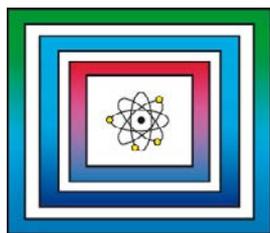


# F+E Endlagerung

9Y2017020000

CHRISTA-II – Beschreibung  
des generischen  
geologischen Modells  
für das Endlagersystem  
„überlagernder ewG“



Ergebnisbericht

Hannover, Dezember 2021

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND  
ROHSTOFFE HANNOVER

F+E Endlagerung

Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für  
ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im  
Kristallingestein in Deutschland – CHRISTA-II

CHRISTA-II – Beschreibung des generischen geologischen Modells  
für das Endlagersystem „überlagernder ewG“

Ergebnisbericht

Autoren:	Weitkamp, Axel Frenzel, Britta Krumbholz, Michael, Dr. Mrugalla, Sabine Sönneke, Jürgen
Auftraggeber:	BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz)
Auftragsnummer:	9Y2017020000
Datum:	21.12.2021
Geschäftszeichen:	B3.4/B50112-52/2021-0005/001
Gesamtblattzahl:	100

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste  
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
<b>Verkürzte Zusammenfassung</b> .....	4
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b> .....	5
<b>2 Geographische Rahmenbedingungen</b> .....	6
2.1 Geographische Einordnung .....	6
2.2 Klima .....	6
<b>3 Umfeldcharakterisierung des Modells „überlagernder ewG“</b> .....	8
3.1 Regionalgeologische Entwicklung .....	8
3.1.1 Saxothuringische Zone .....	9
3.1.2 Entwicklungen im Zechstein .....	11
3.1.3 Mesozoische und Känozoische Entwicklungen .....	12
3.2 Hydrogeologisches Umfeld .....	15
<b>4 Charakterisierung des Modells „überlagernder ewG“</b> .....	18
4.1 Randbedingungen des geologischen Modells .....	19
4.2 Geomorphologie und Oberflächengewässer .....	21
4.3 Geologischer Aufbau .....	25
4.3.1 Wirtsgestein .....	26
4.3.2 Barriereformation .....	30
4.3.3 Deckgebirge .....	34
4.4 Genese und tektonische Entwicklung .....	40
4.5 Geologisches 3D-Kluftmodell .....	41
4.6 Gesteinscharakterisierung .....	46
4.6.1 Petrographie/Lithologie .....	48
4.6.2 Petrophysik .....	49
4.7 Hydrogeologie .....	56
4.7.1 Hydraulische Eigenschaften .....	56
4.7.2 Hydrochemische Verhältnisse .....	62
4.7.3 Stofftransport .....	65

Seite

4.8	Geothermische Verhältnisse .....	67
4.8.1	Wärmeleitfähigkeit .....	68
4.8.2	Spezifische Wärmekapazität .....	70
4.8.3	Thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	71
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>73</b>
5.1	Gestein und struktureller Aufbau .....	74
5.2	Hydraulische Verhältnisse .....	74
5.3	DFN-Modelle für reale Standorte .....	75
5.4	Realisierung des Konzeptes „überlagernder ewG“ .....	76
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>77</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>91</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>94</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>95</b>
	<b>Anhangverzeichnis .....</b>	<b>97</b>

---

## Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Weitkamp, Axel Frenzel, Britta Krumbholz, Michael, Dr. Mrugalla, Sabine Sönneke, Jürgen
Titel:	CHRISTA-II – Beschreibung des generischen geologischen Modells für das Endlagersystem „überlagernder ewG“
Schlagwörter:	Endlagersysteme, generische geologische Modelle, Kluftsystem, Kristallingestein, Parameter

Der vorliegende Bericht ist Teil des Projekts „Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland“ (CHRISTA-II) und beschreibt das generische 3D-Modell für das Endlagersystem „überlagernder ewG“. Zunächst wird das geographische und regionalgeologische Umfeld dargestellt. Danach folgt die genauere Charakterisierung des geologischen Modells z. B. in Bezug auf die angenommenen Gesteinseigenschaften, den strukturgeologischen Aufbau und die hydrogeologischen Gegebenheiten inkl. der Erläuterungen der für weitere Berechnungen notwendigen Gesteins-/Gebirgsparameter. Abschließend wird die Eignung des Konzeptes „überlagernder ewG“ im Hinblick auf die Langzeitsicherheit diskutiert.

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Im Rahmen des Vorhabens CHRISTA-II wird ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Kristallingestein in Deutschland entwickelt. Im ersten Schritt werden für Deutschland standortunabhängige generische geologische Modelle für unterschiedliche ewG-Typen entwickelt. Betrachtet werden die folgenden Typen:

- „multipler ewG“ mit mehreren räumlich getrennten ewG innerhalb eines Kristallinkomplexes,
- „überlagernder ewG“, bei dem eine Schicht oberhalb des Kristallingesteins die geologische Barrierenfunktion übernimmt,
- „mKBS-3“, bei dem die Geosphäre keine Barrierenfunktion übernehmen kann und diese von den Behältern unterstützt durch einen Buffer übernommen wird.

Im vorliegenden Bericht wird das geologische Modell für das Konzept „überlagernder ewG“ beschrieben. Es handelt sich um ein generisches geologisches Modell, für das das angenommene regionale geographische und geologische Umfeld und der strukturelle Aufbau erläutert werden. Vervollständigt wird die Charakterisierung des Modells durch die Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse. Insbesondere dafür ist die Beschreibung eines möglichen Kluftsystems erforderlich, da es zusammen mit dem hydraulischen Gradienten die Grundwasserströmung im Kristallingestein maßgeblich bestimmt und somit eine wichtige Planungsgrundlage für die Auslegung der geotechnischen Barrieren bildet.

Außerdem werden geologische und hydrogeologische Eigenschaften parametrisiert, die z. B. als Grundlage für Integritätsbetrachtungen dienen. Wichtig dafür sind sowohl Kenntnisse über das mechanische Gebirgsverhalten als auch über physikalisch-chemische Eigenschaften, die einen Einfluss auf Prozesse haben, die in einem Endlagersystem während der zukünftigen Entwicklung ablaufen können.

Ein entscheidender Faktor für die Bewertung des Endlagersystems „überlagernder ewG“ ist die Beantwortung der Frage, ob oder in wie weit es sich mit den neuen, aktuell gültigen rechtlichen Rahmenbedingungen nach der „Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ vom 06.10.2020 (BMU 2020) in Einklang bringen lässt. Eine Einschätzung dazu wird in Kapitel 5 getroffen.

## 2 Geographische Rahmenbedingungen

### 2.1 Geographische Einordnung

Der Modelltyp „überlagernder ewG“ weist auf einer Grundfläche von 40 mal 40 km (1.600 km<sup>2</sup>) ein hügeliges Relief mit moderaten Geländehöhen zwischen rund 100 und 400 m ü. NN auf. Oberflächennah stehen Sedimentgesteine des Muschelkalk an, das kristalline Grundgebirge liegt in Tiefen von mehreren hundert Metern. In Deutschland finden sich solche Bedingungen z. B. in der naturräumlichen Großregion der Mittelgebirgsschwelle, die vom Norddeutschen Tiefland bis zum Alpenvorland reicht. Neben Mittelgebirgen, wie dem Harz, dem Schwarzwald, dem Erzgebirge oder dem Bayerischen Wald, gehören auch tiefer liegende Bereiche wie das Oberrheinische Tiefland oder das Thüringer Becken dazu, so dass keine allgemeingültige Einteilung in Höhenbereiche zur Abgrenzung dieser Landschaftsform vorliegt.

Die erosive Reliefentwicklung der Mittelgebirge reicht häufig bis ins Tertiär zurück. Unter wechselnden klimatischen Einflüssen haben sich abhängig vom Gesteinstyp verschiedene Strukturformen herausgebildet. Härtlingsrücken und steile Hänge wechseln sich mit Höhenlagen mit geringem Relief ab. Eine Besonderheit in der Reliefentwicklung trat während der pleistozänen Kaltzeiten auf. In den Höhenlagen von Harz, Schwarzwald und Bayerischem Wald bildeten sich Kargletscher, die aufgrund der Erosion durch Gletscherschurf (Exaration) breite Täler ausräumten. Hinzukommt, dass die nördlichen Bereiche der Mittelgebirgsschwelle landschaftlich auch von den Randausläufern des Saale- und des Elster-Inlandgletschers geprägt wurden.

