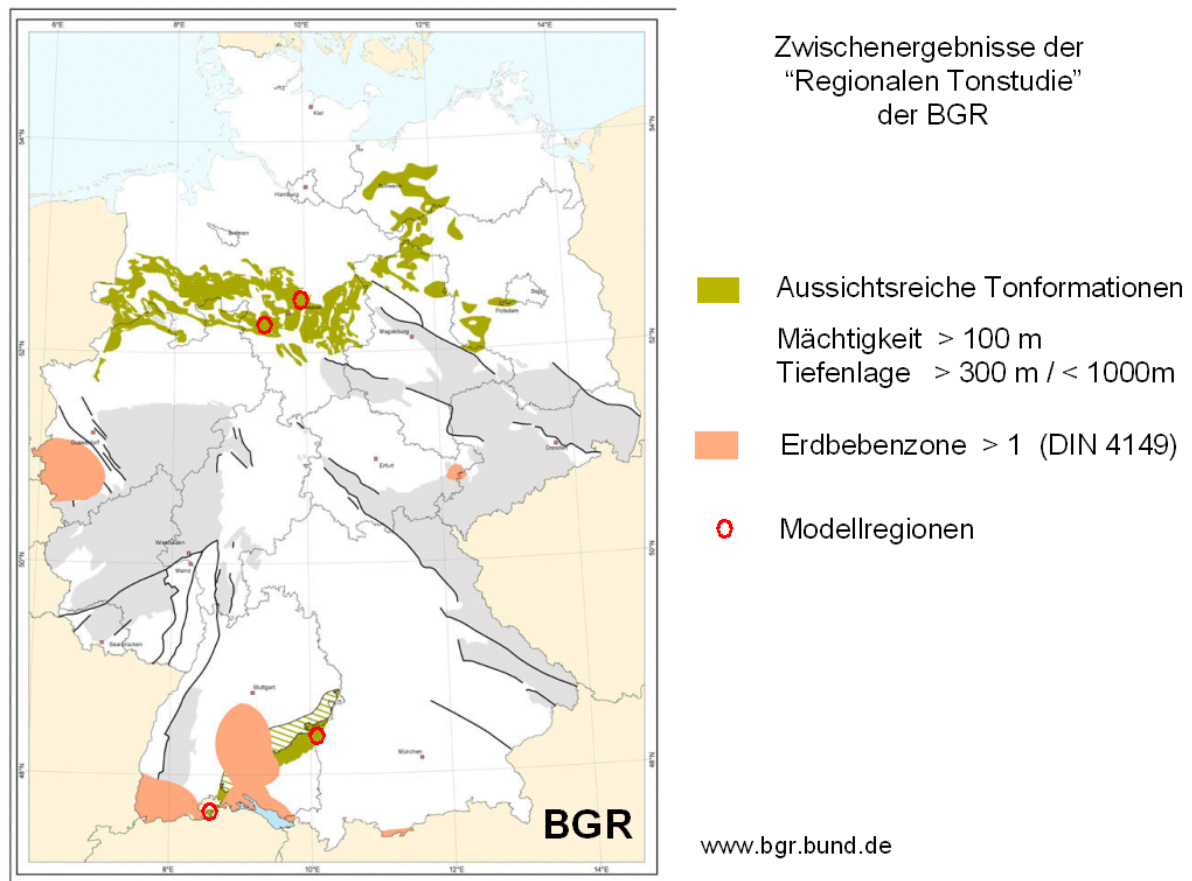


Abbildung 4-6: Erdbebenkarte BGR mit den im Rahmen des Projektes untersuchten Modellregionen

Zeugen junger magmatischer Aktivität im Raum Nordschweiz-Süddeutschland sind die mittel- bis spät-miozänen Vulkangebiete des Hegaus (nordwestlich des Bodensees) und des Kaiserstuhls im Rheintalgraben, die aber seit ca. 7 bzw. 16 Millionen Jahren nicht mehr aktiv sind. Diese Vulkangebiete liegen am Südost- bzw. Nordwestende der Freiburg-Bonnendorfer-Hegau-Bodensee-Grabenzone, die im Zusammenhang mit der miozänen Heraushebung des Schwarzwaldes entstanden sein dürfte.

Südwestlich der Neuhauser Störung (Westbegrenzung des Hegau-Bodensee-Grabens) treten im Bereich des Untersuchungsgebietes im östlichen Tafeljura und am angrenzenden Molassenordrand keine markanten Bruchzonen auf. Die tektonische Situation des Untersuchungsgebietes unterscheidet sich demnach deutlich von derjenigen des benachbarten Vulkangebietes des Hegaus. Daher ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich eine Intrusion oder Extrusion von Magma im Laufe der nächsten Million Jahre im Untersuchungsgebiet ereignet.

4.5 Thermische Umgebungsbedingungen

Die Abbildung 4-7 zeigt das Temperaturprofil im Untersuchungsgebiet. Ein linearer Ansatz der Temperaturkurve von Benken ergibt einen Temperaturgradient von 35 mK m^{-1} bei einer Oberflächentemperatur von $9,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

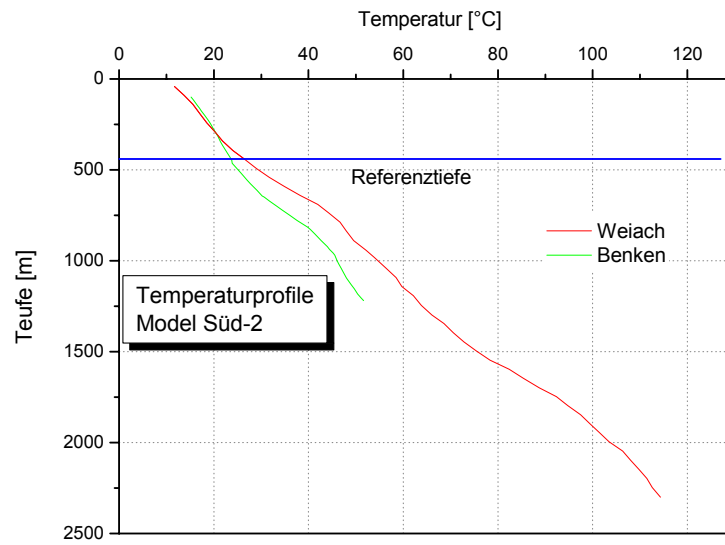


Abbildung 4-7: Temperaturprofile der Bohrungen Weiach und Benken (NAGRA 2001 und 1986)

5 Referenzregion Nord-2

5.1 Lage des generischen Modells

Alternativ zu dem Modellgebiet nordöstlich von Hannover wurde im Bereich des Niedersächsischen Beckens (Nord-1) seitens der BGR-Berlin ein weiteres Modellgebiet (Nord-2) vorgeschlagen. Das Referenz-Modellgebiet befindet sich im südwestlichen Niedersachsen im Raum zwischen Minden und Hameln (siehe Abbildung 5-1). Es erstreckt sich über ein ca. 450 km² großes Areal. Regionalgeologisch gehört das Gebiet um Minden mit der Struktur Quetzen zur Wesergebirgs-Randmulde. Die Wesergebirgs-Randmulde ist das südlichste tektonische Elemente des Niedersächsischen Beckens bzw. Tektogens.

