

F+E Endlagerung

9Y3207000000

Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT)

Teil I: Beschreibung des geologischen Endlager- standortmodells



Ergebnisbericht

Hannover, Juli 2016

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und
Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein

Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT)
Teil I: Beschreibung des geologischen
Endlagerstandortmodells

Ergebnisbericht

Autoren: Reinhold, Klaus
Stark, Lena
Kühnlenz, Tatjana
Ptock, Lennart

Auftraggeber: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)/
Projekträger Karlsruhe,
Wassertechnologie und Entsorgung
(PTKA-WTE) für das Bundesministerium
für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

Auftragsnummer: Förderkennzeichen: 02E11061C

Geschäftszeichen: B3/B50112-43/2015-0005/001

Datum: 26.07.2016

TK-Nr.: Süddeutschland

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

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

	Inhaltsverzeichnis	Seite
	Verkürzte Zusammenfassung.....	4
1	Einleitung.....	5
2	Geologische Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils SÜD.....	6
2.1	Sedimentologische Verhältnisse.....	8
2.1.1	Muschelkalk.....	10
2.1.2	Keuper.....	10
2.1.3	Unterjura.....	12
2.1.4	Mitteljura (inklusive Wirtsgestein).....	13
2.1.5	Oberjura.....	15
2.1.6	Tertiär.....	17
2.1.7	Quartär.....	19
2.2	Hydrogeologie und Hydrochemie.....	20
2.2.1	Muschelkalk.....	22
2.2.2	Keuper.....	24
2.2.3	Unterjura.....	25
2.2.4	Mitteljura.....	26
2.2.5	Oberjura.....	27
2.2.6	Tertiär.....	29
2.2.7	Quartär.....	29
3	Aufbau und Geologie des Endlagerstandortmodells SÜD.....	30
3.1	Topographie.....	31
3.2	Strukturgeologische Gegebenheiten.....	32
3.3	Modell-Einheiten des Endlagerstandortmodells.....	34
3.3.1	Modell-Einheit m1.....	34
3.3.2	Modell-Einheit m2.....	35
3.3.3	Modell-Einheit m3.....	36
3.3.4	Modell-Einheit k1.....	37
3.3.5	Modell-Einheit k2.....	39
3.3.6	Modell-Einheit k3.....	40
3.3.7	Modell-Einheit ju1.....	41
3.3.8	Modell-Einheit ju2.....	42
3.3.9	Modell-Einheit jm1 (Wirtsgestein).....	43
3.3.10	Modell-Einheit jm2.....	44
3.3.11	Modell-Einheit jm3.....	46
3.3.12	Modell-Einheit jo1.....	47
3.3.13	Modell-Einheit jo2.....	49

Seite

3.3.14	Modell-Einheit jo3	50
3.3.15	Modell-Einheit tms	51
3.3.16	Modell-Einheit q	52
3.4	Temperatur-Tiefenverteilung thermische Reife	53
4	Zusammenfassung	55
	Literaturverzeichnis	61
	Abkürzungsverzeichnis	68
	Abbildungsverzeichnis	69

Gesamtblattzahl: 71

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Reinhold, Klaus Stark, Lena Kühnlenz, Tatjana Ptock, Lennart
Titel:	Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) - Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells
Schlagwörter:	Endlagerstandortmodell, Geologie, Referenzprofil SÜD, Süddeutschland

Im Rahmen des Vorhabens AnSichT werden mit diesem Zwischenbericht die geologischen Grundlagen für die Erstellung des Endlagerstandortmodells SÜD dokumentiert und der Aufbau des Modells beschrieben. Das Modell der geologischen Gesamtsituation beinhaltet 16 Modell-Einheiten, die eine Schichtenfolge vom Muschelkalk bis zum Quartär abbildet. Die Modell-Einheiten sind relativ homogen entwickelte und regional gut charakterisierbare geologische Einheiten. Dadurch lassen sich die hydraulischen und gesteinsphysikalischen Parameter durch einen repräsentativen Wert für die jeweilige Modell-Einheit im Endlagerstandortmodell SÜD beschreiben. Der Bericht wird durch die Berichte Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis (JAHN et al. 2016) und Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises (MARBMANN 2016) ergänzt und fortgeführt.

1 Einleitung

Das Vorhaben AnSichT hat das Ziel, die Methodik des Sicherheitsnachweises für ein HAW-Endlager im Tongestein zu erarbeiten und dessen Anwendbarkeit für generische Endlagerstandorte zu testen. Dabei soll die Methode so gestaltet sein, dass sie für verschiedene Endlagerstandorte anwendbar ist. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Vorhabens die zwei unterschiedlichen Endlagerstandortmodelle NORD und SÜD erarbeitet. Dieser Bericht beschreibt die geologischen Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils SÜD und den geologischen Aufbau des Endlagerstandortmodells SÜD. Die geologischen Verhältnisse unterscheiden sich deutlich von denen des Endlagerstandortmodells NORD (REINHOLD et al. 2013).

Zur Erstellung eines geologischen Endlagerstandortmodells SÜD wurde von REINHOLD & SÖNNKE (2012) ein Referenzprofil SÜD vorgeschlagen. Dafür wurden die wirtsgesteinsunabhängigen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen des AkEnd (2002) sowie die Ergebnisse der „Regionalen Tonstudie“ der BGR (HOTH et al. 2007) berücksichtigt. Im Gebiet des Referenzprofils SÜD stellt daher die Opalinuston-Formation (Mitteljura) beispielhaft das Wirts- und Barrieregestein dar.

Analog zur Erstellung des Endlagerstandortmodells NORD (REINHOLD et al. 2013) erfolgt zuerst eine Beschreibung der strukturgeologischen, sedimentologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils SÜD (Kapitel 2). Basierend auf diesen Ausführungen wird eine Schichtenfolge in einem 3D-Modell erstellt. Die Lagerungsverhältnisse und die lithologischen Eigenschaften der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell SÜD werden im Kapitel 3 dokumentiert.

Da in Süddeutschland keine Ergebnisse aus Standortuntersuchungen für einen HAW-Endlagerstandort im Tongestein vorliegen, werden Festlegungen zur geologischen Gesamtsituation in einem Endlagerstandortmodell SÜD getroffen. Die Festlegungen basieren auf den Erkenntnissen internationaler Standorterkundungsprogramme, z. B. im Rahmen von Endlagerprojekten in der Schweiz und in Frankreich, sowie auf Beschreibungen der geologischen Verhältnisse in Süddeutschland.

2 Geologische Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils SÜD

Im Gebiet des Referenzprofils SÜD, wie auch im Gesamtgebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation von Süddeutschland (vgl. HOTH et al. 2007), ist eine Gliederung des Gebirges in strukturelle Stockwerke (Grundgebirge und Deckgebirge) typisch. Diese besitzen deutlich unterschiedliche petrophysikalische und lithologische Eigenschaften. Das unterste strukturelle Stockwerk ist das kristalline Grundgebirge, das aus Magmatiten und Metamorphiten besteht (STETTNER et al. 2001). Darüber lagert das Deckgebirge mit nur gering deformierten und nicht metamorph überprägten Sedimentgesteinen. Der Aufbau der Schichtenfolge des Deckgebirges kann anhand von Diskontinuitäten in drei Stadien gegliedert werden: permokarbone Molassesedimentation; Ablagerung der mesozoischen Schichtenfolge; känozoische Molassesedimentation (DILL et al. 2008).

Im Oberkarbon und Rotliegend wurden Molassesedimente in intramontanen Becken abgelagert (z. B. Nordschweizer Permokarbondrog; BACHMANN & MÜLLER 1996, NITSCH & ZEDLER 2009). Bis zur Perm/Trias-Wende wurde das Grundgebirgsstockwerk, inklusive der Permokarbon-Becken weitgehend eingeebnet und es entstand eine Peneplain (LEMCKE 1973). Teil der Peneplain war die paläogeographisch bedeutsame Vindelizische Schwelle. Durch die im Westen beginnende langsame, sukzessive Subsidenz der Vindelizischen Schwelle beginnt das mesozoische Deckgebirge dort bereits mit triassischen (vgl. Abb. 1) und weiter im Südosten erst mit jurassischen Ablagerungen (LEMCKE 1975). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD tritt im Zeitraum Kreide bis Alt-Tertiär eine Schichtlücke auf. Ab dem späten Obereozän (Priabon) bildete sich im Vorland der aufsteigenden Alpen ein absinkendes Becken, das deren Abtragungsschutt aufnahm (LEMCKE 1973). Etwa dem Verlauf der Donau folgend, ist südöstlich dieser Line das mesozoische Deckgebirge von mächtigen känozoischen Sedimenten überdeckt (Abb. 1). Diese lagern diskordant auf den mesozoischen Schichten auf und schließen die Schichtenfolge des Deckgebirges nach oben ab (FREUDENBERGER & SCHWERD 1996, GEYER et al. 2011).

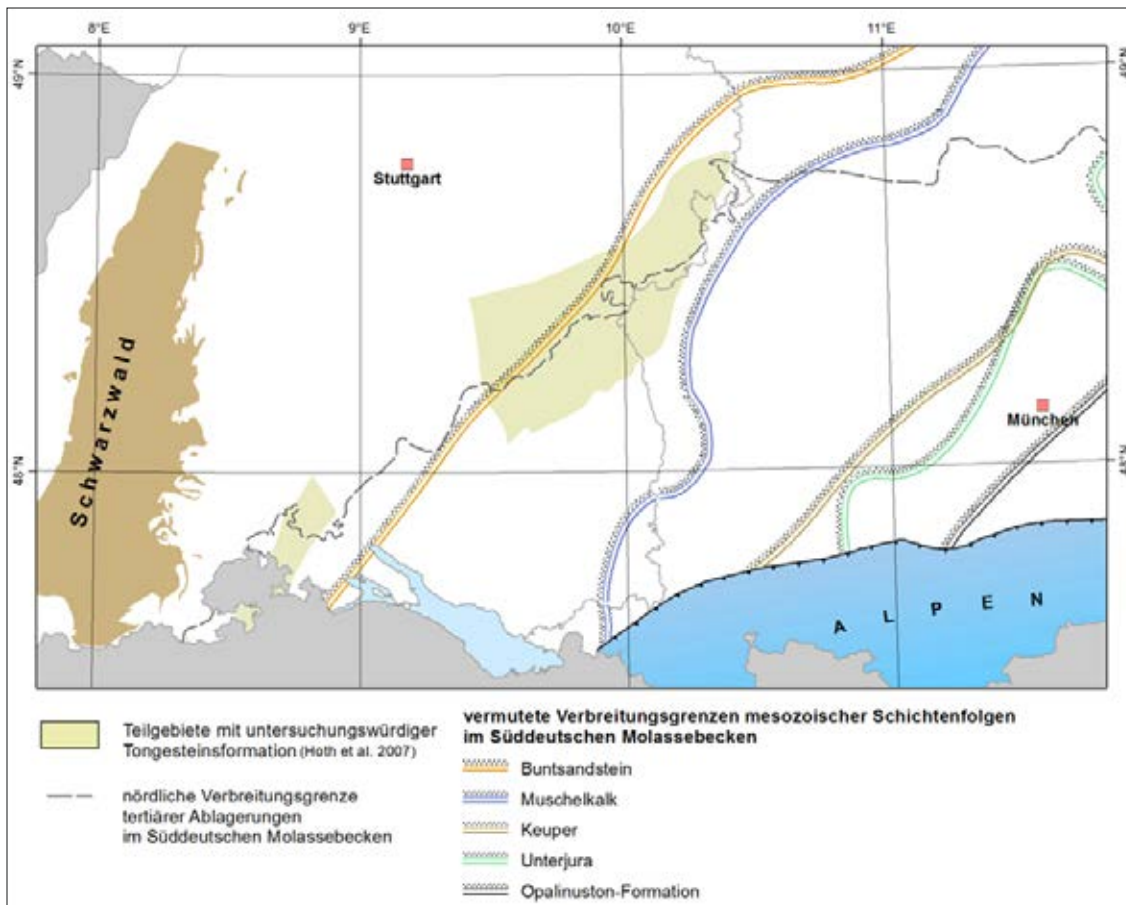


Abb. 1: Sukzessive Verlagerung der maximalen Verbreitung mesozoischer Schichtenfolgen Richtung Südosten im Gebiet des Süddeutschen Molassebeckens sowie die nördliche Verbreitungsgrenze der tertiären Molassesedimente (zusammengestellt aus MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1996, HOTH et al. 2007, BayStMWIVT 2010, FEHN et al. 2010, SCHULZ & DIEPOLDER 2010, GD-LGRB Stand 2013a)

Den Anmerkungen von HOTH et al. (2007) über mögliche regionale Einschränkungen durch Karstgrundwasserleiter im Deckgebirge folgend, wird für das Gebiet des Referenzprofils SÜD eine vollständige Überdeckung der Ablagerungen des Oberjura durch tertiäre Sedimente festgelegt. Die regionale Entwicklung des tertiären Ablagerungsraums ist dort eng verknüpft mit der Entwicklung des nördlichen orogenen Vorlandbeckens der Alpen (FREUDENBERGER & SCHWERD 1996). Folglich gehört das Gebiet des Referenzprofils SÜD zur geologischen Großstruktur Süddeutsches Molassebecken.

Im Zusammenhang mit der strukturellen Entwicklung des Molassebeckens seit dem Obereozän sind alpenparallele syn- und antithetische Abschiebungen entstanden, die überwiegend auf eine Extensionstektonik hinweisen (JODOCY & STOBER 2009). Zudem änderte sich das Schichteinfallen der ursprünglich horizontal lagernden mesozoischen Schichten so, dass sie jetzt generell nach Südosten einfallen (JODOCY & STOBER 2009).

Die Molassesedimentation und damit auch die starke Subsidenz des Ablagerungsraumes endete im Obermiozän (DOPPLER et al. 2005). Es folgt eine bis heute anhaltende Hebung der Region (GEYER et al. 2011).

Gebiete, in denen es im Tertiär vulkanische Aktivitäten gab (z. B. Gebiet um Hegau oder Urach) oder große Störungszonen auftreten, wie die Freiburg-Bonndorfer-Hegau-Bodensee-Grabenzone, liegen deutlich außerhalb vom Gebiet des Referenzprofils SÜD.

2.1 Sedimentologische Verhältnisse

Im Folgenden werden die Schichtenfolgen vom stratigraphisch Älteren zum Jüngeren anhand von Gesteinsmerkmalen (z. B. Tongestein, Sandstein, Kalkstein) sowie den Ablagerungsbedingungen beschrieben (vgl. Abb. 2). Die Beschreibung der sedimentären Schichtenfolge im Gebiet des Referenzprofils SÜD orientiert sich an den geologischen Gegebenheiten im westlichen Molassebecken Süddeutschlands (vgl. auch Kapitel 2.2). Im Bereich der Teilgebiete mit der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation besitzen die Sedimente des Buntsandstein nur eingeschränkte Verbreitung (Abb. 1). Daher wurde für das Gebiet des Referenzprofils SÜD festgelegt, dass die sedimentologische Beschreibung der Schichtenfolge mit den Ablagerungen aus dem Muschelkalk beginnt. Im Gebiet des Referenzprofils SÜD bedecken diese vollständig das von granitoiden Gesteinen aufgebaute, kristalline Grundgebirge (STETTNER et al. 2001). Ablagerungen des Permokarbons kommen in diesem Gebiet nicht vor.

Zusammenfassende Arbeiten über die geologische Entwicklung von Süddeutschland, zur dortigen Verbreitung der Formationen und zu den struktureologischen Verhältnissen im Untergrund wurden u. a. von BOIGK (1981), BERTLEFF et al. (1988), FREUDENBERGER & SCHWERD (1996), GROSCOPF & VILLINGER (2002), MENNING & HENDRICH (2005), RUPF & NITSCH (2008) und GEYER et al. (2011) publiziert. Die daraus erstellte schematisierte lithologische Schichtenfolge (Abb. 2) ist dabei maßgebend für die geologischen Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils SÜD und eine Grundlage für die Festlegung der Modell-Einheiten im Kapitel 3.3.

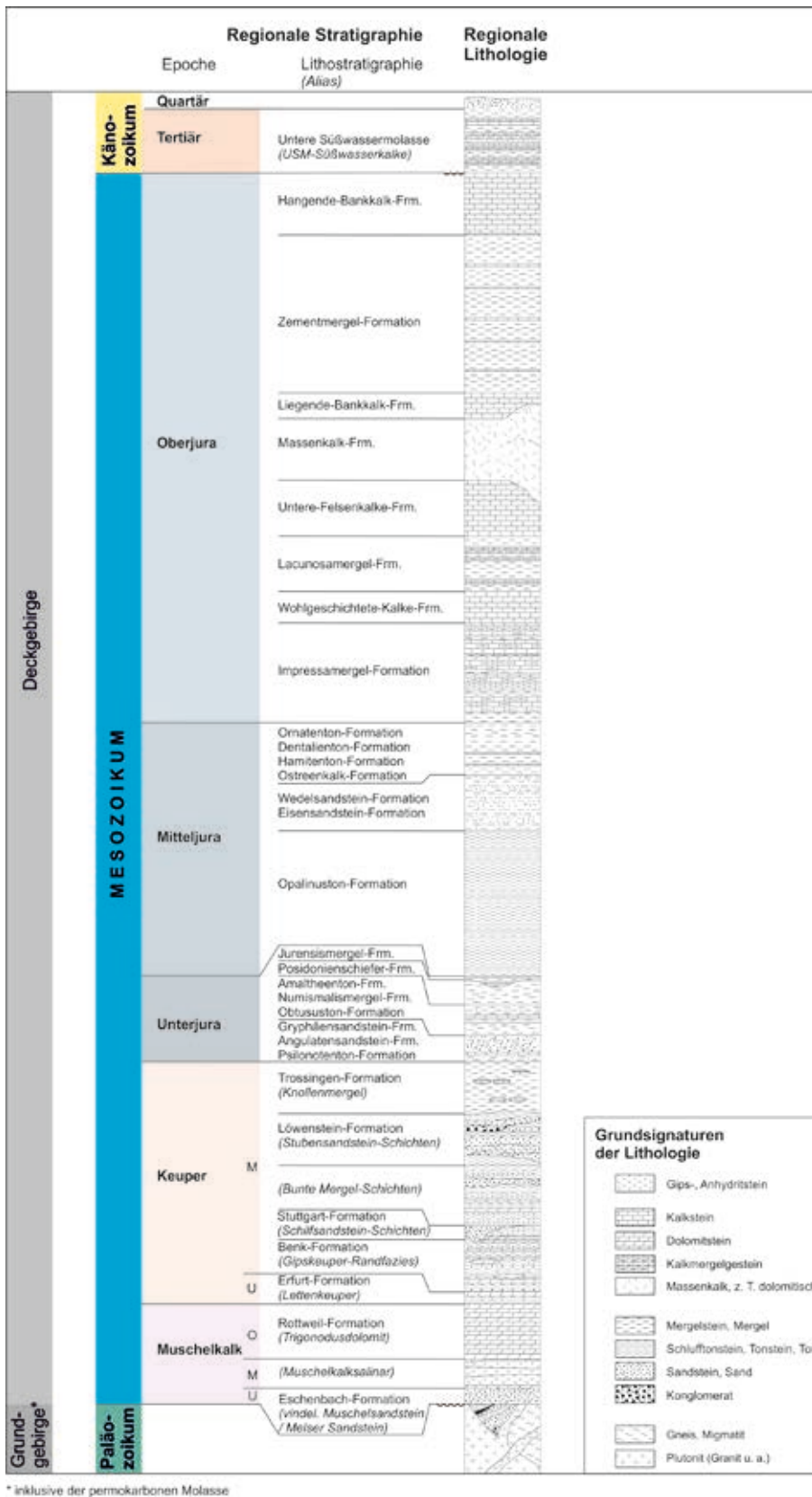


Abb. 2: Schematisches lithostratigraphisches Profil für das Gebiet des Referenzprofils SÜD (basierend auf GEYER et al. 2011 und GD-LGRB 2011)

2.1.1 Muschelkalk

Im Gebiet des Referenzprofils SÜD ist das kristalline Grundgebirge direkt von den marinen Ablagerungen des Muschelkalk überdeckt, die dort insgesamt eine Mächtigkeit zwischen 70 m und 120 m erreichen (GEYER et al. 2011). Im Unterschied zur kalkig dominierten Beckensedimentation im Germanischen Becken besitzen die Sedimente östlich des Bodensees die Merkmale einer Randfazies (BOIGK 1981, FEIST-BURKHARDT et al. 2008). Die Verbreitung der Sedimente des Muschelkalk erstreckt sich im Osten etwa bis zur Iller (östlich der Landesgrenze zwischen Baden-Württemberg und Bayern) (Abb. 1).

Die stratigraphische Einheit Muschelkalk wird unterteilt in drei Untergruppen: Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk (HAGEDORN & SIMON 2005). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD sind die Sedimente des Unteren Muschelkalk durch tonige fein- bis grobkörnige Arkosen bestimmt (Eschenbach-Formation), die teils karbonatisch, teils kieselig gebunden sind. Untergeordnet treten sandige Tonsteine und einzelne Dolomitsteinbänke auf (GEYER et al. 2011).

Die Sedimente des Mittleren Muschelkalk weisen auf marine, hochsalinare Verhältnisse hin. Die evaporitischen Bedingungen könnten in der Folge einer stärkeren Abschnürung des Germanischen Beckens vom Tethys-Ozean entstanden sein (GEYER et al. 2011). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD kam es überwiegend zur Entstehung von Anhydrit-Gestein. Die Anhydritfolge besitzt teilweise stärker tonige Abschnitte und ist oben und unten durch wenige Meter mächtige Dolomitsteine begrenzt. Diese weisen im Vergleich zur Entstehung von Anhydrit auf eine Reduzierung der Salinität im Ablagerungsraum hin (FRANZ et al. 2001).

Im Gebiet des Referenzprofils SÜD besteht der Obere Muschelkalk vorwiegend aus feinkristallinen Dolomitsteinen. Diese Abfolge wird als Rottweil-Formation bezeichnet (alias Trigonodusdolomit; GEYER et al. 2011). Der mehrere Zehnermeter mächtige, poröse bis klüftige Dolomit (Trigonodusdolomit) zeigt generell eine Mächtigkeitsabnahme von Nordwest in Richtung Südost (Bertleff et al. 1988). Untergeordnet treten Tongesteine sowie meist feinkörnige Sandsteine auf (FRANZ et al. 2001).

2.1.2 Keuper

In Süddeutschland hat sich das Sedimentationsgebiet des Keuper gegenüber dem Muschelkalk deutlich nach Südosten erweitert (Abb. 1). Trotzdem besitzen die Sedimente, als Teil der Ablagerungen des Germanischen Keuperbeckens, Merkmale einer Randfazies (BOIGK 1981, GEYER et al. 2011). Der stratigraphisch ältere Teil des Keuper ist durch marine bis brackische Sedimente gekennzeichnet, im tieferen Mittleren Keuper treten auch Gipsbildungen auf (Gipskeuper). Diese werden in den jüngeren Schichtenfolgen zunehmend

von limnischen bis terrestrischen Ablagerungen abgelöst, in denen Sandsteinhorizonte auftreten (ETZOLD & SCHWEIZER 2005). Mit Ausnahme der Exter-Formation (Rhät-Sandstein) kommen im Gebiet des Referenzprofils SÜD alle stratigraphischen Einheiten des Keuper vor (vgl. FEHN et al. 2010). Die Gesamtmächtigkeit der Ablagerungen des Keuper beträgt dort insgesamt etwa 150 m bis 200 m (GEYER et al. 2011).

Der Untere Keuper wird von der Erfurt-Formation (Lettenkeuper) aufgebaut. Im Gebiet des Referenzprofils SÜD ist der untere Teil dieser Formation von dolomitischen Tongesteinsschichten dominiert und im oberen von mikritischen Dolomitsteinbänken. In die insgesamt etwa 10 m mächtige Schichtenfolge sind untergeordnet feinsandige Ablagerungen eingeschaltet (FRANZ et al. 2001).

Die typischen Ton- und Sulfatgesteine der Grabfeld-Formation (Gipskeuper) werden im Gebiet des Referenzprofils SÜD durch die Benk-Formation (Gipskeuper-Randfazies) vertreten. Die stärker sandig und tonig dominierte Randfazies markiert den Grenzbereich der Beckensedimentation. Dieser etwa 20 km bis 30 km breite Bereich erstreckt sich vom Bodensee bis zum Nördlinger Ries (GEYER et al. 2011). Es sind vorwiegend feinkörnige Sedimente, feinsandige Tongesteine und Dolomitsteinbänke, in die wenige Meter mächtige Sandsteinhorizonte eingeschaltet sind. Die Sandsteine sind häufig durch Anhydrit oder Karbonat gebunden. Vereinzelt treten in den Tongesteinsschichten knollige Anhydritkonkretionen auf (FRANZ et al. 2001, GEYER et al. 2011).

Darüber folgt die Stuttgart-Formation (Schilfsandstein), eine vorrangig von Schluff- und Tongestein bestimmte Schichtenfolge mit wechselndem Feinsandanteil (GEYER et al. 2011). Aufgrund eines ausgeprägten Paläoreliefs weisen die fluviatilen Ablagerungen kleinräumig starke Mächtigkeitsschwankungen auf. In den etwa NNE - SSW verlaufenden und bis wenige Kilometer breiten Rinnen haben sich wenige Zehnermeter mächtige Sand- und Ton-Ablagerungen entwickelt (Rinnen-Fazies). Ihnen steht die nur wenige Meter mächtige Überflutungs- oder Normalfazies in den Zwischenarealen gegenüber, die durch das Auftreten von stärker tonigen bis schluffigen Sedimenten gekennzeichnet ist (BOIGK 1981, FRANZ et al. 2001, ETZOLD & SCHWEIZER 2005, FEHN et al. 2010, GEYER et al. 2011).

Über der Stuttgart-Formation folgt die stratigraphische Einheit „Bunte Mergel“, die die Steigerwald-Formation (Untere Bunte Mergel), die Hassberge-Formation (Kieselsandstein) und die Mainhardt-Formation (Mittlere- und Obere Bunte Mergel) zusammenfasst. Die Schichtenfolge „Bunte Mergel“ ist im Gebiet des Referenzprofils SÜD wenige Zehnermeter mächtig. Die Lithologie ist durch feinsandige Schluff-Tongesteine, die z. T. dolomitisch gebunden sind sowie vereinzelt auftretende geringmächtige Dolomitsteinbänke gekennzeichnet. Innerhalb dieser Abfolge tritt ein wenige Meter mächtiger Sandsteinhorizont auf, der karbonatisch und tonig gebundene Sandsteinschichten enthält (FRANZ et al. 2001, GEYER et al. 2011).

Die Löwenstein-Formation (Stubensandstein) wird von Sandsteinen sowie untergeordnet von einzelnen Tongesteinsschichten aufgebaut. Die Sandsteinhorizonte zeigen in der Regel eine Tendenz von mittel- bis grobkörnigen Basisablagerungen zu tonigen Feinsandsteinen im Hangenden (ETZOLD & SCHWEIZER 2005). Entstanden ist die Formation unter fluviatilen Bedingungen, wobei die mächtigen Sandsteinfolgen an Rinnenstränge gebunden sind. Zwischen den fluviatilen Rinnen werden die Sandsteine durch eine vorrangig tonig ausgeprägte Überflutungsfazies (sandige Tongesteine) vertreten (GEYER et al. 2011). Das Fluss-System hatte seinen Ursprung im Gebiet der Vindelizischen Schwelle und verlief von dort aus in Richtung Westen und Norden. Die sandigen Ablagerungen reichen bis weit in das Germanische Keuperbecken hinein (BEUTLER et al. 1999).

Darüber schließt sich die überwiegend tonig bis mergelig ausgebildete Trossingen-Formation (Knollenmergel) an, in der eingelagerte gröberklastische Karbonatkonkretionen auftreten (Kalkstein- oder Dolomitsteinknollen; FEHN et al. 2010, GEYER et al. 2011). In den Tongesteinsschichten tritt eine Wechsellagerung von durch Tonminerale der Montmorillonit-Gruppe dominierten Schichten und solche mit einem hohen Anteil an Glimmer auf. Der Anteil an quellfähigen Lagen in den durch Tonminerale dominierten Tongesteinsschichten beträgt etwa 30 % (LIPPMANN & ZIMMERMANN 1983), die z. T. mehr als 40 % quellfähige Tonminerale der Montmorillonit-Gruppe enthalten (GEYER et al. 2011).

2.1.3 Unterjura

Die Sedimente des Unterjura wurden in einem flachen Nebenmeer der Tethys, dem süddeutschen Jurameer, abgelagert. Im Vergleich zur Obertrias hat sich der Ablagerungsraum im Gebiet des Referenzprofils SÜD zunächst nur gering verändert (Abb. 1) und der Wechsel von sandigen und tonigen Ablagerungen setzt sich fort. Nachfolgend werden diese von Schichten abgelöst, die vorwiegend aus Tonmergelsteinen und Mergelsteinen bestehen. Die Mächtigkeit der Schichtenfolge des Unterjura beträgt dort insgesamt etwa 50 m bis 80 m (GEYER et al. 2011).