Ist die Abtragungsresistenz hoch, wie z. B. bei anstehendem Kristallingestein, führt oft nur die fluviatile Erosion zu reliefbildenden Taleinschnitten. Ein Beispiel für Reliefbildung bei unterschiedlich abtragungsresistenten Gesteinen sind die Schichtstufenlandschaften in Gebieten mit oberflächlich anstehendem Muschelkalk (Zepp 2008). Diese Landschaftsform entsteht durch das Zusammenwirken von Denudation und fluviatiler Erosion in den durch eine Wechsellagerung von Kalksteinbänken mit mergeligen Schichten charakterisierten Gebieten.

### 2.2 Klima

Dem Modell „überlagernder ewG“ wird die klimatostratigraphische Gliederung Mitteleuropas für das Quartär mit den Kaltzeiten Elster, Saale und Weichsel zugrunde gelegt. Aktuell dauert die Warmzeitphase, die nach Ende der letzten Wechsel-Vereisung vor ca. 11.700 Jahren in Deutschland begann, weiter an (Deutsche Stratigraphische Kommission 2016). Unter

diesen Bedingungen herrscht in Deutschland derzeit weitverbreitet ein warmgemäßigtes Klima, das nach der Köppen-Geiger-Klassifikation (Peel et al. 2007) der Klasse Cfb entspricht, und das im östlichen Bereich und in den Höhenlagen der Mittelgebirge in ein boreales Klima (Klassen Dfb und Dfc) übergeht (vgl. Abb. 1). Der Betrachtungszeitraum für das Modell „überlagernder ewG“ beginnt mit einem Klima der Klasse Cfb, bei dem es sich um ein warmgemäßigtes, immerfeuchtes Klima mit warmen Sommern handelt.

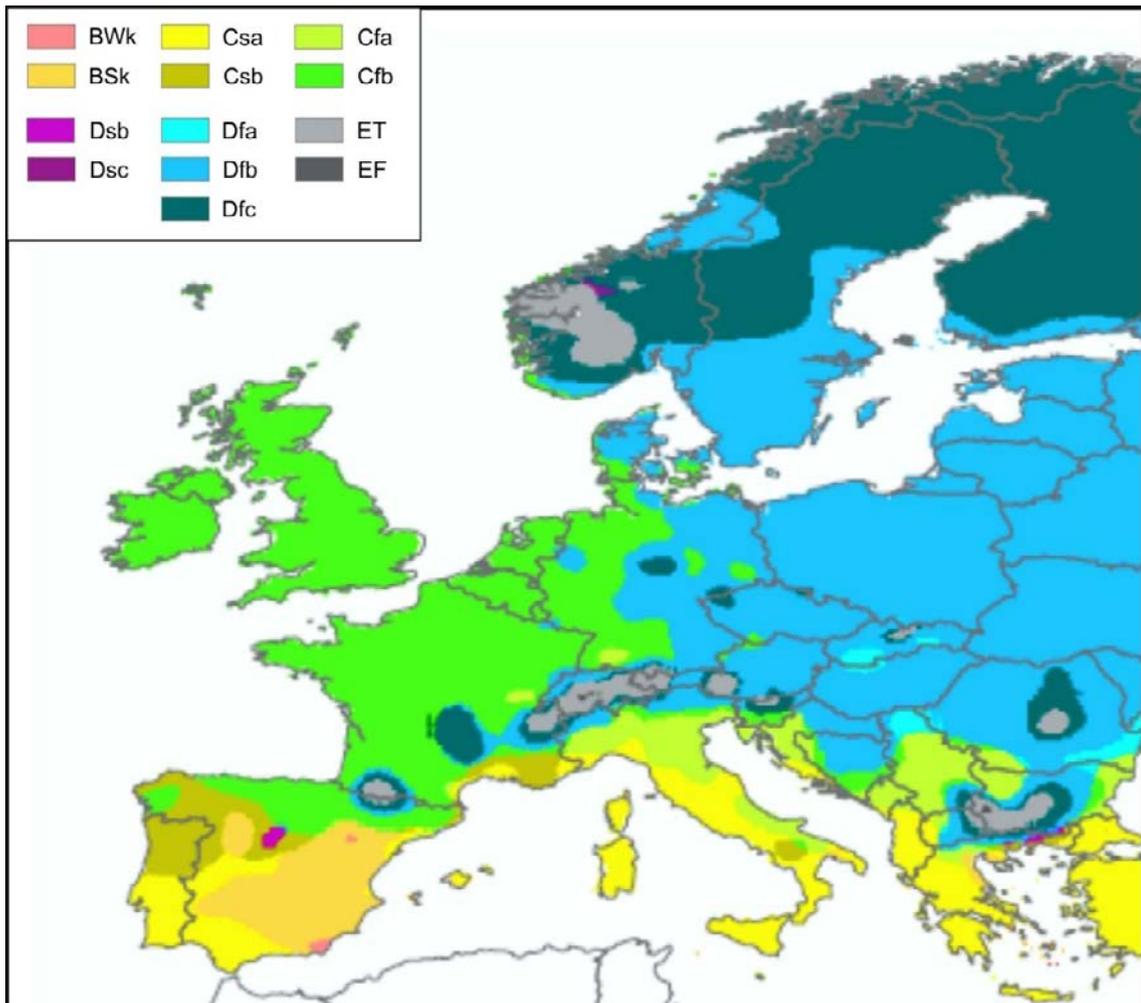


Abb. 1: Verbreitung der Köppen-Geiger Klimatypen (vgl. Abkürzungsverzeichnis) in Europa (verändert nach Peel et al. 2007)

In den nächsten eine Million Jahren muss unter Zugrundelegung des natürlichen Klimazyklus, bei dem eine Kaltzeit und die dazugehörige Warmzeit ungefähr 100.000 Jahre andauern, mit ca. zehn weiteren Kalt- und Warmzeiten gerechnet werden. Im Vergleich zu den rezenten Bedingungen können die globalen Temperaturmittelwerte dann bis ungefähr 5 °C höher und bis ca. 10 °C niedriger sein (vgl. Shackelton et al. 1990).

Wie bereits in Kapitel 2.1 erläutert, waren einige tiefer liegende Bereiche der Deutschen Mittelgebirgsschwelle in der Vergangenheit von Vereisungen im Randbereich der ausgedehnten Eisschilde (Saale und Elster) betroffen. Um die damit verbundenen Prozesse wie glaziale Erosion oder Rinnenbildung (siehe Kapitel 4.4) in die Betrachtung der möglichen Entwicklungen für das Modell „überlagernder ewG“ einzubeziehen, wird angenommen, dass es in Zukunft ebenfalls von den Randausläufern eines solchen Eisschildes erreicht wird.

Da eine Eisüberdeckung eine Isolationsschicht darstellt, wirkt die atmosphärische Temperaturentwicklung nicht während des gesamten Nachweiszeitraumes direkt auf den Untergrund ein, wodurch bei langandauernder Eisüberdeckung ein Auftauen der Permafrostschichten unter dem Eis stattfinden kann. Daher ist in zukünftigen Kaltzeiten im Modellgebiet nur zeitweise mit Permafrost zu rechnen.

### **3 Umfeldcharakterisierung des Modells „überlagernder ewG“**

#### **3.1 Regionalgeologische Entwicklung**

Die geologischen Vorgänge, die das Modellgebiet maßgeblich geprägt haben, beginnen mit dem Einsetzen der variszischen Orogenese im Devon, hervorgerufen durch die Schließung des Rheischen Ozeans und die Kollision der beiden Großkontinente Laurussia im Norden und Gondwana im Süden. Bei diesem Vorgang wurden sukzessive auch mehrere kleinere intermediäre Einheiten mit kontinentaler Kruste (Terrane) sowie Bereiche mit ozeanischer Kruste in das neu entstehende Gebirge integriert. In Mitteleuropa entstand das Saxothuringikum (siehe Kapitel 3.1.1) als innere Zone des variszischen Gebirges (siehe Abb. 2), eine aus überwiegend kristallinen Gesteinen aufgebaute Zone. Nördlich dieser Zone schließen sich gering metamorphe Faltungs- und Überschiebungsgürtel an (Renoherzynikum). Die südlich dieser Zone liegenden, ursprünglich gering metamorphen Einheiten wurden durch die spätere alpidische Orogenese stark überprägt und z. T. von mächtigen Molasseablagerungen bedeckt (Moldanubikum). Für weiterführende Informationen zur Morphologie des variszischen Grundgebirges siehe Reinhold (2005).