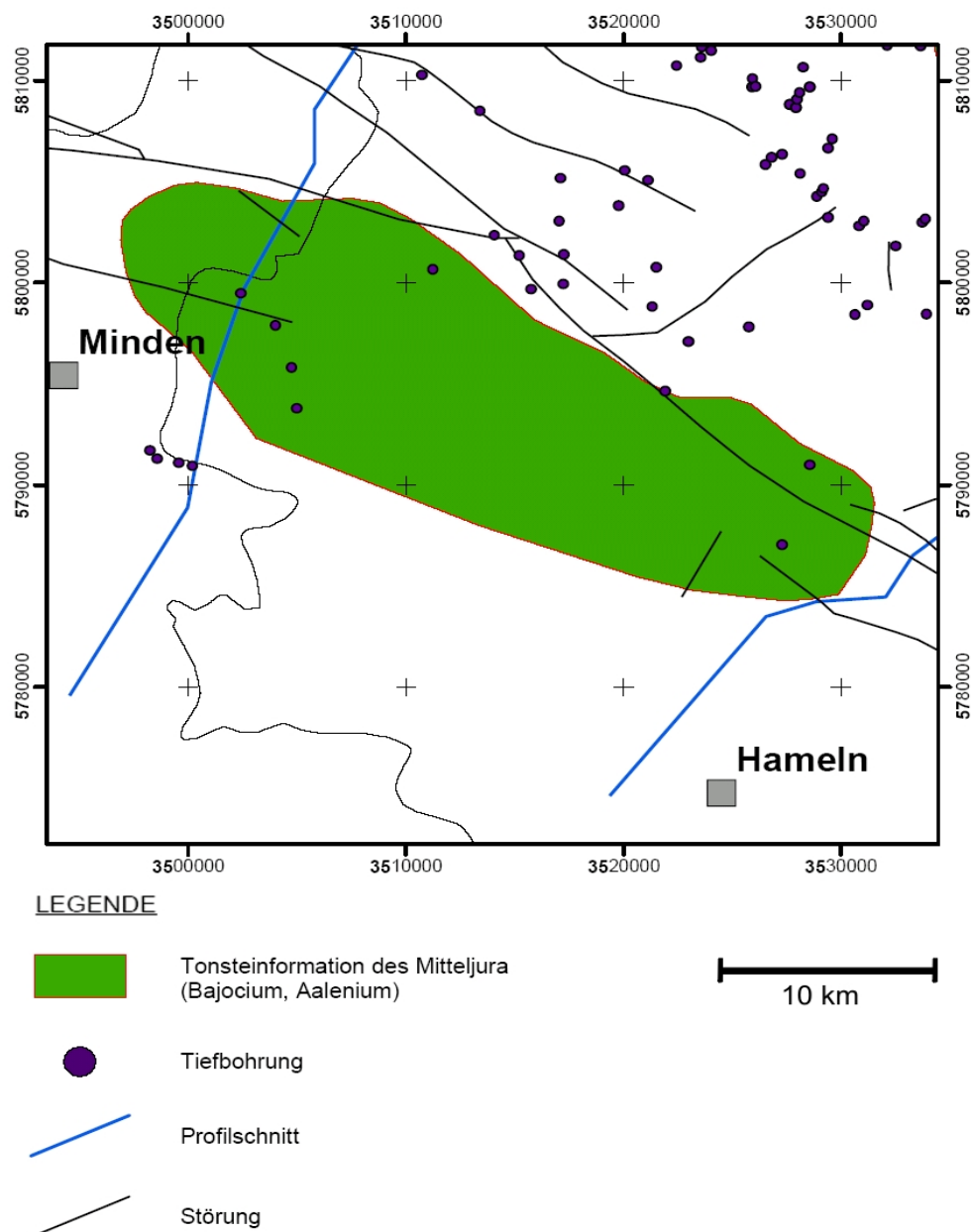


Abbildung 5-1: Lage des Untersuchungsgebietes Nord-2 nach BGR

Südlich der Wesergebirgs-Randmulde schließt sich im Raum Hameln (mit dem Süntel und dem Bad Münden-Graben) die nächste größere tektonische Einheit an, das Weserbergland. Das Weserbergland wird überwiegend von triassischen und jurassischen Sedimenten aufgebaut. Durch einen Wechsel von festeren und weicheren Gesteinen kommt es zur der für das Weserbergland charakteristischen Herausbildung von Schichtstufen, so dass die sog. Schichtstufenlandschaft entsteht. Besonders die Schichten des Oberen Muschelkalk, des Korallenoolith (Malm) sowie des Wealden-, Hils- und Osning-Sandsteins sind als Gelände-rippen herauspräpariert worden.

5.2 Geologische Situation im südlichen Niedersächsischen Becken

Die Abbildung 5-2 zeigt das generisches Modell im Raum zwischen Minden und Hameln. Der Profilschnitt ist 4-fach überhöht.

Die Tonsteininformationen, die im Untersuchungsgebiet die endlagerspezifischen Mindestanforderungen hinsichtlich Mächtigkeit und Tiefenlage (> 100 m Mächtigkeit, Tiefenlage > 300 m und < 1.000 m Tiefe) erfüllen, sind die Tonsteine des Doggers (Aalenium und unteres Bajocium, in der Abbildung 5-2 blau gefärbt). Das generische Endlagermodell wurde in einer Referenz-Tiefe von 800 - 900 m entwickelt.

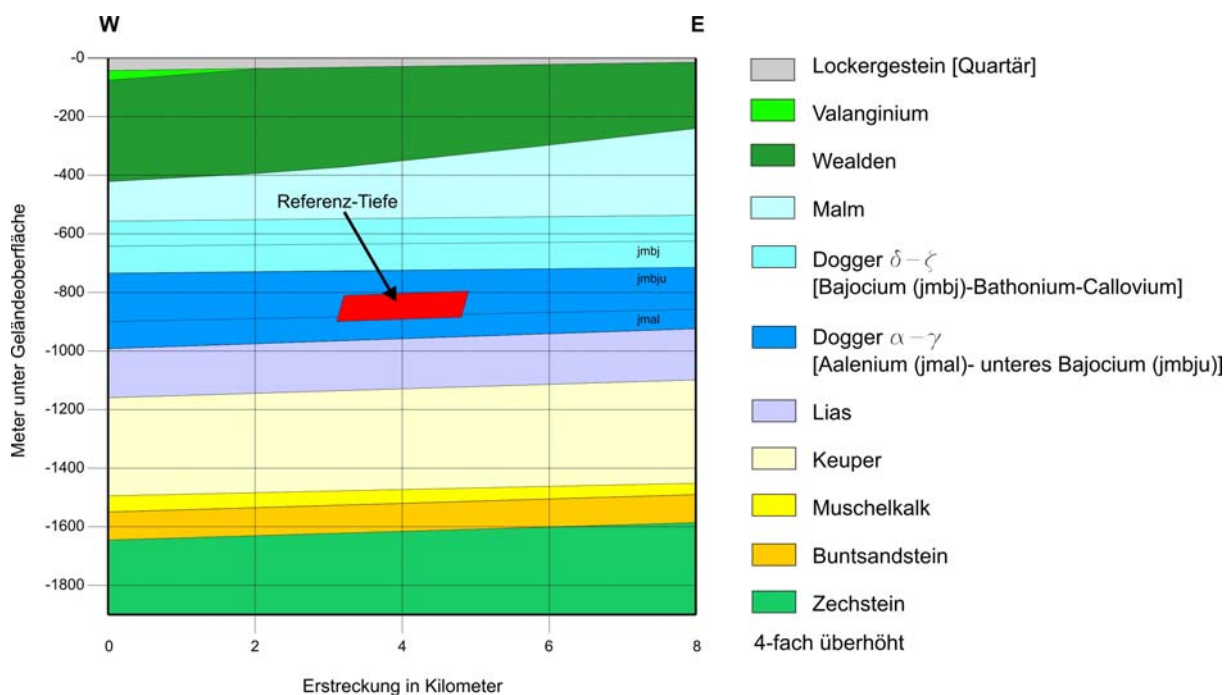


Abbildung 5-2: Generisches Modell Nord-2 zwischen Minden und Hameln

Das Modell wurde an Hand von zwei Profilen (siehe Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4) des „Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (BGR 2001)“ konstruiert. Die Lage dieser Profilschnitte ist in Abbildung 5-1 zu sehen.

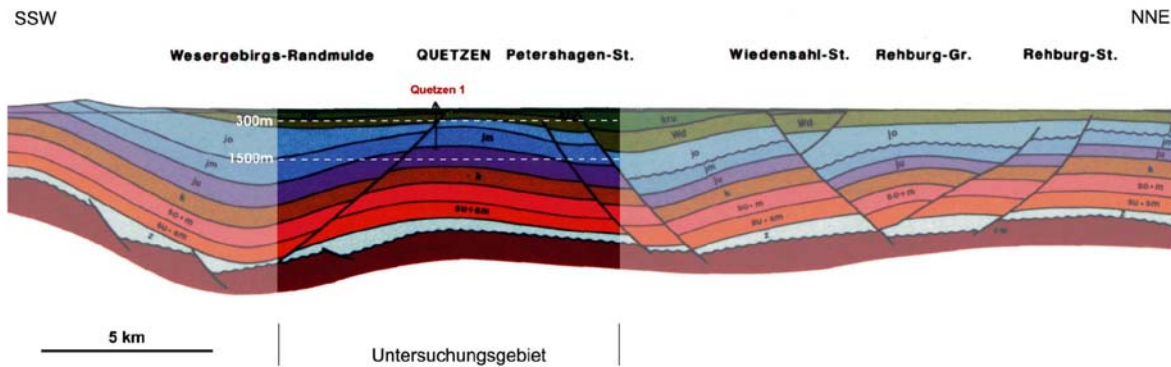


Abbildung 5-3: Profilschnitt durch den NW-Abschnitt des Untersuchungsgebietes.
 Die Schichten der Unterkreide sind grün, der Jura blau und der Trias braun eingefärbt (BGR 2001).

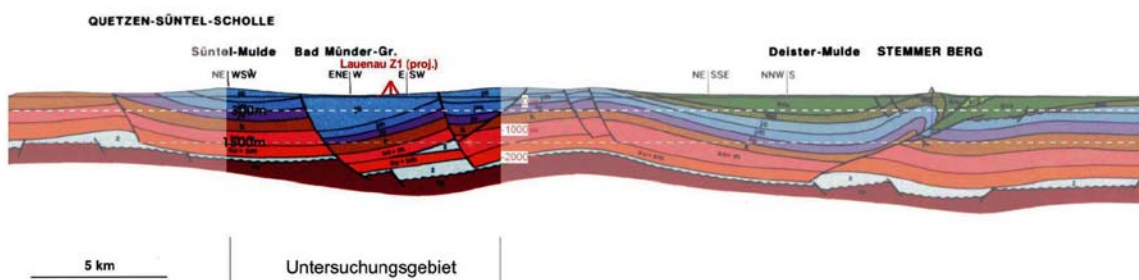


Abbildung 5-4: Profilschnitt durch den SE-Abschnitt des Untersuchungsgebietes.
 Die Schichten der Unterkreide sind grün, der Jura blau und der Trias braun eingefärbt (BGR 2001)

5.3 Stratigraphie im Untersuchungsgebiet

Das Weserbergland ist Bestandteil der Nordwestfälisch-Lippischen Aufwölbungszone bzw. Schwelle, die die erste deutliche morphologische Gebirgsauftragung am Südrand des Norddeutschen Flachlandes bzw. des Niedersächsischen Beckens darstellt. Diese Aufwölbungszone erstreckt sich entlang der Piesberg-Pyrmonter Achse von Westen nach Osten vom Teutoburger Wald über das Wiehengebirge bis zum Weserbergland mit Süntel und Deister. Die Fortsetzung nach Osten bildet das Leinebergland mit Ith und Hils sowie die Höhenzüge des nördlichen Harzvorlandes. Die Nordwestfälisch-Lippische Aufwölbungszone wird im Süden von der Osning-Zone, die in Abbildung 5-5 zu sehen ist, begrenzt.