Mit der nur wenige Meter mächtigen Pylonotenton-Formation beginnt die marine Sedimentation im Unterjura. Es ist eine Wechselfolge von sandigen Tonmergelsteinbänken und Kalksteinbänken. Darüber folgt eine 10 m bis 15 m mächtige Schichtenfolge, die durch Sandsteine deutlich geprägt ist. Diese Schichtenfolge gehört zum größten Teil zur Angulatensandstein-Formation, in der Feinsandsteinkörper auftreten, die vorzugsweise in Richtung Nord-Süd gestreckt sind. Die wenige Meter mächtige Gryphäensandstein-Formation (Arietensandstein) bildet den oberen Teil der sandig dominierten Schichtenfolge des Unterjura (GEYER et al. 2011).

Die nachfolgende Schichtenfolge des Unterjura ist überwiegend aus stets kalkhaltigen, tonigen bis mergeligen Ablagerungen sowie bituminösen Ton- und Mergelsteinen (sog. Ölschiefer) aufgebaut. Die älteste Ablagerung ist eine etwa 10 m mächtige Tonmergelfolge der Obtususton-Formation, die von einer wenige Meter mächtigen Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge überlagert wird, welche ein Teil der Numismalimergel-Formation ist. Im Hangenden folgt die ebenfalls nur wenige Meter mächtige Amaltheenton-Formation, die sich aus Schluff und feinverteilt Pyrit führenden Tonmergelsteinen zusammensetzt. Es folgen die Ablagerungen des Toarcium, die im Gebiet des Referenzprofils SÜD insgesamt eine Mächtigkeit von etwa 20 m erreichen. Der untere Teil des Toarcium wird von einer distalen Fazies der Posidonienschiefer-Formation vertreten, die etwa 10 m mächtig ist (RIEGRAF 1985, ROEHL & SCHMID-ROEHL 2005). Die Posidonienschiefer-Formation besteht dort aus kalkigen Tonmergelsteinen bis Mergelsteinen mit hohem Gehalt an organischem Kohlenstoff und einzelnen Kalksteinbänken (RIEGRAF 1985, ROEHL & SCHMID-ROEHL 2005). Die Werte für den gesamten organischen Kohlenstoffgehalt (TOC) liegen im Mittel bei 6,2 % und in den stark bituminösen Schichten im Mittel bei 7,7 %, wobei dort maximale TOC-Werte von 16 % auftreten (ROEHL & SCHMID-ROEHL 2005). Die Jurensimergel-Formation bildet die letzte Schichtenfolge des Unterjura, die an der Basis eine Erosionsdiskordanz aufweist (vgl. ROEHL & SCHMID-ROEHL 2005). Dort, wo eine starke Erosion der Posidonienschiefer-Formation erfolgte, besitzt die Jurensimergel-Formation regional eine höhere Mächtigkeit (Wannenfazies). Die Wannenfazies ist bestimmt durch Mergelsteinschichten, in die fossilreiche Kalksteinbänke eingeschaltet sind. Neben der Wannenfazies gibt es die kondensierte Schwellenfazies, die durch wenige Kalkbänke und dünne Mergelsteinzwischenlagen charakterisiert ist.

2.1.4 Mitteljura (inklusive Wirtsgestein)

Wie schon im Unterjura erfolgten die Ablagerungen des Mitteljura in einem Epikontinentalmeer, dessen Ablagerungsraum sich im Vergleich zum Unterjura durch eine Verlagerung der Küstenlinie in Richtung Südosten (Abb. 1) deutlich vergrößert hat (MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1996). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD beträgt die Mächtigkeit des Mitteljura insgesamt etwa 180 m bis 200 m (GEYER et al. 2011). Zu Beginn des Mitteljura werden vorwiegend Tone sedimentiert (Opalinuston-Formation). Im Hangenden folgen, meist feinsandige, Tonmergelsteine, in die einzelne eisenreiche Sandsteine eingeschaltet sind. Diese sind wiederum durch eine Schichtenfolge mit vorwiegend Ton- und Mergelsteinen überdeckt.

Im Gebiet des Referenzprofils SÜD besteht die etwa 120 m mächtige Opalinuston-Formation aus einem gut verfestigten, glimmerführenden, siltigen Tonstein, der nur eine geringe laterale Variabilität der Fazies aufweist (HOTH et al. 2007). Die geringe Variabilität der Lithologie wird durch das Vorkommen sandigerer und kalkreicherer Tongesteinsschichten bestimmt, die

insbesondere im oberen Abschnitt auftreten. Nach FRANZ & NITSCH (2009) wird die untere, meist 100 m mächtige, sandarme bis -freie Abfolge als Teufelsloch-Subformation bezeichnet und der sandigere obere Abschnitt als Zillhausen-Subformation. Eine ähnliche lithologische Aufteilung findet sich auch in der Bohrung Benken (Abb. 3; NAGRA 2001, 2002), in der der untere Teil (etwa 60 m) aus feingeschichteten, glimmerführenden, leicht kalkigen und siltigen Tonsteinen besteht und nur wenige sideritische Konkretionen aufweist. Darüber ist die Schichtenfolge der glimmerführenden, leicht kalkigen und sandigen Tonsteine durch zahlreiche, dünne, eisenkalzitisch zementierte Sandsteinlagen und -linsen unterbrochen (NAGRA 2001).

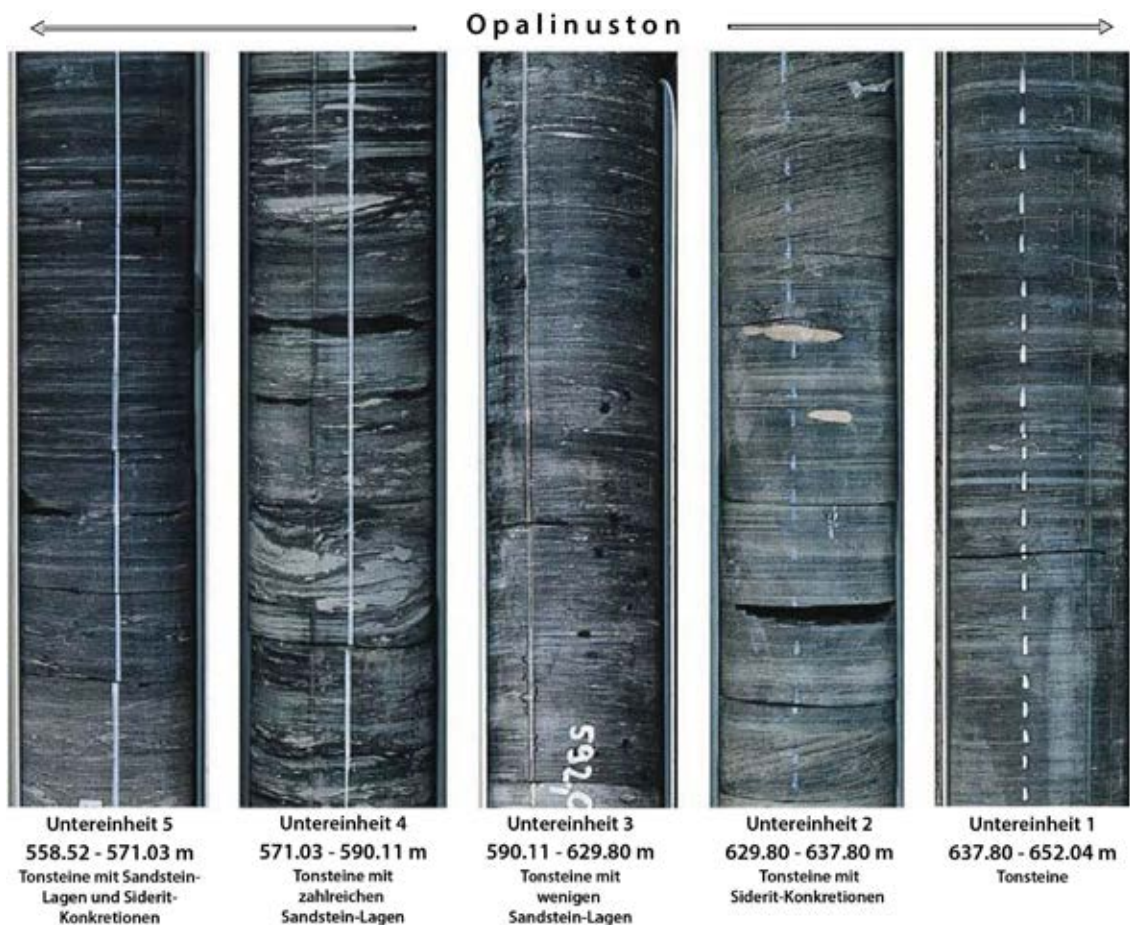


Abb. 3: Kernfotos der Opalinuston-Formation aus der Bohrung Benken (verändert nach NAGRA 2002)

Nach den Ergebnissen der „Regionalen Tonstudie“ der BGR (HOTH et al. 2007) sind die tonigen Ablagerungen geeignet, die Mindestanforderungen (vgl. REINHOLD & SÖNNKE 2012) an ein Wirtsgestein zu erfüllen. Im Gebiet des Referenzprofils SÜD wird dementsprechend die Opalinuston-Formation als Wirtsgestein ausgewiesen. Die im Rahmen von Standorterkundungsprogrammen in der Schweiz erzielten Erkenntnisse zur Opalinuston-Formation, z. B. aus dem Felslabor Mont Terri (z. B. BOSSART & THURY 2008) und der Sondierbohrung Benken (z. B. NAGRA 2001, 2002), werden in Ermangelung

ausreichender geologischer Standortdaten auf das Gebiet des Referenzprofils SÜD übertragen. Eine zusammenfassende, geologische Beschreibung der Opalinuston-Formation im Bereich der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation erfolgte durch STARK (2014). Eine Dokumentation der verfügbaren Gesteinsparameter, die auch für die Parametrisierung des Standortmodells SÜD genutzt werden, wurde von JAHN et al. (2016) erstellt.

Im Hangenden der Opalinuston-Formation folgen feinsandige Tongesteine, in die tonige bis kalkig gebundene Feinsandsteine eingeschaltet sind. Der untere Teil dieser Abfolge gehört zur Eisensandstein-Formation, die Merkmale einer vollmarin-subtidalen neritischen Sandgrund-Ablagerung mit Anzeichen gerichteter Bodenströmung aufweist (FEHN et al. 2010). Die eisenreichen Sandsteine und eisenoolithischen Barrenkörper bilden mehrere Kilometer breite, flache Sandkörper, deren Längsachse etwa Nordost-Südwest orientiert sind (FEHN et al. 2010). Die größte Mächtigkeit einzelner Sandsteinhorizonte innerhalb dieser mehrere Zehnermeter mächtigen Schichtenfolge liegt bei 5 m bis 8 m (GEYER et al. 2011). Im Hangenden folgen feinsandige Tonmergelsteine, in die tonige Sandsteinhorizonte eingeschaltet sind. Diese Abfolge ist Teil der Wedelsandstein-Formation.

Im oberen Teil des Mitteljura fehlen sandige Einschaltungen und insgesamt ist dieser im Gebiet des Referenzprofils SÜD wenige Zehnermeter mächtig. Die Schichtenfolgen der Ostreenkalk-Formation und Hamitenton-Formation besteht vorwiegend aus einer Wechselfolge von Tonmergelsteinen und dünnen Kalksteinbänken. Die wenige Meter mächtigen Dentalenton- und Ornatenton-Formationen bestehen aus Ton- und Tonmergelschichten mit geringen Vorkommen von Glaukonit, Phosphoritkonkretionen und pyritisierten Grabspuren sowie Eisenoolithen (GEYER et al. 2011).

2.1.5 Oberjura

Im Übergang vom Mitteljura zum Oberjura verliert die einstige Vindelizische Schwelle ihre Bedeutung als paläogeographische Erhebung und Abtragungsgebiet. Die Sedimentation wurde durch die Verhältnisse in einem großen Schelfmeer bestimmt, das zu der Zeit eine direkte Verbindung mit der Tethys im Süden besaß (ZIEGLER 1990). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD sind die marinen Ablagerungen des Oberjura flächenhaft im Untergrund verbreitet und erreichen insgesamt eine Mächtigkeit von etwa 400 m (GEYER et al. 2011). Der Sedimentationsraum dieses Gebietes ist Teil der Schwäbischen Fazies, die sich aus massigen Kalksteinen und Dolomiten des Schwäbischen Schwammriffs und der mergelreichen Abfolge des Schwäbischen Mergelbeckens aufbaut (BIRNER et al. 2012). Die Ablagerungen werden grundsätzlich zwei dominierenden Faziestypen zugeordnet: der geschichteten Fazies und der ungeschichteten Schwammkalk-Fazies. Die geschichtete Fazies besteht aus einer Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge, in die die ungeschichtete

Schwammkalk-Fazies (Massenkalk-Fazies) in verschiedenen stratigraphischen Niveaus eingeschaltet ist. Letztere ist durch mächtige, ungeschichtete Massenkalke gekennzeichnet, die sich aus Schwamm- und Mikroben-Biohermen aufbauen (GEYER et al. 2011).

Mit der etwa 70 m bis 80 m mächtigen Impressamergel-Formation beginnen die Ablagerungen des Oberjura im betrachteten Gebiet. Es ist eine Wechselfolge von stärker mergeligen Kalkstein- bis Kalkmergelsteinbänken, wobei der Anteil an Mergelsteinen nach unten zunimmt. Im Hangenden folgt die wenige Zehnermeter mächtige Wohlgeschichtete-Kalke-Formation (MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1989). Diese besteht aus Zentimeter dicken Kalksteinbänken, die nur durch dünne Mergelfugen voneinander getrennt sind. In der darüber folgenden Lacunosamergel-Formation sind mergelige Ablagerungen wieder deutlich stärker vertreten. Die 40 m bis 50 m mächtige Formation besteht vorwiegend aus geschichteten Mergel- und Kalkmergelsteinen.

Die Untere-Felsenkalke-Formation ist Teil der geschichteten Fazies und verzahnt sich lateral mit der ungeschichteten Schwammkalk-Fazies (Massenkalk-Formation). Von dieser Verzahnung sind insbesondere die höheren Teile der Formation betroffen. Daher schwankt die Mächtigkeit der geschichteten Untere-Felsenkalke-Formation lateral deutlich. Sie besteht vorrangig aus dezimeter- bis metermächtigen Kalksteinbänken mit dünnen Zwischenlagen von Kalkmergelstein (GEYER et al. 2011).

Die Obere-Felsenkalke-Formation wird vollständig durch die Schwammkalk-Fazies der Massenkalk-Formation vertreten, die die geschichtete Fazies im Hangenden ablöst. Stratigraphisch vertritt die Formation somit den Zeitraum des oberen Mittel- und Oberkimmeridgium und besteht aus Schwamm-Mikroben-Biohermen, die hauptsächlich aus Kieselschwämmen aufgebaut sind. Diese sind von Kalkabscheidungen benthischer Mikrobenmatten umkrustet und in einer Matrix aus Kalkschlamm eingebettet. Durch Diagenese wurden die Massenkalke häufig in mittelkörnigen Dolomitstein umgewandelt oder sind bereits teilweise wieder zu sekundärem Kalkstein rekristallisiert (GEYER et al. 2011). Im Ergebnis entstanden grobkörnige, löchrige, stark zerklüftete Dolomite und dolomitische Kalksteine, die stärker zur Verkarstung neigen als die Ablagerungen der geschichteten Fazies (BERTLEFF & WATZEL 2002, BIRNER et al. 2012).

Darüber folgen die Liegende-Bankkalk-, Zementmergel- und Hangende-Bankkalk-Formation, die größtenteils der geschichteten Fazies (Bankkalk-Fazies) zuzuordnen sind. Die Liegende-Bankkalk-Formation ist eine Abfolge von dezimetermächtigen Kalksteinbänken mit teilweise dünnen Kalkmergelstein-Zwischenlagen. Die Formation kann regional durch die Schwammkalk-Fazies vertreten sein, wodurch die Mächtigkeit deutlichen Schwankungen unterliegt. Mit zunehmendem Anteil an Mergelstein folgt die über hundert Meter mächtige Zementmergel-Formation (MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1989). Diese besteht vorwiegend

aus Mergelsteinen, in die vereinzelt Kalkbänke eingeschaltet sind. Den Abschluss der mesozoischen Schichtenfolge bilden im Gebiet des Referenzprofils SÜD die Ablagerungen der Hangende-Bankkalke-Formation. Die Formation besteht aus einer Abfolge von mikritischen, Dezimeter mächtigen Kalksteinbänken und erreicht eine Mächtigkeit von mehreren Zehnermetern (MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1989).

Gegen Ende des Jura zieht sich das Meer aus dem Süddeutschen Raum zurück und in der Kreide war das Gebiet des Referenzprofils SÜD Festland. Vor der Ablagerung der Molassesedimente waren die an der Oberfläche anstehenden Einheiten des Oberjura der Erosion und Verkarstung ausgesetzt (GEYER et al. 2011). Die damals angelegte Verkarstung reicht aber nicht bis zu den Gesteinen des heutigen gut durchlässigen Karstgrundwasserleiters des Oberjura, da die relativ oberflächennah entstandenen Lösungshohlräume größtenteils durch Lehm bzw. Boluston plombiert sind (STOBER & VILLINGER 1997).

2.1.6 Tertiär

Im Tertiär (etwa Priabonium/Rupelium) entstand das nordalpine Molassebecken als orogenes Vorlandbecken der Alpen, das sich heute parallel zu den Alpen vom Nordrand der Alpen bis zum Südrand der Schwäbischen-Fränkischen Alb erstreckt (FREUDENBERGER & SCHWERD 1996). Aufgrund beträchtlicher Faziesunterschiede von etwa gleichzeitig entstandenen Ablagerungen erfolgt deren Unterteilung in eine Westmolasse und eine etwa östlich des Lechs beginnende Ostmolasse (DOPPLER et al. 2005). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD sind die tertiären Ablagerungen Teil der Westmolasse (vgl. auch Kapitel 2.2) und sie werden aufgrund ihrer Genese einem lakustrin-fluviatilen Milieu der Unteren Süßwassermolasse zugeordnet (Abb. 4). Neben dem Erosionsschutt der Alpen wurde am Nordrand des Molassebeckens auch Abtragungsmaterial z. B. aus der Schwäbischen Alb ins Becken eingetragen (FREUDENBERGER & SCHWERD 1996).

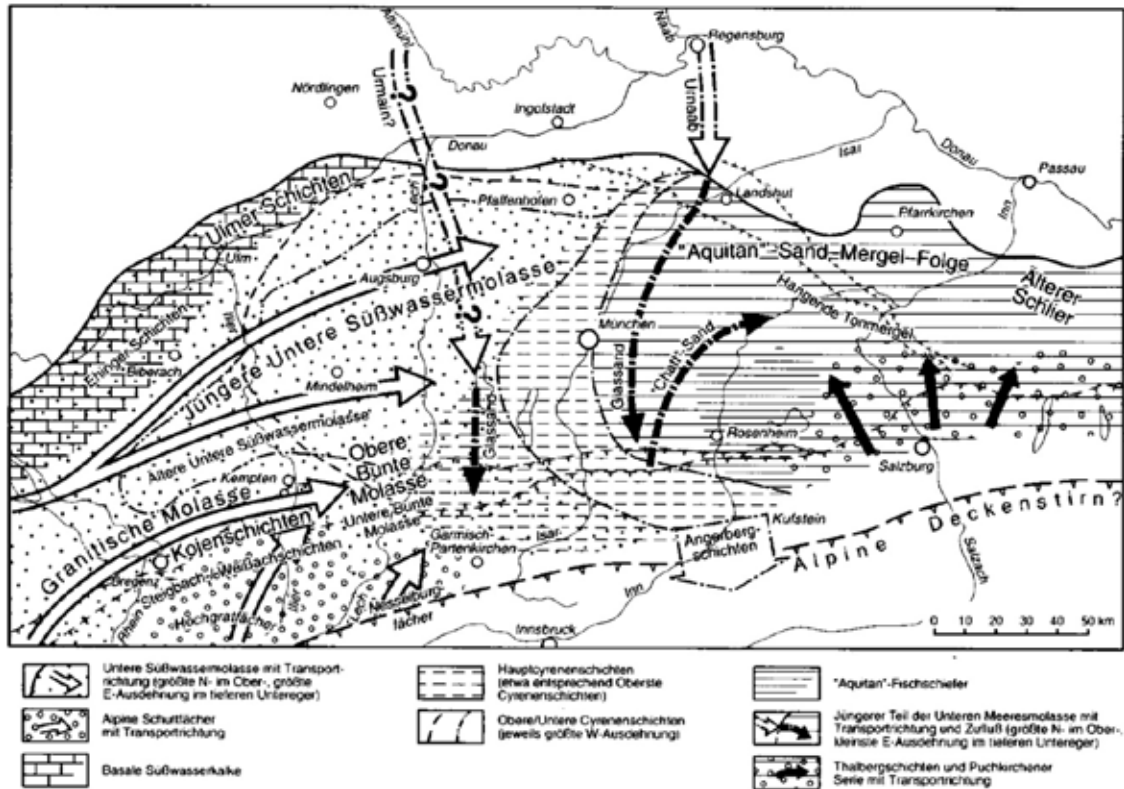


Abb. 4: Paläogeographie der lithofaziellen Einheiten der Unteren Süßwassermolasse, Unteren Brackwassermolasse und des jüngeren Teils der Unteren Meeresmolasse (Eger) (aus FREUDENBERGER & SCHWERD 1996)

Zur Darstellung: Die tektonisch eingeeengte aufgerichtete Molasse und die Faltenmolasse sind auf die vermutliche Verbreitung zur Ablagerungszeit gedehnt. Im Süden ist die ungefähre Lage der alpinen Deckenfront im entsprechenden Zeitraum dargestellt. Verschiedene Zeitebenen überlagern sich: jüngerer Abschnitt mit durchgezogenen, mittlerer mit einfach strich-punktierten, älterer mit zweifach strich-punktierten Grenzlinien oder Richtungspfeilen. Heutige Topographie und tektonische Großstrukturen als Orientierungshilfe: heutige Grenzen Alpen/Molasse und Faltenmolasse/Vorlandmolasse; Hauptstörungen des Landshut–Neuöttinger Hochs.

Die Sedimente der Unteren Süßwassermolasse überdecken diskordant die Ablagerungen des Oberjura. Aufgrund fehlender Verbreitung oder späterer Erosion im Gebiet des Referenzprofils SÜD treten dort andere lithostratigraphische Einheiten der Molasse nicht auf (vgl. FREUDENBERGER & SCHWERD 1996). Innerhalb des Gebietes nimmt die Mächtigkeit der Unteren Süßwassermolasse von wenigen Zehnermetern im Nordwesten auf deutlich über 200 m im Südosten zu (vgl. BERTLEFF et al. 1988). Die Schichtenfolge besteht aus einer Wechselfolge von unterschiedlich kalkigen und tonigen, gering verfestigten Mergelsteinen sowie Kalksteinen (Süßwasserkalke), in die Tongesteine und geringmächtige Feinsandsteine eingeschaltet sind und in der vereinzelt kohlige Lagen auftreten können (DOPPLER et al. 2005, GEYER et al. 2011).

2.1.7 Quartär

Im Gebiet des Referenzprofils SÜD besitzen die meist unter fluvioglazialen Bedingungen abgelagerten Schichten des Quartär (PLUM et al. 2008) keine flächendeckende Verbreitung. Die jung- und mittelpleistozänen, fluvioglazialen Talkiese und Sande kommen heute entweder als Terrassenablagerungen (Hoch-, Niederterrasse) in den Flusstälern oder in heutigen Trockentälern pleistozäner Flüsse vor (Abb. 5). Meist sind die Sande und Kiese gut sortiert und weisen einen wechselnden Feinsand- und Schluffanteil auf. In den jüngeren Talauen kann auch organisches Material enthalten sein. Gelegentlich sind die jungen Talfüllungen von Auenlehm überlagert (PLUM et al. 2008).

Die fluvioglazialen Ablagerungen sind maximal rund 40 m mächtig. Dieser Wert berücksichtigt aber die Ablagerungen in Rinnen und Becken im gesamten Alpenvorland (WaBoA 2012). Für das Gebiet des Referenzprofils SÜD, das außerhalb der Verbreitung der Rinnen und Becken liegt, werden die Werte für die Mächtigkeit der quartären Ablagerungen daher auf kleiner 10 m bis maximal 15 m festgelegt.

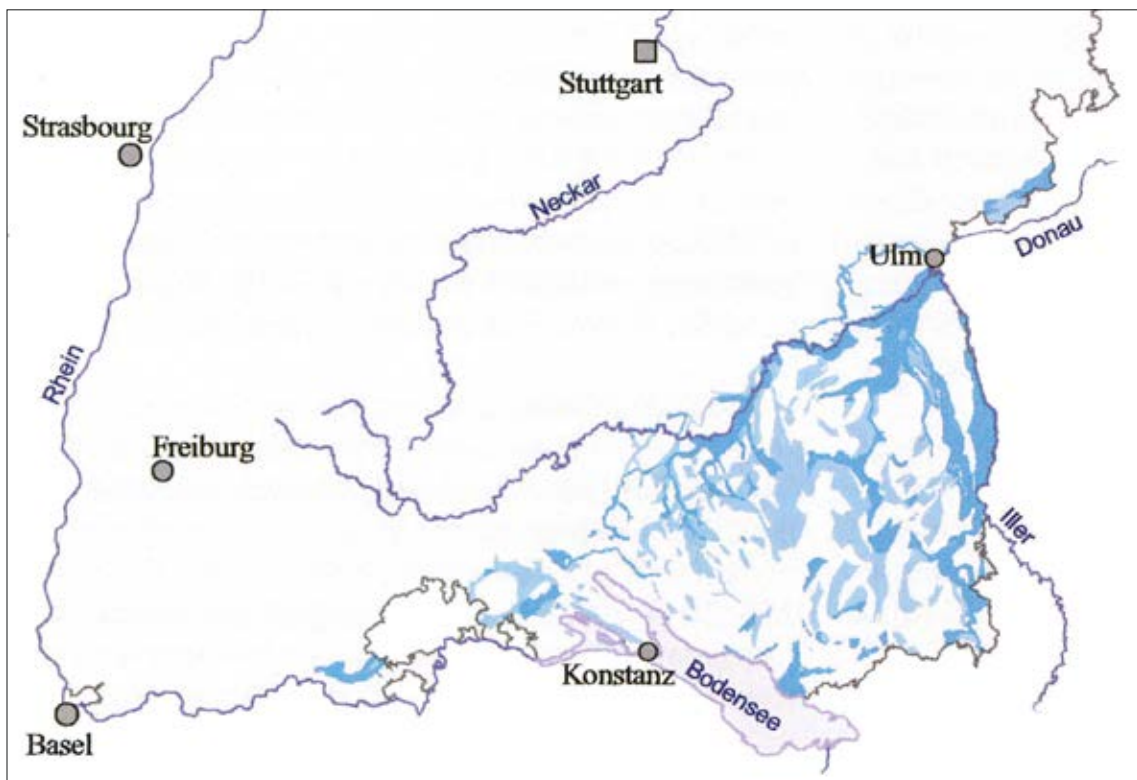


Abb. 5: Übersicht über die Verbreitung der quartären fluvioglazialen Kiese und Sande im Alpenvorland. Mit dunkelblau gekennzeichnet sind Gebiete mit einem rezenten Ausstrich. Die mit hellblau gekennzeichneten Gebiete weisen eine Überdeckung mit Deckschichten auf, die überwiegend aus geringdurchlässigeren Moränensedimenten bestehen (verändert nach PLUM et al. 2008).

2.2 Hydrogeologie und Hydrochemie

Die nachfolgenden Ausführungen sind eine Grundlage für die hydrogeologische Charakterisierung der Modell-Einheiten des Endlagerstandortmodells SÜD (Kapitel 3). Nach den oberflächennahen geologischen und hydrologischen Gegebenheiten ist das Gebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation (HOTH et al. 2007) von Süddeutschland vorrangig zwei hydrogeologischen Räumen zuzuordnen: der Schwäbischen und Fränkischen Alb sowie dem Süddeutschen Molassebecken (Abb. 6). Ein markanter Unterschied zwischen den zwei genannten hydrogeologischen Räumen ist, dass im Gebiet des Süddeutschen Molassebeckens die mesozoischen Festgesteine von tertiären Molassesedimenten bedeckt sind, die im Gebiet des Referenzprofils SÜD ebenfalls flächig verbreitet auftreten (vgl. Kapitel 2 und 2.1). In der Schwäbischen und Fränkischen Alb stehen dagegen die nicht überdeckten Schichten des Oberjura an.