Die variszische Gebirgsbildung endete im späten Paläozoikum. Durch Vorgänge in der unteren Kruste drang geschmolzenes Asthenosphärenmaterial nach oben, was zu verstärkter vulkanischer Aktivität führte, da der lithosphärische Mantel unter der kontinentalen Kruste von unten her thermisch ausgedünnt wurde. In der Folge kam es zu Hebungsvorgängen, was eine verstärkte Erosion des neu entstandenen variszischen Gebirges zur Folge hatte. Lokale Dehnungsbewegungen sowie Blattverschiebungen verursachten die Bildung von Grabenstrukturen, in denen sich erodiertes Sedimentmaterial ablagern konnte. Durch

diese Prozesse wurde die Mächtigkeit der variszisch verdickten kontinentalen Kruste bis etwa ins Mittlere Perm hinein über einen Zeitraum von 30–40 Mio. Jahren wieder auf 30–35 km reduziert (Meschede 2018). Etwa ab dem Mittleren Perm setzen die großflächigen Beckenbildungen ein, die während des gesamten Mesozoikums ein bestimmender Prozess bei der geologischen Entwicklung im Bereich des heutigen Mitteleuropas waren (Meschede 2018) (siehe a. Kapitel 3.1.2 und 3.1.3).

### **3.1.1 Saxothuringische Zone**

Als möglicher Entwicklungshintergrund für das kristalline Grundgebirge im Modellgebiet wird eine Entwicklung und der strukturelle Aufbau des Saxothuringikums unterstellt.

Das Saxothuringikum ist eine SW-NE bis W-E streichende, ca. 150 km breite Zone im mitteleuropäischen Variszikum, die zwischen dem Rhenoharzynikum und der Nördlichen Phyllitzzone im Norden und dem Moldanubikum im Süden liegt (Abb. 2). Die zum Saxothuringikum gehörige Mitteldeutsche Kristallinzone (MKZ) bildet eine markante SW-NE streichende ca. 50 km breite Struktur im Bereich des mitteleuropäischen Variszikums, die von mehreren granitoiden Körpern durchsetzt ist und einen ehemaligen Vulkanbogen repräsentiert (vgl. Martin et al. 2000).

Alle Zonen weisen kristallines Gebirge mit unterschiedlichen Altern und Entwicklungen auf. Weitere Betrachtungen zur regionalen Geologie und zum Grundgebirge finden sich in Veröffentlichungen der zuständigen staatlichen geologischen Dienste Deutschlands (Freudenberger & Schwerd 1996; Glaser et al. 2008; Rupf & Nitsch 2008) sowie in vielen regionalgeologischen Veröffentlichungen (u. a. Pälchen & Walter 2008; Geyer et al. 2011; Seidel 2003).

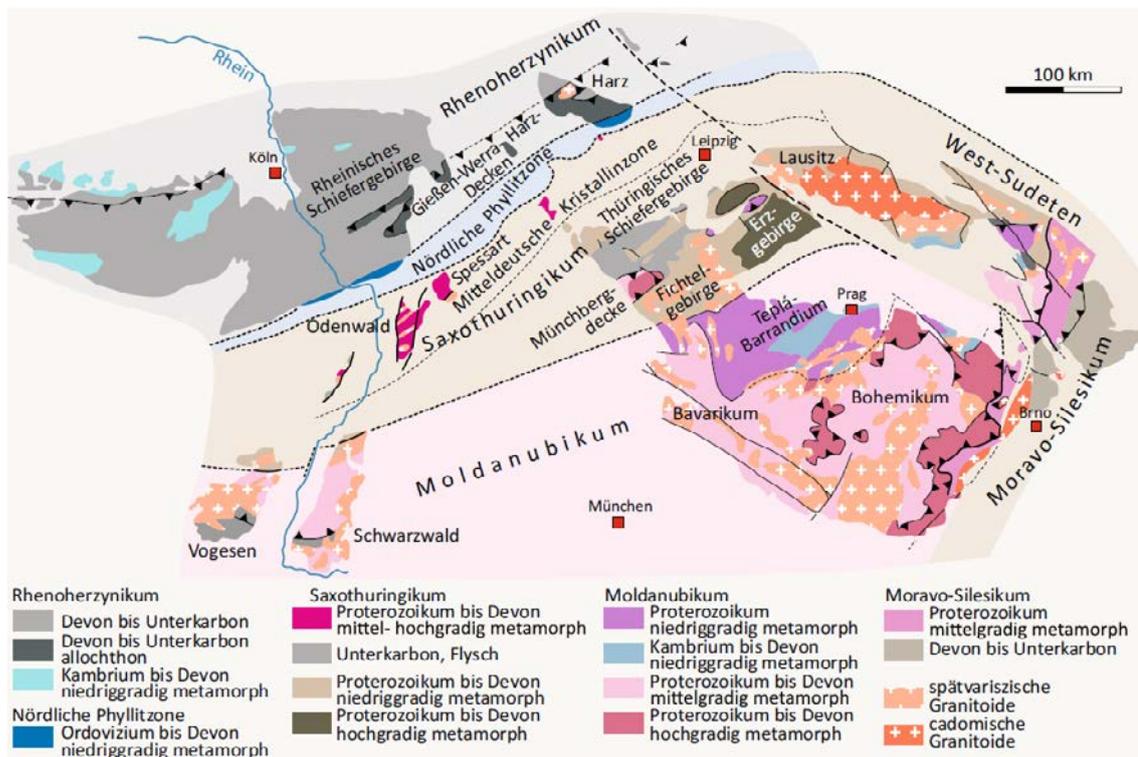


Abb. 2: Strukturgeologische Gliederung des variszischen Grundgebirges in Mitteleuropa (Meschede 2018)

Eine wichtige Nahtstelle im Bereich des variszischen Gebirges entstand durch das Schließen des Rheischen Ozeans zwischen Laurussia und Armorica. Durch die Kollision von Mikroterranen bildete sich die MKZ, die den kristallinen Unterbau eines ehemaligen Vulkanbogens repräsentiert. Mit Beginn von Kollisionsprozessen zwischen Laurussia und Gondwana infolge der Subduktion des Rhenoharzynischen Ozeans und der Paleotethys im frühen Oberdevon setzte ein lokal verstärkter Magmatismus ein. Die Bildung von syn- bis spätorogenen In- und Extrusionsmagmatiten reichte lokal bis an die Wende Unter-/Oberkarbon. Kollisionsvorgänge im späten Unterkarbon bewirkten die abschließenden variszischen Faltungs- und Stapelungsprozesse im Bereich der Saxothuringischen Zone.

Das kristalline Saxothuringikum ist hauptsächlich im Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirge, im Fichtelgebirge, im Erzgebirge sowie Lausitzer und Meissener Massiv vertreten, tritt aber auch in einem schmalen Streifen am Nordrand der Vogesen und des Schwarzwaldes auf (vgl. Franke 2018). Das Saxothuringikum ist sehr heterogen und besteht aus Metamorphiten, Magmatiten (inklusive der variszischen Granitoide) und gefalteten Sedimenten bis zum Unterkarbon, die in der Regel stark tektonisch beansprucht und in unterschiedlichen Graden z. T. metamorph überprägt sind (s. a. Dallmeyer et al. 1995; Kroner et al. 2004; Linnemann & Schauer 1999). Der Internbau ist durch SW-NE (erzgebirgisch) streichende Sattel- und Muldenzonen gekennzeichnet, welche

entlang von NW-SE streichenden, postvariszisch mehrfach aktivierten Störungszonen versetzt wurden (Franke et al. 1995).

### 3.1.2 Entwicklungen im Zechstein

Für das Modell „überlagernder ewG“ wurde als Barriereformation eine flach lagernde saline Abfolge des Zechstein angenommen. Das Vorkommen von flach lagernden Steinsalzfolgen in Deutschland wird in Reinhold et al. (2014) dargestellt (vgl. Abb. 3). Charakteristisch ist, dass die Zechsteinabfolge im Beckenzentrum vollständiger abgelagert wurde als in den Randbereichen oder den kleineren südlichen Becken.