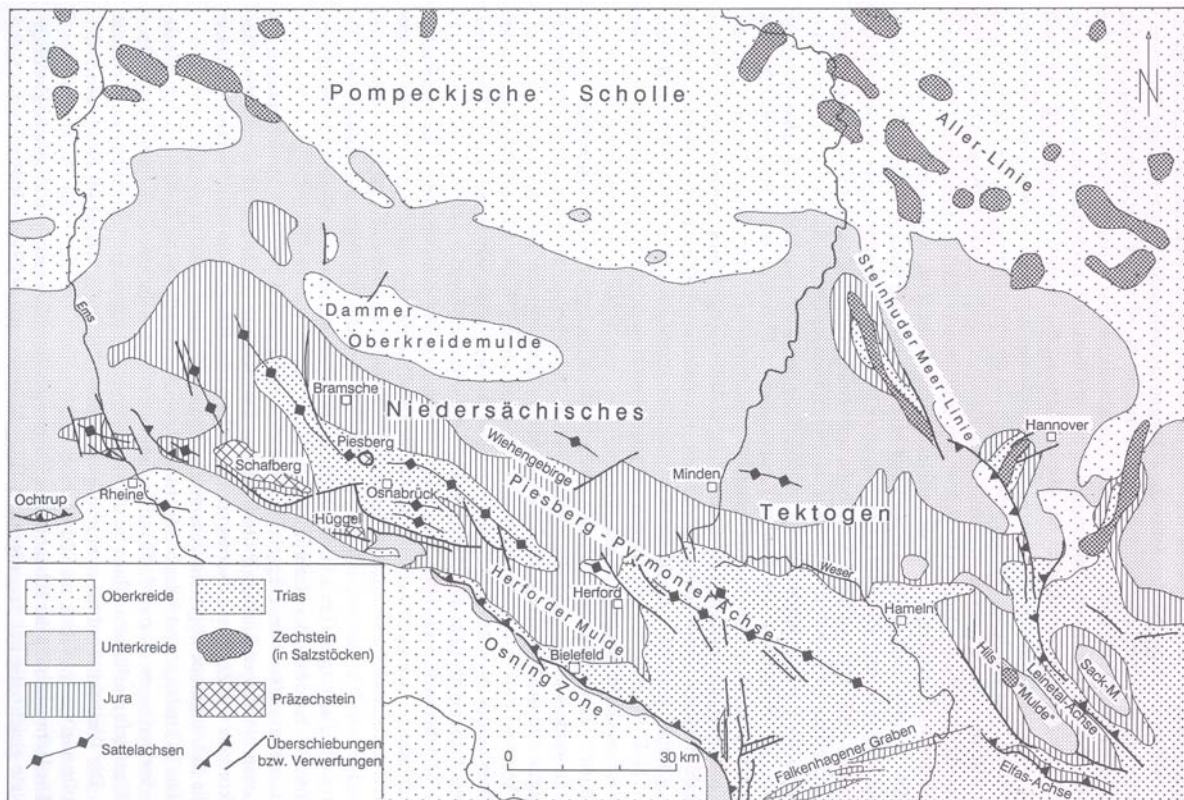


Abbildung 5-5: Der westliche und zentrale Teil des Niedersächsischen Beckens, mit der im Süden gelegenen Nordwestfälisch-Lippischen Aufwölbungszone sowie der Piesberg-Pyrmonter Achse (WALTER 1992).

Die geomorphologische Form des Weserberglandes (südöstlicher Teil des Untersuchungsgebietes), flache Bergketten und Schichtstufenlandschaft, wird geprägt von den charakteristischen Sedimentgesteinsfolgen des Mesozoikums, die zum einen durch den Aufstieg von Zechstein Salzen, zum anderen durch junge, komplexe tektonische Beanspruchungen (Osning-Überschiebung sowie Grabenbrüche, z.B. Leinetalgraben) verstellt wurden. Schichten der Triaszeit (Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper) liegen im Pyrmonter Bergland an der Erdoberfläche, Schichten der Jurazeit (Lias, Dogger, Malm) treten weiter nördlich im Süntel, Deister, Osterwald und Ith zu Tage. Die Kreideschichten liegen auf dem Bückeberge und bedecken auch noch höhere Teile von Deister und Süntel.

Der Bereich zwischen den Rehburger Bergen und den Bückebergen (im südlichen Niedersächsischen Becken), der den nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebiets darstellt, ist ein tektonischer Beanspruchungsraum, der Aufwölbungstendenzen zeigt und sich durch ein komplexes WNW-ENE streichendes Schollensystem mit Graben und Horststrukturen auszeichnet. Die Wesergebirgs-Randmulde und die Quetzener Struktur sind Elemente dieses tektonischen Systems.

Im Untersuchungsgebiet steht über den Zechstein Salzen die komplette mesozoische Schichtenfolge der Trias und der Jura bis zum Valangin der Unterkreide an. Die Schichtenfolge wird abgedeckt durch ca. 10 m mächtige Lockergesteine des Quartärs.

Zechstein

Im Zechstein lag das Untersuchungsgebiet im Bereich des Germanischen Beckens, einem marinen Ablagerungsraum. Nach mehrmaliger Abriegelung des Beckens und Eindampfung des Meeresswassers unter aridem Klima entstanden die für das Zechstein charakteristischen, bis zu mehrere 100 m mächtigen, salinaren Serien: zyklisch Abfolgen von Tonen, Karbonaten, Anhydriten, Stein- und Kalisalzen.

Trias

Die Trias beginnt zunächst mit einer kontinentalen Phase, dem Buntsandstein. Von den damaligen Hochgebieten schoben sich breite Deltaflächen in das Germanische Becken vor. Dies führte zur Bildung von mehreren 100 m mächtigen Sandstein/Tonstein-Wechselagerungszyklen, die über hunderte von Kilometern aushalten. Der Obere Buntsandstein (Röt) ist bereits ein Übergangsglied zu den marinen Ablagerungen des Muschelkalks. Im Röt kam es im Nordwestdeutschen Becken nach marinen Ingressionen zur Ausscheidung von evaporitischen Sedimenten (Gips, Anhydrit und Steinsalz).

Im Muschelkalk wurden durch einen erneuten Meeresvorstoß von Süden weite Teile Mitteleuropas von einem Flachmeer bedeckt. Die dünnsschichtigen „Wellen“- , Mergel- und Schillkalke des Unteren Muschelkalks zeugen von häufiger Umlagerung im bewegten Flachwasser. Im Mittleren Muschelkalk kam es nach einer kurzzeitigen Meeresabriegelung erneut zur Ausscheidung einer bis zu 200 m mächtigen, evaporitischen Schichtenfolge. Im Oberen Muschelkalk wurden nach erneuter Transgression wieder flachmarine Karbonatgesteine abgelagert.

Nach der Verlandung des Muschelkalk-Meeres im Keuper begannen sich Deltas in den Ablagerungsraum vorzuschieben. Den Unteren oder Lettenkohlenkeuper bilden dolomitische Tonsteine, die mit dunklen Mergeln und Kohleschmitzen führenden Sandsteinen wechsellagern. Der Mittlere Keuper ist im allgemeinen mächtiger und eintöniger. Im marin-brackischen Milieu entstanden mächtige Serien von bunten Tonmergel-, Silt- und Tonsteinen. In den tieferen Teilen treten durch die Eindampfung küstennaher Becken Anhydrit- und Gipsablagerungen und teilweise auch Steinsalzlager auf. Charakteristisch ist das Auftreten des im Durchschnitt 25-30 m mächtigen Schilfsandsteins. Dieser belegt eine Zwischenphase, in der kontinental beeinflusste fluviatile Ablagerungen des Delta-Bereichs häufig auftreten.

Im Oberen Keuper geriet der nordwestdeutsche Raum erneut unter marinen Einfluss, wodurch marine Ton- und Sandsteine abgelagert wurden.

Jura

Paläogeographischen Entwicklung

Mit der weltweiten Ingression des Meeres an der Wende zum Jura (Lias, Dogger und Malm) wird der nordwestdeutsche Sedimentationsraum endgültig marin. Im Lias und Dogger wurde durch die Hessische Senke das nordwestdeutsche Becken mit dem süddeutschen Sedimentationsraum mit nur wenigen Unterbrechungen verbunden, wie auch Abbildung 5-7 (S. 53) zeigt. Der nordwestdeutsche Sedimentationsraum zeigt nach BRAND & HOFFMAN (1963) vom Unterlias bis zum Bathonium zwar größere fazielle Unterschiede, aber nur geringe Veränderungen seiner Begrenzung. Im Südosten und Südwesten lagen größere Landmassen: die Böhmischo-Herzynische und die Ardennisch-Rheinische Masse. Das rasche Auskeilen des Lias im Deutsch-Holländischen Grenzgebiet macht das Vorhandensein eines Insel- oder Schwellengebietes etwa in der Gegend der Ostholländischen Triasplatte wahrscheinlich. Fazielle Anzeichen eines nördlichen Festlandes fehlen in den Lias-Sedimenten Nordwestdeutschlands. Im Oberlias verflacht sich der nördliche Teil des Sedimentationsraumes und es macht sich ab dem Oberen Bajocium der wachsende Einfluss eines nördlichen oder nordöstlichen Festlandes durch Zunahme der Sandgehalte bemerkbar.

Mit dem Beginn des Malm tritt eine sehr auffällige Veränderung des Nordwestdeutschen Beckens ein. Die Festländer, die den Trog während des Lias und des Doggers begrenzten, vergrößern sich und engen den Sedimentationsraum ein. Es entwickelte sich am Ende des Kimmeridges eine WNW-ESE verlaufende Trogzone, das Niedersächsische Becken. Die Begrenzung bilden im Süden die Rheinische Masse und die Hildesheimer Halbinsel, im Nor-

den die Pompeck'sche Schwelle, im Westen die Ostholländische Triasplatte sowie im Osten die durch Buchten gegliederte Flechtlinger Schwelle.