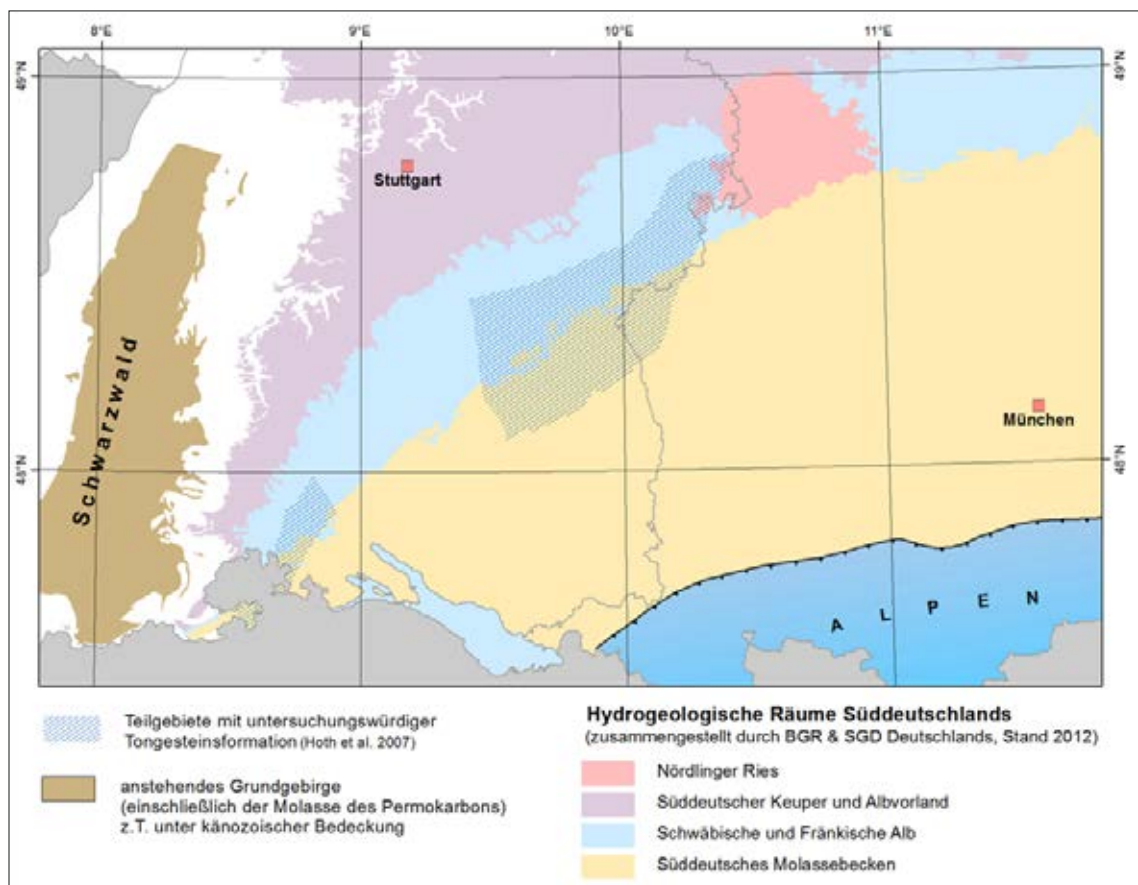


Abb. 6: Hydrogeologische Räume im Bereich der Teilgebiete der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation von Süddeutschland (nach BGR-online Stand 2013)

Die im Weiteren für die hydrogeologische Beschreibung verwendeten Begriffe Ost- und Westmolasse werden in Bezug auf die mesozoischen Schichtenfolgen zur regionalen Differenzierung verwendet. Die Ostmolasse beginnt etwa östlich des Lechs (vgl. Kapitel 2.1.6) und damit außerhalb des Referenzprofils SÜD. Zusammenfassende hydrogeologische

Berichte zu den Tiefenwässern im westlichen Süddeutschen Molassebecken wurden z. B. von BERTLEFF et al. (1988), STOBER & VILLINGER (1997), BERTLEFF & WATZEL (2002), BIRNER et al. (2012) und STOBER et al. (2012) erstellt.

Danach können im Gebiet des Referenzprofils SÜD hydrogeologisch drei übereinander liegende Einheiten unterschieden werden: die mesozoischen Festgesteine, die tertiären Molassesedimente und die quartären Ablagerungen. Zudem kann im Übergangsbereich der mesozoischen Schichtenfolge zum kristallinen Grundgebirge, im Bereich des oberen, häufig alterierten und zerklüfteten Teils des kristallinen Grundgebirges, ein weiterer Grundwasserkörper vorkommen (GEYER et al. 2011, STOBER & JODOCY 2011).

In der mesozoischen Abfolge wechseln sich wasserdurchlässige Festgesteine, wie Sandsteine sowie verkarstete oder stark geklüftete Karbonat- und Gipsgesteine, mit Gesteinsschichten ab, die sehr schlechte hydraulische Eigenschaften besitzen (z. B. Ton- und Mergelstein oder Anhydritstein; vgl. Kapitel 2.1). Die für die Grundwasserführung im Untergrund des Referenzprofils SÜD bedeutendsten Aquifere der mesozoischen Festgesteine sind die verkarsteten Ablagerungen des Oberjura und die stark klüftigen Ablagerungen des Oberen Muschelkalk (BERTLEFF et al. 1987). Weitere Aquifere, die aufgrund ihrer Mächtigkeit oder den hydraulischen Eigenschaften eine geringere Bedeutung besitzen, treten in den Ablagerungen des Unteren Muschelkalk (Eschenbach-Formation), des Keuper (Stuttgart- und Löwenstein-Formation), des Unterjura (Angulatensandstein-Formation) und des Mitteljura (Eisensandstein-Formation) auf (Kap. 2.1). Hydraulische Informationen zu den weniger bedeutenden Aquiferen basieren häufig auf den Beschreibungen der Speichergesteine aus den Kohlenwasserstoff (KW)-Feldern des westlichen Molassebeckens (Abb. 7). Im Vergleich zum Gebiet des Referenzprofils SÜD stammen diese hydrogeologischen Informationen aus tiefer liegenden Bereichen des westlichen Molassebeckens, also von deutlich außerhalb des Gebietes des Referenzprofils SÜD.

Bei den tertiären Gesteinen der Molasse überwiegen Grundwassergeringleiter. Die wenigen gut wasserdurchlässigen Schichtabschnitte treten meist nur lokal auf (GEYER et al. 2011) und sind im Gebiet des Referenzprofils SÜD nicht verbreitet. In diesem Gebiet bilden die tertiären Molassesedimente die Basis der quartären Grundwasserleiter. Die quartären Aquifere sind an die fluviatilen Talfüllungen größerer Gewässer, wie beispielsweise der Donau, gebunden (GEYER et al. 2011).

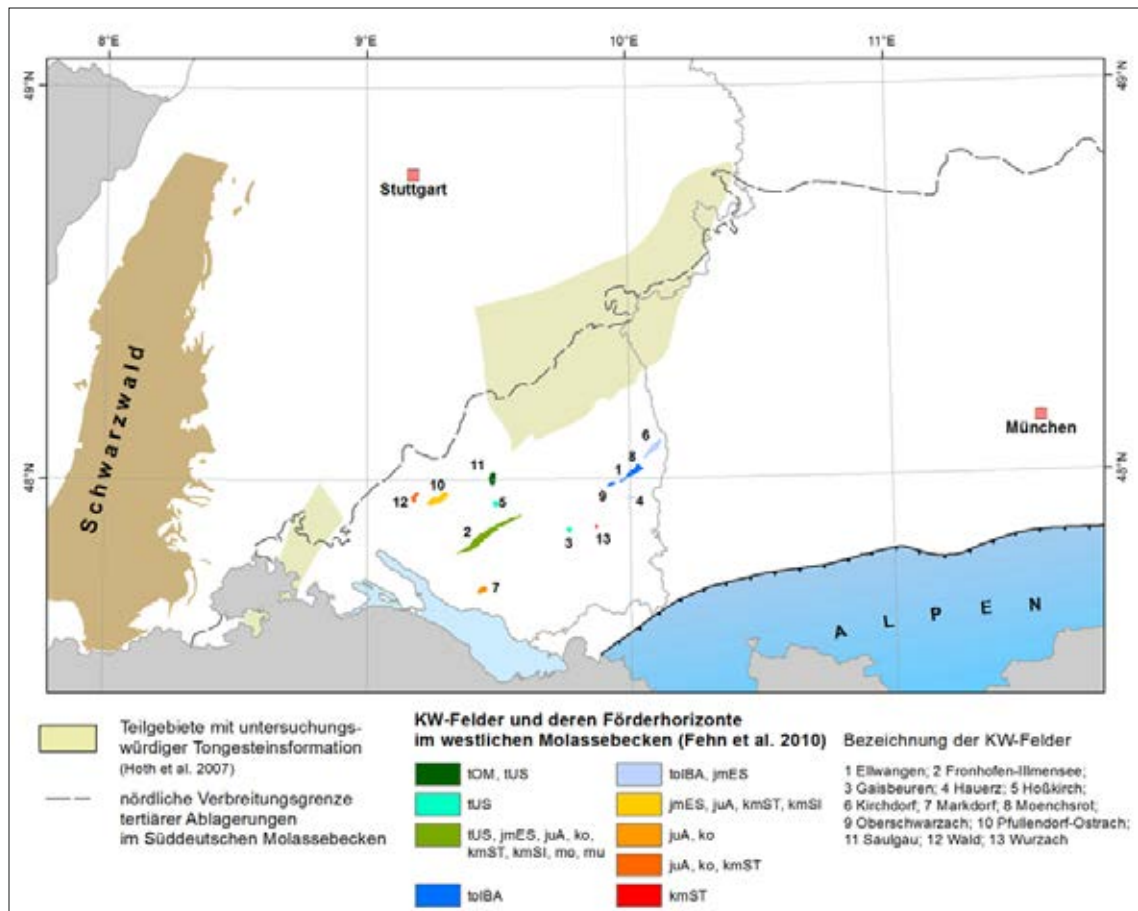


Abb. 7: Lage der Teilgebiete mit der untersuchungswürdigen Tongesteinsinformation (nach HOTH et al. 2007) und der KW-Felder (aus FEHN et al. 2010) Stratigraphische Abkürzungen der Förderhorizonte nach PREUSS et al. (2009); jmES = Eisensandstein-Formation.

2.2.1 Muschelkalk

Aquifere treten in den Ablagerungen des Oberen und Unteren Muschelkalk auf (STOBER & JOBOCY 2011). Diese Grundwasserkörper werden durch den Mittleren Muschelkalk getrennt, der überwiegend aus Anhydrit aufgebaut ist (Kap. 2.1) und nur eine sehr geringe Durchlässigkeit besitzt (FEHN et al. 2010).

Die Sandsteine der Eschenbach-Formation (Unterer Muschelkalk) weisen bspw. im Kohlenwasserstoff-Feld Fronhofen-Illmensee Aquifereigenschaften auf. Dort wurden Porositätswerte zwischen 7 % und 14 % (FEHN et al. 2010) bestimmt und die Werte der Gebirgsdurchlässigkeit sind oft ähnlich den unten genannten Werten des Oberen Muschelkalk (STOBER et al. 2012).

Die Schichtenfolgen des Oberen Muschelkalk weisen häufig Klüfte auf, wobei vor allem die klüftigen Dolomite und Kalksteine der Rottweil Formation (Trigonodusdolomit) wasserführend sind. Der hydraulisch nutzbare Hohlraum setzt sich aus dem unregelmäßig verteilten Kluffnetzwerk und der primären Dolomit-Porosität zusammen (STOBER & VILLINGER 1997). Die Porositätswerte im Gebiet des westlichen Molassebeckens liegen zwischen 11 % und 18 % (FEHN et al. 2010). Die Werte zur Gebirgsdurchlässigkeit im Raum Pfullendorf-Fronhofen-Bad Wurzach schwanken zwischen 5×10^{-7} m/s und 1×10^{-9} m/s, während weiter südwestlich bei Siblingen (Schweiz) die Werte der Gebirgsdurchlässigkeit des Oberen Muschelkalk bei $1,5 \times 10^{-6}$ m/s bis $2,1 \times 10^{-6}$ m/s liegen (STOBER & VILLINGER 1997). Die regionale Verteilung von Spülungsverlusten bei den Bohrkampagnen im westlichen Molassebecken deutet ebenfalls auf eine tendenziell höhere Durchlässigkeit in Richtung Westen hin (STOBER & VILLINGER 1997). Zudem scheinen die Werte der Gebirgsdurchlässigkeit im Bereich des westlichen Molassebeckens mit zunehmender Tiefe abzunehmen, wobei die Werte in etwa 1000 m Tiefe im Bereich von 10^{-7} m/s liegen (STOBER et al. 2012). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD deuten die Potentiallinien des Grundwassers im Oberen Muschelkalk (Abb. 8) auf einen generellen Abstrom des Grundwassers in Richtung Westen und Nordwesten hin.

Der Gesamtlösungsinhalt (TDS) der Wässer im Oberen Muschelkalk liegt in Tiefen von etwa 1000 m bei 10 g/l (STOBER & JODOCY 2011). Die hydrochemischen Analysen zeigen eine deutliche Veränderung des Gesamtlösungsinhaltes der Wässer im Teufenintervall zwischen 1000 m und 1300 m unter Gelände, von 10 g/l auf über 50 g/l (STOBER & JODOCY 2011).

Im westlichen Molassebecken liegt der pH-Wert der Wässer im Oberen Muschelkalk zwischen pH 5,9 und pH 7,7. Oberhalb von etwa 700 m unter Gelände variieren die pH-Werte nur noch gering und liegen bei etwa pH 6,0. Ab einer Tiefe von etwa 1000 m unter Gelände sind die Wässer dem Na-Cl-Wassertyp zuzurechnen. Die Konzentrationen (mmol(eq)/kg) der Kationen Ca^{2+} und Mg^{2+} sowie der Anionen HCO_3^- und SO_4^{2-} sind gegenüber Na^+ und Cl^- um etwas mehr als eine Zehnerpotenz geringer (STOBER & JODOCY 2011).

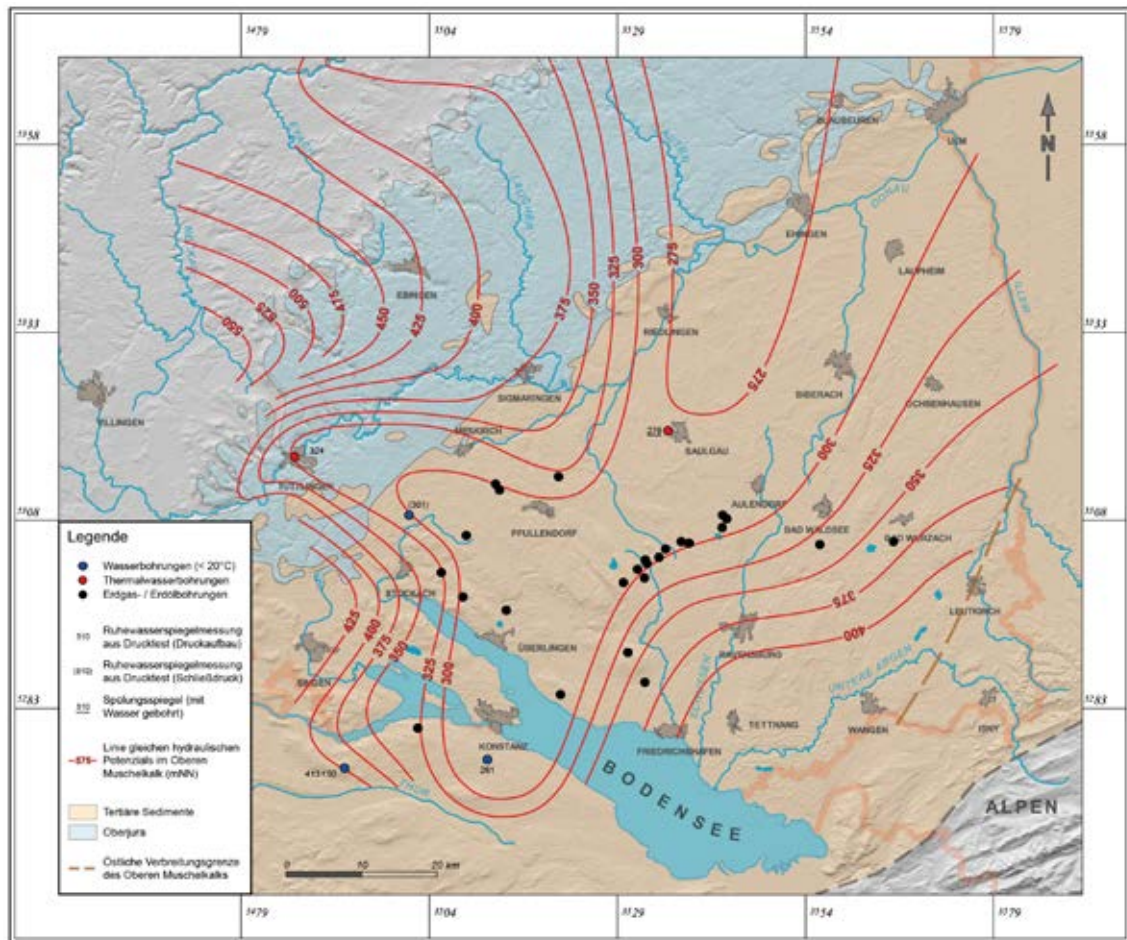


Abb. 8: Verlauf der Potentialisolines des Grundwassers im Oberen Muschelkalk (STOBER & JODOCY 2011)

2.2.2 Keuper

Im Bereich des westlichen Molassebeckens sind in den Ablagerungen des Keuper drei potenzielle Aquifere nachgewiesen, die durch mächtige, gering durchlässige Schichtenfolgen getrennt sind (siehe Kap. 2.1). Die drei, regional verschieden ausgeprägten, sandigen Schichtenfolgen treten in der Stuttgart-Formation (Schilfsandstein), Hassberge-Formation (Kieselsandstein) und in der Löwenstein-Formation (Stubensandstein) auf (BOIGK 1981). Die Sandsteine sind fluviatiler Entstehung und die sandig dominierten Schichtenfolgen sind an die ehemaligen Flussrinnen gebunden (FEHN et al. 2010, GEYER et al. 2011). Im Gebiet des Referenzprofils SÜD und im Bereich des westlichen Molassebeckens sind für die beiden älteren sandigen Aquifere keine quantitativen hydraulischen Informationen verfügbar. Allgemein weisen die Sandsteine des Mittleren Keupers erhöhte hydraulisch wirksame Porenraumanteile auf. So bilden die Sandsteine der Stuttgart-Formation im Gebiet des südwestdeutschen Molassebeckens höffige, aber nicht produktive KW-Speichergesteine und der Kieselsandstein führt in den KW-Feldern Fronhofen-Illmensee und Pfullendorf-Ostrach Kohlenwasserstoffe (BOIGK 1981).

Für die Sandsteine der Löwenstein-Formation (Stubensandstein) sind quantitative Informationen aus dem westlichen Molassebecken verfügbar. Die Löwenstein-Formation erreicht im Gebiet des Referenzprofils SÜD mehrere Zehnermeter, wobei eine größere Mächtigkeit an das Vorkommen von rinnenförmigen Strukturen gebunden ist (FRANZ et al. 2001, FEHN et al. 2010). Der Anteil von potenziellen Speichergesteinen an der Gesamtmächtigkeit der Formation variiert und liegt im tieferen Teil des westlichen Molassebeckens meist unter 10 m (Abb. 9). Für die sandigen Speichergesteine liegen die Werte für die Porosität und Permeabilität in Pfullendorf-Ostrach durchschnittlich bei 20 % bzw. 50 mD ($4,93 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) bis 150 mD ($1,48 \times 10^{-13} \text{ m}^2$) (BOIGK 1981, FEHN et al. 2010).

Der potenzielle Aquifer (Löwenstein-Formation) wird durch die tonig bis mergelig ausgebildete Trossingen-Formation im Hangenden abgedeckt, die eine außerordentlich geringe Durchlässigkeit besitzt und einen hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralen aufweist (siehe Kap. 2.1).

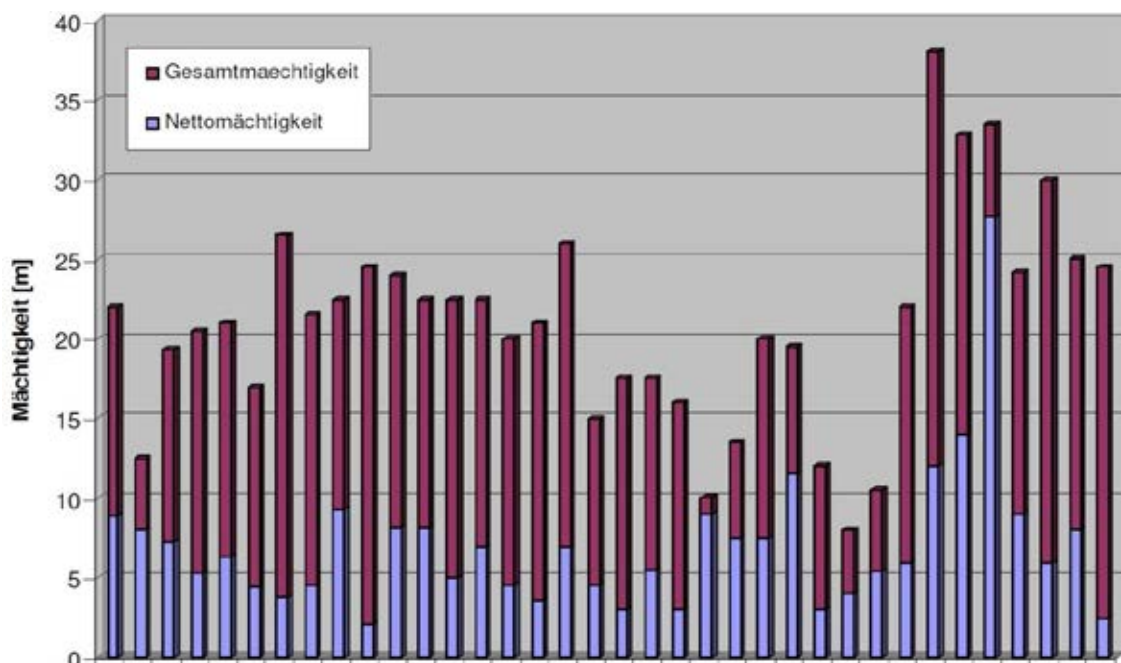


Abb. 9: Darstellung der Anteile der Nettomächtigkeit der Speicherhorizonte an der Gesamtmächtigkeit der Löwenstein-Formation (Stubensandstein) in verschiedenen Bohrungen des westlichen Molassebeckens (FEHN et al. 2010)

2.2.3 Unterjura

Im Unterjura tritt eine etwa 10 m mächtige sandige Schichtenfolge auf. Diese Sandsteine bilden regional gute Speichergesteine, was die KW-Lagerstätten im Gebiet des westlichen Molassebeckens (z. B. Fronhofen-Illmensee) sowie häufige Spülungsverluste bei Bohrungen

belegen. Die Permeabilitätswerte im tieferen Bereich des westlichen Molassebeckens liegen bei etwa 10 mD ($9,87 \times 10^{-15} \text{ m}^2$) bis 50 mD ($4,93 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) (BOIGK 1981, FEHN et al. 2010).

Hydrogeologische Parameter für den durch Tongesteine dominierten oberen Unterjura liegen nicht vor. Aufgrund des hohen Tonanteils und der Tiefenlage wird erwartet, dass die Schichtenfolge nur eine sehr schlechte Durchlässigkeit aufweist (vgl. HOTH et al. 2007).

2.2.4 Mitteljura

Im Mitteljura treten innerhalb der Eisensandstein-Formation höhere Durchlässigkeiten auf. Die Formation liegt zwischen der von Tongesteinen dominierten Opalinuston-Formation im Liegenden und einer wenige Zehnermeter mächtigen Schichtenfolge aus vorwiegend Tonmergelsteinen und dünnen Kalksteinbänken im Hangenden (Kap. 2.1).

Insbesondere die Opalinuston-Formation ist ein großflächig verbreiteter Grundwassergeringleiter in Süddeutschland (AG Deponien 1997). Bereits durch wenige Zehnermeter Überdeckung reduziert sich die oberflächennahe hydraulische Leitfähigkeit (k_f -Werte im Bereich 10^{-4} m/s bis 10^{-6} m/s) um mehrere Größenordnungen (k_f -Werte im Bereich 10^{-8} m/s bis 10^{-11} m/s) und die hydrochemischen Analysen deuten hier bereits auf stagnierende Zirkulationsverhältnisse hin (HEKEL 1992). In der Nordschweiz ergaben hydraulische Tests der Opalinuston-Formation in mehrere Hundertmeter tiefen Bohrungen durchweg eine außerordentlich geringe Durchlässigkeit von kleiner als $k_f = 10^{-12} \text{ m/s}$ (NAGRA 1994).

Die Eisensandstein-Formation besteht aus eisenreichen Sandsteinen mit tonigen Zwischenlagen. Die größte Mächtigkeit einzelner Sandsteinhorizonte innerhalb dieser mehrere Zehnermeter mächtigen Schichtenfolge liegt bei 5 m bis 8 m (GEYER et al. 2011). Die Nettomächtigkeit der Speichergesteine in den KW-Feldern des tieferen Teils des westlichen Molassebeckens ist noch weiter reduziert (Abb. 10).

Die Sandsteine besitzen erhöhte hydraulisch wirksame Porenraumanteile und sind im Gebiet des westlichen Molassebeckens KW-Speichergesteine, z. B. in den KW-Feldern Mönchsrot, Kirchdorf, Arlesried und Pfullendorf-Ostrach (BOIGK 1981).

Im Gebiet des westlichen Molassebeckens wurden Mittelwerte der Porosität in den einzelnen Bohrungen zwischen etwa 4 % und 20 % ermittelt und der Durchschnitt der Porositätswerte aller Bohrungen liegt bei etwa 15 % (FEHN et al. 2010). Dies ist auch der Bereich, der von SCHULZ & DIEPOLDER (2010) angegeben wird (Porositätswerte zwischen 10 % und 25 %). Die Permeabilität ist bereits über kurze Distanzen erheblichen Schwankungen unterworfen, was auch mit dem effektiven Poren- und Kluftvolumen zusammenhängt, nämlich unregelmäßig verteiltes Kluftnetzwerk und primäre Porosität. Nach SCHULZ & DIEPOLDER (2010) liegen

die Permeabilitätswerte meist bei 100 mD ($9,87 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) und darunter, maximal bei etwa 800 mD ($7,90 \times 10^{-13} \text{ m}^2$) (vgl. auch BayStMWIVT 2010). Auch bei FEHN et al. (2010) werden Werte von 10 mD ($9,87 \times 10^{-15} \text{ m}^2$) bis 1000 mD ($9,87 \times 10^{-13} \text{ m}^2$) angegeben: in den KW-Feldern Fronhofen 12 mD ($1,18 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) bis 19 mD ($1,88 \times 10^{-14} \text{ m}^2$), Illmensee 3 mD ($2,96 \times 10^{-15} \text{ m}^2$) bis 10 mD ($9,87 \times 10^{-15} \text{ m}^2$) und Pfullendorf 30 mD ($2,96 \times 10^{-14} \text{ m}^2$) bis 450 mD ($4,44 \times 10^{-13} \text{ m}^2$). In der weiter östlich liegenden Forschungs- und Thermalwasserbohrung Geisenfeld (südlich Ingolstadt) wurde ein k_f -Wert von $1,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ (etwa $1,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$) für den bohrlochfernen Bereich ermittelt und eine Gesamtkonzentration an gelösten Stoffen von etwa 1 g/l (BayStMWIVT 2010).