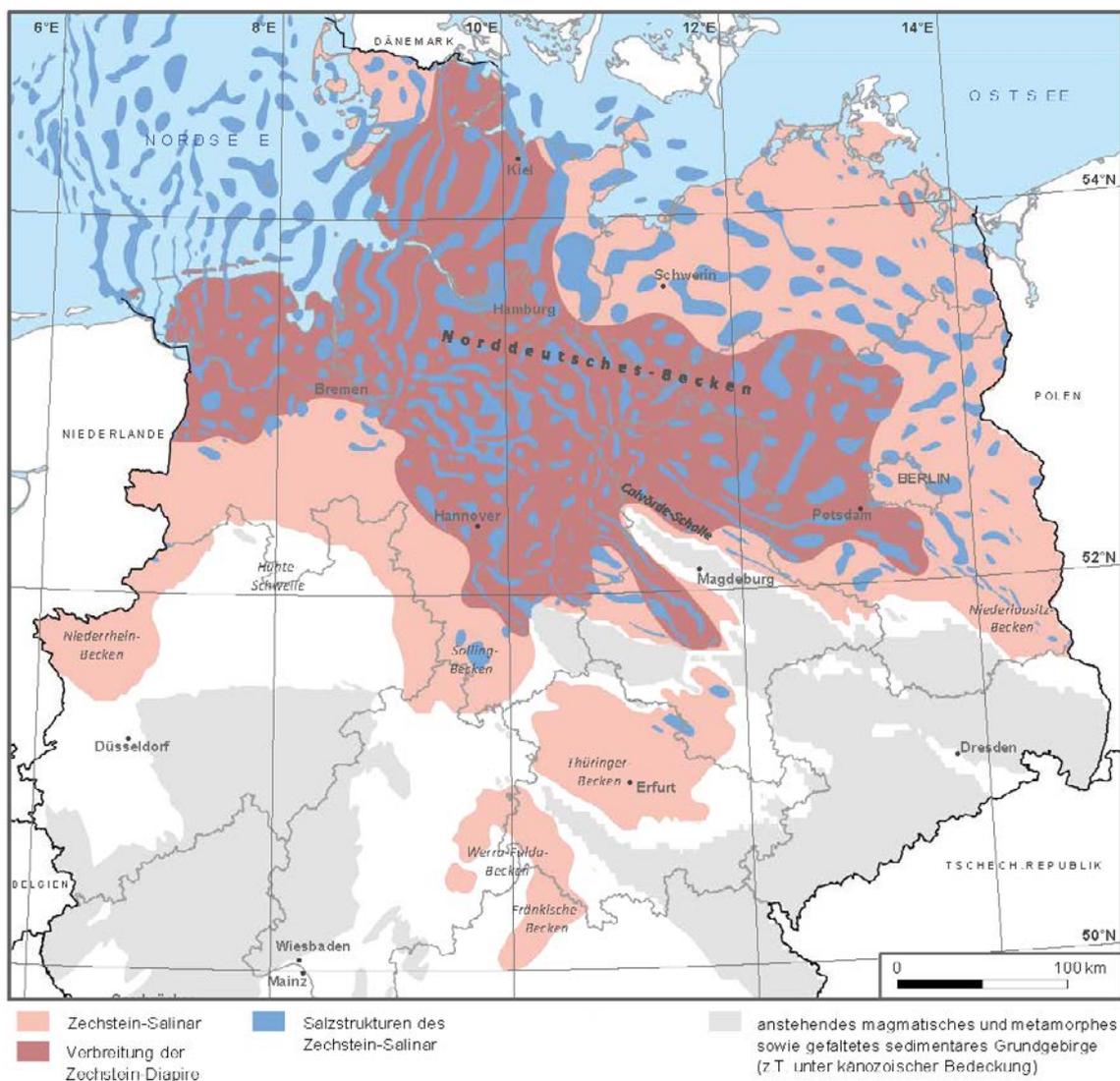


Abb. 3: Schematische Verbreitung des Halit-führenden Zechstein-Salinars in Deutschland (verändert nach Reinhold et al. 2014)

Die unteren Einheiten der Beckenfüllung bilden vielfach permische Einheiten, von denen insbesondere die Zechstein-Gruppe mit ihren barrierewirksamen Steinsalzfolgen für die Ausweisung eines „überlagernden ewG“ in Frage kommt. Die Steinsalzlager des Zechstein sind Teil der marinen Ablagerungen, die bei vollständiger Erhaltung in sieben lithostratigraphische Formationen (Folgen z1 – z7) unterteilt sind. Diese Gliederung folgt der Zyklizität in der Sedimentation, die jeweils mit feinklastischen Ablagerungen beginnt. Diese werden von schwer löslichen Karbonaten gefolgt von Sulfaten und Salzen (Evaporiten) des salinaren Zyklus überlagert.

Mit der Ingression des Zechsteinmeeres wurden zunächst die Klastika des Permokarbon aufgearbeitet. Dabei entstand das bis zu wenige Meter mächtige basale Zechsteinkonglomerat/Weissliegend. Die Trennung des Zechsteinkonglomerats von den klastischen Sedimenten des Rotliegend (Grauliegend) ist umstritten. Daher wird zur Grenzziehung allgemein der Kupferschiefer als eine geringmächtige, aber weit verbreitete und markante Grenzschicht für die Basis Zechstein verwendet. Darüber folgen kalkige und dolomitische Ablagerungen, die als Werra-Karbonat zusammengefasst werden. Die Werra-Folge (z1) wurde hier exemplarisch ausgewählt, da sie eine der mächtigsten Salzfolgen im Norddeutschen Becken darstellt und ähnlich aufgebaut ist wie die anderen salinar geprägten Zechstein-Abfolgen. Auf das Werra-Karbonat folgen anhydritisch dominierte Ablagerungen, gefolgt von Steinsalz mit verschiedenen Reinheitsgraden bis zu den zuletzt im Eindampfungszyklus ausfallenden Kali- und Magnesiumsalzen. An diese schließt sich häufig eine umgekehrte Phase des Zyklusses von halitischen zu anhydritisch-tonigen Ablagerungen an. Je nach Lage der Zechsteinvorkommen können Abfolge, Mächtigkeiten und Fazies der Ablagerungen große laterale und vertikale Variationen aufweisen.

### 3.1.3 Mesozoische und Känozoische Entwicklungen

Das Deckgebirge im Modell „überlagernder ewG“ orientiert sich an den stratigraphischen Einheiten der Germanischen Trias. Der Sedimentationsraum war das weitgehend vom offenen Meer abgeschnürte Norddeutsche bzw. Germanische Becken (vgl. Abb. 4 und Abb. 5), das sich in Zentraleuropa als epikontinentales Becken im Anschluss an die variszische Gebirgsbildung während des Perm bildete (vgl. Kapitel 3.1.2). Das Zentrum des Beckens ist geprägt von feinkörnigen und evaporitischen Sedimentgesteinen, seine Randbereiche hingegen von überwiegend grobkörnigen klastischen Sedimentgesteinen (vgl. Abb. 4 und Abb. 5). Das Germanische Becken unterteilte sich weiter in mehrere kleinere Becken und Schwellenregionen. Allerdings gab es immer wieder Meeresvorstöße von der Tethys aus unterschiedlichen Richtungen in das Becken hinein, charakteristisch für die triassische Schichtenfolge ist daher eine verschieden stark ausgeprägte Zyklizität der Sedimente. Umfassende Zusammenstellungen zur Entwicklung der Germanischen

Trias geben z. B. Meschede (2015), Stackebrandt & Manhenke (2010), Littke et al. (2008) und Walter (2007).

Mit Beginn der Trias (Buntsandstein) setzte eine leichte Hebung Mitteleuropas und die Regression des Zechsteinmeeres nach Norden ein. Unter ariden Bedingungen transportierten weit verzweigte, häufig nur periodisch wasserführende Flusssysteme große Sedimentmengen aus den umliegenden Hebungsbereichen in die vormals vom Zechsteinmeer gefüllte Senke. Trockneten die Flüsse aus, bildeten sich abflusslose Senken, in denen häufig auch äolische Sedimente abgelagert wurden. Die kontinentale Gesteinsabfolge des Buntsandstein (Untertrias) besteht zumeist aus Sandsteinen, aber auch Konglomeraten, Silt- und Tonsteinen, im Unteren Buntsandstein treten untergeordnet auch Karbonate und Anhydrit auf. Mit Ende des Buntsandstein breitete sich das Röt-Meer im Modellgebiet aus. Diese Entwicklung ist durch immer feinkörnigere Sedimente bis hin zu Röt-Tonen und -Mergeln des Oberen Buntsandstein dokumentiert.