Petrographie

Im Lias entstanden im nordwestdeutschen Becken dunkle, fossilreiche Tone und Tonmergelsteine, die bis zu 1.400 m mächtig werden können. Da Hochgebiete jenseits der Elbe und Oder gelegen haben, erreichen von dort nur die letzten Ausläufer von größeren Flusssystemen und Deltamündungen das nordwestdeutsche Lias-Meer. Es ist deshalb eine etwas sandigere Ostfazies von einer tonigen West- oder Beckenfazies zu unterscheiden. Die Grenze verläuft in nord-südlicher Richtung von Kiel über Hamburg zwischen Hannover und Celle.

Der mittlere Jura (Dogger) umfasst eine Zeitspanne von ca. 178 bis 155 Mio. Jahre. In Abbildung 5-6 ist die lithostratigraphische Gliederung des Doggers von Nordwestdeutschland dargestellt. Die endlagerspezifischen Mindestanforderungen erfüllen die Tonsteine des Aaleniums und des unteren Bajociums. Die Lithofazies der Wirtsgesteinsformationen ist gekennzeichnet durch schwach siltige, pyritführende Tonsteine und Mergelstein, mit Tonanteilen von $\geq 80\%$. Im NW im Bereich von Minden sind vereinzelt sandige Mergelsteine eingeschaltet (HOTH 2005, mündliche Mitteilung).

Das Aalenium umfasst den Dogger α und β . Der Dogger α (Opalinuston) ist wie Abbildung 5-7 zeigt in Nordwestdeutschland – wie auch im süddeutschen Sedimentationsraum – einheitlich tonig ausgebildet.

Die Mächtigkeit des Dogger α ist im südöstlichen Teil von Nordwestdeutschland (Untersuchungsgebiet) am größten und steigt hier örtlich auf bis zu 100 und mehr Meter an. Im Raum Hannover-Nienburg wurden aber bereits wieder nur Durchschnittswerte von 40 m ermittelt (BRAND & HOFFMANN, 1963).

Der Opalinuston Nordwestdeutschlands entstand in landfernen Hochseeregionen mit entsprechender (= pelagischer) Fauna und Flora. Die hier zur Ablagerung kommenden pelagischen Sedimente sind nur noch unmittelbar vom Festland abhängig. Nur im Südosten und da auch nur im oberen Teil zeigen die Tonsteine durch die räumliche Nähe zur Rheinischen Masse einen merklichen Sandgehalt und leiten so zu der hier stark sandigen Fazies des Dogger β über.

Im Vergleich zu Norddeutschland (Tiefwasserfazies) entstand der Opalinuston im süddeutschen Raum in einem flachen Epikontinentalmeer mit maximalen Wassertiefen von wenigen Dekametern. Die Abbildung 3-1 (S. 27) zeigt, dass das süddeutsche Opalinuston-Meer durch das Böhmisches Massiv, das Vindelizische Land und die Alemannischen Inseln im Süden und der Lothringischen Karbonatplattform im Westen von dem offenen Ozean der Tethys getrennt wurde. Im Norden traten das London-Brabanter Massiv und die Rheinische Masse als Barrieren zum Germanischen Becken auf. Im süddeutschen Bereich ist im Vergleich zum norddeutschen Raum mit einem größeren Festlandseinfluss zu rechnen. Als Liefergebiet für grobklastische Schüttungen (Feinsande und Sande) kommt das Böhmisches Massiv im Osten des Ablagerungsraumes in Frage.

| System | Numerisches Alter in Mio a. | Internationale Stufengliederung | | | Lithologie |
|--------|-----------------------------|---------------------------------|-----------|--|-----------------------------------|
| JURA | 156,5 | CALLOVIUM | OXFORDIUM | | Omaten-Ton |
| | | | OBER | | |
| | | | MITTEL | | |
| | | | UNTER | | Macrocephalen-Schichten |
| | 164,6 | BATHONIUM | | | Aspidoides-Schichten |
| | | | OBER | | |
| | | | MITTEL | | |
| | | | UNTER | | Combrash Württembergica-Schichten |
| | 166,5 | BAJOCIUM | | | Parkinsonien-Schichten |
| | | | OBER | | Garantianen-Schichten |
| | | | | | Subfurcaten-Schichten |
| | | | | | Coronaten-Schichten |
| | | | UNTER | | Sonninen-Schichten |
| | 174,5 | AALENIUM | | | Concava-Sandstein |
| | | | OBER | | Ludwigien-Schichten |
| | | | | | Opalinus-Ton |
| | 178 | | UNTER | | |

Abbildung 5-6: Lithostratigraphische Tabelle des Doggers
(www.lbeg.de/index.htm?/geologie/erdgeschichte/jura_einstieg.htm)

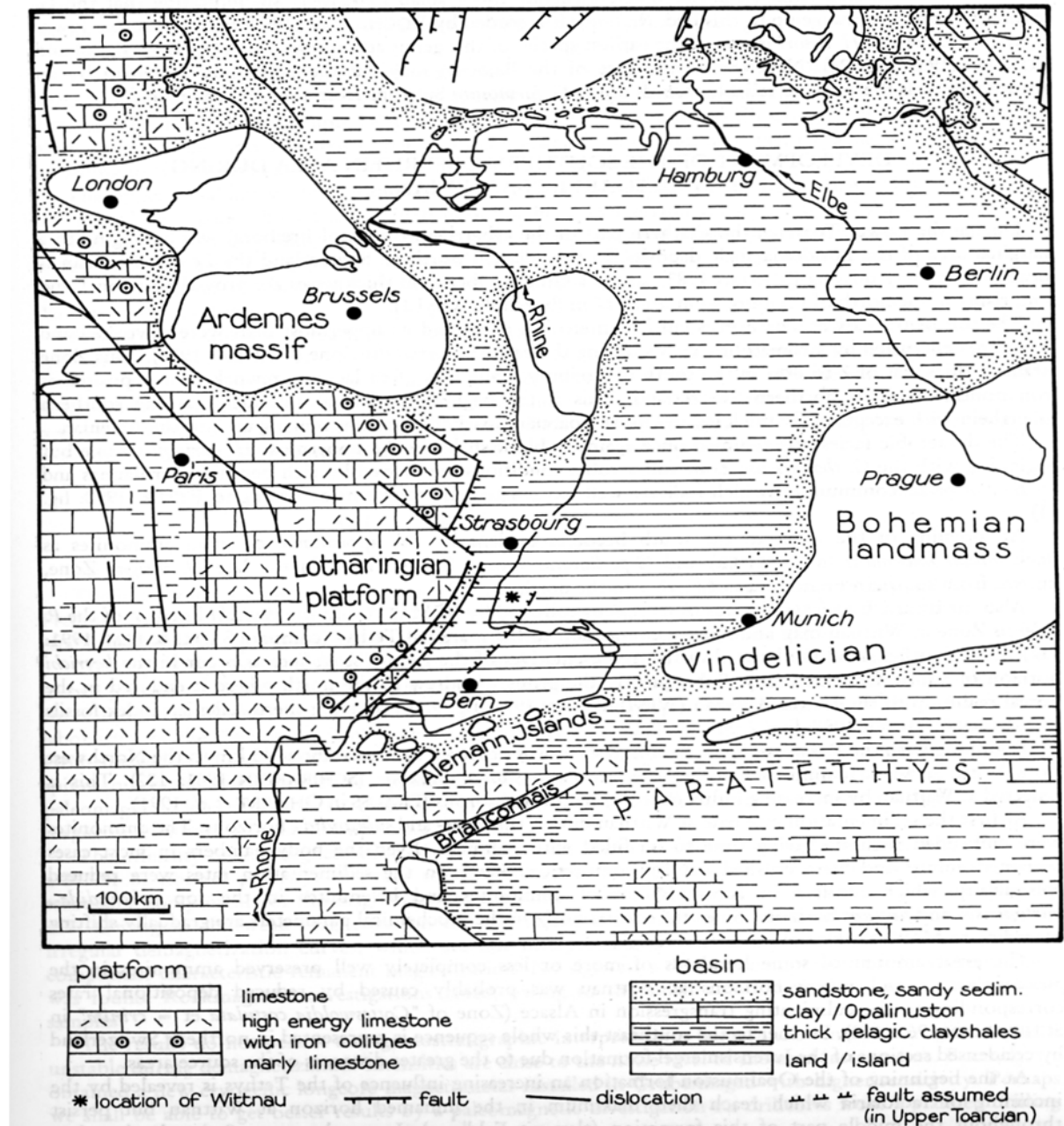


Abbildung 5-7: Paläogeographie des Unteren Aalenium im zentralen Europa (OHMERT & ROLF 1994)

Östlich der Weser zeigt der Dogger β anfänglich noch eine tonig-sandfreie Fazies, aber weiter östlich schalten sich immer häufiger Feinsandflaser und -schmitzen ein, bis es zur Bildung von z.T. recht mächtigen, aber vielfach seitlich rasch auskeilenden Sandsteinbänken kommt. Entlang der Westflanke der Oderwaldstruktur zwischen Wolfenbüttel und Braunschweig waren diese Sandsteine als potenzielle Erdölträger Explorationsziel.

Das Bajocium umfasst den Dogger γ (Unteres Bajocium) und δ (Mittleres/Oberes Bajocium). Der nordwestdeutsche Sedimentationsraum scheint eine beträchtliche Einengung im Südosten, Westen und vielleicht auch im Norden erfahren zu haben (BRAND & HOFFMANN 1963).

Im Dogger γ wird die Fazies in fast ganz Nordwestdeutschland als rein tonig, bereichsweise mergelig beschrieben. Die größten Mächtigkeiten wurden im Raum Meinersen festgestellt, wo in der Bohrung Hillerse 1 der Dogger γ nach einer Mächtigkeit von 102 m noch nicht

durchteuft wurde. Im Osten verschwindet der Sandgehalt völlig oder tritt sehr stark zurück, während im Emsland und im Raum Holstein, Oldenburg und Hamburg dagegen eine allmähliche Zunahme des Sandgehaltes beobachtet wurde. Dort wurden brackisch-limnische Sande abgelagert, die nach Süden jedoch sehr schnell geringmächtiger werden.