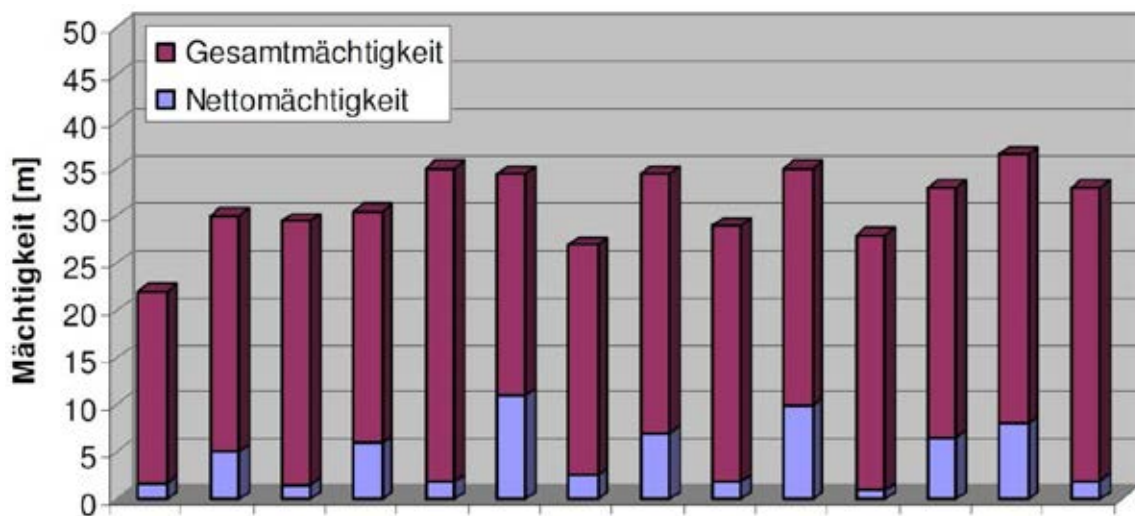


Abb. 10: Darstellung der Anteile der Nettomächtigkeit der Speicherhorizonte an der Gesamtmächtigkeit der Eisensandstein-Formation in verschiedenen Bohrungen des westlichen Molassebeckens (FEHN et al. 2010)

Hydrogeologische Parameter für die Tonmergelsteine im oberen Mitteljura liegen nicht vor. Nach HOTH et al. (2007) deutet jedoch der hohe Tonanteil in der Schichtenfolge und ihre Tiefenlage darauf hin, dass diese nur eine sehr schlechte Durchlässigkeit aufweist.

2.2.5 Oberjura

Im Bereich, wo der Oberjura durch Molassesedimente überdeckt ist, bilden die ungeschichteten Massenkalk des Mittel- und Oberkimmeridgium einen gut durchlässigen Karstgrundwasserleiter (BERTLEFF & WATZEL 2002). Die stärker mergeligen Sedimente der geschichteten Fazies im tieferen Oberjura bilden seine Basis (BIRNER et al. 2012). Auch die über dem gut durchlässigen Karstgrundwasserleiter lagernden Mergel- und Kalksteine der geschichteten Fazies (oberer Teil der Liegenden-Bankkalk-, Zementmergel- und Hangenden-Bankkalk-Formation) führen nur wenig oder kein Grundwasser (BERTLEFF et al. 1988, STOBER & VILLINGER 1997). Innerhalb der ungeschichteten Massenkalk können Werte

zwischen 20 m und 60 m für die Nettomächtigkeit des Aquifers angesetzt werden. Das nutzbare Hohlräumvolumen liegt bei 2,5 % bis 3 % (BERTLEFF & WATZEL 2002). Der übrige, weitaus mächtigere Teil der ungeschichteten Massenkalk wirkt als Speicherschicht, in der eine Vernetzungen der unterschiedlich dimensionierten, wasserführenden Hohlräume existiert (BERTLEFF et al. 1988).

Die unterschiedlichen Faziestypen und die Diagenese (insbesondere Dolomitisierung/ Dedolomitisierung) bewirkten einen wechselnden Verkarstungsgrad. Mit zunehmender Entfernung von der Donau und mit zunehmender Tiefenlage der Schichtenfolge des Oberjura nach Südosten nimmt die Intensität der Verkarstung ab (STOBER & VILLINGER 1997). Die Fließwege im Oberjura beschränken sich im Wesentlichen auf Karsthohlräume, Klüfte und auf Schichtfugen, so dass aus einem wechselnden Verkarstungsgrad eine regional unterschiedliche Gebirgsdurchlässigkeit resultiert (BayStMWIVT 2010). Für den Karstgrundwasserleiter im Gebiet des Referenzprofils SÜD können aus BIRNER et al. (2012) und STOBER & VILLINGER (1997) Werte für die Gebirgsdurchlässigkeit zwischen 10^{-4} m/s und 10^{-5} m/s abgeleitet werden. Nach den vom GD-LGRB (Stand 2013a) veröffentlichten Messwerten liegen diese dort zwischen der 10^{-2} m/s und 10^{-3} m/s. Die Potentiallinien des Grundwassers im Oberjura (Abb. 11) zeigen im Gebiet des Referenzprofils SÜD einen generellen Abstrom des Grundwassers in Richtung Osten.

Die Salinität des Grundwassers im Oberjura im Teufenbereich bis 400 m unter Gelände beträgt weniger als 1 g/l (etwa 0,32 g/l bis zu maximal 0,75 g/l; STOBER & JODOCY 2011). Nach der Art und Menge der gelösten Stoffe im Grundwasser handelt es sich im Gebiet des Referenzprofils SÜD um Ca-Mg-HCO₃-Wässer. Die höheren Konzentrationen von ²H- und ¹⁸O-Isotopen in diesem Grundwasser weisen auf eine Neubildung unter holozänen Klimabedingungen hin (BERTLEFF & WATZEL 2002, Birner et al. 2012). Der Chemismus dieser Wässer wird somit stark vom Zustrom an rezenterem und sauerstoffreicherem Grundwasser aus der Schwäbischen Alb beeinflusst (GEYER et al. 2011).

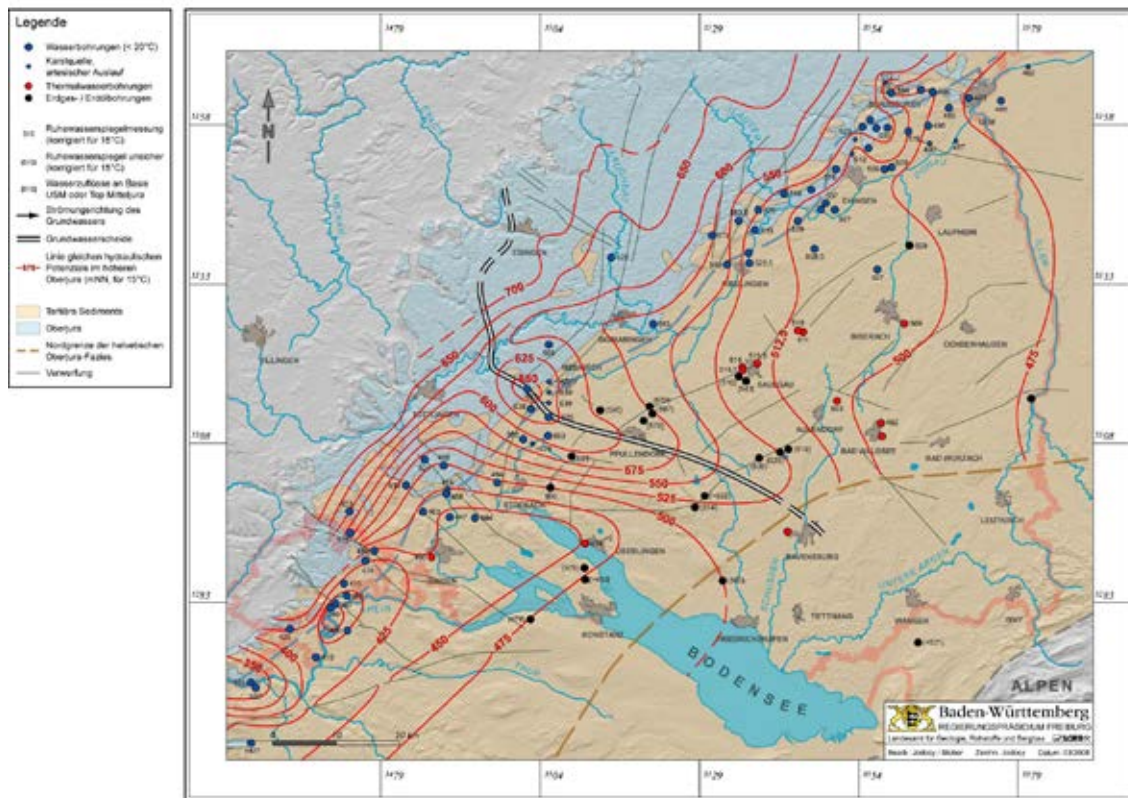


Abb. 11: Verlauf der Potentialisolinen des Grundwassers im höheren Oberjura (STOBER & JODOCY 2011)

2.2.6 Tertiär

Als tertiäre Ablagerungen treten im Gebiet des Referenzprofils SÜD nur die Schichten der Unteren Süßwassermolasse auf. Die Schichtenfolge ist vorrangig durch eine lateral heterogene Wechselfolge von unterschiedlich kalkigen und tonigen Mergelsteinen sowie Kalksteinen gekennzeichnet. Die Molasseschichten wirken insgesamt als Grundwassergeringleiter, wobei die Durchlässigkeit (Transmissivität T) in der Größenordnung von $T=1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ liegt. Wegen des karbonatischen Gesteins kann die Gesamthärte deutlich über 20 °dH liegen (GEYER et al. 2011).

2.2.7 Quartär

Die quartären Kiese und Sande bilden im Gebiet des Referenzprofils SÜD durchlässige Porengrundwasserleiter. Als Vorfluter für das Grundwasser dienen in der Regel die Oberflächengewässer, wie beispielsweise die Donau. Im Gebiet des Referenzprofils SÜD bilden die nur gering durchlässigen Schichten der Unteren Süßwassermolasse die Basis des quartären Grundwasserkörpers.

Die Flusskiese und Sande, die im Gebiet des Referenzprofils SÜD vorkommen, weisen eine überwiegend sehr hohe bis hohe Durchlässigkeit auf und werden aufgrund ihrer Ergiebigkeit wasserwirtschaftlich intensiv genutzt (GEYER et al. 2011). Durch die hohen Durchlässigkeiten sind auch die Grundwasserfließgeschwindigkeiten überwiegend hoch bis sehr hoch. Der geometrische Mittelwert der Durchlässigkeit der quartären Talkiese und Talsande im gesamten Alpenvorland liegt im Bereich von $k_f = 1,3 \times 10^{-3}$ m/s und bei der Transmissivität bei etwa $T = 9,5 \times 10^{-2}$ m²/s (PLUM et al. 2008). Allerdings ist die Variation der Werte durch den z. T. höheren Anteil von Feinsediment vergleichsweise hoch.

Die fluviatilen Sande und Kiese weisen einen großen Anteil an karbonatischen Geröllen auf. Die Schichtwässer sind demzufolge fast ausschließlich als Typ Ca-HOC₃-Wässer mit einem mittelgroßen Lösungsinhalt (WaBoA 2012) zu charakterisieren. Die mittleren Konzentrationen von Calcium liegen bei 85 mg/l, von Magnesium bei 15 g/l und von Hydrogenkarbonat bei 320 mg/l. Der Gesamtlösungsinhalt liegt im Mittel bei 480 mg/l. Regionen mit erhöhtem organischem Anteil (z. B. Talauen) können lokal reduzierende Verhältnisse aufweisen (PLUM et al. 2008). Generell werden eher oxidierende Verhältnisse erwartet.

Besitzen die quartären Sedimente einen direkten Kontakt mit den Ablagerungen des Oberjura, so kann es zu einem hydraulischen Kurzschluss zwischen den Karstgrundwasserleitern des Oberjura und dem quartären Aquifer kommen. Im Verbreitungsgebiet der tertiären Molassesedimente kann ein Zustrom in die quartären Aquifere aus den Karstgrundwasserleitern nur erfolgen, wenn ein entsprechender Druckgradient im Karstgrundwasserleiter vorliegt und die zu durchströmende grundwassergeringleitende Schicht nur eine geringe Mächtigkeit aufweist (GEYER et al. 2011). Ab einer gewissen Mächtigkeit (> 20 m) der gering durchlässigen tertiären Ablagerungen entsteht eine hydraulische Trennwirkung zwischen den Grundwasserkörpern (HAAKH et al. 2004).

3 Aufbau und Geologie des Endlagerstandortmodells SÜD

Das etwa 140 km² große generische Endlagerstandortmodell SÜD basiert auf den Daten des Geodaten-Dienstes vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) des Landes Baden-Württemberg (GD-LGRB Stand 2013a) und den Arbeiten der Gruppe FEHN et al. (2010). Basierend auf den geowissenschaftlichen Daten im Bereich des Referenzprofils SÜD und der im Kapitel 2 dargestellten geologischen Gesamtsituation wurde ein Endlagerstandortmodell SÜD mit dem Programm openGEO erstellt (Abb. 12). Im Ergebnis wurden 16 Modell-Einheiten, äquivalent zu den Ablagerungen vom Muschelkalk bis zum Quartär, im Modell ausgehalten.

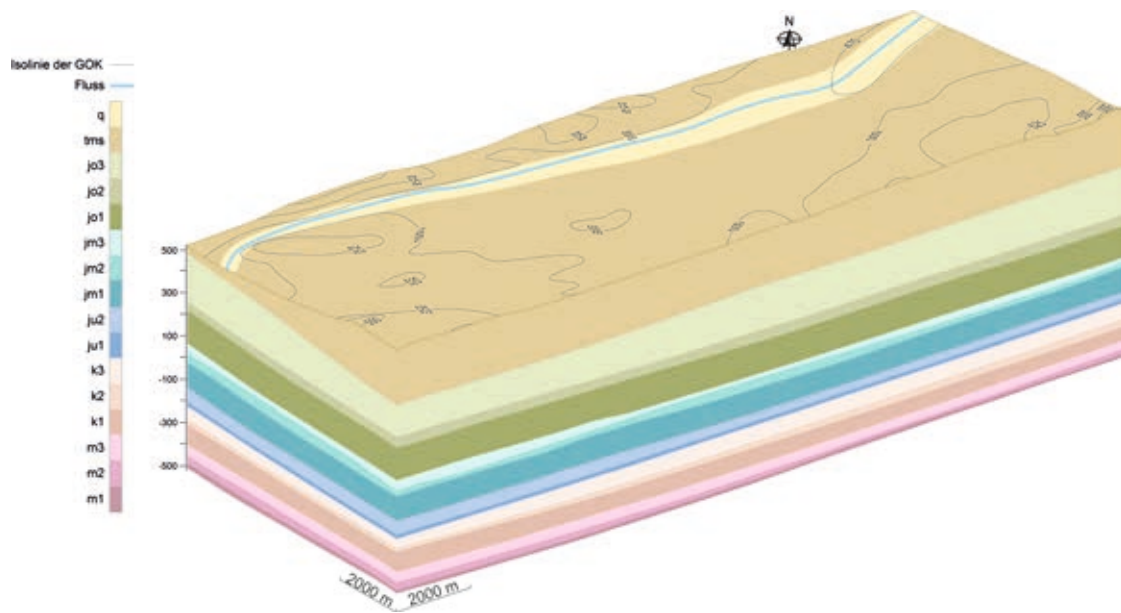


Abb. 12: Blockbild der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell SÜD (5-fache Überhöhung). Werte der Höhenlinie vgl. Abb. 13

3.1 Topographie

Auf Grundlage des Referenzprofils SÜD (REINHOLD & SÖNNKE 2012) werden für das Endlagerstandortmodell SÜD topographische Höhen von etwa 475 m NN bis 550 m NN festgelegt, wobei die Werte geringfügig darunter bzw. darüber liegen können (Abb. 13).

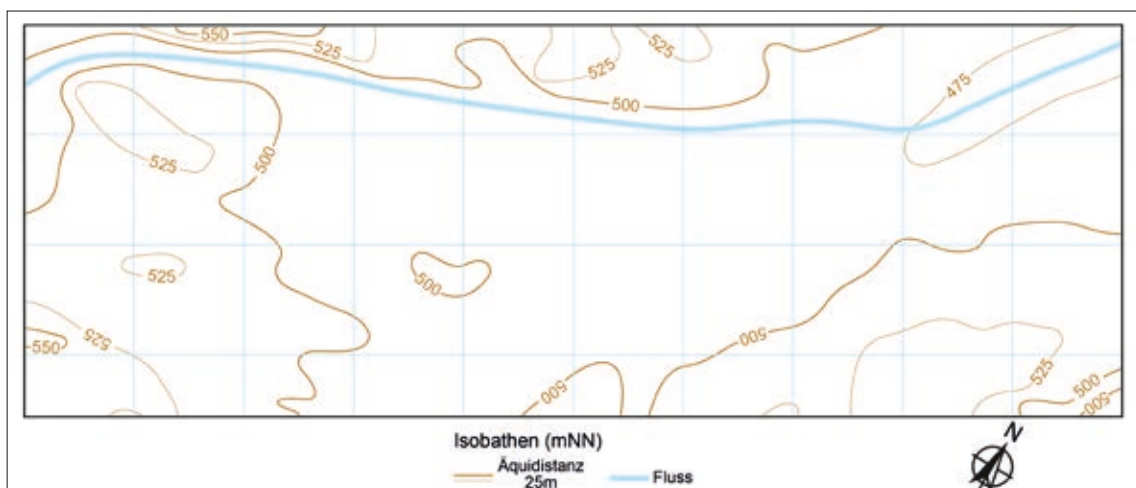


Abb. 13: Topographie des Endlagerstandortmodells SÜD (Gitterlinienabstand 2 km)

Das Oberflächenrelief im Endlagerstandortmodell ist unter fluvioglazialen Bedingungen im Pleistozän entstanden. Die klimatischen Bedingungen dieser Zeit waren durch einen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten geprägt, in deren Verlauf es zu mehreren Vergletscherungen im Alpenvorland kam, die nicht das Gebiet des Referenzprofils SÜD erreichten. Die Schmelzwasserflüsse der Gletscher schufen im Bereich des generischen Modells breite Talformen und lagerten fluvioglaziale Sedimente ab. Durch die sukzessive Eintiefung der Schmelzwasserflüsse entstanden Flussterrassen (Hoch- und Niederterrassen). Im Endlagerstandortmodell SÜD wird beispielhaft eine solche Talform mit einem oberirdischen Abfluss nach Osten dargestellt. Das generische Fließgewässer in einem breitem Sohlental, ist ein kiesgeprägter Strom und wurde exemplarisch dem Fließgewässertyp eines Mittelgebirges zugeordnet (vgl. Fließgewässertyp 9.1 in POTTGIESSER & SOMMERHÄUSER 2008, DAHM et al. 2014).

Die linienhafte Erosion durch fluviatile Prozesse ist durch die Hebungen der Erdkruste beeinflusst. Informationen zur vertikalen Bewegung der Erdkruste in Süddeutschland sind im Bericht von STARK (2014) zusammenfassend beschrieben. Die Hebung der Erdkruste wurde durch post-kollisionale isostatische Ausgleichsprozesse der Alpenorogenese und die spätalpine Verkippung der Erdkruste im Alpenvorland hervorgerufen (vgl. STRASSER et al. 2009). Untersuchungen für das Zürcher Weinland ergaben Hebungsraten im Bereich von 0,1 mm/a, die seit etwa 10 Millionen Jahren andauert (NAGRA 2002). Das Gebiet der Schwäbischen Alb unterliegt seit ungefähr 12 Millionen Jahren einer Hebung von durchschnittlich 0,01 mm/a (vgl. STRASSER et al. 2009, STRASSER 2011). Dementsprechend wird für das Endlagerstandortmodell SÜD eine andauernde Hebung angenommen, die im Bereich von 0,01 mm/a bis maximal 0,1 mm/a liegt.

3.2 *Strukturgeologische Gegebenheiten*

Die Erfassung eines Kluft- und Störungsinventars sowie die Bestimmung ihrer hydrodynamischen Eigenschaften hängen stets von den Informationen aus einer konkreten Standorterkundung ab. In Ermangelung dieser Daten aus deutschen Standorterkundungsarbeiten werden für das Wirtsgestein des generischen Endlagerstandortmodells SÜD solche Informationen aus den Untersuchungsergebnissen von Standorterkundungsprogrammen im Rahmen von Endlagerprojekten in der Schweiz und Frankreich übernommen. Darüber hinaus sind die im Folgenden beschriebenen, generellen strukturgeologischen Gegebenheiten für das Endlagerstandortmodell SÜD zu berücksichtigen.

Die geologischen Verhältnisse des Referenzprofils SÜD gleichen dem westlichen Molassebecken, nahe dem nordwestlichen Beckenrand. Es wird erwartet, dass die für das gesamte Molassebecken typischen, etwa alpenparallel verlaufenden syn- und antithetischen

Abschiebungen (GEYER et al. 2013) vereinzelt auch im Endlagerstandortmodell SÜD vorkommen. Diese Störungen weisen dort jedoch nur einen geringen vertikalen Versatz auf (maximal wenige Meter) und wurden als geometrische Körper nicht zusätzlich modelliert. Die im Endlagerstandortmodell SÜD nicht dargestellten, aber zu erwartenden Störungen und Klüfte, werden mit den lithologischen und hydrogeologischen Eigenschaften der Modell-Einheiten berücksichtigt.

So hängt das Auftreten von Klüften und Störungen in der Schichtenfolge des Endlagerstandortmodells SÜD mit den mechanischen Eigenschaften der Gesteine zusammen und ist u. a. durch die Druck- und Temperaturbedingungen sowie die Verformungsgeschwindigkeit beeinflusst (MURAWSKI 1968-1991, REUTER et al. 1996). So verhalten sich bspw. Dolomite spröder als Kalke, wodurch die Dolomite häufig zerklüfteter sind als die Kalke (FÜCHTBAUER 1988). Dementsprechend treten auch die großen Kluftsysteme in den Modell-Einheiten auf, die durch Kalkstein oder Dolomitstein dominiert sind. Aber auch die sandigen, mesozoischen Schichtenfolgen im Gebiet des Referenzprofils SÜD werden meist als Poren-Kluft-Aquifere klassifiziert (z. B. in FEHN et al. 2010). Die auch mit einer starken Zerklüftung von Kalkstein und Dolomitstein zusammenhängende Verkarstung tritt in der Modell-Einheit jo2 auf, die durch stärker verkarstete Bereiche charakterisiert ist.

Die bekannten, über mehrere Kilometer lang auftretende Störungszonen, wie die Pfullendorf-Saulgau-Struktur (vgl. CLAUSER et al. 2002), liegen südlich vom Gebiet des Referenzprofils SÜD und blieben bei der Modellierung des Endlagerstandortmodells SÜD unberücksichtigt. Derzeit gibt es im Teilgebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation in Süddeutschland (HOTH et al. 2007) keine Hinweise auf derartige Störungszonen. Es ist daher anzunehmen, dass das erstellte Endlagerstandortmodell SÜD die wahrscheinlichen strukturgeologischen Gegebenheiten widerspiegelt.

Für die Genese der Störungen wird angenommen, dass diese mit den gut untersuchten Störungszonen (z. B. Pfullendorf-Saulgau-Struktur) des westlichen Molassebeckens vergleichbar ist. Die Entstehung der Pfullendorf-Saulgau-Struktur hängt mit der Entwicklung des Molassebeckens zusammen, die etwa im Eozän/Oligozän begann. In einem Zeitraum von etwa 25 Millionen Jahren – bis zum Obermiozän – erfolgte eine starke Subsidenz des Ablagerungsraums und das Molassebecken progradierte während dieser Zeit mehrere Zehnerkilometer weit nach Norden (DOPPLER et al. 2005). Damit übereinstimmend konnte auch für die Entstehung der Abschiebungen in den Erdöl-/Erdgaslagerstätten (z. B. KW Feld Pfullendorf) im westlichen Molassebecken ein Zeitraum vom Oligozän bis zum Miozän ermittelt werden (vgl. WEHNER et al. 1983).

Nach dem Obermiozän folgte eine Phase der tektonischen Hebung und flächenhaften Erosion (GEYER et al. 2011). Dadurch wurden im Gebiet des Referenzprofils SÜD alle

jüngeren tertiären Schichten bis zu den Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse erodiert. Gegenwärtig werden für diesen Bereich nur sehr geringe tektonische Bewegungen angenommen. Darauf weist auch die nur geringe Seismizität in den Gebieten mit untersuchungswürdigen Tongesteinen hin, die nach HOTH et al. (2007) in der Erdbebenzone 1 und kleiner liegen.

3.3 Modell-Einheiten des Endlagerstandortmodells

Im Folgenden werden für das Endlagerstandortmodell SÜD die Lagerungsverhältnisse der 16 Modell-Einheiten und ihre lithologischen und hydrogeologischen Eigenschaften dokumentiert.

3.3.1 Modell-Einheit m1

Die lithologische Zusammensetzung der Modell-Einheit m1 ist charakteristisch für die Ablagerungen des Unteren Muschelkalk im Gebiet des Referenzprofils SÜD. Es handelt sich vorwiegend um tonige, fein- bis grobkörnige Arkosen, die teils karbonatisch, teils kieselig gebunden sind. Untergeordnet treten sandige Tonsteine und einzelne Dolomitsteinbänke auf (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Gebirgsdurchlässigkeit ist vergleichbar den Werten der Modell-Einheit m3 (vgl. Kapitel 3.3.3), so dass es sich um einen klüftig-porösen Grundwassereringleiter mit geringer Durchlässigkeit handelt.

Die Gesamtmächtigkeit der Modell-Einheit m1 beträgt 20 m und die Basisfläche befindet sich größtenteils in Tiefen zwischen -550 m NN und -650 m NN (Abb. 14).

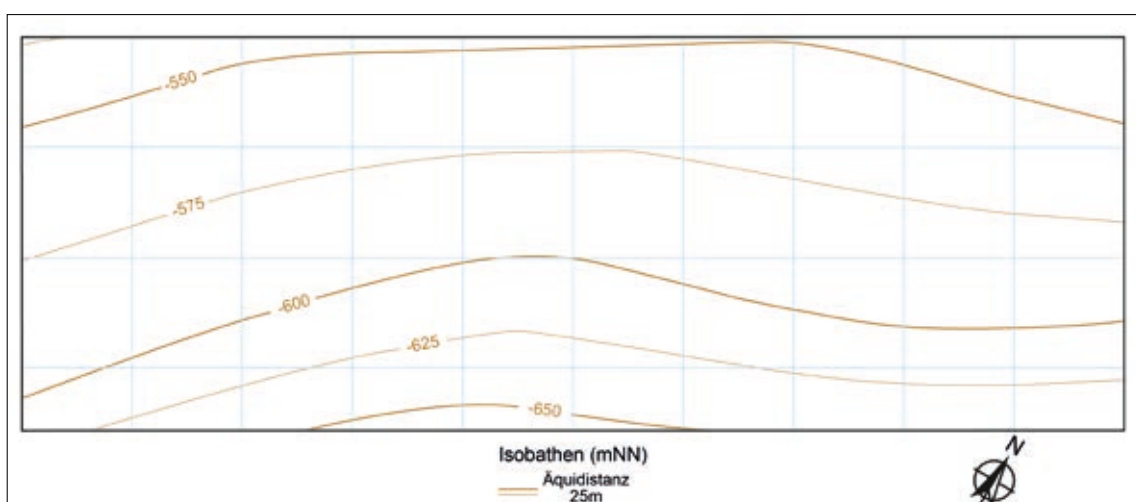


Abb. 14: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit m1 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.2 Modell-Einheit m2

Die Modell-Einheit m2 ist weniger als 50 m mächtig und die Basisfläche befindet sich im Nordwesten bei etwa -525 m NN und im Südosten bei etwa -625 m NN (Abb. 15). Vergleichbar mit den Ablagerungen des Mittleren Muschelkalk im Gebiet des Referenzprofils SÜD ist die Lithologie der Modell-Einheit m2 durch eine Schichtenfolge von Anhydritstein dominiert, die teilweise stärker tonige Abschnitte aufweist sowie oben und unten durch wenige Meter mächtige Dolomitsteine begrenzt wird (vgl. Kapitel 2.1.1). Aufgrund seiner lithologischen Ausprägung ist die Modell-Einheit m2 ein Grundwassergeringleiter mit sehr geringer Durchlässigkeit.