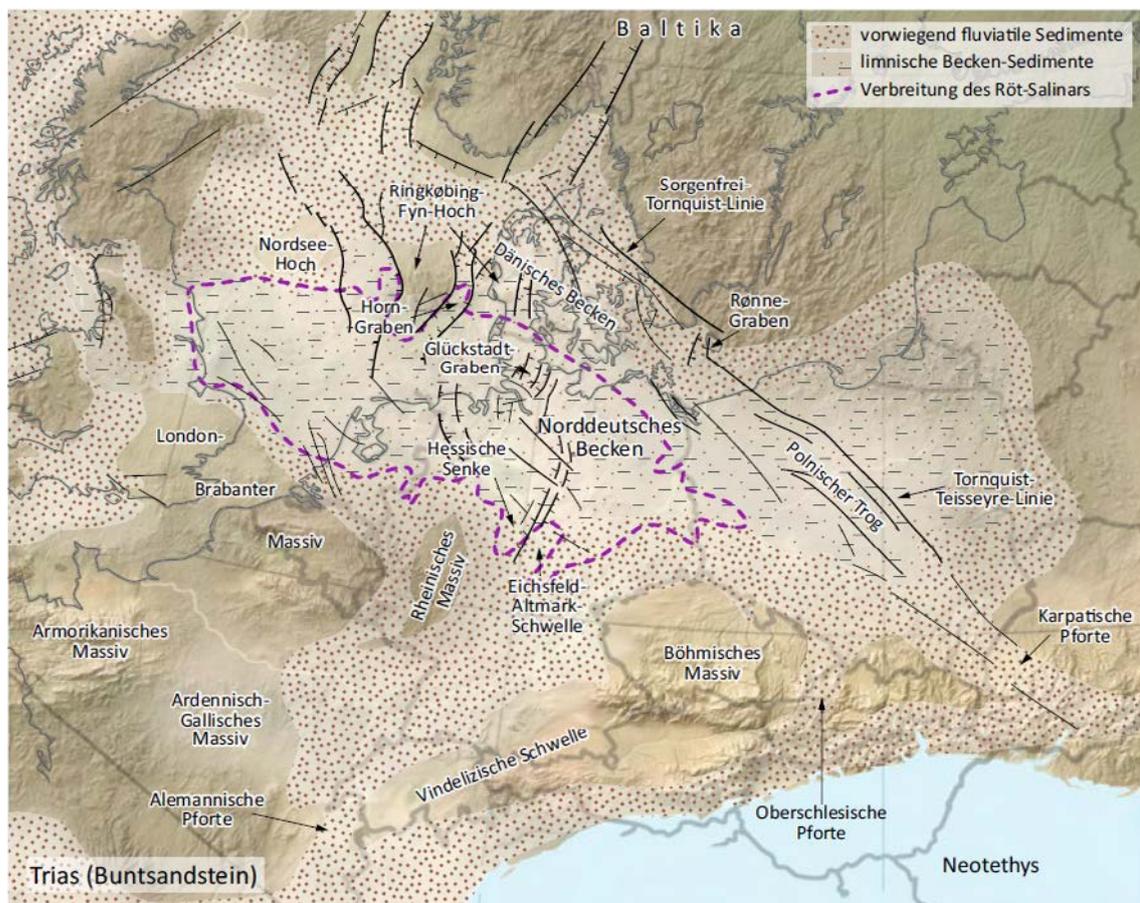


Abb. 4: Paläogeographische Rekonstruktion Mitteleuropas zur Zeit des Buntsandstein (Meschede 2018)

Diese Transgression setzte sich im Muschelkalk (Mittlere Trias) fort. In dem flachen Meeresbecken, das über schmale Meeresarme mit der Tethys verbunden war („Pforten“ ,

vgl. Abb. 5), wurden je nach Salzwasserzufuhr aus dem offenen Ozean Karbonate, Sulfate oder Steinsalz ausgefällt oder gelöst. Zwischen die karbonatisch ausgebildeten Folgen des Unteren und Oberen Muschelkalk sind daher nach NW in Richtung des Beckenzentrums mit zunehmender Mächtigkeit saline Gesteine des Mittleren Muschelkalk in die Abfolge eingeschaltet. Die Mächtigkeiten der Muschelkalk-Sedimente im Germanischen Becken erreichen zwischen 200 m und 400 m. Lediglich in einigen Grabenstrukturen wie dem Horn- und Glückstadt-Graben sind sie noch höher. Insgesamt ist die Faziesentwicklung trotz einiger regionaler Besonderheiten aufgrund einer ansonsten einheitlichen Entwicklung über das gesamte Meeresbecken hinweg gut korrelierbar.

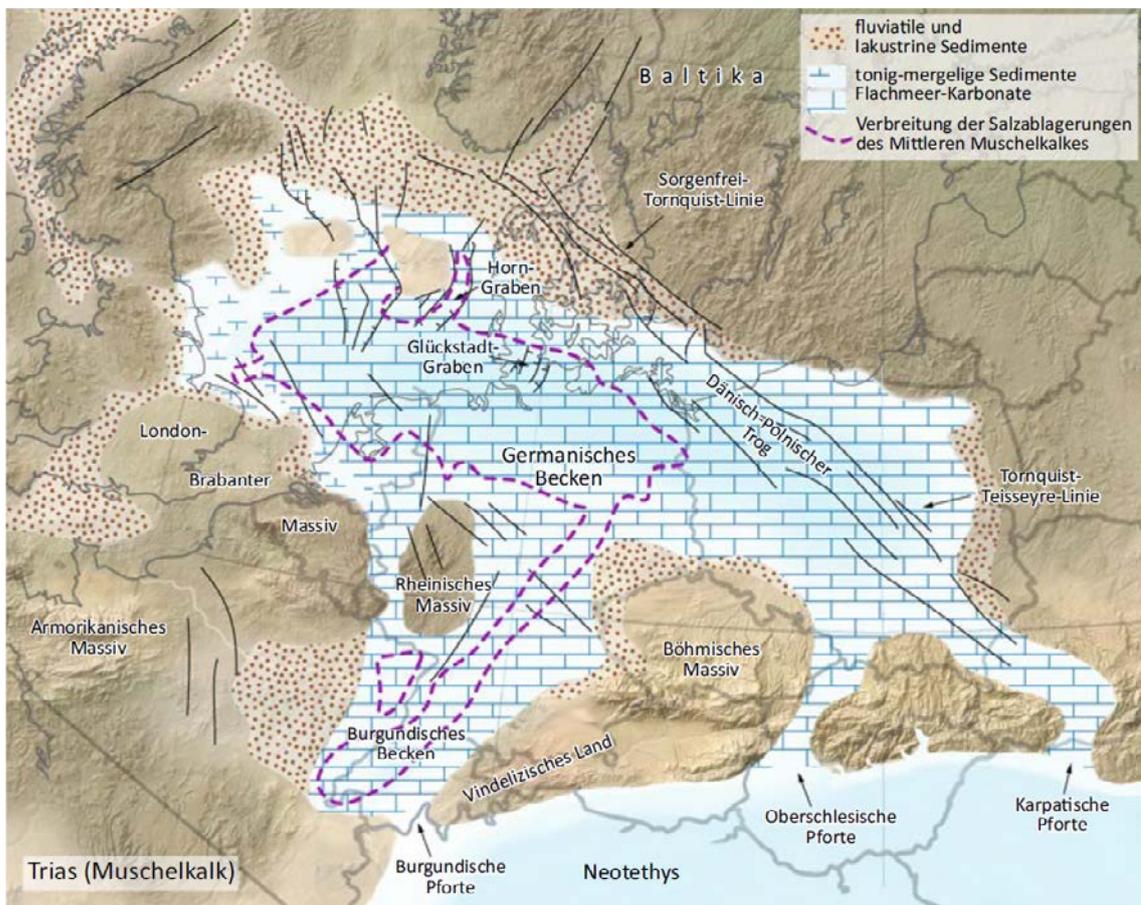


Abb. 5: Paläogeographische Rekonstruktion Mitteleuropas zur Zeit des Muschelkalk (Meschede 2018)

Zu Beginn der Oberen Trias (Keuper) setzte eine leichte Hebung ein und es wurden terrestrische Sedimente abgelagert. Im Mittleren Keuper kam es erneut zu einer Meeresingression in das Germanische Becken, in deren Folge sich bis zu 400 m mächtige Salinargesteine bildeten. Bis in die Zeit des Jura und der Kreide gab es weitere Phasen von Meeresvorstößen und mariner Sedimentation in Folge einer generellen Absenkungstendenz. Danach blieben viele Gebiete in Mitteleuropa weitgehend terrestrisch und die an der Oberfläche anstehenden Einheiten waren der Verwitterung, Erosion und Verkarstung

ausgesetzt. Im Modellgebiet wurde die Schichtenfolge bis auf die Trias erodiert. Auf den verkarsteten Ablagerungen des Muschelkalk lagern lokal quartäre fluviatile Sande, Schotter und Auelehm.

Im Känozoikum entstanden in West- und Mitteleuropa tektonische Graben- und Störungssysteme mit unterschiedlichen Streichrichtungen oft entlang älterer Bruchzonen der Erdkruste. Diese Strukturen wurden von Ziegler (1992) unter dem Begriff des Europäischen Känozoischen Grabensystems (EKG) zusammengefasst. Von dieser Entwicklung waren in Teilbereichen auch variszische Einheiten wie das Saxothuringikum bzw. die MKZ betroffen. So bildeten sich z. B. der Oberrheingraben, die Hessische Senke und der Egergraben.