Die tonige Wirtsgesteins-Fazies endet im Oberen Bajocium (Dogger δ) mit den Kalksandsteinen der Garantianen-Schichten (siehe Abbildung 5-6, S. 52). Im Mittel-/Ober-Bajocium stellt sich im gesamten Sedimentationsgebiet erstmals ein merklicher nach oben hin zunehmender Feinsandgehalt ein. Der Feinsand wird aus einem im Norden gelegenen zentralen Nordsee-Hoch, das sich zeitweise bis südlich der Unterelbe erstreckt haben kann und von der Rheinischen Masse im Süden geliefert. Die Hauptschüttungsrichtung hat sich damit von E-W nach N-S verschoben. Deltasandsteinhorizonte sind sowohl für das Ober-Bajocium als auch für das Bathonium (Dogger ϵ) charakteristisch. Die größte Ausbreitung in dieser Zeit besitzen die Cornbrash- und Porta-Sandsteine. Der Cornbrash ist kein stratigraphischer, sondern ein rein fazieller Begriff; er kann innerhalb der verschiedensten Zonen des Bathoniums auftreten. Bei der Cornbrash-Fazies handelt es sich um eine senkrecht zur nordöstlichen Festlandsküste gerichtete sandige Rinnenaufschüttung, die in einem limnisch-brackischen Milieu zur Ablagerung gekommen ist. Die Abbildung 5-8 zeigt, dass die Sandsteine im Weser-Trog weit gegen Süden vorgreifen. Westlich der Ems klingen die Sandschüttungen aus. Im Osten dagegen schließen sie sich zu einem geschlossenen Paket zusammen, das im Bereich der Schwellenregion, die den Weser-Trog vom Gifhorner Trog trennt, aus einem schillreichen Kalksandstein besteht (BRAND & HOFFMANN 1963).

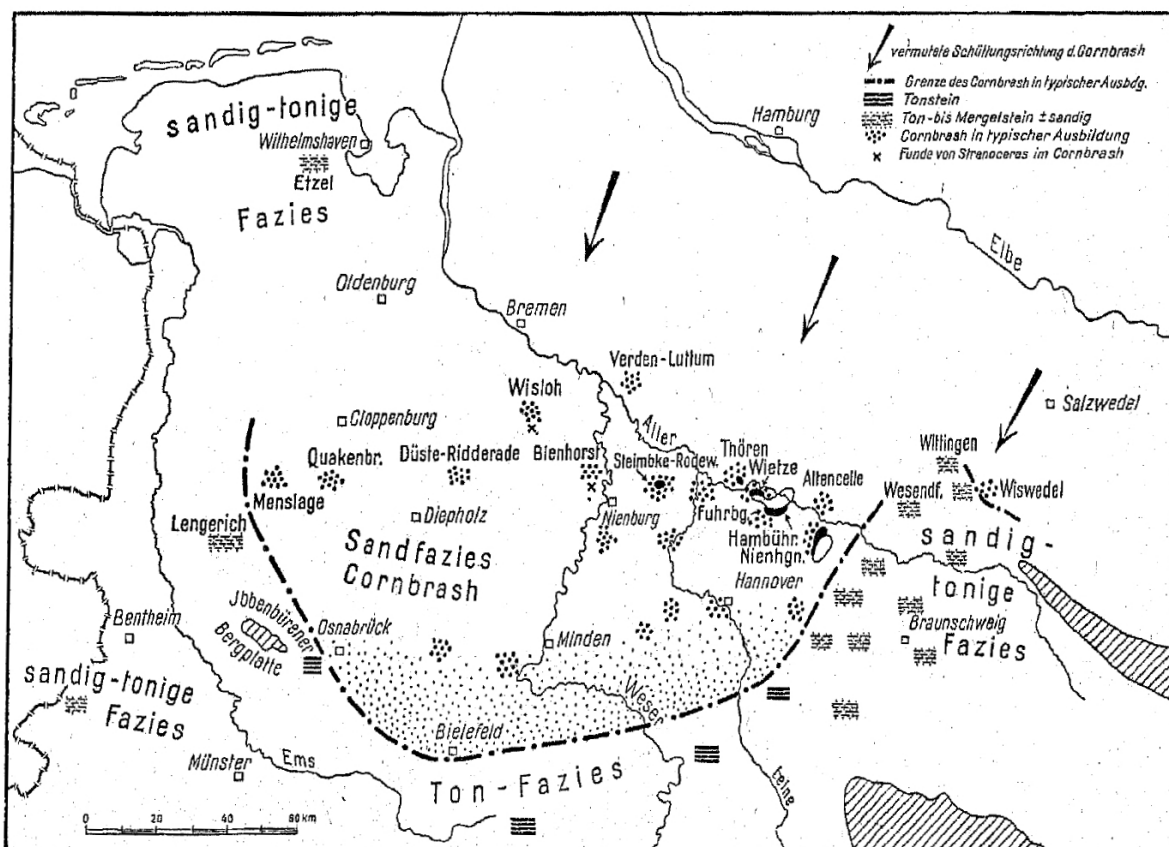


Abbildung 5-8: Faziesverteilung des Cornbrashes im Bathonium Norddeutschlands (KUMM 1952)

Im Untersuchungsgebiet treten vom Oberen Bajocium bis Bathonium Kalksandsteine, Sandsteine sowie Mergelsteine und Tonsteine der Cornbrash-Fazies auf. Der Tonanteil schwankt zwischen 20 – 50 %.

Das marine Callovium (Dogger ζ) zeugt von einer erneuten, allerdings nur kurzfristigen Hebung des Meeresspiegel (BOIGK 1981). Im tieferen Teil sind zwar noch 1 bis 2 Sand-

steinbänke (= Macrocephalen-Sandstein) aufgeschlossen, jedoch setzt die Vertonung schon 10 bis 20 km nördlich der Vertonung des Bathonium-Sandsteins (siehe Abbildung 5-8) ein. Das Mittel- und Obercallovium ist mit dem Ornatenton wieder rein tonig ausgebildet.

Im Untersuchungsgebiet nimmt das Callovium vom Westen (20 m) nach Osten (55 m) an Mächtigkeit zu. Lithologisch lässt sich das Callovium als Tonsteine und Mergelsteine mit Kalkstein-Lagen beschreiben. Der Tonanteil liegt zwischen 10 – 80 %.

Zum Beginn des Malms (Stufe Oxford) bestehen im Osten und Nordwesten noch Verbindungen mit dem offenen Meer. Gleichzeitig kam eine Reihe bereits im Lias angelegter, NNE-SSW (rheinisch) streichender Schwellen und Tröge in heftige epiorogene Bewegung. Die Fazies- und Mächtigkeitsunterschiede sind daher größer als in den Schichten des tieferen Jura. Die tonig-mergeligen bis kalkigen, z.T. auch anhydritischen Gesteinsserien des Serpults stellen den Abschluss der jurassischen Schichtenfolge dar.

Die Ablagerungen des Oxfordiums gehören im Westen Norddeutschlands vermutlich einem Wattenmeer an, in das sich von Norden und Nordwesten ein Delta mit fluviatilen Sedimenten und Sandsteinhorizonten vorschob. Die Fazies ist deshalb vorwiegend tonig-sandig bis tonmergelig und durch einen raschen Wechsel mit Sand- und Kalksteinen gekennzeichnet. Der Tonanteil beträgt maximal 45 %. Diese Ablagerungen, die sogenannte Wiehengebirgsfazies, sind nur im zentralen westlichen Teil des Beckens erhalten geblieben und nehmen nach Osten rasch an Mächtigkeit zu. Außerdem sind Eisen- und Korallenoolithe sowie Schalenkalke und Lumachellen typische Komponenten der Abfolge.

Im Kimmeridge wurden bis zu 1.000 m mächtige feinklastische Sedimente im Gifhorner Trog festgestellt. Im westlichen Teil des Niedersächsischen Beckens sind sie geringmächtiger, vielfach tonig-sandig bis kalkig (die sog. Knollenkalke), von grauer, rötlicher oder grünlicher Färbung. Im Untersuchungsgebiet ist eine Mächtigkeitszunahme von 15 m im Westen auf 100 m im Osten festzustellen. Charakteristisch ist eine Abfolge von Kalk- und Tonsteinen. Im Osten des Untersuchungsgebietes wurde ein Tonanteil von bis zu 60 % festgestellt (HOTH 2005, mündliche Mitteilung).

Im Tithon (Obermalm) verlagert sich das Trogtiefste in das Niedersächsische Becken. Dieser Teil des Malms zeichnet sich aus durch eine starke Zunahme der Salinität als auch durch eine sehr unterschiedliche lithologische Entwicklung. Unterschieden wird eine Karbonat-, Sulfat- und Chloridfazies.

Im Untersuchungsgebiet tritt die an den Rändern des Ablagerungsbeckens und im Bereich der Schwellen vorherrschende Karbonatfazies auf. Sie ist gekennzeichnet durch oolitische Kalksteine, Dolomite, Mergelsteine und Tonsteine. Beckenwärts schließt sich die Sulfatfazies an mit Tonmergel- und Kalksteinen, die von geringmächtigen Anhydritbänken durchsetzt sind. Die größte flächenhafte Ausdehnung besitzt die Sulfat-Fazies im Weser-Hannover Gebiet.

In der Chlorid-Fazies treten schließlich in ganz verschiedenem stratigraphischen Niveau Steinsalzlager auf, die sich zu einem mehr oder weniger geschlossenen, 1.000 m mächtigen Salinar zusammenschließen können (TRUSHEIM 1971). Ablagerungen der Chlorid-Fazies sind nur in zwei, räumlich begrenzten Trögen entwickelt: in dem schmalen Rehden-Lohe-Becken (westlich von Hannover) und dem breiteren Menslage-Lembruch Becken (Quackenbrück-Diepholz).