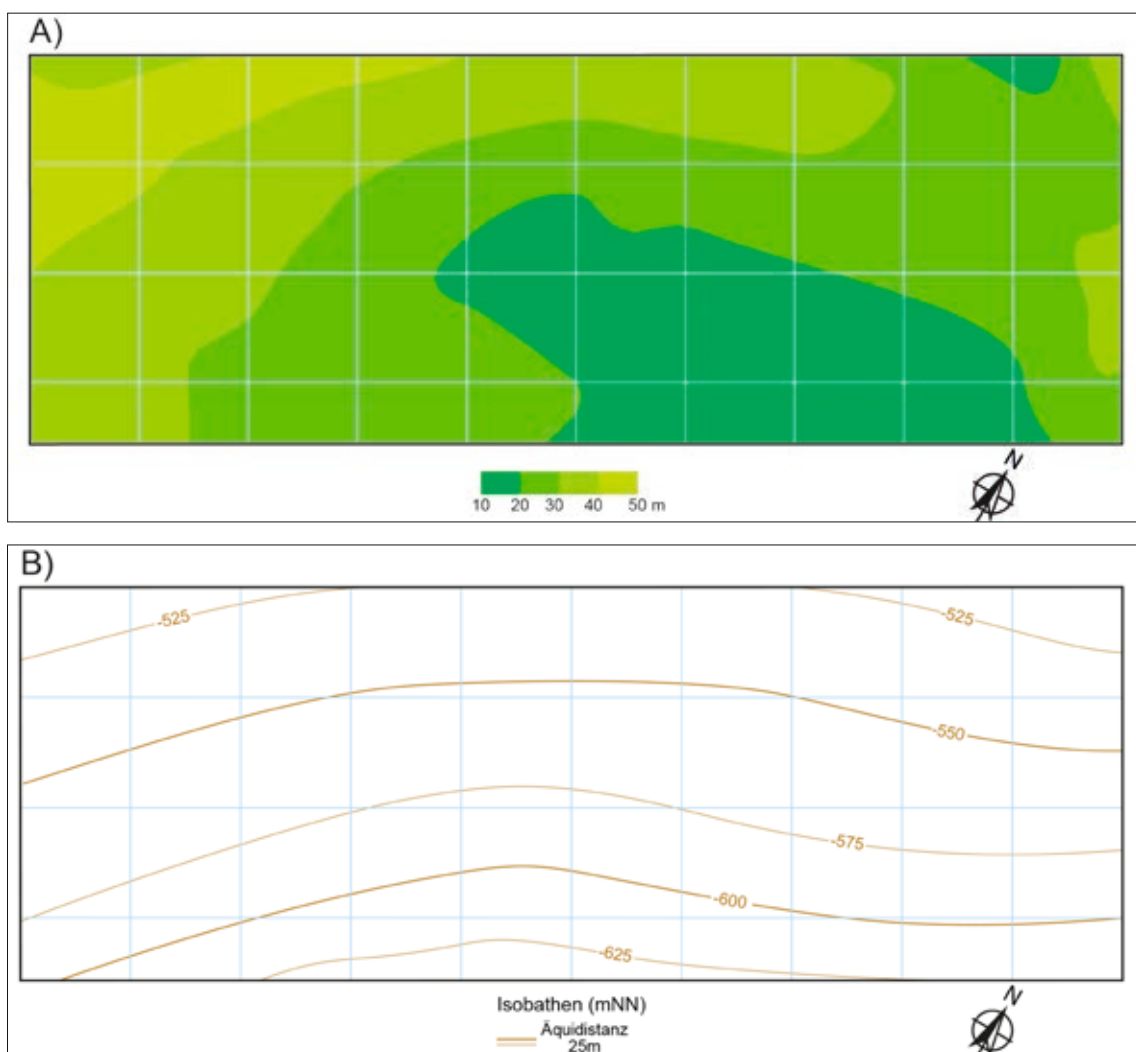


Abb. 15: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit m2 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.3 Modell-Einheit m3

Die lithologischen Eigenschaften der Modell-Einheit m3 werden durch einen porösen bis stark geklüfteten Dolomit (äquivalent zum Trigonodusdolomit, Oberer Muschelkalk) bestimmt. In dem mehrere Zehnermeter mächtigen (Abb. 16), feinkristallinen Dolomitstein treten untergeordnet Tonsteine sowie feinkörnige Sandsteine auf (vgl. Kapitel 2.1.1). Hydrogeologisch handelt es sich um einen klüftig-porösen Grundwassergeringleiter mit geringer Durchlässigkeit. Die Durchlässigkeit kann sich bei Vorhandensein einer sekundären Kluftpermeabilität um ein Vielfaches erhöhen. Der Chemismus des Wassers wird als Na-Cl-Wasser charakterisiert. Die Konzentrationen (mmol(eq)/kg) der Kationen Ca^{2+} und Mg^{2+} sowie der Anionen HCO_3^- und SO_4^{2-} sind gegenüber Na^+ und Cl^- um etwas mehr als eine 10er Potenz geringer. Die Gesamtkonzentration an gelösten Stoffen beträgt 10 g/l (vgl. Kapitel 2.2.1).

Die Basisfläche der Modell-Einheit m3 liegt im Endlagerstandortmodell SÜD meist zwischen -500 m NN und -600 m NN (Abb. 16).

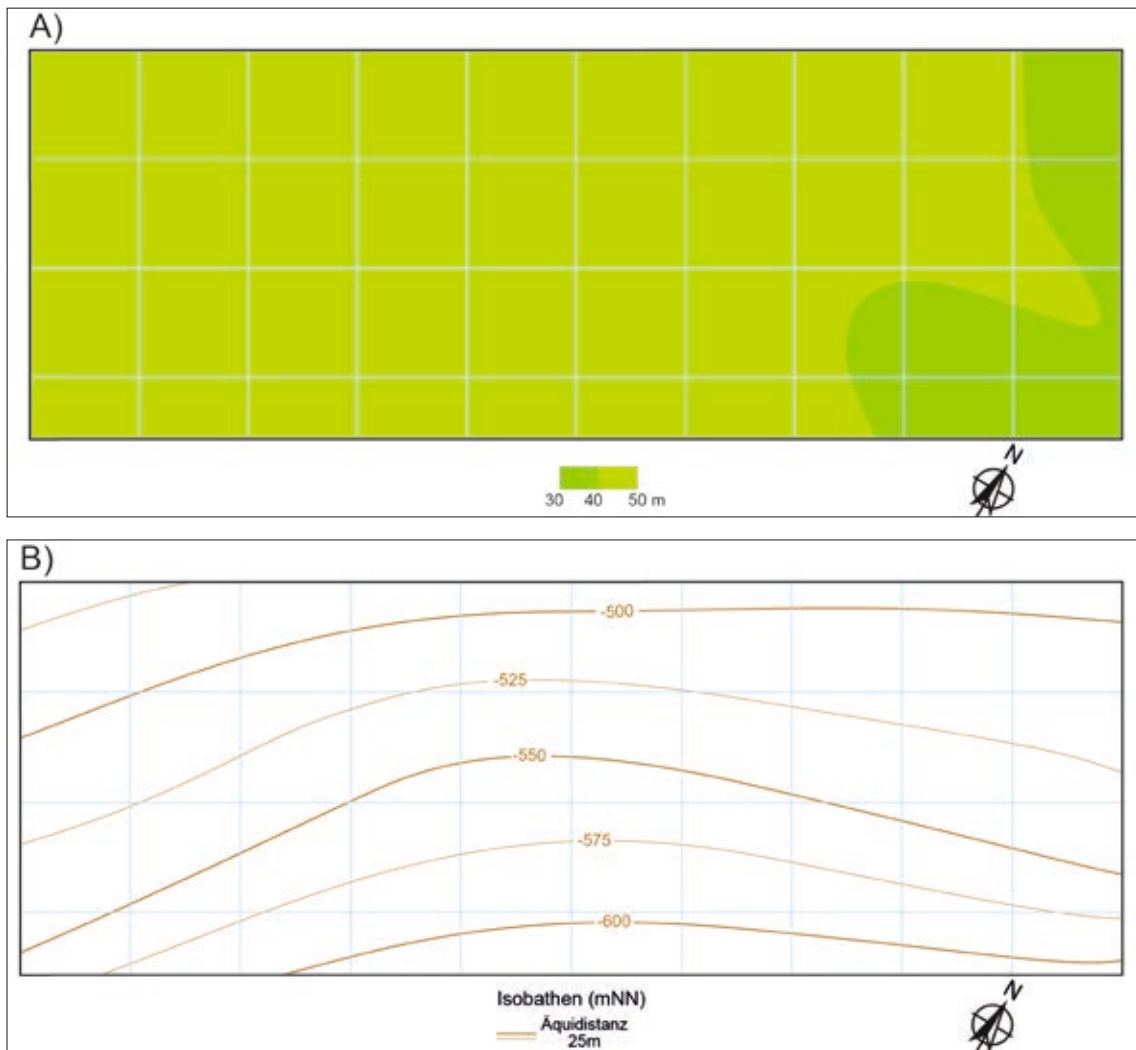


Abb. 16: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit m3 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.4 Modell-Einheit k1

Die Modell-Einheit k1 fasst die lithologisch sehr heterogene Schichtenfolge der Erfurt-Formation, der Benk-Formation, der Stuttgart-Formation sowie die Bunte Mergel-Schichtenfolge zusammen (Abb. 17). Die Ablagerungen im unterem Teil der Modell-Einheit k1 sind durch marine bis brackische Sedimente gekennzeichnet (vgl. Kapitel 2.1.2). Sie beginnen mit einer durch dolomitische Tongesteinsschichten sowie mikritische Dolomitsteinbänke dominierten Schichtenfolge (äquivalent zur Erfurt-Formation). Darüber folgen Schichten, die vorwiegend aus feinsandigen Tongesteinen und Dolomitsteinbänken bestehen. In den Tongesteinsschichten treten lokal knollige Anhydritkonkretionen und ein nur geringmächtiger Sandsteinhorizont auf. Die Sandsteine sind durch Anhydrit oder Karbonat stark zementiert (äquivalent zur Benk-Formation).

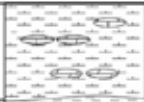




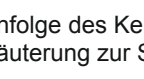
Regionale Stratigraphie		Regionale Lithologie		Modell-Einheit
Epoche	Lithostratigraphie (Alias)			
Keuper	Trossingen-Formation (Knollenmergel)		Mergelgestein Karbonatkonkretionen	k3
	Löwenstein-Formation (Stubensandstein-Schichten)		Sandstein Tongestein	k2
	(Bunte Mergel-Schichten)		Schlufftongesteine Dolomitgestein Sandstein	k1
	Stuttgart-Formation (Schilfsandstein-Schichten)		Schluff- und Tongestein Sandstein	
	Benk-Formation (Gipskeuper-Randfazies)		Dolomitgestein feinsandige Tongesteine Anhydritkonkretionen	
U	Erfurt-Formation (Lettenkeuper)		Dolomitgestein Tongestein	

Abb. 17: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Keuper zu den Modell-Einheiten k1, k2 und k3 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2

Im oberen Teil der Modell-Einheit k1 treten zunehmend Schichtenfolgen mit limnisch bis terrestrisch geprägten Ablagerungen auf (vgl. Kapitel 2.1.2). Die fluviatilen, sandigen Ablagerungen sind kleinräumig starken Mächtigkeitsschwankungen unterworfen und an schmale Rinnen gebunden, die in eine überwiegend durch Schluff- und Tongestein dominierte Schichtenfolge eingebettet sind (äquivalent zur Stuttgart-Formation). Den oberen Abschluss der Modell-Einheit k1 bilden wenige Zehnermeter mächtige feinsandige Schluff-Tongesteine, die z. T. dolomitisch gebunden sind sowie vereinzelt auftretende geringmächtige Dolomitsteinbänke (äquivalent Bunte Mergel-Schichten).

Insgesamt wird für die Modell-Einheit k1 eine tonig-schluffig dominierte Lithologie mit vereinzelt auftretenden Dolomit-Bänken und die hydrogeologischen Eigenschaften eines porösen Grundwassergeringleiters mit sehr geringer Durchlässigkeit festgelegt. Die Basisfläche der Modell-Einheit k1 liegt in großen Teilen des Endlagerstandortmodells SÜD in Tiefen zwischen -450 m NN und -550 m NN. Nur im Westen liegt die Basisfläche in geringeren Tiefen und im Südosten in größeren Tiefen (Abb. 18).

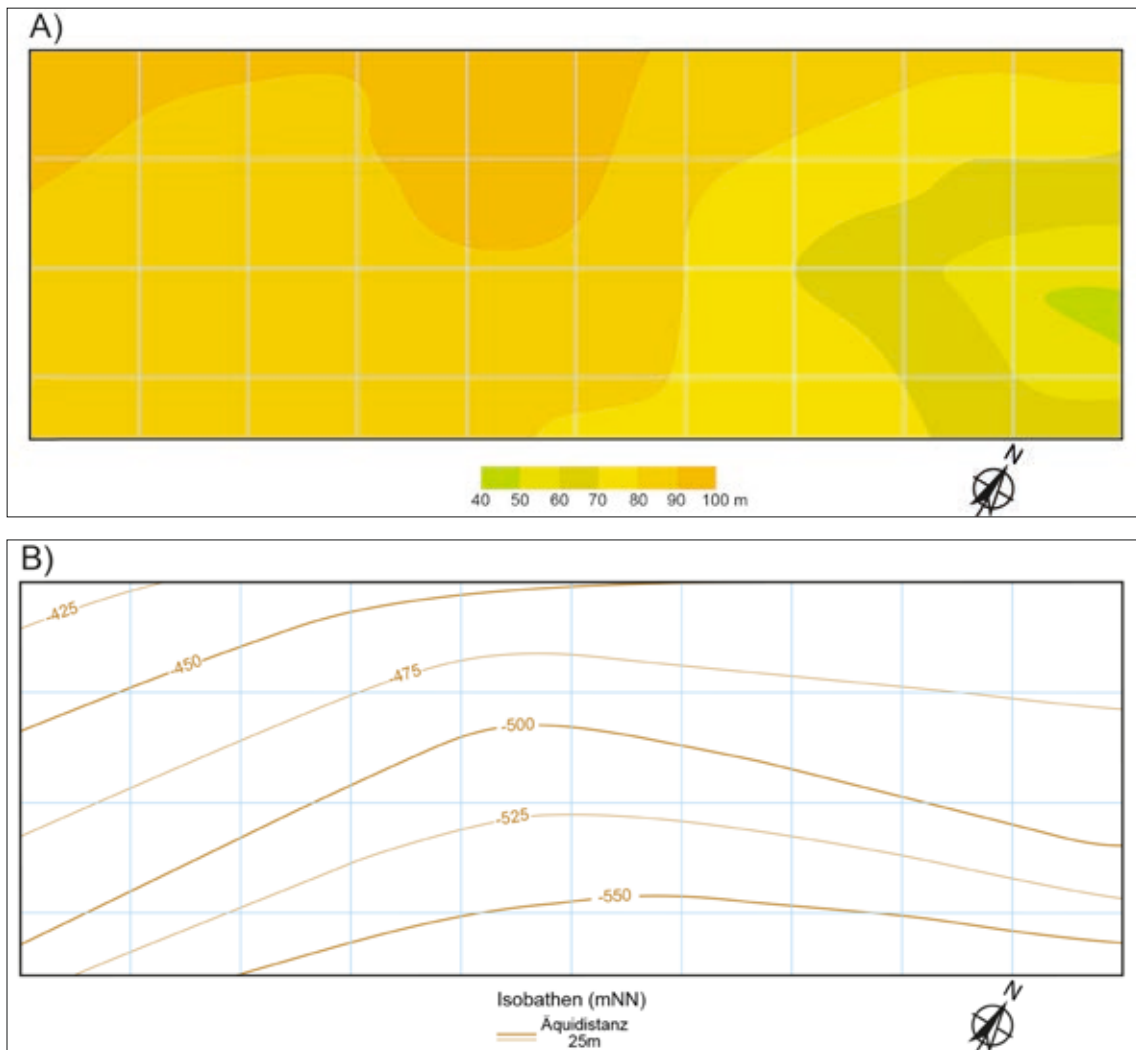


Abb. 18: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit k1 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.5 Modell-Einheit k2

Die fluviatilen Ablagerungen der Modell-Einheit k2 (Abb. 17) bestehen aus Sandsteinen sowie untergeordnet einzelnen Tongesteinsschichten (vgl. Kapitel 2.1.2). Die Sandsteinhorizonte zeigen in der Regel eine Tendenz von mittel- bis grobkörnigen Basisablagerungen zu tonigen Feinsandsteinen im Hangenden (äquivalent zur Löwenstein-Formation). Für die insgesamt wenige Zehnermeter mächtige, sandig dominierte Modell-Einheit k2 wird angenommen, dass es sich um einen klüftig-porösen Grundwasserleiter mit einer mäßigen Durchlässigkeit handelt.

Die Basisfläche der Modell-Einheit k2 liegt in großen Teilen des Endlagerstandortmodell SÜD in Tiefen zwischen -350 m NN und -475 m NN (Abb. 19).

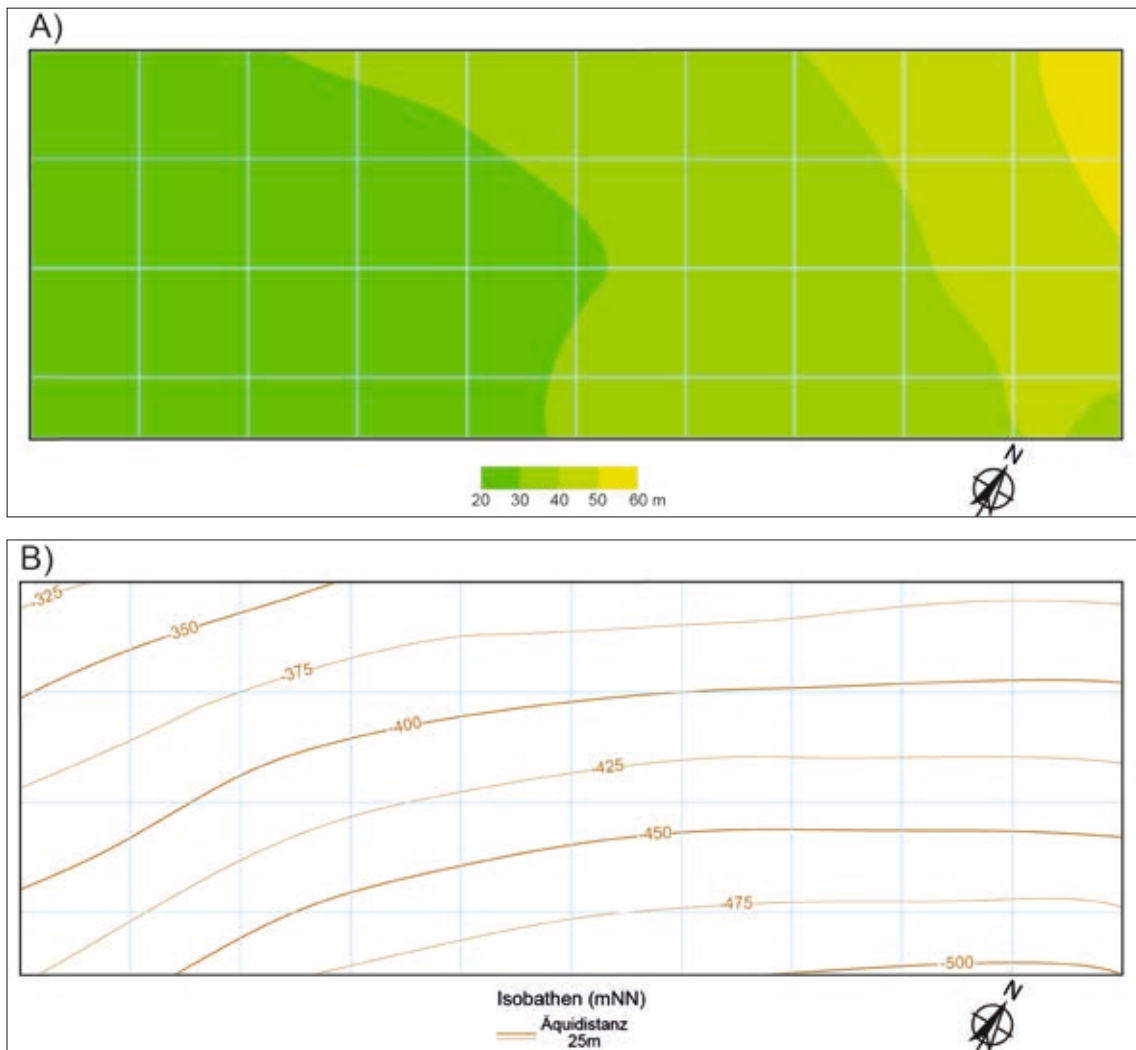


Abb. 19: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit k2 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.6 Modell-Einheit k3

Tonige und mergelige Ablagerungen sind charakteristisch für die Modell-Einheit k3 (Abb. 17), in der auch gröberklastische Karbonatkonkretionen eingelagert sind. In den Tongesteinsschichten tritt eine Wechsellagerung von durch Tonminerale der Montmorillonit-Gruppe dominierten Schichten und solchen mit einem hohen Anteil an Glimmern auf. Die Tongesteinsschichten enthalten einen sehr hohen Anteil an quellfähigen Tönen (vgl. Kapitel 2.1.2). Aufgrund der Lithologie weist die Modell-Einheit k3 eine außerordentlich geringe Durchlässigkeit auf (kleiner 10^{-10} m/s). Die Basisfläche der Modell-Einheit k3 liegt in großen Teilen des Endlagerstandortmodells SÜD in Tiefen zwischen -325 m NN und -450 m NN (Abb. 20).

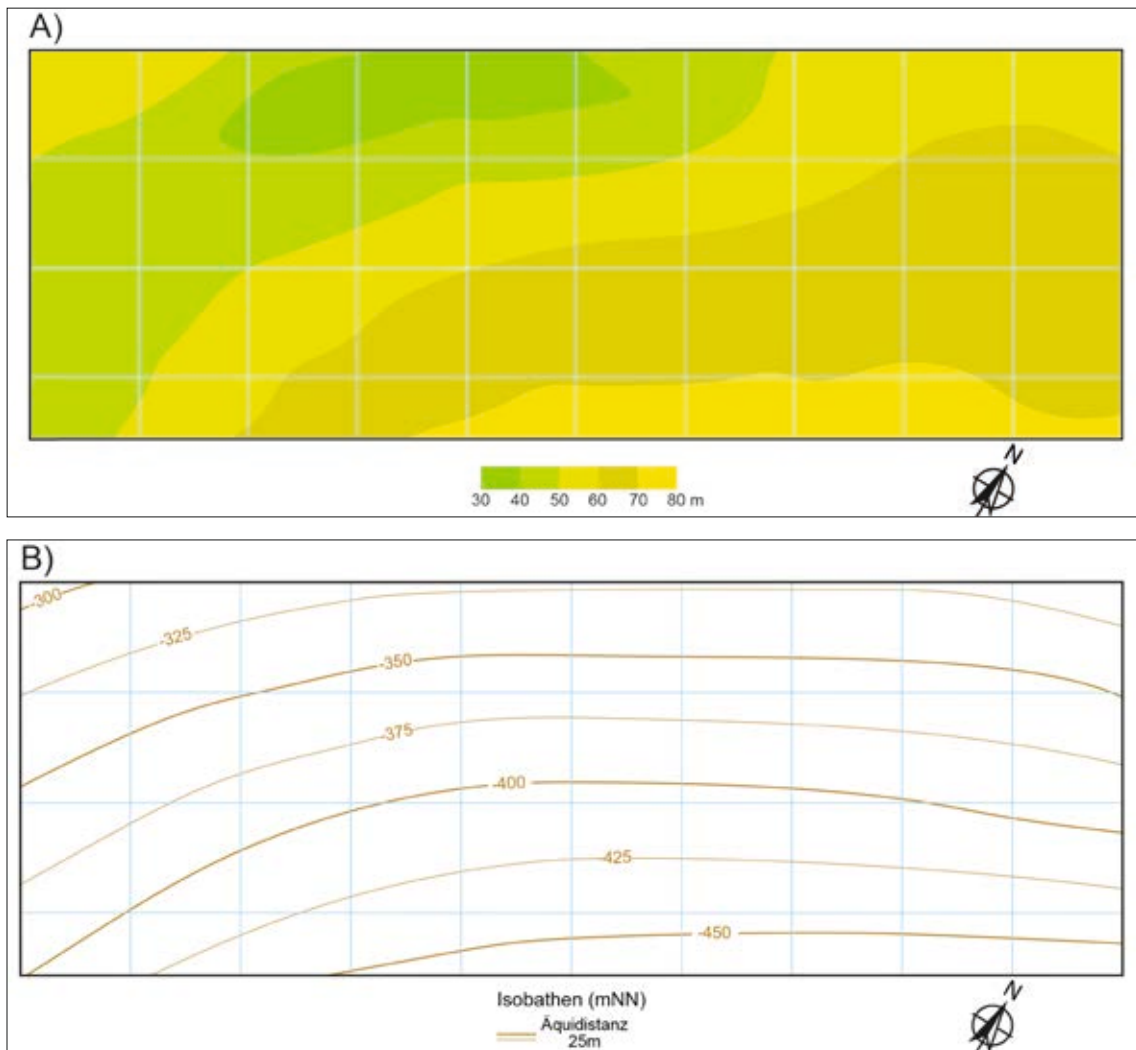


Abb. 20: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit k3 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.7 Modell-Einheit ju1

Die Modell-Einheit ju1 fasst die sandig dominierte Schichtenfolge des unteren Unterjura (Gryphäensandstein-, Angulatensandstein- und Psilonotenton-Formation) im Gebiet des Referenzprofils SÜD zusammen (Abb. 21). Neben den tonigen Sandsteinen treten auch geringmächtige sandige Tonmergelsteinbänke und wenige Kalksteinbänke auf. In Anlehnung an die geologischen Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils SÜD (vgl. Kapitel 2.1.3) wird die Gesamtmächtigkeit der Modell-Einheit ju1 für das Endlagerstandortmodell auf 20 m festgelegt. Die einzelnen Sandsteinlagen in der Modell-Einheit ju1 bilden ein hydrogeologisches System mit regional sehr unterschiedlichen Durchlässigkeitswerten. Die Modell-Einheit ju1 besitzt insgesamt die Eigenschaften eines Grundwassergeringleiters mit nur geringer Durchlässigkeit.

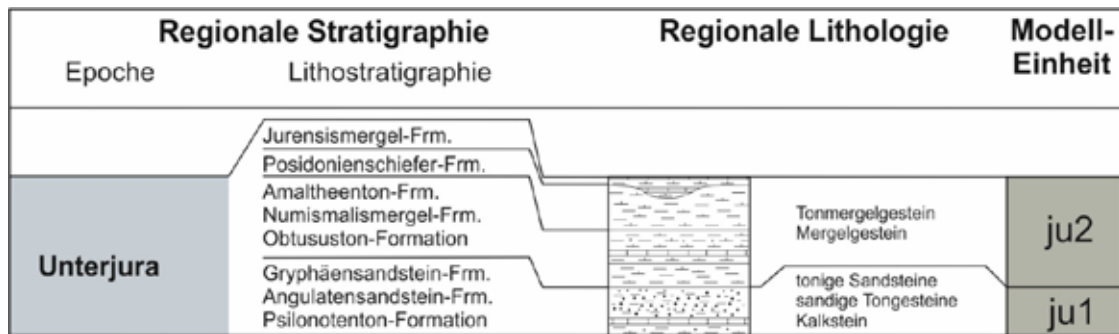


Abb. 21: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Unterjura zu den Modell-Einheiten ju1 und ju2 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2

Die Basisfläche der Modell-Einheit ju1 liegt in großen Teilen des Endlagerstandortmodells SÜD in Tiefen zwischen -275 m NN und -375 m NN (Abb. 22).

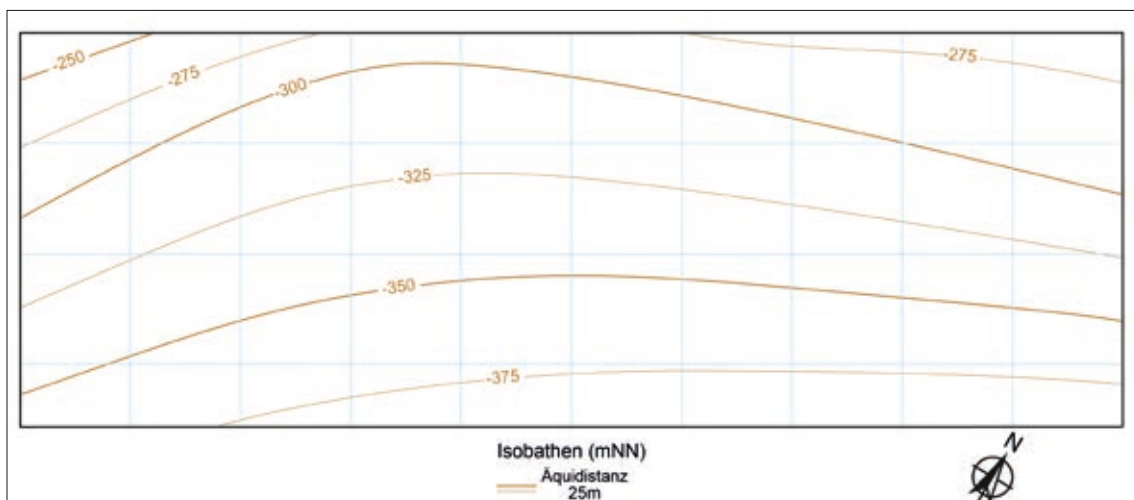


Abb. 22: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit ju1 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.8 Modell-Einheit ju2

Die überwiegend aus kalkhaltigen, tonigen bis mergeligen Ablagerungen sowie bituminösen Ton- und Mergelsteinen (sog. Ölschiefer) bestehende Schichtenfolge des oberen Unterjura (vgl. Kapitel 2.1.3) wird in der Modell-Einheit ju2 zusammengefasst (Abb. 21). Die Schichtenfolge ist mehrere Zehnermeter mächtig und die Basisfläche der Modell-Einheit ju2 liegt in Tiefen zwischen etwa -250 m NN und etwa -350 m NN (Abb. 23). Hydrogeologisch ist diese Modell-Einheit als ein Grundwassergeringleiter mit einer außerordentlich geringen Durchlässigkeit (kleiner 10^{-10} m/s) zu charakterisieren.