Auf das Deckgebirge wirkten verschiedene kaltzeitlich bedingte glaziale Prozesse wie eine Inland- und Vorlandvereisung in Verbindung mit glazialer Rinnenbildung, die in Kapitel 4.4 kurz charakterisiert werden.

### **3.2 Hydrogeologisches Umfeld**

In diesem Kapitel erfolgt eine Kurzbeschreibung der hydrogeologischen Rahmenbedingungen des Modells „überlagernder ewG“, welches in Kapitel 4.7 genauer charakterisiert wird. Beschrieben werden die regional auftretenden hydraulischen Eigenschaften der Gesteinseinheiten, die im Modell vorkommen. Außerdem wird ein Überblick über die vorkommenden hydrochemischen Verhältnisse gegeben.

Die Bezeichnung der Durchlässigkeitsklassen orientiert sich an der  $k_f$ -Wert basierten Einstufung nach Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (1997), die nachfolgend wiedergegeben ist. Die  $k_f$ -Werte sind in der Einheit m/s angegeben.

Grundwasserleiter (GWL):

- sehr hoch  $> 10^{-2}$
- hoch  $> 10^{-3}$  bis  $10^{-2}$
- mittel  $> 10^{-4}$  bis  $10^{-3}$
- mäßig  $> 10^{-5}$  bis  $10^{-4}$

Grundwassergeringleiter (GWGL):

- gering  $> 10^{-7}$  bis  $10^{-5}$
- sehr gering  $> 10^{-9}$  bis  $10^{-7}$
- äußerst gering  $\leq 10^{-9}$

Im Festgestein wird die hydraulische Leitfähigkeit hauptsächlich von Kluftsystemen bestimmt. Nach Sebastian (2018) sind die wesentlichen Eigenschaften von Klüften und Kluftsystemen:

- der Kluftabstand (Klüftigkeitsziffer usw.),
- der Durchtrennungsgrad der Klüfte (höchster Wert 1 bei Klüften ohne Materialbrücken),
- die Rauigkeit der Kluftoberflächen (beeinflusst den Strömungswiderstand bzw. die Strömungsgeschwindigkeit) und
- die Öffnungsweite der Klüfte.

Darüber hinaus spielen die Dimension und der Vernetzungsgrad der Klüfte eine wichtige Rolle. Untersuchungen zu Klufteneigenschaften wurden z. B. im Rahmen von Versuchen im Untertagelabor (Underground Research Laboratory – URL) Äspö und an verschiedenen Gesteinsarten des finnischen URL Onkalo durchgeführt und sind tabellarisch in Jobmann et al. (2016) zusammengestellt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen schematischen Überblick, wie der  $k_f$ -Wert von der Kluftöffnungsweite bei einem Kluftabstand von 1 m abhängt.

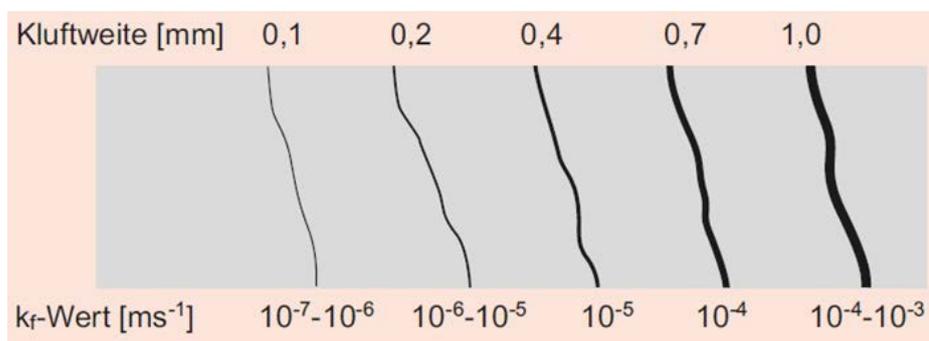


Abb. 6: Beispiele für Durchlässigkeitsbeiwerte in geklüftetem Gebirge bei unterschiedlichen Kluftöffnungsweiten und einem Kluftabstand von einem Meter (verändert nach Wittke (1990) in Sebastian (2018))

Beim granitischen Grundgebirge handelt es sich um einen GWGL. Die Wasserführung ist hauptsächlich auf die Kluffthohlräume beschränkt, das ungeklüftete Gestein selbst führt keine oder nur sehr geringe Wassermengen. Die hydraulische Leitfähigkeit im Wirtsgestein schwankt zwischen „gering“ bis „äußerst gering“. Wässer im Granit weisen meist hohe Gehalte an Ca, HCO<sub>3</sub> und SO<sub>4</sub> auf (vgl. BMU 2000; Ad-Hoc AG 2016; Stober et al. 2014; Stober & Buchner 2020). Durch die chemische Beeinflussung durch den überlagernden Zechstein tritt jedoch ein Na-Ca-Cl-Grundwassertyp auf.

Der das Kristallin überlagernde Zechstein weist überregional fazielle Unterschiede auf. In Beckenrandbereichen, in denen z. B. Sandsteine, Konglomerate und Karbonate zur Ablagerung kamen, können grundwasserleitende Stockwerke mit verschiedenen hydraulischen Leitfähigkeiten ausgebildet sein. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Poren-Kluft-GWL und untergeordnet um Karst-GWL, in denen auch gespannte Verhältnisse auftreten können. Der Grundwasserchemismus dieser Schichten ist geprägt durch hohe Gehalte an Ca, Mg, HCO<sub>3</sub> und SO<sub>4</sub> (StMWi 2019). Der zentrale Beckenbereich jedoch ist von salinaren Abfolgen dominiert. Ein solcher Ablagerungsraum wird auch dem Modell zu Grunde gelegt. Die salinaren Abfolgen bestehen hauptsächlich aus Wechsellagen von Steinsalz, Kalisalz und Anhydritgestein mit möglichen Einschaltungen von tonigen und karbonatischen Schichten und sind vorwiegend als GWGL mit „äußerst geringer“ hydraulischer Leitfähigkeit ausgeprägt. Höhere hydraulische Leitfähigkeiten können vor allem in geklüftetem Anhydritgestein auftreten. Eine Strömung der Grundwässer wird in diesen Schichten im Modell nicht angenommen. Neben den zuvor genannten Grundwässern können im Zechstein Fluideinschlüsse aus dem ehemaligen Ablagerungsraum vorhanden sein. Diese liegen häufig fein verteilt auf Korngrenzen oder als Einschlüsse in Kristallen vor. Bei der hydrochemischen Zusammensetzung dominieren Na-Cl-Typen.

Der über dem Zechstein liegende Untere Buntsandstein ist überregional als GWGL ausgebildet. Lediglich Einschaltungen von gröberen Sandsteinen erhöhen lokal die hydraulische Leitfähigkeit. Vor allem im Kontaktbereich zum Zechstein weisen die Grundwässer eine hydrochemische Beeinflussung durch das Salinar auf. Die auftretenden Grundwassertypen reichen von unbeeinflussten Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-, Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>- und Mg-Ca-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>-Typen bis zu Ca-Na-Cl-SO<sub>4</sub>, Ca-Na-SO<sub>4</sub>-Cl-HCO<sub>3</sub> und weiteren NaCl geprägten Varianten (vgl. z. B. Seidel 2003; LHW Sachsen-Anhalt 2012; StMWi 2019).

Im unteren Bereich ist der Mittlere Buntsandstein, der oft aus gröberen Sandsteinen besteht, als GWL ausgebildet. Je nach hydraulischer Anbindung können darin gespannte Verhältnisse vorliegen. Die Grundwassertypen variieren je nach Zusammensetzung der Gesteine und können z. B. als Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>, Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> und Ca-HCO<sub>3</sub> vorliegen (vgl. z. B. Seidel 2003; LHW Sachsen-Anhalt 2012; StMWi 2019).

Darüber folgen zunächst GWGL des Hangendabschnitts des Mittleren Buntsandstein und des Oberen Buntsandstein. In den Ton-, Silt- und Feinsandsteinen stellt der Porenraum kaum effektive Porosität zur Verfügung, so dass die Permeabilität durch geringdurchlässige Klüfte kontrolliert wird. Als Grundwassertypen treten Ca-SO<sub>4</sub> und Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> auf (vgl. z. B. Seidel 2003; LHW Sachsen-Anhalt 2012; StMWi 2019).