Im Bereich des Süntel (südöstlicher Bereich des Untersuchungsgebietes) steht der Malm größtenteils als Korallenoolith (Oxfordium) oder Kalk- und Tonstein (Kimmeridge) an, der Verkarstungserscheinungen aufweist.

Unterkreide

Nur im Westen des Untersuchungsgebietes im Bereich der Wesergebirgs-Randmulde sind die Unterkreide-Schichten des Wealdens und Valangins aufgeschlossen. Die paläogeographische Großkonfiguration entsprach im Wealden und Valangin noch weitgehend der des ausgehenden Obermalm (Serpulit).

Die lithologische Untergrenze der Unterkreide Schichten ist unscharf und liegt im konkordanten Übergang zum Serpulit des Oberen Jura (Malm). Im Untersuchungsgebiet entwickeln sich aus den brackisch-marinen Ablagerungen des Serpulits die sandigen Tonsteine und Kalksteine der terrestrisch dominierten Wealden-Fazies des Ostteils des Niedersächsischen Beckens.

Die das nordwestdeutsche Wealden-Becken (siehe Abbildung 5-9) umgebenden Gebiete waren von einem ausgeglichenen Relief gekennzeichnet. Lediglich die im Süden des Ablagerungsraumes gelegene Rheinische Masse bildete als „Hochgebiet“ das Hauptliefergebiet der Sedimente (STILLE 1909).

Im Bereich des Untersuchungsgebietes zwischen Weser und Leine (Ostteil des Niedersächsischen Beckens) schob sich von der Rheinischen Masse ein großer Schüttungskegel tonig-sandiger Sedimente in die Tonstein-Fazies des Beckeninneren. Das mächtigste hierzu gehörige Sandsteinpaket ist der Deister Sandstein. Die proximalen Enden des Schüttkegels sind von Mooren und Sumpfwäldern besetzt, die zur Kohlebildung führten. Häufig verzahnen sich diese kohleführenden Ablagerungen mit mächtigeren Sandkörpern, die von schluffig-tonigen Lagen durchsetzt sind. Vereinzelt treten in diesen Serien Kalksteine auf. Die sandig-tonigen Ablagerungen des Wealdens erreichen im Untersuchungsgebiet Mächtigkeiten von bis zu 250 m mit einem Tonanteil von ca. 65 %.



Abbildung 5-9: Paläogeographische Übersichtsskizze von Nordwestdeutschland, Wealden nach SCHOTT et al. (1967/69).

1. Gebiet ohne Sedimentation (örtlich sehr geringe Sedimentation möglich).
2. Vorwiegend tonige Sedimente (< 10 % Sandanteil).
3. Tonig-sandige Sedimente (10-50 % Sandanteil).
4. Überwiegend sandige Sedimente (> 50 % Sandanteil).
5. Vorkommen von marinen bis brackisch-marinen Folgen.

Im Valangin setzt im NW-deutschen Raum die erste flächenhafte, marine Ingression nach der langen Zeit nicht vollmariner Faziesbedingungen mit erstaunlicher Gleichzeitigkeit ein.

Die zentralen Abschnitte des Niedersächsischen Beckens sind durch überwiegend dunkelgraue, z.T. mergelige, Pyrit führende Tonsteine gekennzeichnet. In diese Tonsteine schalten sich am westlichen und südlichen Beckenrand tonig-sandige Ablagerungen ein, die Zeiten einer stärkeren Erosion des Landes entsprechen. Die Sandsteine des Obervalangin im Raum östlich und nördlich von Hannover erwiesen sich als Erdöl-speichergesteine. Sie wurden u.a. in den Feldern Leiferde, Nienhagen-Hänigsen und Suderbruch in Förderung genommen.

Die sandigen Tonsteine und Tonmergelsteine des Valangin erreichen im Untersuchungsgebiet Mächtigkeiten von bis zu 75 m mit einem Tonanteil von bis zu 75 %.

Quartär

Die Ablagerungen des Quartärs sind durch einen raschen Wechsel von Warm- und Kaltzeiten entstanden. Der quartäre Sediment-Komplex besteht im allgemeinen aus einer Wechselfolge von Schmelzwassersanden, Geschiebemergeln sowie Beckenbildungen (Tone, Schluffe und Feinsande). Die Beckenbildungen sind jedoch nur vereinzelt erhalten geblieben.

Im Niedersächsischen Bergland schnitten sich während der Kaltzeiten die Flüsse ein und lagerten Kies um. Außerhalb der Flusstäler wurde Löss abgelagert, der sich aus feinen, vom Wind transportierten und abgelagerten Partikeln zusammensetzt.

Im Untersuchungsgebiet treten Tone, Sande und Kiese auf, die nach Osten in Mergel übergehen. Es wurde Tonanteile zwischen 50 – 70 % festgestellt.

5.4 Erdbeben und Vulkanismus

Aus der „Karte der Erdbebenzonen Deutschlands (DIN 4149)“ geht hervor, dass im Gegensatz zum Niederrhein-Gebiet, dem Oberrhein-Gebiet und der Schwäbischen Alb sowie Sachsen die Erdbebendichte und –frequenz im Bereich der Norddeutschen Senke außerordentlich gering ist. Damit kann Erdbebengefährdung im Bereich der Norddeutschen Senke als Negativkriterium für die Untersuchungswürdigkeit ausgeschlossen werden (KOCKEL & KRULL 1995).

Bei der Endlagerstandortauswahl ist eine zu erwartende, vulkanische Aktivität im Zeitraum von einer Millionen Jahren zu berücksichtigen. In Deutschland müssen außer den Gebieten Eifel und Vogtland/Egergraben keine weiteren Gebiete mit einer vulkanischen Gefährdung benannt werden (AKEND 2002). Mit einem Wiederaufleben des Vulkanismus im Süddeutschen Molassebecken (Hegau Vulkanismus im Miozän) und in der Norddeutschen Senke ist im Zeitraum von einer Millionen Jahre nicht zu rechnen.

5.5 Thermische Umgebungsbedingungen

Es werden ähnliche thermische Umgebungsbedingungen wie im Referenzmodellgebiet Nord-1 vermutet. Eine lineare Interpolation führt zu einem Temperaturgradient von 38 mK m^{-1} und einer Oberflächentemperatur von $8,0 \text{ °C}$.

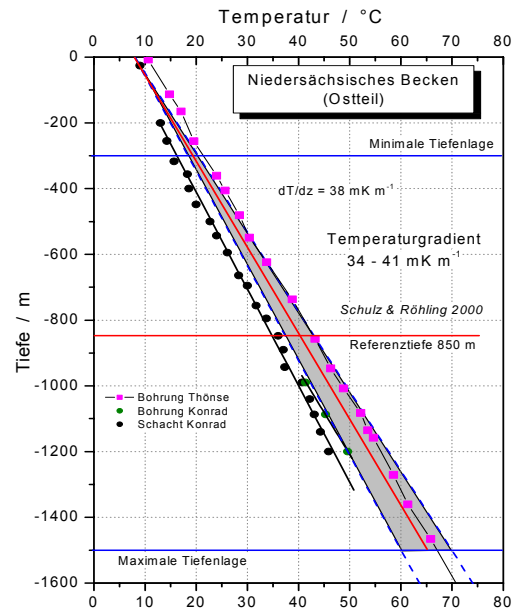


Abbildung 5-10: Untergrundtemperaturen in der relevanten Region

Literaturverzeichnis

- AKEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, W&S Druck, Köln.
- ANDRA (1999): Geological Statement Report of the Eastern Site. Report Nr. A RP ADS 99-00506/1999.
- Balling, N., Kristiansen, J. I., Breiner, N., Poulsen, K. D., Rasmussen, R., Saxov, S. (1981): Geothermal measurements and subsurface temperature modelling in Denmark, GeoSkifter No. 16, Department of Geology, Aarhus University.
- Barker, C.E., Pawlewicz, M.J. (1994): Calculation of Vitrinite Reflectance from Thermal Histories and Peak Temperatures. A comparison of Methods. – P.K. Mukhopadhyay & W.G. Dow (Eds.), Vitrinite reflectance as a maturity parameter: applications and limitations. – ACS Symposium Series 570: 216-229.
- Bartenstein, H., Teichmüller M., Teichmüller R. (1971): Die Umwandlung der organischen Substanz im Dach des Bramscher Massivs; Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., 18: 501-538; Krefeld.
- Bausch, W., Schober, T. (1997): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1 : 25.000 und Erläuterungen zum Blatt 8316/8416 Klettgau/Hohentengen am Hochrhein. Geol. Landesamt Baden-Württemberg, Freiburg i. Br.
- Bayerisches Geologisches Landesamt (BGL, Hrsg. 1996): Erläuterung zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000, 4. Auflage, 329 S., München.
- BGR - Koordinatoren Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Kockel, F. (2001): Geotektonischen Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor - Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie, Geol. Jb, A 153, Hannover.
- Binot, F., Gerling, P., Hiltmann, W., Kockel, F., Wehner, H. (1993): The Petroleum System in the Lower Saxony Basin. In: Spencer A.M. (Ed.), Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons III. Spec. Publ. European Association of Petroleum Geoscientists No. 3, pp. 121 – 139. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bloomer, J. R. (1981): Thermal conductivities of mudrocks in the United Kingdom, Q. J. eng. Geol., London.
- Boigk, H. (1968): Gedanken zur Entwicklung des Niedersächsischen Tektogens; Geol. Jb., 85, 861-900, Hannover.
- Boigk, H. (1981): Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland – Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik; Enke-Verlag, Stuttgart.
- Brand, E., Hoffmann, K. (1963): Stratigraphie und Fazies des nordwestdeutschen Jura und Bildungsbedingungen seiner Erdöllagerstätten; Erdöl und Kohle, 16., S. 437-450, Hamburg.
- Brigaud, F., Vasseur, G. (1989): Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks, Geophysical Journal 98, pp. 525-542.
- Brigaud, F., Vasseur, G. (1989): Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks, Geophysical Journal Nr. 98.