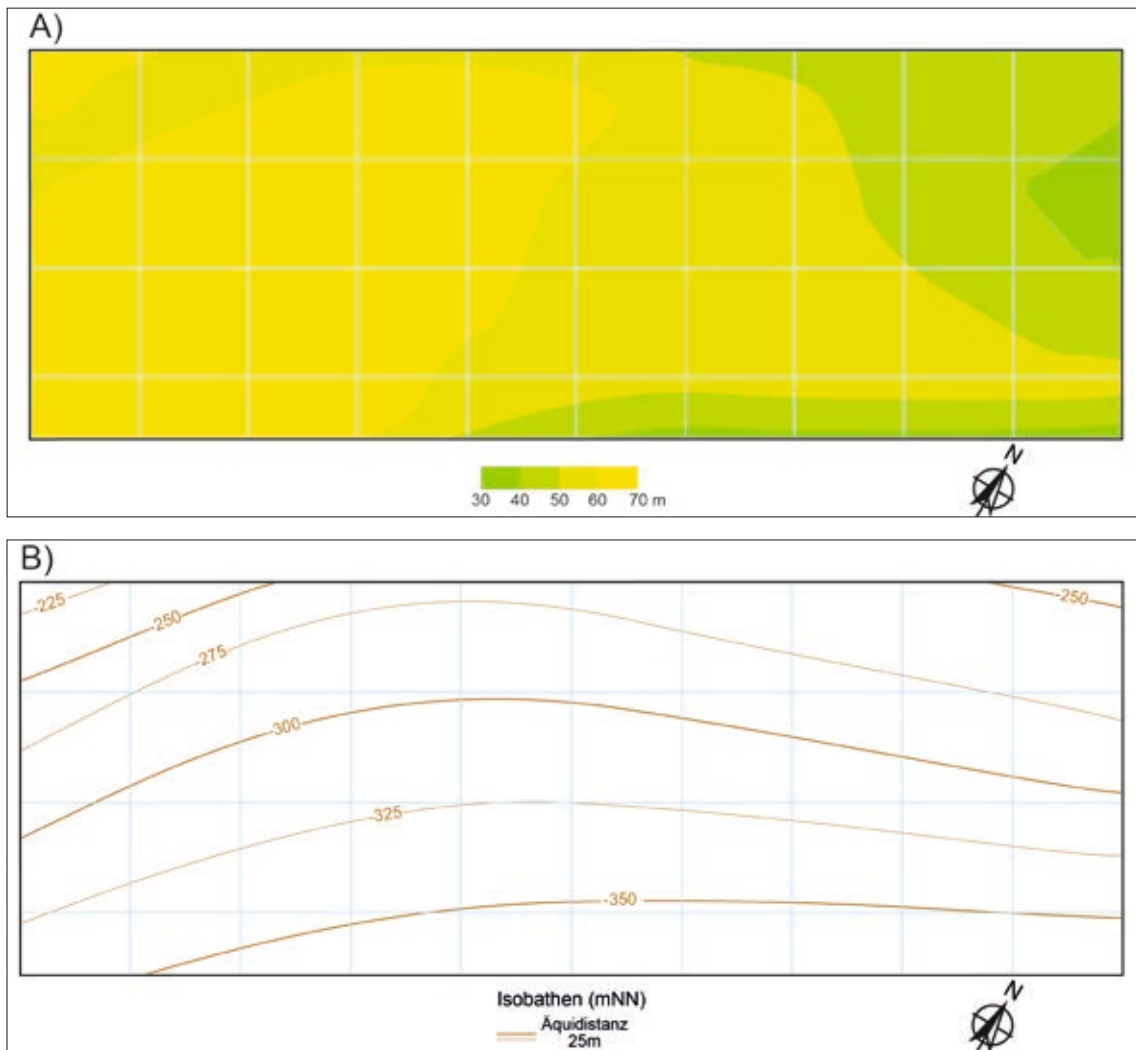


Abb. 23: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit ju2 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.9 Modell-Einheit jm1 (Wirtsgestein)

Die Modell-Einheit jm1 besteht aus den tonigen Ablagerungen der Opalinuston-Formation und ist im Endlagerstandortmodell das Wirtsgestein (vgl. Kapitel 2.1.4). Das Wirtsgestein ist, entsprechend der Zusammenfassung von HOTH et al. (2007), ein gut verfestigter, glimmerführender, siltiger Tonstein. In der Modell-Einheit jm1 ist die laterale Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften sehr gering. Die Mächtigkeit liegt meist zwischen 110 m und 120 m, im östlichen Teil des Endlagerstandortmodells ist sie etwas geringer (im Bereich zwischen 100 m und 110 m) und im Westen etwas höher (im Bereich von 120 m bis 130 m). Im Endlagerstandortmodell SÜD besitzen die Tongesteine der Modell-Einheit jm1 die hydraulischen Eigenschaften eines Grundwassergeringleiters mit einer außerordentlich geringen Durchlässigkeit (kleiner 10^{-10} m/s).

Große Teile der Basisfläche der Modell-Einheit jm1 liegt in Tiefen zwischen etwa -200 m NN und etwa -300 m NN (Abb. 24).

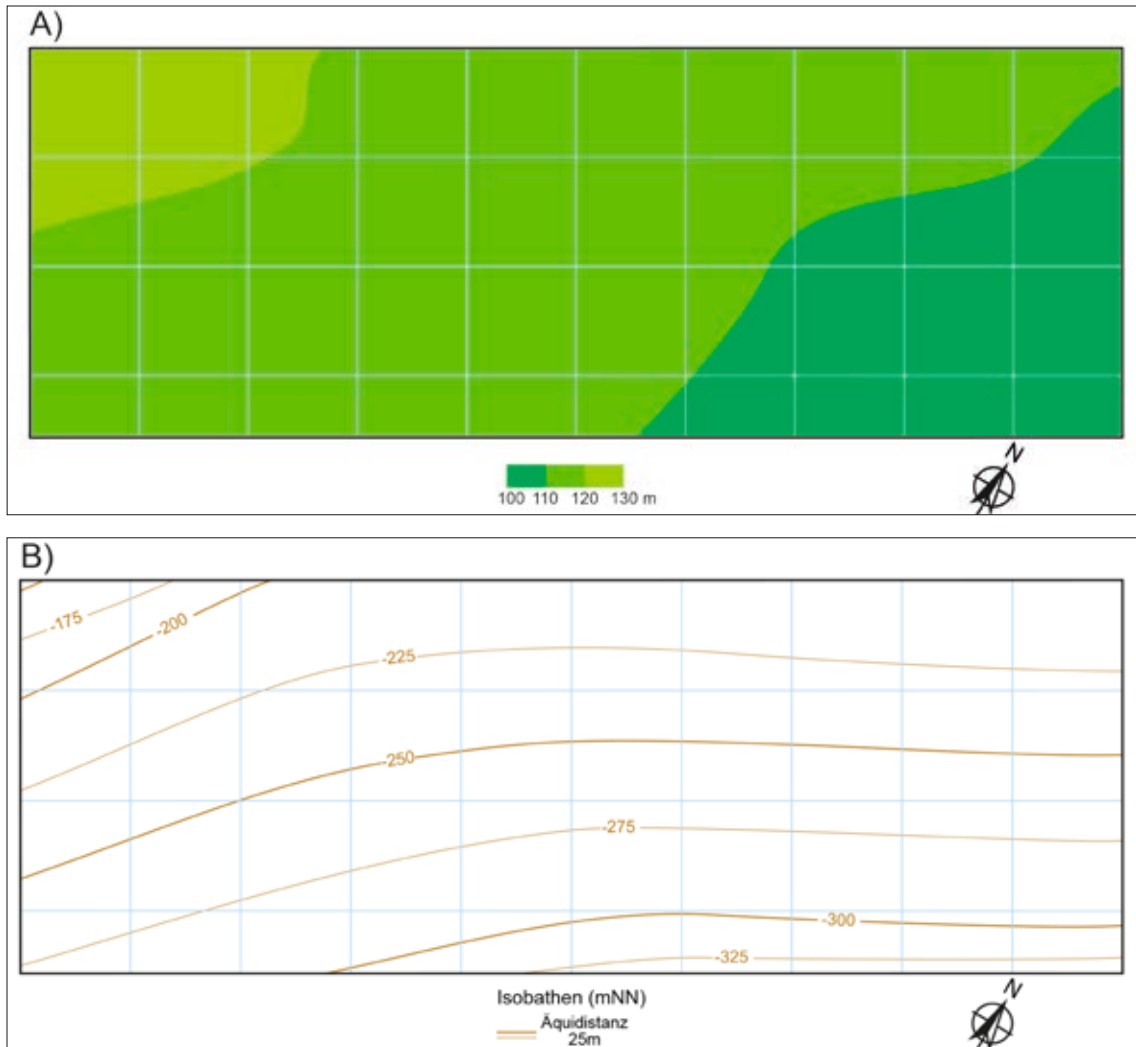


Abb. 24: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jm1 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.10 Modell-Einheit jm2

Vorrangig entspricht die Lithologie der Modell-Einheit jm2 der Eisensandstein-Formation, die aus feinsandigen Tongesteinen und darin eingeschalteten eisenreichen Feinsandsteinen besteht (vgl. Kapitel 2.1.4). Die Ablagerungen der Wedelsandstein-Formation sind geringmächtige, feinsandige Tonmergelsteine und haben nur einen geringen Anteil an der Gesamtmächtigkeit der Modell-Einheit jm2 (Abb. 25). Im Endlagerstandortmodell SÜD schließt sich im Hangenden des Wirtsgesteins somit ein Grundwassergeringleiter an, in dem die Sandsteinschichten eine geringe Durchlässigkeit aufweisen. Die Gesamtkonzentration an gelösten Stoffen im Wasser beträgt etwa 1 g/l.




Regionale Stratigraphie		Regionale Lithologie		Modell-Einheit
Epoche	Lithostratigraphie			
Mitteljura	Ornatenton-Formation Dentalienton-Formation Hamitenton-Formation Ostreenkalk-Formation		Tonmergelstein Karbonat	jm3
	Wedelsandstein-Formation Eisensandstein-Formation		Sandstein (tonig, kalkig) Tongestein Tonmergelstein	jm2
	Opalinuston-Formation		Tongestein	jm1

Abb. 25: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Mitteljura zu den Modell-Einheiten jm1, jm2 und jm3 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2

Die Mächtigkeit der Formation schwankt zwischen etwa 15 m und 65 m, wobei die größeren Mächtigkeiten im Nordwesten auftreten. Die Basisfläche liegt zwischen etwa -125 m NN im Nordwesten und -225 m NN im Südosten (Abb. 26).

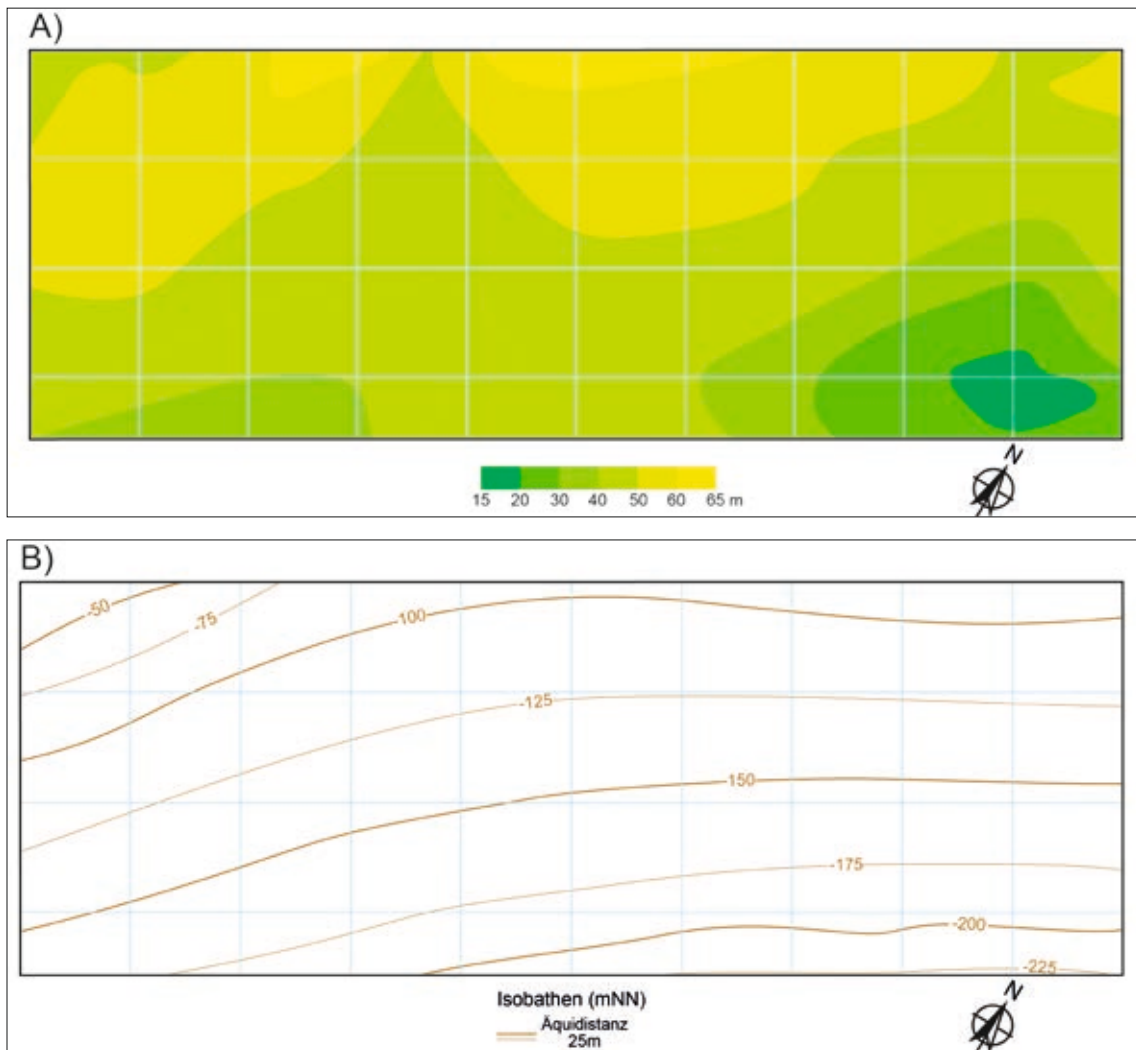


Abb. 26: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jm2 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.11 Modell-Einheit jm3

In der Modell-Einheit jm3 sind die Ablagerungen der Ostreenkalk-, Hamitenton-, Dentalienton- und Ormatenton-Formation zusammengefasst (Abb. 25). Die Einheiten bestehen vorwiegend aus Tonmergelsteinen mit einzelnen Kalkstein-Lagen. Die Gesamtmächtigkeit der Schichtenfolge (vgl. Kapitel 2.1.4) variiert im Endlagerstandortmodell SÜD zwischen etwa 20 m und 50 m. Der Flächenanteil im Modell mit Mächtigkeiten unter 20 m und über 50 m ist sehr gering. Die vorwiegend aus Tonmergelsteinen bestehende Modell-Einheit jm3 im Endlagerstandortmodell SÜD wird als Grundwassergeringleiter mit einer außerordentlich geringen Durchlässigkeit (kleiner 10^{-10} m/s) eingestuft.

Die Basisfläche liegt zwischen etwa -50 m NN im Nordwesten und -150 m NN im Südosten (Abb. 27). Im Westen liegt sie in etwas geringeren Tiefen (bis etwa 0 m NN) und im Osten werden etwas höhere Tiefenlagen erreicht (bis etwa -200 m NN).

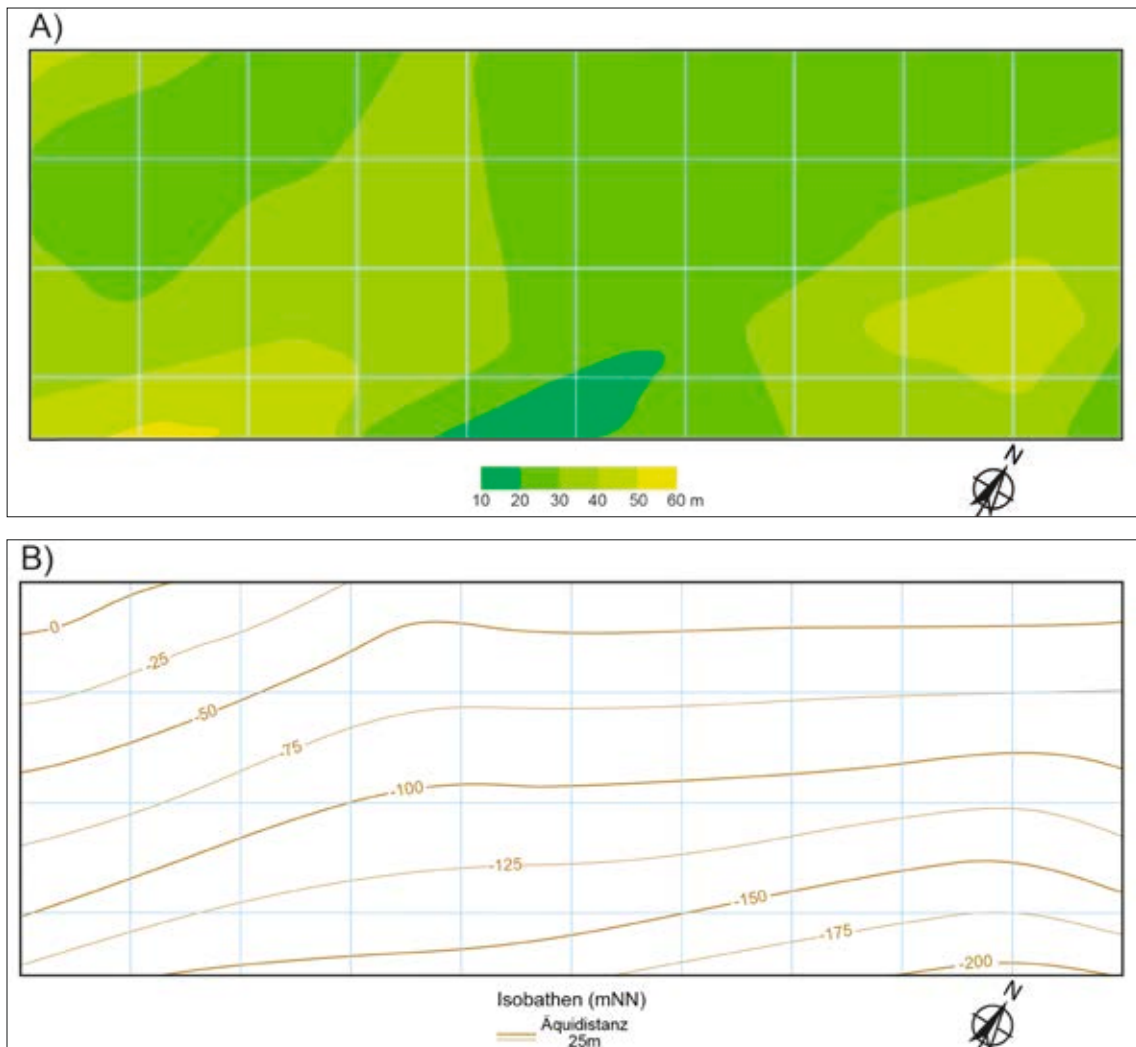


Abb. 27: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jm3 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.12 Modell-Einheit jo1

Die Modell-Einheit jo1 fasst die Ablagerungen der geschichteten Fazies (Bankkalk-Fazies) des Oberjura im Liegenden der ungeschichteten Schwammkalk-Fazies zusammen (vgl. Kapitel 2.1.5). Die geschichtete Fazies besteht aus einer Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge und Kalkmergelsteinen, äquivalent zu den Ablagerungen der Impressamergel-, der Wohlgeschichtete-Kalke-, Lacunosamergel- und Untere-Felsenkalke-Formation (Abb. 28). Insbesondere die bankigen Kalksteinlagen der Schichtenfolge können lokal Klüfte mit einer höheren Durchlässigkeit aufweisen. Diese Klüftzonen besitzen aber innerhalb der Modell-Einheit jo1 nur eine geringe Erstreckung sowie ein geringes Klüftvolumen und bilden keine

eigenständigen Grundwasserkörper. Im Endlagerstandortmodell SÜD wird die insgesamt aus Kalkstein, Kalkmergelstein und Mergelstein bestehende Schichtenfolge der Modell-Einheit jo1 als Grundwassergeringleiter mit einer nur geringen Durchlässigkeit eingestuft.

Die Schichtenfolge ist im Modell insgesamt einheitlich 150 m mächtig und die Tiefe der Basisfläche liegt zwischen 0 m NN und -150 m NN (Abb. 29).

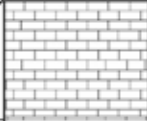



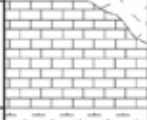

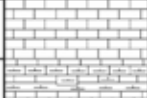

Regionale Stratigraphie		Regionale Lithologie		Modell-Einheit
Epoche	Lithostratigraphie			
Oberjura	Hangende-Bankkalk-Frm.		Kalkstein	jo3
	Zementmergel-Formation		Mergelgestein Kalkstein	
	Liegende-Bankkalk-Frm.		Kalkstein	
	Massenkalk-Frm.		Kalkstein Dolomitstein	jo2
	Untere-Felsenkalke-Frm.		Kalkstein	jo1
	Lacunosamergel-Frm.		Mergelgestein Kalkmergelgestein	
	Wohlgeschichtete-Kalke-Frm.		Kalkstein	
	Impressamergel-Formation		Kalkmergelstein Kalkstein	

Abb. 28: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Oberjura zu den Modell-Einheiten jo1, jo2 und jo2 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2

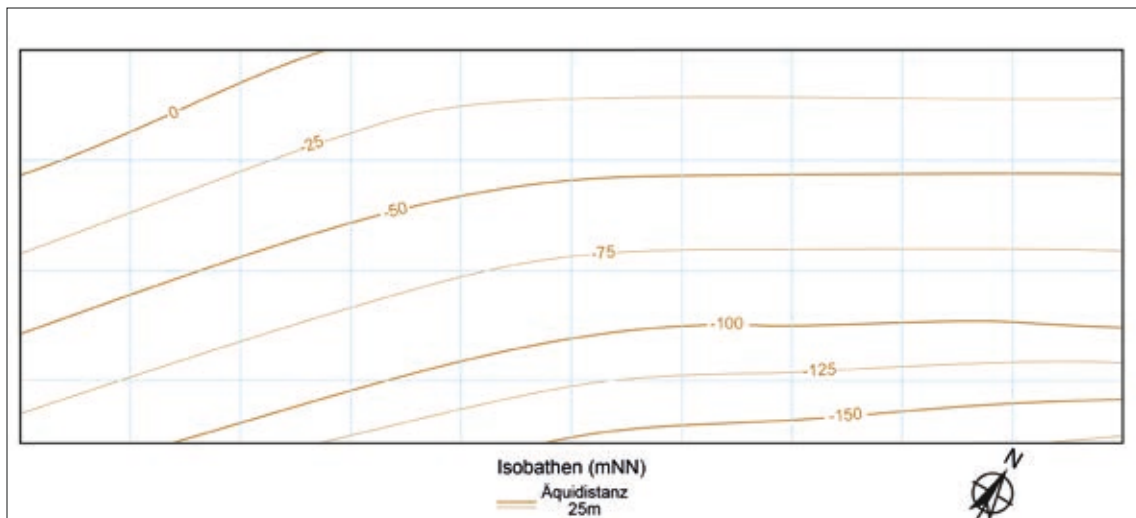


Abb. 29: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit jo1 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.13 Modell-Einheit jo2

Im gesamten Endlagerstandortmodell SÜD ist die Modell-Einheit jo2 einheitlich 50 m mächtig. Es handelt sich um die grobkörnigen, sehr porösen, stark zerklüfteten Dolomite und dolomitische Kalksteine der ungeschichteten Fazies des Oberen Jura (vgl. Kapitel 2.1.5 und Kapitel 2.2.5). In dieser Modell-Einheit tritt eine stärkere Verkarstung auf, die wesentlich die hydrodynamischen Eigenschaften beeinflusst und die eine hohe Durchlässigkeit verursacht. Das Wasser des Grundwasserleiters weist nur eine geringe Gesamtkonzentration an gelösten Stoffen auf (etwa 750 mg/l) und ist nach dem chemischen Stoffbestand den Ca-Mg-HCO₃-Wässern zuzuordnen.

Die Basisfläche der Modell-Einheit jo2 liegt in großen Teilen des Endlagerstandortmodells SÜD in Tiefen zwischen 125 m NN und 25 m NN (Abb. 30).

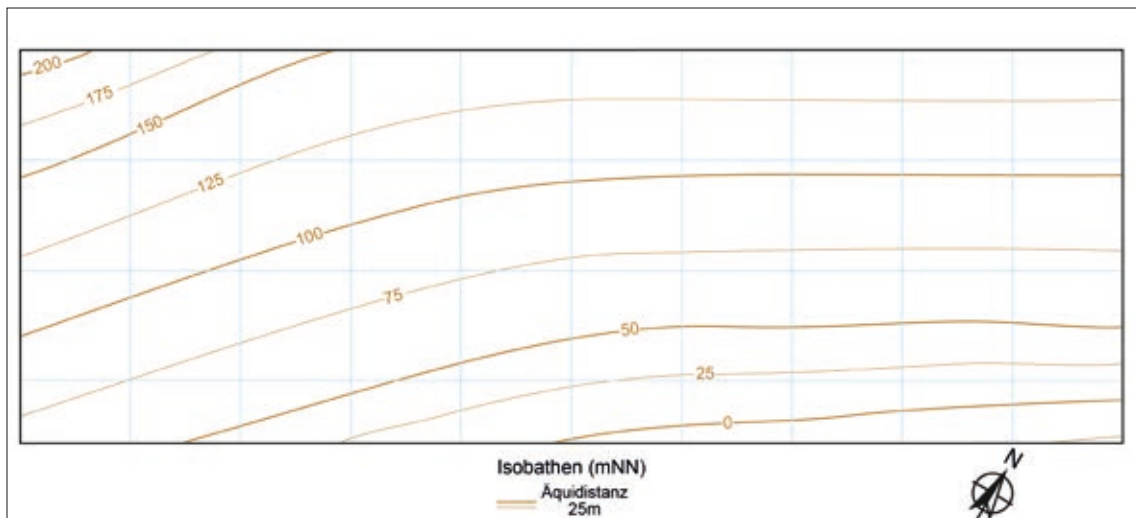


Abb. 30: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit jo2 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.14 Modell-Einheit jo3

Die Modell-Einheit jo3 fasst die Schichtenfolge der geschichteten Fazies des Oberjura im Hangenden der ungeschichteten Fazies des Oberjura zusammen. Die geschichtete Fazies besteht aus einer Kalkstein-Mergelstein-Wechselfolge, äquivalent zu den Ablagerungen der Liegenden-Bankkalk-, der Zementmergel- und Hangenden-Bankkalk-Formation (Abb. 28 und Kapitel 2.1.5). Im Vergleich zur Modell-Einheit jo2 besitzt die Modell-Einheit jo3 insgesamt nur eine mäßige Durchlässigkeit, die vor allem auf der Durchlässigkeit von Klüften im Gestein beruht.

Die Mächtigkeit schwankt zwischen 175 m und 250 m, wobei die hohen Mächtigkeitswerte im Nordwesten und geringere Werte (zwischen 150 m und 175 m) im Süden auftreten (Abb. 31). Die Basisfläche der Modell-Einheit jo3 befindet sich größtenteils in Tiefen zwischen 175 m NN und 75 m NN. Nur im Westen erreicht die Tiefenlage der Basisfläche Werte bis 250 m NN und im Osten gibt es eine kleine Fläche, wo die Tiefenwerte im Bereich von 50 m NN liegen (Abb. 31).