Mit dem oberflächennah anstehenden Muschelkalk liegt das Modell „überlagernder ewG“ in einer typischen Schichtstufenlandschaft der Deutschen Mittelgebirgsschwelle. Auch im regionalen Umfeld des Modells stehen mesozoische Schichten an, deren Eigenschaften die Hydrogeologie prägen. Quartäre Lockergesteine sind meist nur lokal und geringmächtig vorhanden, so dass die Grundwasserleitertypen im Wesentlichen durch Kluft- und zum Teil auch Karsthohlräume geprägt sind. Eine großflächige auf Vorfluter ausgerichtete Grundwasseroberfläche bildet sich in diesen Leitertypen nicht aus. Der Flurabstand ist daher stark von Niederschlagsereignissen abhängig. Schwer einzuschätzen ist auch die Größe der unterirdischen Einzugsgebiete, da sie stark davon abhängt, wie die Karsthohlräume ausgebildet sind und welche Vernetzung sie aufweisen. Die oberirdische Wasserscheide ist meist nicht identisch mit der unterirdischen. Als Grundwassertypen treten auf: Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>, Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> und Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> (vgl. z. B. Seidel 2003; LHW Sachsen-Anhalt 2012; StMWi 2019).

Eine hydraulische Verbindung zwischen dem GWL des Muschelkalk und dem des Mittleren Buntsandstein ist im Modell nicht gegeben. Eine Verbindung könnte z. B. im Bereich von Störungszonen auftreten. Über die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG (2017) werden solche Zonen jedoch mit einem ausreichenden Abstand zum Endlagerstandort gemieden. Daher wird für das regionale Umfeld des Modells „überlagernder ewG“ ebenfalls davon ausgegangen, dass solche Störungen nicht vorliegen und die beiden GWL als getrennt zu betrachten sind.

#### **4 Charakterisierung des Modells „überlagernder ewG“**

Die Grundlagen für das hier verfolgte Konzept für das Modell „überlagernder ewG“ wurden im vorlaufenden Forschungsprojekt „CHRISTA“ erarbeitet (Jobmann et al. 2016). Darauf aufbauend wurden im Forschungsprojekt „KONEKD“ von (Bertrams et al. 2017) Möglichkeiten für die technische Umsetzung entwickelt und beschrieben.

Da es bislang deutschlandweit keinen Erkundungsstandort im Kristallingestein mit Bezug zur Endlagerung radioaktiver Abfälle gibt und die derzeitige Datengrundlage nicht ausreicht, um ein geologisches Modell inklusive seiner spezifischen Parameter zu erstellen, musste bei der Modellerstellung und Parametrisierung auf Kenntnisse und Daten

zurückgegriffen werden, die entweder aus internationalen Vorhaben zur Endlagerung radioaktiver Abfälle oder aus Projekten mit abweichenden Zielsetzungen, wie z. B. der Geothermie, stammen. Insgesamt ist zu betonen, dass keine der verwendeten Datenquellen in Bezug zu einer geologischen Gesamtsituation steht, die der des generischen Modells „überlagernder ewG“ gleicht. Die geologischen Randbedingungen für das Modell sowie die physikalischen und chemischen Parameter des Deckgebirges, der Barriereformation und des Kristallingesteins wurden aus der Fachliteratur und u. a. aus nachfolgenden Projekten und Untersuchungsprogrammen zusammengestellt:

- Projekt AnSichT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (Jobmann et al. 2017),
- Projekt KOSINA: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (Bollingerfehr et al. 2018),
- Kontinentales Tiefbohrprogramm in Deutschland (KTB) (Erzinger & Stober 2005),
- Untersuchungsprogramm in Tschechien – URL Bukov (z. B. Souček et al. 2017, 2018),
- Untersuchungsprogramm in Schweden – URL Äspö, Standorte Laxemar und Forsmark (Bossart et al. 2001; Hartley & Roberts 2013; SKB 2008, 2009),
- Untersuchungsprogramm in Finnland – Standort Olkiluoto (Posiva 2012; Siren 2011, 2012) und
- Untersuchungsprogramm in der Schweiz – z. B. Felslabor Grimsel (Amiguet 1985; Keusen et al. 1989).

#### **4.1 Randbedingungen des geologischen Modells**

Um eine ausreichende Größe z. B. für Radionuklidbreitungsrechnungen zu gewährleisten, wird für das geologische 3D-Modell „überlagernder ewG“ eine Fläche von ca. 40 mal 40 km und eine Mächtigkeit von rund 3 km festgelegt. Es bildet einen generischen Modellstandort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle im Kristallingestein ab, der die Mindestanforderungen des (StandAG 2017) erfüllt. Die Basis des geologischen 3D-Modells bildet ein relativ homogen zusammengesetzter granitischer Kristallkörper, der von mehreren hundert Meter mächtigen Sedimentgesteinen überlagert wird. Der ewG ist Teil der sedimentären Überdeckung, die aus Einheiten des Zechstein, Buntsandstein

und Muschelkalk aufgebaut ist, und besteht aus barrierewirksamen Salzgesteinen des Zechstein.

In den kristallinen Gesteinen des Modells kommen sowohl Abkühlungsklüfte, Entlastungsklüfte als auch während der geologischen Entwicklungsgeschichte tektonisch verursachte Klüfte vor (s. Kap. 4.5). Diese weisen unterschiedliche hydraulische Leitfähigkeiten und Vernetzungsgrade auf und beeinflussen die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Gebirges. Sie sind somit im Zuge des Integritätsnachweises zu berücksichtigen (vgl. Thiedau et al. 2021).

Untersuchungen zeigen, dass kristallines Basement im oberflächennahen Bereich hydraulisch leitfähiger ist als in größerer Tiefe (z. B. Tsang et al. 2015; Rhén et al. 2008). Die höhere hydraulische Leitfähigkeit in geringeren Tiefen lässt sich auf größere Kluftöffnungsweiten und dichtere Vernetzungen zurückführen (z. B. Ranjram et al. 2015; Stober & Bucher 2015). Allerdings lassen sich aus vorliegenden Daten keine allgemeingültigen Gesetzmäßigkeiten zum Zusammenhang zwischen Tiefe und hydraulischer Leitfähigkeit ableiten (vgl. a. Ranjram et al. 2015). Für die generellen Ziele des Projektes CHRISTA-II ist eine genaue Abbildung der Permeabilitätsabnahme im Wirtsgestein mit zunehmender Tiefe nicht notwendig. In einem konservativen Ansatz wurde daher eine gleichmäßig dichte Verteilung der hydraulisch wirksamen Klüfte gewählt (vgl. Kap. 4.5), so dass die in der Natur zu erwartende Abnahme der Permeabilität mit der Tiefe (vgl. Kuang & Jiao 2014) im Modell nicht abgebildet wird.

Für das generische geologische Modell wurden die Randbedingungen wie folgt festgelegt:

- Das Modell liegt in einem Bereich mit granitischem kristallinen Basement unter einer mächtigen Abfolge von permischen und triassischen Sedimentgesteinen.
- Es weist einen ausreichend großen Abstand zu aktiven Störungszonen auf, so dass keine Einflüsse dieser Strukturen zu erwarten sind.
- Die den ewG beinhaltende Barriereformation (Zechstein) liegt tiefer als 300 m u. GOK. Das Barrieregestein aus Steinsalz weist eine Mindestmächtigkeit von 100 m und eine Gebirgsdurchlässigkeit  $< 10^{-10}$  m/s auf.
- Die Einlagerungssohle befindet sich in einer Tiefe von ca. -950 m NN im Kristallingestein.
- Der am Top von Kristallingesteinen häufig anzutreffende stärker geklüftete Bereich wird im Modell nicht gesondert dargestellt (siehe Kapitel 4.3.1).

- Im Kristallingestein werden hydraulisch wirksame Klüfte angenommen, die untereinander vernetzt sein können. In einem konservativen Ansatz wird von einer tiefenunabhängigen gleichbleibend hohen Klüftintensität ausgegangen.
- Im Modell werden nur die hydraulisch wirksamen Klüfte dargestellt. Generell ist der hydraulisch wirksame Anteil von Klüften im Kristallin gering (Geyer et al. 2011; Tsang et al. 2015).

#### **4.2 Geomorphologie und Oberflächengewässer**

Die Geomorphologie des Modells „überlagernder ewG“ entspricht einer typischen Schichtstufenlandschaft, wie sie im Bereich der Deutschen Mittelgebirgsschwelle bei anstehendem Mesozoikum häufig anzutreffen ist. Im Fall des vorliegenden Modells „überlagernder ewG“ stehen oberflächennah Sedimente des Muschelkalk an, die lokal, meist in den Flussauen, von geringmächtigem Quartär überlagert werden. Aufgrund ihrer Erosionsresistenz bilden die im Muschelkalk vorkommenden Kalksteinbänke im Gelände oft Höhenrücken aus. Abb. 7 zeigt die Geländeoberkante (GOK) des Modells, mit mehreren solcher Erhebungen mit Geländehöhen bis über 325 m ü. NN im Nordwesten und über 375 bzw. 400 m ü. NN im Süden. Insgesamt ist in diesen Bereichen jedoch ein sanft welliges Relief ausgebildet. Vom zentralen Bereich des Modells öffnet sich nach Osten und Nordosten ein breites flaches Tal, dessen Höhenlage bei ca. 175 bis knapp unter 125 m ü. NN liegt.