- Brigaud, F., Chapman, D., Le Douaran, S. (1990): Estimating Thermal Conductivity in Sedimentary Basins using Lithologic Data and Geophysical Well Logs, The American Association of Petroleum Geologists Bulletin.
- Brigaud, F., Chapman, D. S., Le Douaran, S. (1990): Estimating thermal conductivity in sedimentary basins using lithological data and geophysical well logs, American Association of Petroleum Geologists Bulletin V. 74, No. 9, pp. 1459-1477.
- Brockamp, O. (1976): Nachweis von Vulkanismus in Sedimenten der Unter- und Oberkreide in Norddeutschland, Geologische Rundschau, Vol. 65, 162-173.
- Buntebarth, G. (1980): Geothermie – Eine Einführung in die allgemeine und angewandte Wärmelehre des Erdkörpers, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York.
- Buntebarth, G. (2005): Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften an Tonstein-Proben der Unterkreide, Geophysikalisch-technisches Büro, Clausthal-Zellerfeld.
- Demongodin, L., Pinoteau, B., Vasseur, G., Gable, R. (1991): Thermal conductivity and well logs - a case study in the Paris basin, Geophys. J. Int. 105, pp. 675-691.
- Demongodin, L., Vasseur, G., Brigaud, F. (1993): Anisotropy of thermal conductivity in clayey formations, Norwegian Petroleum Society (NPF) Special Publications 3, pp. 209-217, Elsevier, Amsterdam.
- Deutloff, O., Teichmüller, M., Teichmüller, R., Wolf, M. (1980): Inkohlungsuntersuchungen im Mesozoikum des Massivs von Vlotho im Niedersächsischen Tektonen, N. Jb. Geol. Paläont. Mh., 1980 (6): 321-341, Stuttgart.
- Diebold, P., Naef, H., Ammann, M. (1991): Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz. Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen. NAGRA Tech. Ber. NTB 90-04, und Landeshydrologie und -geologie, Bern, Geol. Ber. Nr. 14.
- Dill, H.G. mit Beiträgen von Koch, J., Mattiat, B., Rösch, H., Weiser, T., Blum, N. (1995): Sedimentpetrographie und -geochemie der Unterkreideschichten in den Bohrungen Wiechendorf 1/86 und Ahlum 1, Geol. Jb., A 141, 45-483, 6 Abb., 2 Tab., 1 Taf., Hannover.
- Eckhardt, F.-J. (1991): Geotechnische Probleme der marinen Unterkreide Niedersachsens, Mitteilungen des Institutes für Bodenforschung und Baugewandte Geologie der Universität für Bodenkultur Wien, Reihe: Angewandte Geowissenschaften, Heft 1 Tonmineralogie und Geotechnik, Wien.
- Erkwoh, F.-D., Knauff, W., Worthmann, H. (1964): Das Wealden von Isenstedt, Kreis Lübbecke (Westf.), Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., 7: 383-402, Krefeld.
- Fabian, H.-J. (1971): Die Aufschlußbohrung Ellerborg Z1 bei Lübbecke in Westfalen, Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 18: 387-394, Krefeld.
- Gaida, K.-H., Gedenk, R., Kemper, E., Michaelis, W., Scheuch, R., Schmitz, H.-H., Zimmerle, W. (1981): Lithologische, mineralogische und organisch-geochemische Untersuchungen an Tonsteinen und Tonmergelsteinen der Unterkreide Nordwestdeutschlands, Geol. Jb., A 58, 15 – 47, 8 Abb., 2 Tab., 2 Taf., Hannover.
- Geyer, O.F., Gwinner, M.P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg.- 482 S., Schweizerbart, Stuttgart.

- GSF (Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH), Institut für Tieflagerung (1982): Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Abschlussbericht Band I (GSF – T 136).
- Hekel, U. (1989): Forschungsvorhaben Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien. - Zwischenbericht über die Voruntersuchungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Freiburg (unveröffentlicht), Bibliothek BGR.
- Herrgesell, G., Franz, M. (2002): Blatt 8317/5417 Jestetten (vorläufige Ausgabe). – Freiburg i.Br., Geologisches Landesamt Baden-Württemberg.
- Hofmann, F. (1981): Erläuterungen zum Blatt Nr. 74: Neunkirch, Geol. Atlas d. Schweiz. Schweiz. geol. Komm.
- Hölting, B. (1996): Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie, Enke-Verlag, Stuttgart.
- Hoth, P., Wirth, H., Schulz, P., Krull, P. (2002): Tonformationen in Deutschland als mögliche Barriere- oder Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, BGR, Hannover.
- Hoth, P., Schulz, P., Fischer, M., Krull, P. (2002a): Geowissenschaftliche Mindestanforderungen im Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Überprüfung der Anwendbarkeit bei Tongesteinsvorkommen in Deutschland, BGR, Berlin.
- Jobmann, M., Schulz, R. (1989): Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken, Abschlussbericht Teilgebiet Hydrogeothermik, Band 1, NfB Hannover.
- Jobmann, M., Amelung, P. (2004): Untersuchungen zur Sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein -Genesis- Jahresbericht 2003.
- Kim, J., Gompper, K., Geckeis, H. (2001): Forschung zur Langzeitsicherheit der Endlagerung hochaktiver Abfälle. In Radioaktivität und Kernenergie, pp. 118-129, Forschungszentrum Karlsruhe.
- Kemper, E. (1973): The Valanginian and Hauterivian stages in northwest Germany, In: The Boreal Lower Cretaceous: the proceedings of an International organisation, vol. 5, 327 – 344, Liverpool.
- Kemper, E., Zimmerle, W. (1978): Die anoxischen Sedimente der präoberaptischen Unterkreide NW-Deutschlands und ihr Paläogeographischer Rahmen, Geol. Jb., A 45, 3 – 41, 2 Abb., 1 Tab., 3 Taf., Hannover.
- Kemper, E. (1995): Sedimente, Fazies und Schichtenfolge des Barrême und Apt in NW-Deutschland, Geol. Jb., A 141, 9-45, 13 Abb., 4 Taf., Hannover.
- Kühn, V. (1994): Mineralogische Untersuchungen an Sedimenten der norddeutschen Unterkreide unter besonderer Berücksichtigung der Tonmineralogie sowie diagenetischer Bildungen, Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fachbereiche der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- Kockel, F., Krull, P. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen, Archiv-Nr. Hannover 111 089: 48 S., 1 Anhang, 4 Anl., BGR Hannover.
- Kumm, A. (1952): Das Mesozoikum in Niedersachsen. Der Dogger (Mittlerer oder Brauner Jura). - In: BRÜNING (Hrsg.): Geologie und Lagerstätten Niedersachsens. - Schr. wirtschaftswiss. Ges. Stud. Nieders., N. F. 2: 329-509, 96 Abb., 21 Tab., Bremen.

- Leydecker, G., Steinwachs, M. (1980): Das Erdbeben vom 2. Juni 1977 in der Norddeutschen Tiefebene bei Soltau, Geol. Jb., E 18: 18 S., 5 Abb., 3 Tab., Hannover.
- Matthes, S. (1987): Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Meyer, K. (1969): Zur Paläogeographie der Stufen Rhät bis Alb im Emsland, Erdöl-Erdgas-Zeitschrift, 85. Jg., 484 – 505, 21 Abb., Hamburg.
- Midttomme, K., Roaldset, E., Aagaard, P. (1997a): Thermal conductivity of selected claystones and mudstones from England, Clay Minerals 33, pp. 131-145.
- Midttomme, K., Roaldset, E., Aagaard, P. (1997b): Thermal conductivities of argillaceous sediments, in: McCann et al. (eds) 1997: Modern Geophysics in Engineering Geology, Geological Society Engineering Geology Special Publication No. 12, pp. 335-363.
- Müller, E. (1995): Geochemische und sedimentologische Untersuchung der Grenzsichten Barrême-Apt unter besonderer Berücksichtigung der Laminite, Geol. Jb., A 141, 533 – 549, 3 Abb., 3 Tab., Hannover.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA, 2001) : Technischer Bericht 00-01 – Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA, 2002a): Technischer Bericht 02-03 – Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA, 2002b): Projekt Opalinus Clay, Safety report, Nagra Technical Report (NTB) 02-05, Wetingen, Schweiz.
- Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA, 2002c): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland, Nagra Technical Report (NTB) 99-08, Wetingen, Schweiz, Korrigendum mit den revidierten Figuren und Beilagen Mai 2006.
- Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA, 1988): Technischer Bericht 86-01, Sondierbohrung Weiach.
- Nodop, J. (1971): Tiefenrefraktionsseismischer Befund im Profil Versmold-Lübbecke-Nienburg, Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., 18: 411-422, Krefeld.
- Ohmert, W., Rolf, Ch. (1994): The Aaelnian boundaries at Wittnau (Oberrhein area, south west Germany), Proceedings 3rd International Meeting on Aalenian and Bajocian Stratigraphy, Miscellanea del Servizio Geologico Nazionale, Volume 5: 33-61, 9 figg., 5 tavv.
- Patnaik, P., Füchtbauer, H. (1978): Temperature influencing the authigenic growth of silicates, IXth International Congress of Sedimentology, Abstract, Nice.
- Rachold, V., Brumsack, H.-J. (1995): Geochemie von Unterkreide-Sedimenten (Barrême bis Apt) des niedersächsischen Beckens (unter besonderer Berücksichtigung des Unterapt-Fischschiefers), Geol. Jb., A 141, 551 – 561, 6 Abb., 1 Tab., 1 Anh, Hannover.
- Riedel, H. (1989): Schwermetallgehalte im Sedimentgestein (Braunjura a) als mögliche geogene Grundwasserbelastung. Diplomarbeit Universität Stuttgart - zitiert in: Schmidt 1996, Stuttgart.