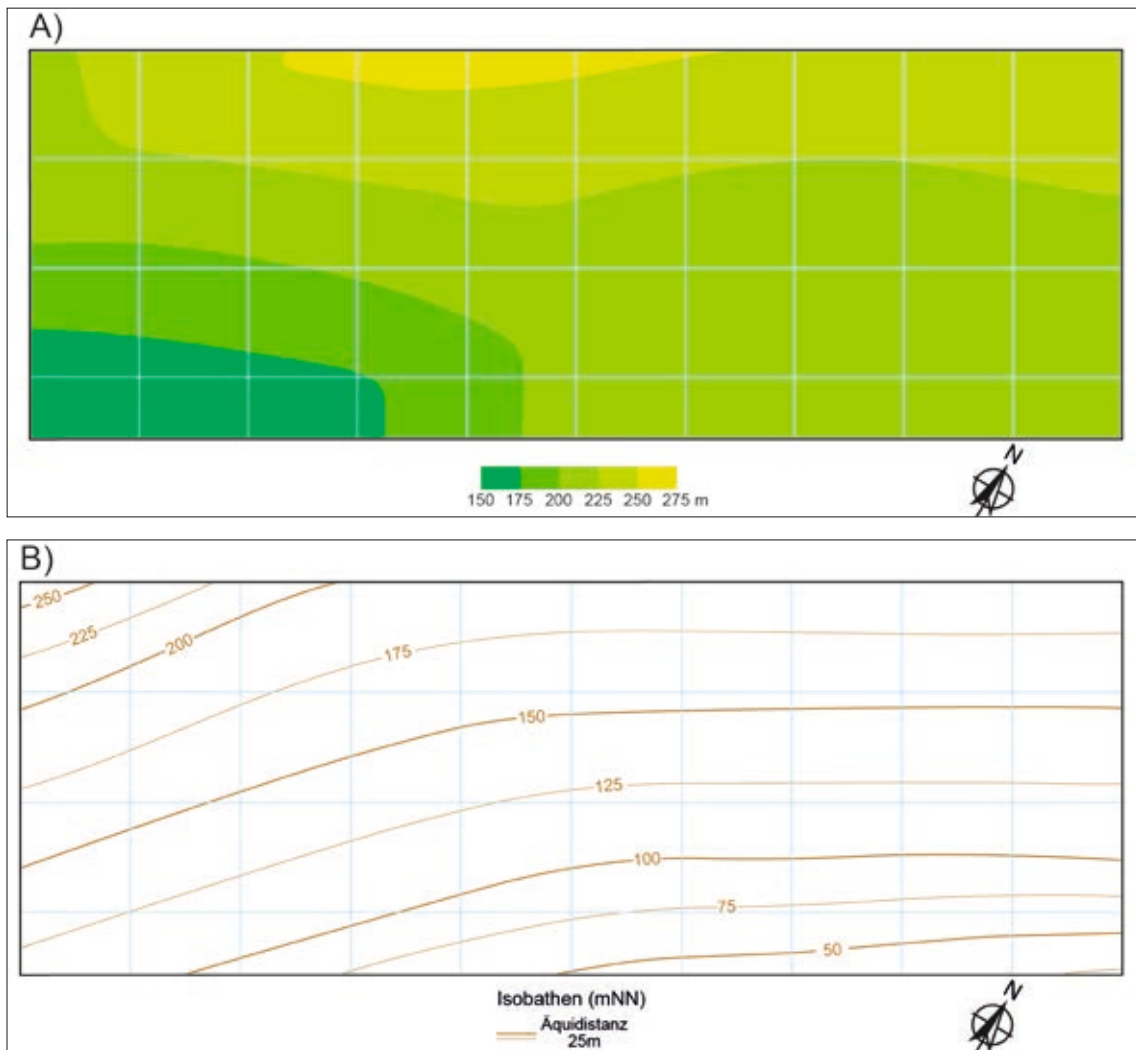


Abb. 31: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jo3 (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.15 Modell-Einheit tms

Die Modell-Einheit tms fasst die tertiären Ablagerungen im Gebiet des Referenzprofils SÜD zusammen. Die Lithologie der Modell-Einheit tms wird von einer Wechselfolge aus unterschiedlich kalkigen und tonigen, gering verfestigten Mergelsteinen sowie Kalksteinen (Süßwasserkalke) dominiert. In diese Schichtenfolge sind Tongesteine und geringmächtige Feinsandsteine eingeschaltet (vgl. Kapitel 2.1.6). Die flächenhaft verbreiteten und nur gering durchlässigen Ablagerungen der Modell-Einheit tms bewirken eine hydraulische Trennwirkung zwischen dem Aquifer der Modell-Einheit q und dem Karstgrundwasserleiter der Modell-Einheit jo2.

Die Mächtigkeitswerte der Modell-Einheit tms nehmen von Nordwesten nach Südosten zu, von etwa 50 m auf über 250 m. Im Modell variieren die Tiefenwerte der Basisfläche insgesamt um etwa 200 m. Im Westen liegen sie bei etwa 450 m NN und im Südosten bei 250 m NN (Abb. 32).

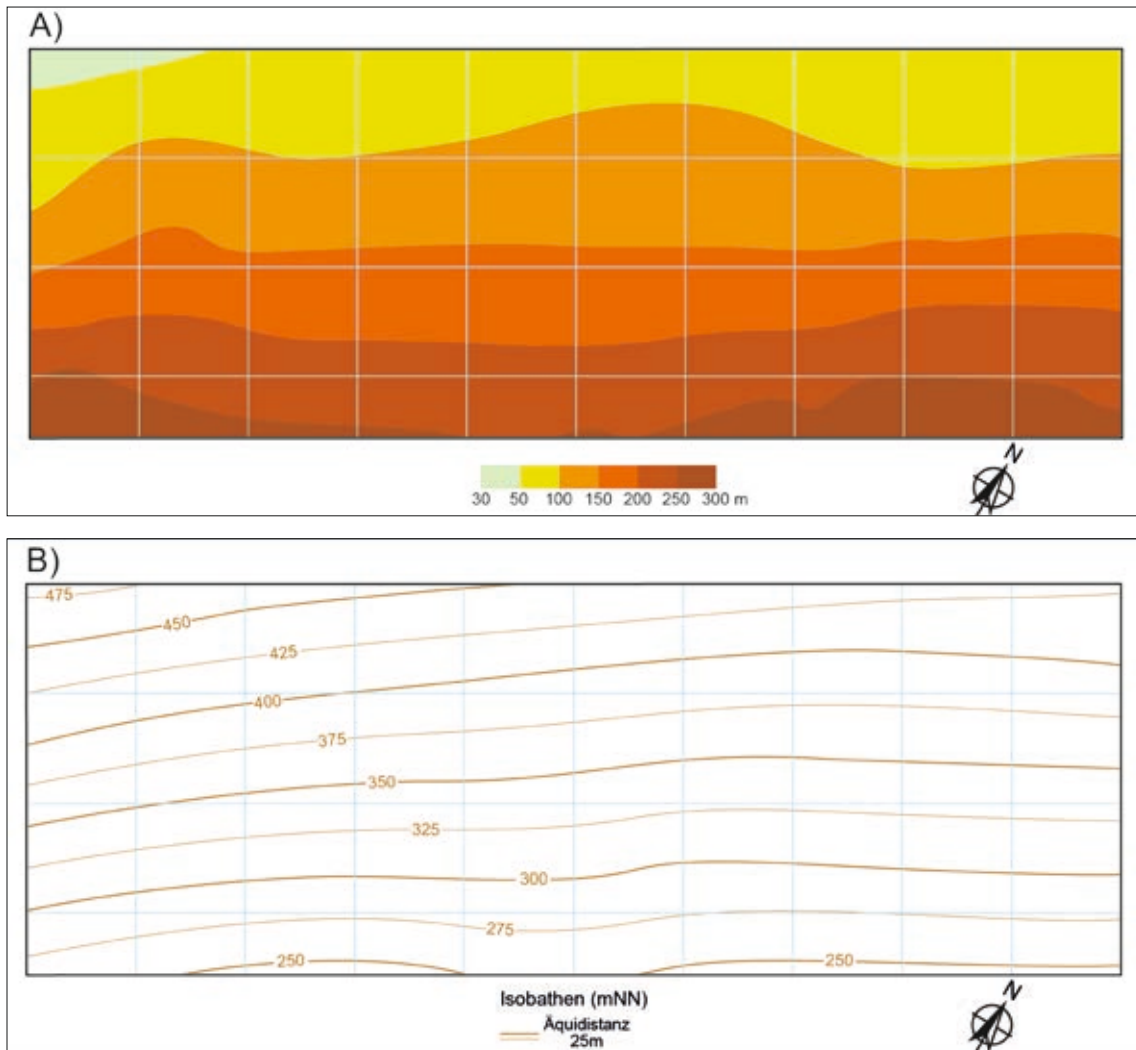


Abb. 32: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit tms (Gitterlinienabstand 2 km)

3.3.16 Modell-Einheit q

Die Modell-Einheit q besitzt im Endlagerstandortmodell SÜD keine flächendeckende Verbreitung und die lithologischen Eigenschaften sind mit denen der quartären Lockersedimente im Gebiet des Referenzprofils SÜD vergleichbar (vgl. Kapitel 2.1.7). Es handelt sich um meist gut sortierte, fluviatile Sande und Kiese, die einen wechselnden Feinsand- und Schluffanteil aufweisen sowie häufig einen großen Anteil an karbonatischen Geröllen besitzen. In den Lockersedimenten ist ein Porengrundwasserleiter mit hoher Durchlässigkeit

entwickelt. Es handelt sich um Wasser mit geringem Lösungsinhalt (480 mg/l). Nach ihrem chemischen Stoffbestand können sie als Ca-HCO₃-Wasser typisiert werden.

Für das Gebiet des Referenzprofils SÜD werden die Werte für die Mächtigkeit der quartären Ablagerungen auf kleiner 10 m bis maximal 15 m festgelegt (Abb. 33). Im Verbreitungsgebiet der Modell-Einheit q stehen die Ablagerungen an der Erdoberfläche an.

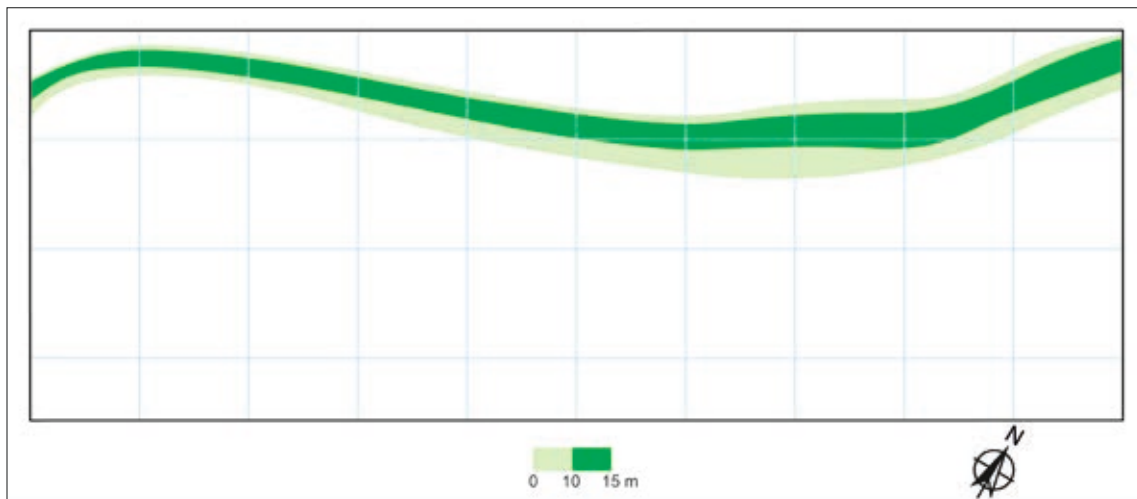


Abb. 33: Mächtigkeit der Modell-Einheit q (Gitterlinienabstand 2 km)

3.4 Temperatur-Tiefenverteilung und thermische Reife

Die regionalen Temperaturverhältnisse im Untergrund sind eine Randbedingung bei der thermischen Auslegung eines Endlagers (JOBMANN et al. 2007). Im Gebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation in Süddeutschland besitzt die Temperatur-Tiefenverteilung eine deutliche räumliche Variabilität (s. Abb. 34). In einer Tiefe von 1000 m unter Gelände kommen dort Temperaturbereiche von minimal 35 °C bis 40 °C sowie maximal von 55 °C bis etwa 60 °C vor, wobei für das Gebiet des Referenzprofils SÜD der Temperaturbereich von 50 °C bis 55 °C berücksichtigt wird. Im Zusammenhang mit einer mittleren Jahrestemperatur an der Erdoberfläche von etwa 9 °C (AGEMAR et al. 2013) wird ein konstanter geothermischer Tiefengradient für das Endlagerstandortmodell SÜD von 45 K/km festgelegt.

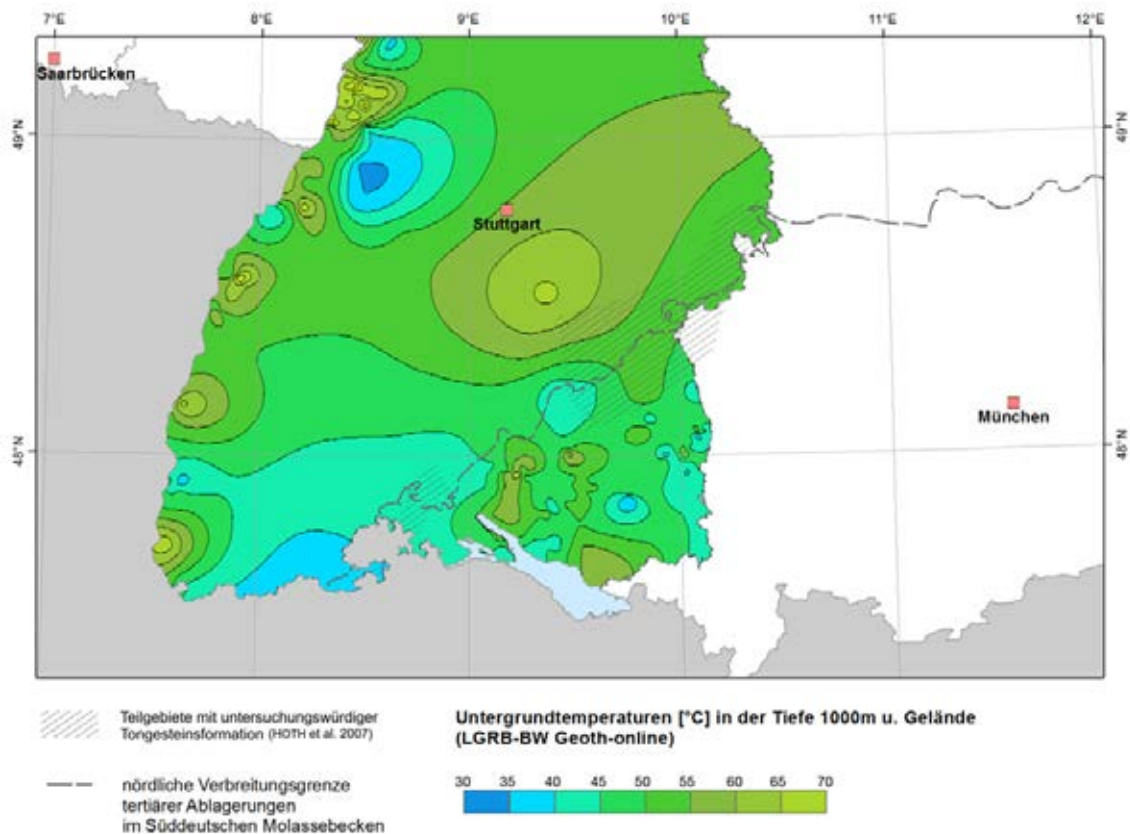


Abb. 34: Verteilung der Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg für die Tiefe 1000 m unter Gelände (GD-LGRB Stand 2013b)

Für Modell-Einheiten mit potenziellen Erdölmuttergesteinen (bspw. bituminöse Ton- und Mergelsteine in der Modell-Einheit ju2) ist festzustellen, dass das Gebiet des Referenzprofils SÜD sich nördlich und außerhalb des Erdöl-/Erdgas-Lagerstätteengebiets befindet (Abb. 7). Dies gilt ebenfalls für das gesamte Gebiet der untersuchungswürdigen Tongesteinsinformation in Süddeutschland (vgl. HOTH et al. 2007). Im Gebiet der Erdöl-/Erdgas-Lagerstätten (z. B. Feld Fronhofen, Feld Pfullendorf) besitzen die potenziellen Erdölmuttergesteine (Posidonienschiefer-Formation, Opalinuston-Formation) einen zu geringen Reifegrad für eine Ölbildung (BRINK et al. 1992). So liegen die Werte der Vitrinitreflexion (Reifeparameter für den Inkohlungsgrad des organischen Materials im Gestein) für die Sedimente des Mitteljura im Feld Pfullendorf bei 0,5 % R_r , im Feld Fronhofen bei 0,54 % R_r bis 0,55 % R_r und im Feld Mönchsrot bei 0,55 % R_r (WEHNER et al. 1983). Für die Entstehung der vorhandenen Lagerstätten wird daher eine Migration der Kohlenwasserstoffe seit dem Miozän aus dem weiter südlich, tiefer versenkten Beckenbereich angenommen (BOIGK 1981, WEHNER et al. 1983, DILL et al. 2008). Anhand der Bohrung Benken (Nordschweiz) sind ähnliche Vitrinitreflexionswerte für die Opalinuston-Formation (0.52 % R_r bis 0.58 % R_r) ermittelt worden (NAGRA 2002). Auch in der Schwäbischen Alb deuten die Werte der Rock-Eval-Pyrolyse und die Vitrinitreflexionswerte für die Posidonienschiefer-Formation auf eine vergleichbar geringe Reife der organischen Substanz hin (ROEHL & SCHMID-ROEHL 2005).

Somit hat die organische Substanz der mesozoischen Ablagerungen in den genannten Lokationen einen sehr ähnlichen Inkohlungsgrad erreicht, was auf eine vergleichbare Temperaturgeschichte hindeutet. Nach den Untersuchungen der organischen Geochemie an der Bohrung Benken (Nordschweiz) hat die Opalinuston-Formation dort einen maximalen Temperaturbereich von 59 °C bis 78 °C bei der Versenkung erfahren (NAGRA 2002).

Im Vergleich zu den Werten, die durch die Untersuchungen der organischen Bestandteile ermittelt wurden, ergaben sich aus Modellrechnungen zur Beckensimulation im Raum Benken Maximaltemperaturen von 81 °C bis 93 °C (NAGRA 2002). Die hierfür grundlegende Rekonstruktion der Sedimentationsgeschichte beinhaltet eine Abschätzung der Mächtigkeit erodierter Schichten. Für das Gebiet wurden Erosionswerte für die Ablagerungen des jüngsten Oberjura und der Kreide von 300 m bis 700 m und für die jungtertiäre Erosion von 700 m bis 1100 m angenommen (NAGRA 2002). Dagegen sind nach LEMCKE (1974) im Bereich von Pfullendorf Erosionswerte von insgesamt nur etwa 200 m bis 250 m anzunehmen.

Auf Basis des geschilderten Sachverhaltes zur Erdöl-/Erdgas-Genese wird für das Endlagerstandortmodell SÜD festgelegt, dass es in den Schichten mit Erdölmuttergesteinseigenschaften bisher nicht zur Entstehung thermisch generierte Kohlenwasserstoffe kam. Durch mikrobielle Prozesse entstandene Kohlenwasserstoffe (z. B. biogene Gase) können aber im Endlagerstandortmodell SÜD in geringer Konzentration auftreten. Für die Festlegung der Temperaturgeschichte werden die Werte aus den Untersuchungen der organischen Geochemie (Temperaturmaximum im Bereich von 59 °C bis 78 °C) für das Gebiet des Referenzprofils SÜD übernommen.

4 Zusammenfassung

Der Bericht dokumentiert die geologischen Verhältnisse eines Endlagerstandortmodells an einem generischen Standort in Süddeutschland. Zusammen mit dem Endlagerstandortmodell NORD (REINHOLD et al. 2013) stehen für die Methodenentwicklung und die Anwendung eines Sicherheitsnachweises für HAW-Endlagerstandorte im Tongestein (Projekt AnSichT) somit zwei Beschreibungen von generischen Standorten zur Verfügung, die voneinander abweichende geologische Verhältnisse aufweisen.

Die Festlegungen für das Endlagerstandortmodell SÜD basieren auf der Beschreibung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Gebiet des Referenzprofils SÜD (Kapitel 2). Entsprechend der dort dargestellten struktureologischen Stockwerksgliederung wurden die lithologischen Merkmale folgender stratigraphischer Einheiten beschrieben: Muschelkalk, Keuper, Unterjura, Mitteljura, Oberjura, Tertiär und Quartär. Zusammenfassend

kann die sedimentäre Abfolge des Mesozoikums durch die Sedimentation in einem Schelfbereich beschrieben werden, in dem sich vorwiegend karbonatische und tonige bis mergelige sowie untergeordnet sandige Ablagerungen akkumulierten. Nach einer Phase der Hebung und Erosion (Kreide bis Alt-Tertiär) wurden in dem sich entwickelnden orogenen Vorlandbecken der Alpen Molassesedimente abgelagert. Die im Vergleich zu den mesozoischen Sedimenten weniger verfestigten Molassesedimente sind im Gebiet des Referenzprofils SÜD Teil der Unteren Süßwassermolasse. Die tertiäre Versenkung endete im Jungtertiär und seitdem befindet sich das Gebiet des Referenzprofils SÜD in der post-molassischen Hebungs- und Erosionsphase.

Das etwa 140 km² große generische Endlagerstandortmodell SÜD wurde mit dem Programm openGEO modelliert und hat eine Erstreckung in Richtung SW-NE von zirka 20 km und in Richtung NW-SE von zirka 7 km (Abb. 35 und Abb. 36). Die topographischen Höhenwerte variieren zwischen etwa 475 m NN und 550 m NN, wobei die minimalen und maximalen Werte geringfügig darunter bzw. darüber liegen können. Am Endlagerstandortmodell SÜD wird eine geringe Hebungstendenz angenommen, die im Bereich zwischen 0,01 mm/a und 0,1 mm/a liegt.

Die Basis des Endlagerstandortmodells SÜD liegt größtenteils in Tiefen zwischen 650 m u. NN und 550 m u. NN und entspricht dem Top des Grundgebirges. Die mehr als 1000 m mächtige Schichtenfolge wurde in 16 Modell-Einheiten aufgeteilt (Abb. 35 und Abb. 36).

Wirtsgestein ist die Modell-Einheit jm1, die aus den tonigen Ablagerungen der Opalinuston-Formation besteht. Das Wirtsgestein ist ein gut verfestigter, glimmerführender, siltiger Tonstein, der eine geringe Variabilität der Fazies und der lithologischen Eigenschaften aufweist.

Die einzelnen Modell-Einheiten sind meist wenige Zehnermeter mächtig, nur die Modell-Einheiten jm1, jo1 und tms sind deutlich über 100 m mächtig (Abb. 35). Ein Merkmal fast aller Modell-Einheiten ist die Neigung ihrer Basisflächen von maximal etwa 1 ° in Richtung Südosten (Abb. 36). Dadurch unterscheiden sich die Werte der minimalen und maximalen Tiefenlage einer Basisfläche im Endlagerstandortmodell SÜD um etwa 100 m (Abb. 36). Nur die Tiefenwerte der Basisfläche der Modell-Einheit tms unterscheiden sich in der Größenordnung von 200 m, was einer Neigung von etwa 1,5° in Richtung Südosten entspricht.

Die Modell-Einheiten werden als relativ homogen ausgebildete und regional gut charakterisierbare geologische Einheiten definiert. Obwohl durch regionale Fazieswechsel oder aufgrund der Lagerungsverhältnisse eine Variation der Parameterwerte im Gebiet des Referenzprofils SÜD im Rahmen natürlicher Schwankungen gegeben ist (vgl. JAHN et al. 2016), werden für das Modell die hydraulischen und gesteinsphysikalischen

Parameter durch einen Wert für die jeweilige Modell-Einheit repräsentiert (vgl. MAßMANN 2016). Eine grundlegende Annahme für das generische Endlagerstandortmodell SÜD ist die Erwartung, dass mögliche vorhandene Störungen und Klüfte die Entwicklung des Endlagersystems nicht negativ beeinträchtigen (Kapitel 3.2).

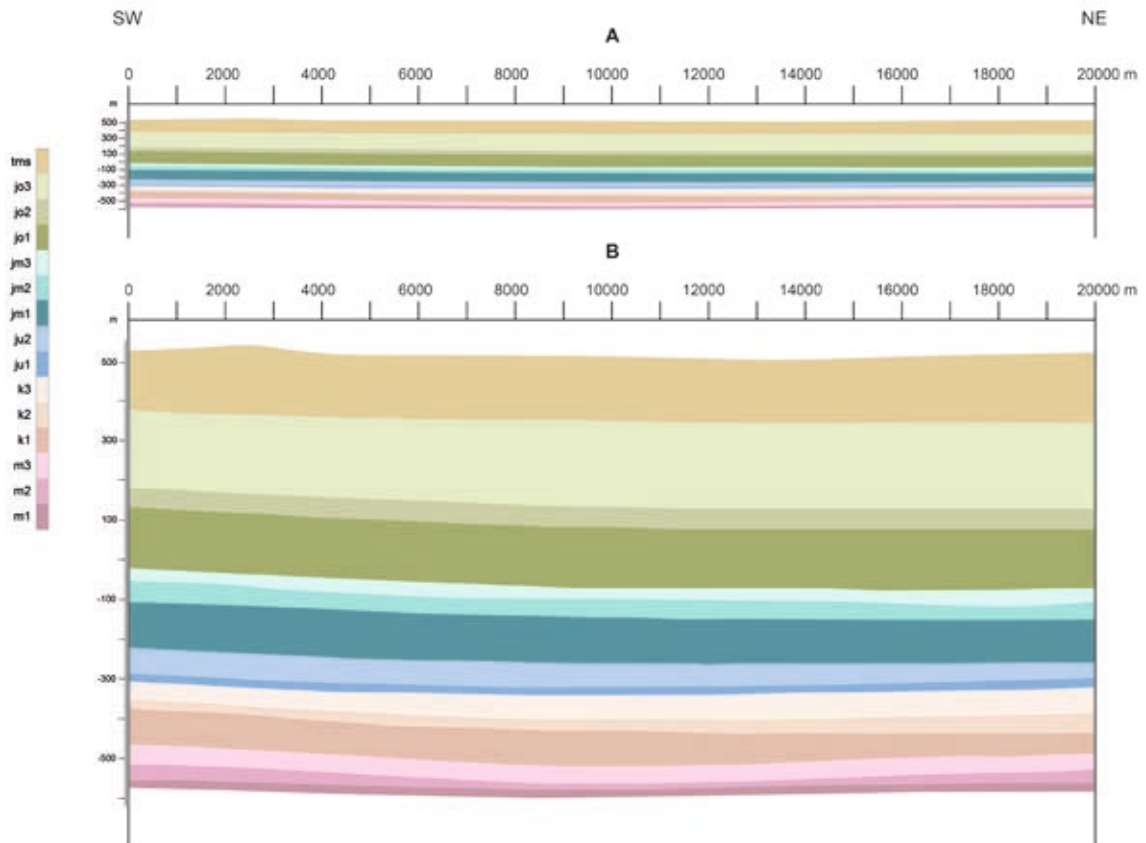


Abb. 35: Geologischer Schnitt Richtung SW-NE durch das Endlagerstandortmodell SÜD. Schnitt A ohne Überhöhung, Schnitt B mit 5-facher Überhöhung

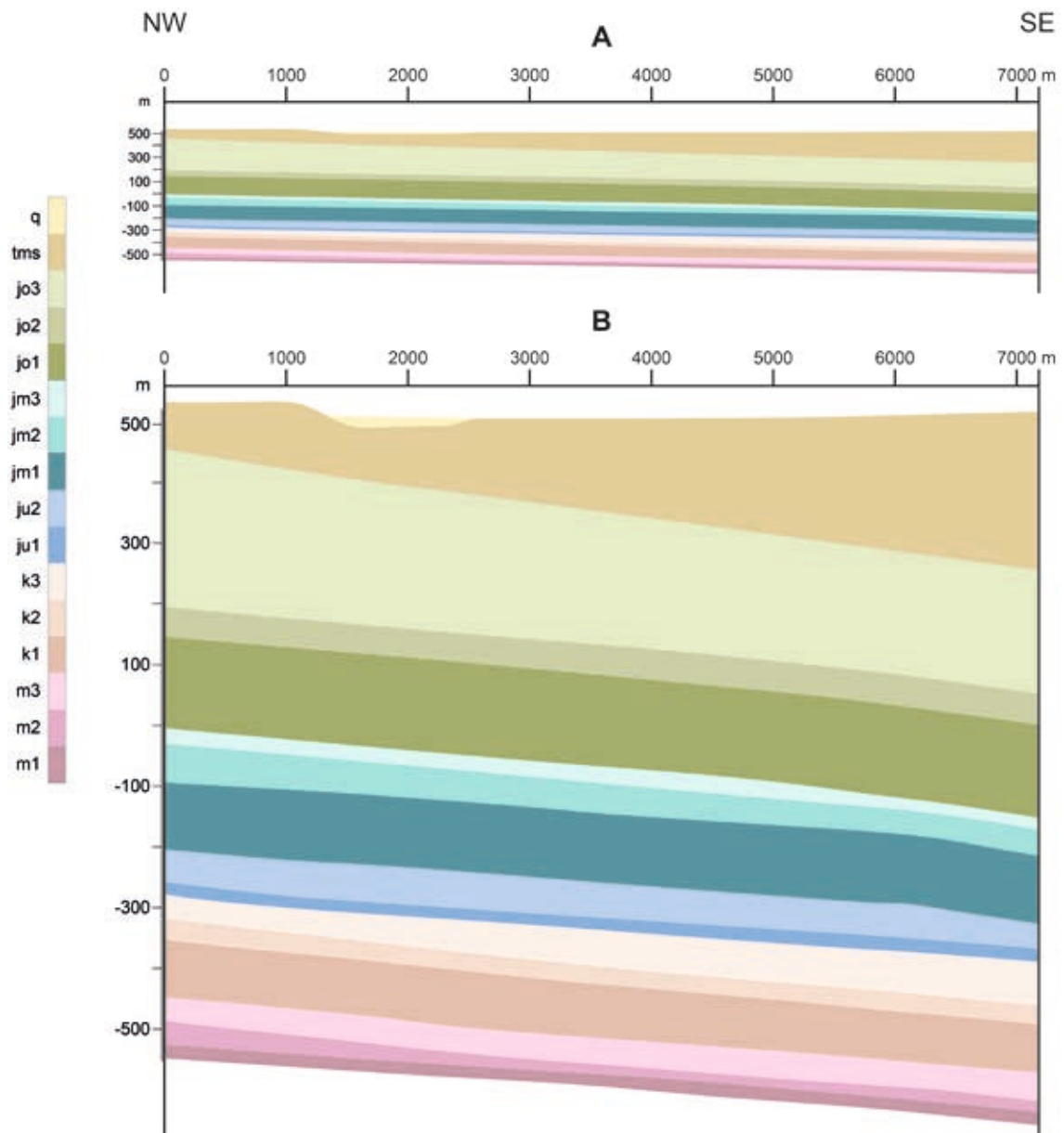








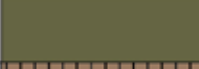









Abb. 36: Geologischer Schnitt Richtung NW-SE durch das Endlagerstandortmodell SÜD. Schnitt A ohne Überhöhung, Schnitt B mit 5-facher Überhöhung

Die vorrangigen lithologischen Ausprägungen der Modell-Einheiten bestimmen wesentlich die hydrogeologischen Verhältnisse im Endlagerstandortmodell SÜD (vgl. Abb. 37). Die durch Ton- und Tonmergelsteine dominierten Modell-Einheiten (inklusive des Wirtsgesteins) gelten als Grundwassergeringleiter mit einer außerordentlich geringen Durchlässigkeit (kleiner 10^{-10} m/s). Die höhere Durchlässigkeit der gröber klastischen Sedimentgesteine (Sandstein) und der Karbonatgesteine (Kalk-, Dolomitstein) beruht auf der hydraulischen Wirksamkeit von Klüften und dem effektiven Porenraum. Geklüftete Bereiche treten insbesondere in den Modell-Einheiten auf, die vorrangig durch Kalkstein oder Dolomitstein aufgebaut sind. Aber auch in den porösen Sandstein-Schichten des Modells sind Klüfte

hydraulisch wirksam. Die hohe Durchlässigkeit der Modell-Einheit jo2 ist durch eine zusätzliche starke Verkarstung begründet.

Modell-Einheit	Lithologische Ausprägung	Hohlraum-Typ	Durchlässigkeit
q	Sande, Kiese	Poren	
tms	Mergelstein, wechselnde Anteile von Kalk und Ton, Kalkstein (Süßwasserkalke)	Poren	
jo3	Kalkstein, Mergelstein (geschichtete Fazies)	Kluft	
jo2	Kalkstein, Dolomitstein (Massenkalk-Fazies)	Karst, Kluft, Poren	
jo1	Kalkstein, Kalkmergelstein, Mergelstein (geschichtete Fazies)	Kluft	
jm3	Tonmergelstein, einzelne Kalkstein-Lagen		
jm2	eisenreicher Sandstein (tonig, kalkig), Tongestein, Tonmergelstein	Kluft, Poren	
jm1	Tongestein		
ju2	Tonmergelstein, Mergelstein		
ju1	tonige Sandsteine, sandige Tonmergelgesteine, einzelne Kalkstein-Lagen		
k3	Tongestein, Mergelstein, Karbonatkonkretionen		
k2	Sandstein, untergeordnet Tongestein	Poren, Kluft	
k1	Tongestein, feinsandige Schluff-Tongesteine, untergeordnet Dolomitstein und sandige Lagen		
m3	Dolomitstein	Kluft, Poren	
m2	Anhydrit, einzelne Tongesteinslagen		
m1	toniger, fein- bis grobkörniger arkosischer Sandstein	Kluft, Poren	

Hydraulische Eigenschaften









Durchlässigkeit	Grundwasserleiter				Grundwassergeringleiter			
	sehr hoch	hoch	mittel	mäßig	gering	sehr gering	äußerst gering	
k _f -Wert								
Grenzen (m/s)	>10 ⁻²	>10 ⁻³ - 10 ⁻²	>10 ⁻⁴ - 10 ⁻³	>10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴	>10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶	>10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁷	>10 ⁻¹⁰ - 10 ⁻⁹	<10 ⁻¹⁰

Abb. 37: Schematische Zusammenstellung der hydraulischen Eigenschaften der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell SÜD, ohne die Berücksichtigung der Anisotropie von Sedimentgesteinen Klassifizierung in Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter nach GRIMMELMANN et al. (1997), ergänzt um den k_f-Wert 10⁻¹⁰

Die Gesamtkonzentration an gelösten Stoffen in den Wässern nimmt von der obersten Modell-Einheit (etwa 0,5 g/l) zur untersten Modell-Einheit (10 g/l) zu. Dabei wechselt der Wasser-Typ nach dem gelösten chemischen Stoffbestand vom Ca-HCO₃- (Modell-Einheit q) über Ca-Mg-HCO₃ (Modell-Einheit jo2) hin zum Na-Cl-Wasser (Modell-Einheit m3).

Für das Endlagerstandortmodell SÜD beträgt der Temperaturgradient 45 K/km und die mittlere Jahrestemperatur an der Erdoberfläche etwa 9 °C. Insbesondere in den tonigen Schichten sind organische Substanzen häufig charakteristische Nebengemengteile der Tongesteine. Für das Endlagerstandortmodell SÜD wird insgesamt eine kontinuierliche Zunahme des Reifegrads der bituminösen Schichten (z. B. Teil der Modell-Einheit ju2) mit der Tiefe angenommen, der jedoch nicht ausreichend für eine thermokatalytische Erdölbildung ist. Die Informationen zur Versenkungsgeschichte deuten auf ein Temperaturmaximum im Bereich von 59 °C bis 78 °C für das Wirtsgestein (Kapitel 3.4).

Die dargestellten geologischen Verhältnisse des Modells und die gewählten Parameter für Modellrechnungen sind ggf. an neue Erkenntnisse anzupassen, die sich im Verlaufe des Projektes ergeben können. Sollte eine solche Anpassung erfolgen, so wird dies in den neuen Berichten dokumentiert.

Literaturverzeichnis

- AG Deponien (1997): Ad hoc Arbeitsgruppe Deponien der Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesrepublik Deutschland: Geowissenschaftliche Rahmenkriterien zur Standorterkundung von Deponien. – Geol. Jb. G4: 98 S.; Hannover (Schweizerbart).
- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd). – 260 S.; Köln.
- BACHMANN, G. H. & MÜLLER, M. (1996): Die Entwicklung des Süddeutschen Molassebeckens seit dem Variszikum. – Eine Einführung. – Z. geol. Wiss., 24 (1/2): S. 3-20.
- BayStMWIVT [Hrsg.] (2010): Bayerischer Geothermieatlas. – Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, 2. Aufl.: 104 S.; München.
- BERTLEFF, B., HAMMER, W., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & WERNER, J. (1987): Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. Eine Übersicht. – Z. dt. geol. Ges., 138: S. 411-423; Stuttgart (Schweizerbart).
- BERTLEFF, B., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G., LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 30: 27-116.
- BERTLEFF, B. & WATZEL, R. (2002): Tiefe Aquifersysteme im südwestdeutschen Molassebecken – Eine umfassende hydrogeologische Analyse als Grundlage eines zukünftigen Quantitäts- und Qualitätsmanagements. – Abh. L.-Amt f. Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, 15: 75-90; Freiburg i. Br.
- BEUTLER, G., HAUSCHKE, N. & NITSCH, E. (1999): Faziesentwicklung des Keupers im Germanischen Becken. – In: Hauschke, N. & Wilde, V. [Hrsg.]: Trias - Eine ganz andere Welt: 129-174; München (Pfeil).
- BGR-online (Stand 2013): Hydrogeologische Großräume und Räume – Eine Zusammenarbeit der Staatlichen Geologischen Dienste der Länder und der BGR. – http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Huek200/grossraeume_raeume_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- BIRNER, J., FRITZER, T., JODOCY, M., SAVVATIS, A., SCHNEIDER, M. & STOBER, I. (2012): Hydraulische Eigenschaften des Malmaquifers im Süddeutschen Molassebecken und ihre Bedeutung für die geothermische Erschließung. – Z. geol. Wiss., 40 (2/3): 133-156.

- BOIGK, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland. – 330 S.; Stuttgart (Enke).
- BOSSART, P. & THURY, M. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. – Rep. Swiss Geol. Surv., 3: 194; Wabern.
- BRINK, H.-J., BURRI, P., LUNDE, A. & WINHARD, H. (1992): Hydrocarbon habitat and potential of Swiss and German Molasse Basin; a comparison. – *Eclogae Geologicae Helveticae*, 85 (3): 715-732.
- CLAUSER, C. DEETJEN, H., HARTMANN, A., HÖHNE, F., RATH, V., RÜHAAK, W., SCHELLSCHMIDT, R. & ZSCHOCKE, A.: (2002): Erkennen und Quantifizieren von Strömung: Eine geothermische Rasteranalyse zur Klassifizierung des tiefen Untergrundes in Deutschland hinsichtlich seiner Eignung zur Endlagerung radioaktiver Stoffe.– Endbericht zum Auftrag 9X0009-8390-0 des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS). – Applied Geophysics and Geothermal Energy E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen: 159 S.; Aachen.
- DAHM, V., KUPILAS, B., ROLAUFFS, P., HERING, D., HAASE, P., KAPPES, H., LEPS, M., SUNDERMANN, A., DÖBBELT-GRÜNE, S., HARTMANN, C., KOENZEN, U., REUVERS, C., ZELLMER, U., ZINS, C. & WAGNER, F. (2014): Strategien zur Optimierung von Fließgewässer-Renaturierungsmaßnahmen und ihrer Erfolgskontrolle. - Umweltbundesamt [Hrsg.]: UBA Texte 43/2014, Forschungskennzahl 3710 24 207, 178 S.
- DILL, H. G., SACHSENHOFER, R. F., GRECLA, P., SASVARI, T., PALINKAS, L. A., BOROJEVIC-SOSTARIC, S., STRMIC-PALINKAS, S., PROCHASKA, W., GARUTI, G., ZACCARINI, F., ARBOUILLE, D. & SCHULZ, H.-M. (2008): Fossil fuels, ore and industrial minerals. – In: McCann, T. [Hrsg.]: *The Geology of Central Europe – Volume 2: Mesozoic and Cenozoic: 1341-1449*; London (The Geological Society).
- DOPPLER, G., HEISSIG, K. & REICHENBACHER, B. (2005): Die Gliederung des Tertiärs im süd-deutschen Molassebecken. – *Newsl. Stratigr.*, 41 (1-3): 359-375; (Schweizerbart).
- ETZOLD, A. & SCHWEIZER, V. (2005): Der Keuper in Baden-Württemberg. – *Cour. Forsch.-Inst.*, 253: 214-258.
- FEHN, C., WIRSING, G. & ENGESSER, W. (2010): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland) - Erstellung von Potenzialkarten in Baden-Württemberg. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden Württemberg, Endbericht: 115 S.; Freiburg i. Br.

- FEIST-BURKHARDT, S., GÖTZ, A. E., SZULC, J., BORKHATARIA, R., GELUK, M., HAAS, J., HORNING, J., JORDAN, P., KEMPF, O., MICHALIK, J., NAWROCKI, J., REINHARDT, L., RICKEN, W., RÖHLING, H., RÜFFER, T., TÖRÖK, A. & ZÜHLKE, R. (2008): Triassic, In: McCann, T. [Hrsg.]: The Geology of Central Europe – Volume 2: Mesozoic and Cenozoic. – 749-821; London (The Geological Society).
- FRANZ, M. & NITSCH, E. (2009): Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg. – LGRB-Informationen, 22: 123-146, Freiburg i. Br.
- FRANZ, M., SIMON, T. & MEYER, R. K. F. (2001): Die Termalwasserbohrung „Donauterme“ – Neu Ulm. – Geologica Bavarica, 106: 81-106.
- FREUDENBERGER, W. & SCHWERD, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000. – Bayerisches Geologisches Landesamt, 4. Aufl.: 329 S.; München.
- FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.] (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. – 1141 S.; (Schweizerbart).
- GD-LGRB (2011): Säulenprofil der Schichtenfolge in Baden-Württemberg. – Regierungspräsidiums Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau [Hrsg.] – http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/download_pool/Saeulenprofil_BW.pdf.
- GD-LGRB (Stand 2013a): Geologisches 3D-Landesmodell 1 : 500 000, Geodatendienst (04.09.2013). – Regierungspräsidiums Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau [Hrsg.]: Kartendienst-Layer Name: „LGRB-BW 3D-Landesmodell 1 : 500000“, ID: LGRB_MAPSERVER_lgrb_gu500_ov; Freiburg i. Br. – http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/lgrb_mapserver.
- GD-LGRB (Stand 2013b): Geothermische Übersichtskarten, Geodatendienst (04.09.2013). – Regierungspräsidiums Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau [Hrsg.]: Kartendienst-Layer Name: „LGRB-BW GEOTH: Geothermische Übersichtskarten 1:1000000“, ID: LGRB_MAPSERVER_lgrb_uek350_geothermie_ov; Freiburg i. Br. – http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/lgrb_mapserver.
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. [Hrsg.] (2011): Geologie von Baden-Württemberg. – 5. Aufl.: 627 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GRIMMELMANN, W., HANNEMANN, M., HECHT, G., MUELLER, A., PLUM, H., PRETSCHOLD, H.-H., SCHARPFF, H.-J. & SCHLIMM, W. (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung – AD-HOC-Arbeitsgruppe Hydrogeologie. – Geol. Jb., G2: 3-157; Hannover.

- GROSCHOPF, R. & VILLINGER, E. (2002): Erläuterungen zur Geologischen Übersichtskarte von Baden-Württemberg 1:1000000. – Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg: 153 S.; Freiburg i. Br.
- HAACKH, F., LANG, U., SCHNECK, A., SANZENBACHER, J., KOPP, A., EMMERT, M., EISELE, W., MAIER, A. & KEIM, B. (2004): Optimierung des Gebietswasserhaushalts in Wassergewinnungsgebieten. – Zweckverband Landeswasserversorgung und Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner, Endbericht: 304; Stuttgart.
- HAGEDORN, H. & SIMON, T. (2005): Der Muschelkalk in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. – Newsl. Stratigr., 41 (1-3): 143-158; (Schweizerbart).
- HEKEL, U. (1992): Forschungsprojekt „Gebirgseigenschaften mächtiger Tonsteinserien“ (FGmT). – Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (neu LGRB), Textband: 190 S.; Freiburg.
- HOTH, P., WIRTH, H., REINHOLD, K., BRÄUER, V., KRULL, P. & FELDRAPPE, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 118 S.; Berlin / Hannover.
- JAHN, S., MRUGALLA, S. & STARK, L. (2016): Projekt AnSichT - Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für einen HAW-Endlager im Tonstein. Endlagerstandortmodell SÜD - Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover.
- JOBMANN, M., UHLIG, L., AMELUNG, P., BILLAUX, D., POLSTER, M. & SCHMIDT, H. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland (GENESIS). – DBE TECHNOLOGY GmbH, Abschlussbericht: 92 S.; Peine.
- JODOCY, M. & STOBER, I. (2009): Geologisch-geothermische Tiefenprofile für den südwestlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. – Z. dt. geol. Ges., 160 (4): 359-366.
- LEMCKE, K. (1973): Zur nachpermischen Geschichte des nördlichen Alpenvorlandes. – Geologica Bavarica, 69: 5-48.
- LEMCKE, K. (1974): Vertikalbewegungen des vormesozoischen Sockels im nördlichen Alpenvorland vom Perm bis zur Gegenwart. – Eclogae Geologicae Helvetiae, 67 (1): 121-133.

- LEMCKE, K. (1975): Molasse und vortertiärer Untergrund im Westteil des süddeutschen Alpenvorlandes. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver. N.F., 57: 87-115.
- LIPPMANN, F. & ZIMMERMANN, M. (1983): Die Petrographie des Knollenmergel, Mittlerer Keuper, Trias. – Geologische Rundschau, 72 (3): 1105-1133.
- MAßMANN, J. (2016): Projekt AnSichT - Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für einen HAW-Endlager im Tonstein. Endlagerstandortmodell SÜD - Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover.
- MENNING, M. & HENDRICH, A. [Editor] (2005): Erläuterungen zur Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2005 (ESTD 2005). – Deutsche Stratigraphische Kommission, Newsl. Stratigr., 41 (1-3): 405 S.; (Schweizerbart).
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KAHLER, H. (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). – Geol. Jb. A115: 77 S.; Hannover.
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KAHLER, H. (1996): Gesteinsfolge des Deckgebirges nördlich der Donau und im Molasseuntergrund – Jura.– In: Freudenberger, W. & Schwerd, K.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500.000. – Bayerisches Geologisches Landesamt, 4. Aufl.: 90-111.; München.
- MURAWSKI, H. (1968-1991): Deutsches Handwörterbuch der Tektonik. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg]: Registerband Lfg. 1.– 10., Bearb. Dt. Tekton. Komm. & DGG; Hannover.
- NAGRA (1994): Sedimentstudie Zwischenbericht 1993. Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 94-10: 76 S.; Wettingen.
- NAGRA (2001): Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht. – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 00-01: 288 S.; Wettingen.
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 02-03: 659 S.; Wettingen.

- NITSCH, E. & ZEDLER, H. (2009): Oberkarbon und Perm in Baden-Württemberg. – LGRB-Informationen, 22: 7-102.
- PLUM, H., ONDREKA, J. & ARMBRUSTER, V. (2008): Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg. – LGRB-Informationen, 20: 106 S.; Freiburg i. Br.
- POTTGIESSER, T. & SOMMERHÄUSER, M. (2008): Beschreibung und Bewertung der deutschen Fließgewässertypen. - Steckbriefe und Anhang.
- PREUSS, H. [Editor] (2009): Symbolschlüssel Geologie – Symbole für die Dokumentation und Verarbeitung geologischer Feld- und Aufschlussesdaten. – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 2. Auflage der digitalen Fassung; Hannover.
- REINHOLD, K. & SÖNNKE, J. (2012): Geologische Referenzprofile in Süd- und Norddeutschland als Grundlage für Endlagerstandortmodelle in Tongestein. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 20 S.; Hannover.
- REINHOLD, K., JAHN, S., KÜHNLENZ, T., PTOCK, L. & SÖNNKE, J. (2013): Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT) – Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 71 S.; Hannover.
- REUTER, F., KLENGEL, K. & PASEK, J. (1996): Ingenieurgeologie. – 3. Aufl.: 603 S.; Leipzig (Dt. Verl. für Grundstoffindustrie).
- RIEGRAF, W. (1985): Mikrofauna, Biostratigraphie und Fazies im Unteren Toarcium Südwestdeutschlands und Vergleiche mit benachbarten Gebieten. – Tübinger mikropaläont. Mitt., 3: 1-232.
- ROEHL, H. J. & SCHMID-ROEHL, A. (2005): Lower Toarcian (upper Liassic) black shales of the Central European epicontinental basin; a sequence stratigraphic case study from the SW German Posidonia Shale. – Society for Sedimentary Geology, Special Publication, 82: 165-189.
- RUPF, I. & NITSCH, E. (2008): Das geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. – LGRB-Informationen, 21: 81 S., Freiburg i. Br.
- SCHULZ, U. & DIEPOLDER, G.W. (2010): Erstellung von Potenzialkarten und Charakterisierung von Speicherstrukturen im Freistaat Bayern. – Bayerisches Landesamt für Umwelt, Schlussbericht, 71 S.; München.

- STARK, L. (2014): Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland - ohne Endlagereinfluss. Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (AnSichT). – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht: 152 S.; Hannover.
- STETTNER, G., ROHRMÜLLER, J. & HOTH, K. (2001): Untergrund Süddeutsche Scholle südlich der MKZ (16) (Vorsilur unter dem Süddeutschen Deckgebirge). – Cour. Forsch.-Inst., 234: 65-76.
- STOBER, I. & JODOCY, M. (2011): Geothermische Nutzhorizonte im westlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. – Z. geol. Wiss., 39 (3/4): 161-172, Berlin.
- STOBER, I., JODOCY, M. & HINTERSBERGER, B. (2012): Vergleich von Durchlässigkeiten aus unterschiedlichen Verfahren - Am Beispiel des tief liegenden Oberen Muschelkalk-Aquifers im Oberrheingraben und westlichen Molassebecken. – Z. geol. Wiss., 40 (1): 1-18, Berlin.
- STOBER, I. & VILLINGER, E. (1997): Hydraulisches Potential und Durchlässigkeit des höheren Oberjuras und des Oberen Muschelkalks unter dem baden-württembergischen Molassebecken. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, 37: 77-96; Freiburg i. Br.
- STRASSER, M. (2011): Höhlen der Schwäbischen Alb als Pegelschreiber für Flussgeschichte und Tektonik in Südwestdeutschland seit dem Miozän. – Universität Stuttgart, Dissertation: 107 S.; Stuttgart.
- STRASSER, M., STRASSER, A., PELZ, K. & SEYFRIED, H. (2009): A mid Miocene to early Pleistocene multi-level cave as a gauge for tectonic uplift of the Swabian Alb (Southwest Germany). – Geomorphology, 106 (1-2): 130-141.
- WaBoA (2012): WaBoA Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. – Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, 4. erweiterte Ausgabe.
- WEHNER, H., HUFNAGEL, H., KUCKELKORN, K., SCHOELL, M. & TESCHNER, M. (1983): Zur Kohlenwasserstoffgenese im deutschen Alpenvorland. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 164 S.; Hannover.
- ZIEGLER, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. – Shell Internat. Petrol. Maatsch. [Hrsg.]: 239 S.; Amsterdam (Elsevier).

Abkürzungsverzeichnis

AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AG Deponien	Ad hoc Arbeitsgruppe Deponien der Staatlichen Geologischen Dienste der Bundesrepublik Deutschland
AnSicht	F&E-Projekt „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“
BayStMWIVT	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie
GENESIS	F&E-Projekt „Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland“
GD-LGRB	Geodatendienst des Regierungspräsidiums Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
HAW	high active waste (hoch radioaktiver Abfall)
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert
KW	Kohlenwasserstoff(e)
NAGRA	„Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle“, verantwortlich für die sichere Endlagerung der in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle und die damit verbundene Forschungs- und Projektierungsarbeiten
R_r	Vitrinitreflexion (Reifeparameter für den Inkohlungsgrad des organischen Materials im Gestein)
TDS	total dissolved solids (Gesamtlösungsinhalt)
TOC	total organic carbon (Gesamter organischer Kohlenstoffgehalt)
WaBoA	Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Sukzessive Verlagerung der maximalen Verbreitung mesozoischer Schichtenfolgen Richtung Südosten im Gebiet des Süddeutschen Molassebeckens sowie die nördliche Verbreitungsgrenze der tertiären Molassesedimente (zusammengestellt aus MEYER & SCHMIDT-KAHLER 1996, HOTH et al. 2007, BayStMWIVT 2010, FEHN et al. 2010, SCHULZ & DIEPOLDER 2010, GD-LGRB Stand 2013a).....	7
Abb. 2: Schematisches lithostratigraphisches Profil für das Gebiet des Referenzprofils SÜD (basierend auf GEYER et al. 2011 und GD-LGRB 2011).....	9
Abb. 3: Kernfotos der Opalinuston-Formation aus der Bohrung Benken (verändert nach NAGRA 2002).....	14
Abb. 4: Paläogeographie der lithofaziellen Einheiten der Unteren Süßwassermolasse, Unteren Brackwassermolasse und des jüngeren Teils der Unteren Meeresmolasse (Eger) (aus FREUDENBERGER & SCHWERD 1996).....	18
Abb. 5: Übersicht über die Verbreitung der quartären fluvioglazialen Kiese und Sande im Alpenvorland.....	19
Abb. 6: Hydrogeologische Räume im Bereich der Teilgebiete der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation von Süddeutschland (nach BGR-online Stand 2013).....	20
Abb. 7: Lage der Teilgebiete mit der untersuchungswürdigen Tongesteinsformation (nach HOTH et al. 2007) und der KW-Felder (aus FEHN et al. 2010).....	22
Abb. 8: Verlauf der Potentialisolinen des Grundwassers im Oberen Muschelkalk (STOBER & JODOCY 2011).....	24
Abb. 9: Darstellung der Anteile der Nettomächtigkeit der Speicherhorizonte an der Gesamtmächtigkeit der Löwenstein-Formation (Stubensandstein) in verschiedenen Bohrungen des westlichen Molassebeckens (FEHN et al. 2010).....	25
Abb. 10: Darstellung der Anteile der Nettomächtigkeit der Speicherhorizonte an der Gesamtmächtigkeit der Eisensandstein-Formation in verschiedenen Bohrungen des westlichen Molassebeckens (FEHN et al. 2010).....	27
Abb. 11: Verlauf der Potentialisolinen des Grundwassers im höheren Oberjura (STOBER & JODOCY 2011).....	29
Abb. 12: Blockbild der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell SÜD (5-fache Überhöhung). Werte der Höhenlinie vgl. Abb. 13.....	31
Abb. 13: Topographie des Endlagerstandortmodells SÜD (Gitterlinienabstand 2 km).....	31
Abb. 14: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit m1 (Gitterlinienabstand 2 km).....	34
Abb. 15: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit m2 (Gitterlinienabstand 2 km).....	35
Abb. 16: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit m3 (Gitterlinienabstand 2 km).....	37

Abb. 17: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Keuper zu den Modell-Einheiten k1, k2 und k3 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2.....	38
Abb. 18: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit k1 (Gitterlinienabstand 2 km).....	39
Abb. 19: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit k2 (Gitterlinienabstand 2 km).....	40
Abb. 20: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit k3 (Gitterlinienabstand 2 km).....	41
Abb. 21: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Unterjura zu den Modell-Einheiten ju1 und ju2 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2.....	42
Abb. 22: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit ju1 (Gitterlinienabstand 2 km).....	42
Abb. 23: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit ju2 (Gitterlinienabstand 2 km).....	43
Abb. 24: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jm1 (Gitterlinienabstand 2 km).....	44
Abb. 25: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Mitteljura zu den Modell-Einheiten jm1, jm2 und jm3 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2.....	45
Abb. 26: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jm2 (Gitterlinienabstand 2 km).....	46
Abb. 27: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jm3 (Gitterlinienabstand 2 km).....	47
Abb. 28: Zuordnung der lithostratigraphischen Schichtenfolge des Oberjura zu den Modell-Einheiten jo1, jo2 und jo2 des Endlagerstandortmodells SÜD. Erläuterung zur Signatur der Lithologie in Abb. 2.....	48
Abb. 29: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit jo1 (Gitterlinienabstand 2 km).....	49
Abb. 30: Isobathen der Basisfläche der Modell-Einheit jo2 (Gitterlinienabstand 2 km).....	50
Abb. 31: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit jo3 (Gitterlinienabstand 2 km).....	51
Abb. 32: Mächtigkeit (A) und Isobathen der Basisfläche (B) der Modell-Einheit tms (Gitterlinienabstand 2 km).....	52
Abb. 33: Mächtigkeit der Modell-Einheit q (Gitterlinienabstand 2 km).....	53
Abb. 34: Verteilung der Untergrundtemperaturen in Baden-Württemberg für die Tiefe 1000 m unter Gelände (GD-LGRB Stand 2013b).....	54
Abb. 35: Geologischer Schnitt Richtung SW-NE durch das Endlagerstandortmodell SÜD. Schnitt A ohne Überhöhung, Schnitt B mit 5-facher Überhöhung.....	57

Abb. 36:	Geologischer Schnitt Richtung NW-SE durch das Endlagerstandortmodell SÜD. Schnitt A ohne Überhöhung, Schnitt B mit 5-facher Überhöhung.....	58
Abb. 37:	Schematische Zusammenstellung der hydraulischen Eigenschaften der Modell-Einheiten im Endlagerstandortmodell SÜD, ohne die Berücksichtigung der Anisotropie von Sedimentgesteinen.....	59