- Rullkötter, J., Littke, R., Heber, G., Horsfield, B., Jendrzewski, L., NotØ, H., Radke, M., Schaefer, R.G. (1995): Organic Matter in Upper Barremian to Lower Aptian Sediments in the Lower Saxony Basin, NW Germany (Wiechendorf 1/86 Borehole), Geol. Jb., A 141, 563-585, 9 figs., 5 tabs., Hannover.
- Rösch, H. (1982): Mineralogisch-geochemische Daten des Oberapt östlich von Hannover, Ergebnisse eines Bohrprogramms, Geologischer Jahrband A65, Hannover.
- Schellschmidt, R (2003): Persönliche Mitteilung, GGA Hannover.
- Schmidt, R. (1996): Feinstratigraphie des Opalinuston (Dogger alpha) der mittleren Schwäbischen Alb, Baden-Württemberg. (Thesis) - Planetary Stratigraphy, Ser. E (Earth), 1: 110 S., 3 Taf., 15 Abb., Tübingen.
- Schonebeck, M., Jobmann, M., Polster, M. (2004): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tongestein -GENESIS-, Jahresbericht 2004, DBE TECHNOLOGY GmbH.
- Schott, W., Jartz, W., Kockel, F., Sames, C. W., v. Stackelberg, V., Stets, J., Stoppel, D., Baldschuhn, R., Krampke, K. D. (1969): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa. – 306 Kt., 1 Tab., Hannover. Hierzu Erläuterungen zum Paläogeographischen Atlas der Unterkreide von NW-Deutschland, S. 1 – 315, 18 Abb., Hannover.
- Stadler, G. (1971): Die Vererzung im Bereich des Bramscher Massivs und seiner Umgebung, Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf. 18, 547-564, Krefeld.
- Steck, A. (2005): Beurteilung der tektonischen Situation des Züricher Weinlandes und des geodynamischen Konzeptes, Kommission Nukleare Entsorgung, Expertenbericht zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen.
- Stille, H. (1909): Zonares Wandern der Gebirgsbildung, Jahresber. Niedersächs. Geol. Ver., 2: 34 – 48, 4 Abb., 3 – 4 Taf., Hannover.
- Suess, F.E. (1903): Bau und Bild der Böhmisches Masse. – In: Diener, C., Hoernes, R., Suess, F.E. & Uhlig, V. (Hrsg.): Bau und Bild Österreichs, 322 S., Wien.
- Teichmüller, M., Teichmüller, R. (1950): Das Inkohlungsbild des Niedersächsischen Wealden-Beckens, Z. dt. geol. Ges., 100, S. 498-517.
- Teichmüller, M., Teichmüller, R., Bartenstein H. (1979): Inkohlung und Erdgas in Nordwestdeutschland. Eine Inkohlungskarte der Oberfläche des Oberkarbons, Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., 27: 137-170, Krefeld.
- Tissot, B. P., Welte, D. H. (1984): Petroleum formation and occurrence. A new approach to oil and gas exploration, Springer-Verlag.
- Trusheim, F. (1972): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegend und Mesozoikum Mitteleuropas - Geol. Jb., 112: 51 S., Hannover.
- Tucker, M. E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrographie. Enke-Verlag, Stuttgart.
- Vosteen, H.-D., Schellschmidt, R. (2003): Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock, Physics and Chemistry of the Earth 28, pp. 499-509.

- Walter, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa. Schweizerbart-Verlag, Stuttgart.
- Wehner, H. (1982): Die organische Geochemie der dunklen Tonsteine des nordwestdeutschen Ober-Apt und Unter Alb, Geol. Jb., A 65, 139 – 146, 4 Abb., 1 Tab., Hannover.

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| Tabelle 2-1: | Zusammenstellung des organischen Ausgangsmaterials, des Kerogen-Typs und des Kohlenwasserstoffpotentials. | 10 |
| Tabelle 2-2: | Zusammenstellung der Maximalwerte der C_{org}- und Pyrit-Gehalte von Unterkreide Tonen im Niedersächsischen Becken | 11 |
| Tabelle 4-1: | Mineralogischer Zusammensetzung (Mittelwert und Standardabweichung) des Opalinustons der Nordschweiz im Bereich des Modells Süd-2 nach (NAGRA 2002b) | 40 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 2-1: | Geologische Gliederung Mitteleuropas (WALTER 1992). | 2 |
| Abbildung 2-2: | Generalisierte Paläogeographie der Unterkreide (KEMPER & ZIMMERLE 1978) | 3 |
| Abbildung 2-3: | Der westliche und zentrale Teil des Niedersächsischen Beckens, | 4 |
| Abbildung 2-4: | Die östlichen Strukturen des Niedersächsischen Beckens (WALTER 1992). | 5 |
| Abbildung 2-5: | West-, Zentral- und Ostteil des Niedersächsischen Unterkreide-Beckens (KEMPER 1973). | 7 |
| Abbildung 2-6: | Benennung der Reihe Kalkstein-Mergel-Ton (MATTHES 1987). | 9 |
| Abbildung 2-7: | Lithologie, lithologische Kurzbeschreibung, Mineralbestand und organischer Kohlenstoffgehalt, Hauterive bis Alb, Schacht Konrad II, Salzgitter Bezirk (GAIDA ET AL. 1981) | 16 |
| Abbildung 2-8: | Tonmineralverteilung der Unterkreide-Tone (Wealden-Alb) in der Fraktion < 0,63µm (BROCKAMP 1976). | 17 |
| Abbildung 2-9: | Tonmineralverteilung der Unterkreide-Tone (Wealden-Alb) in der Fraktion 2 - 0,63 µm (BROCKAMP 1976). | 17 |
| Abbildung 2-10: | Paläogeographische Situation des Niedersächsischen Beckens zur Zeit des Hauterive, | 18 |
| Abbildung 2-11: | Generisches Modell Niedersächsisches Becken (Nord-1) nordöstlich von Hannover | 22 |
| Abbildung 2-12: | Typische geophysikalische Logs für Unter- und das gesamte Mittel Apt | 23 |
| Abbildung 2-13: | Der südöstliche Beckenteil des Niedersächsischen Beckens zur Zeit des Apt mit den Tiefbohrungen Heeßel 1, Fuhrberg E2 und Großburgwedel 6 (nordöstlich von Hannover). | 23 |
| Abbildung 2-14: | Untergrundtemperaturen in der relevanten Region in dem gemäß AKEnd zulässigen Tiefenbereich | 25 |
| Abbildung 3-1: | Paläogeographische Situation zu Beginn der Ablagerung des Opalinustons | 27 |
| Abbildung 3-2: | Süddeutsche Großscholle und angrenzende Gebiete. Aus R. DÜRR 1982, nach W. CARLÈ 1950 (GEYER et al. 1991) | 29 |
| Abbildung 3-3: | Zonengliederung des mitteleuropäischen Varizikums (BGL 1996). | 30 |
| Abbildung 3-4: | Mächtigkeitsverteilung des Opalinuston in Süddeutschland | 32 |
| Abbildung 3-5: | Schnitt A-B durch das Referenz-Modellgebiet für Süddeutschland (JOBMANN 2004) | 33 |
| Abbildung 3-6: | Temperaturgradienten im süddeutschen Molassebecken (JOBMANN et al. 1989) | 34 |
| Abbildung 3-7: | Untergrundtemperaturen in der relevanten Region in dem gemäß AKEnd zulässigen Tiefenbereich | 34 |
| Abbildung 4-1: | Generisches Modell Süd-2 im Raum Jestetten und dem Grenzgebiet zur Nordschweiz mit der Sondierbohrung Benken | 35 |
| Abbildung 4-2: | Lage des Untersuchungsgebietes Süd-2 (BGR). Das Gebiet der Schweiz ist grau eingefärbt. | 36 |
| Abbildung 4-3: | Geologische Übersichtskarte der den Alpen vorgelagerten Molasse-Zone | 37 |
| Abbildung 4-4: | Gliederung und Korrelation des Opalinuston von Weiach, Benken und Mont Terri | 39 |

| | | |
|------------------------|---|-----------|
| Abbildung 4-5 : | Tektonische Karte des Untersuchungsgebietes (gelb umrandet) und des Zürcher Weinlandes abgewandelt aus (NAGRA 2002c) | 42 |
| Abbildung 4-6: | Erdbebenkarte BGR mit den im Rahmen des Projektes untersuchten Modellregionen..... | 44 |
| Abbildung 4-7: | Temperaturprofile der Bohrungen Weiach und Benken (NAGRA 2001 und 1986) | 45 |
| Abbildung 5-1: | Lage des Untersuchungsgebietes Nord-2 nach BGR | 46 |
| Abbildung 5-2: | Generisches Modell Nord-2 zwischen Minden und Hameln | 47 |
| Abbildung 5-3: | Profilschnitt durch den NW-Abschnitt des Untersuchungsgebietes..... | 48 |
| Abbildung 5-4: | Profilschnitt durch den SE-Abschnitt des Untersuchungsgebietes..... | 48 |
| Abbildung 5-5: | Der westliche und zentrale Teil des Niedersächsischen Beckens,..... | 49 |
| Abbildung 5-6: | Lithostratigraphische Tabelle des Doggers..... | 52 |
| Abbildung 5-7: | Paläogeographie des Unteren Aalenium im zentralen Europa (OHMERT & ROLF 1994) | 53 |
| Abbildung 5-8: | Faziesverteilung des Cornbrashs im Bathonium Norddeutschlands (KUMM 1952) | 54 |
| Abbildung 5-9: | Paläogeographische Übersichtsskizze von Nordwestdeutschland, Wealden nach SCHOTT et al. (1967/69). | 56 |
| Abbildung 5-10: | Untergrundtemperaturen in der relevanten Region | 58 |