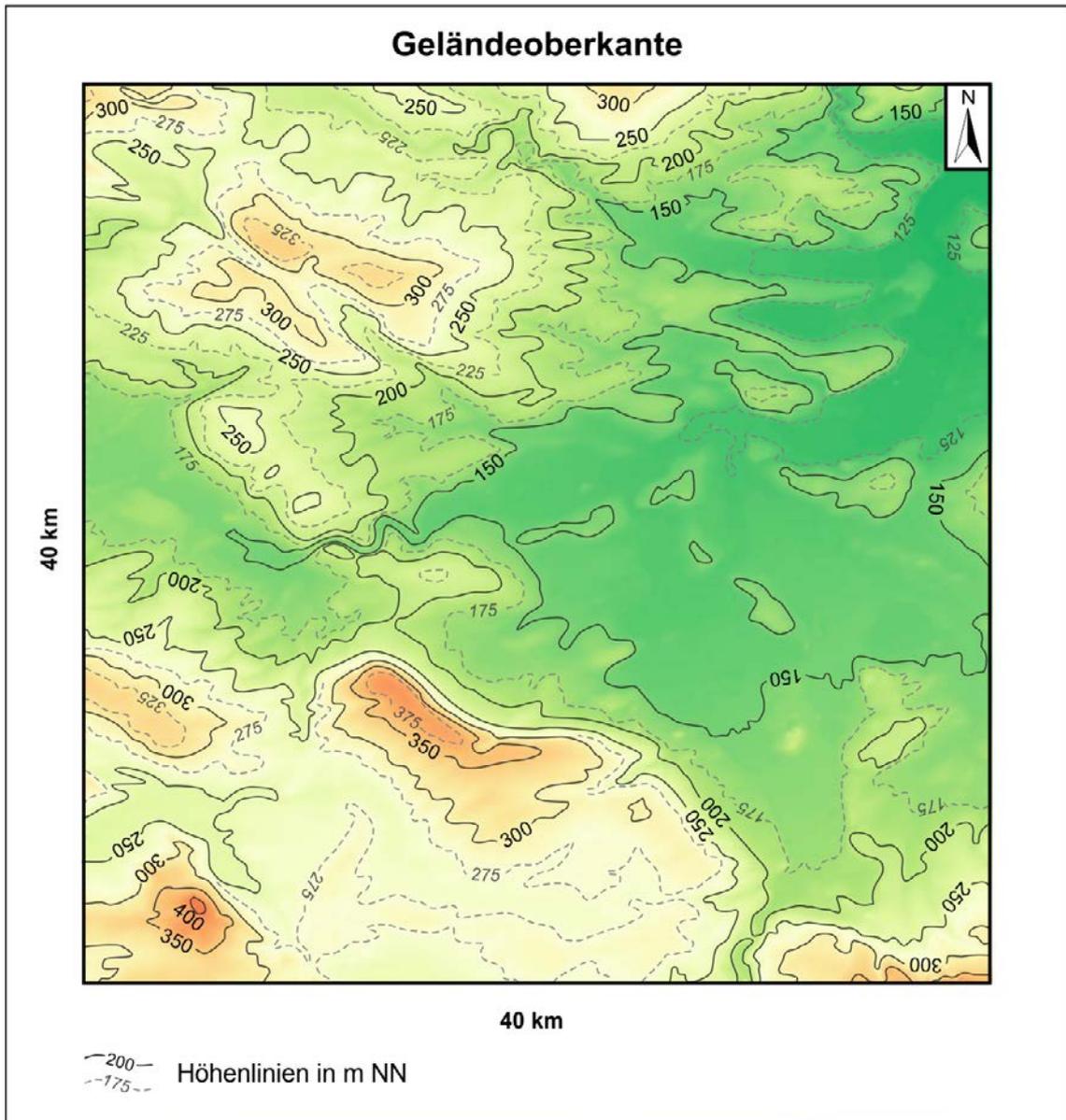


Abb. 7: Höhenlinienplan der Geländeoberfläche des Modells

In diesem flachen Tal ist ein weit verzweigtes Flusssystem angelegt, das Auen mit Breiten von mehreren 10er bis 100er Metern aufweist (vgl. Abb. 8). Die Bäche und Flüsse des Modells als Vorfluter werden sowohl vom oberflächlich abfließenden Niederschlag als auch vom Grundwasser gespeist. Laut Deutscher Wetterdienst (2013) liegt der Mittelwert des jährlichen Niederschlags im Zeitraum von 1880–2010 für Mittelgebirgsregionen knapp über 800 mm/a.

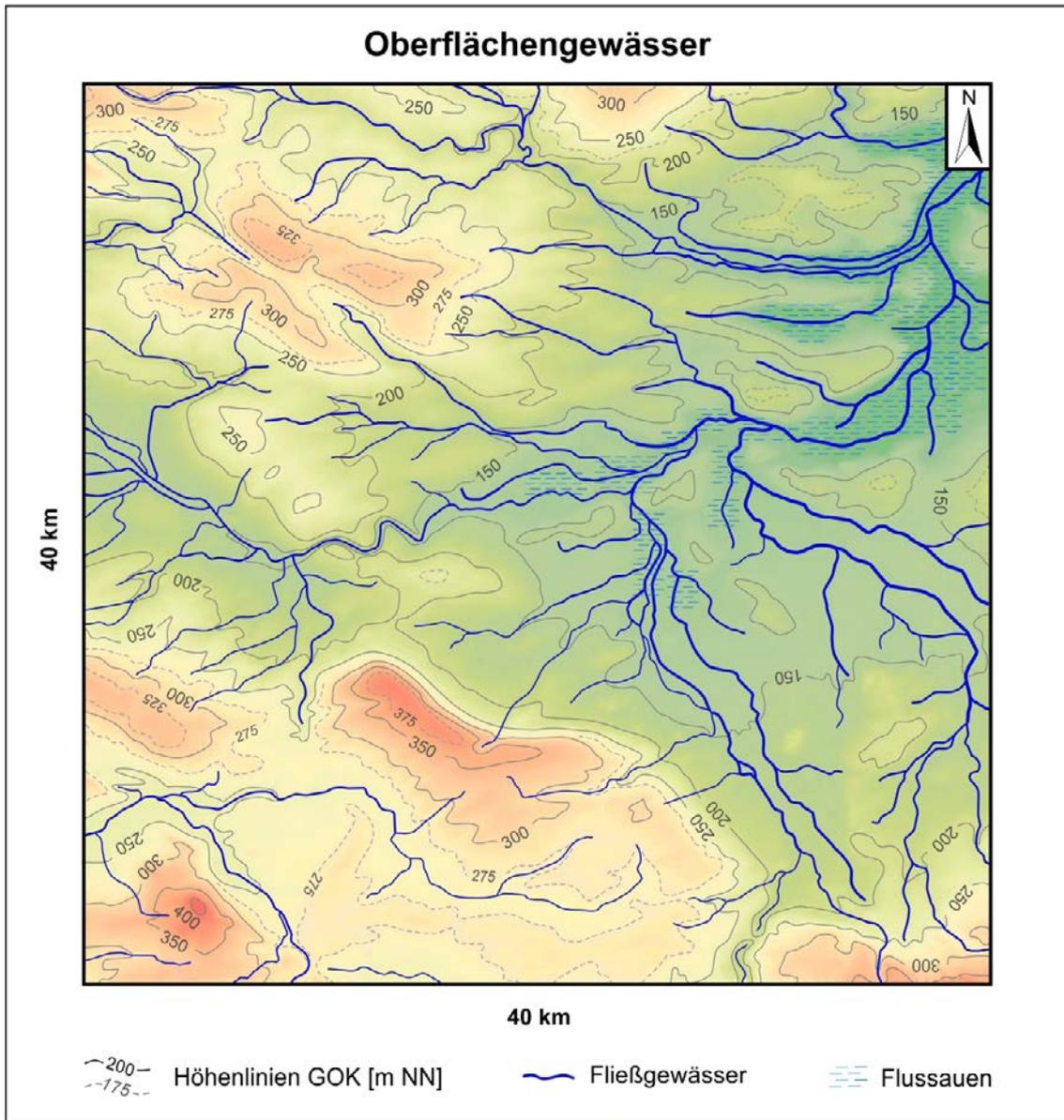


Abb. 8: Gewässernetz im Modell „überlagernder ewG“

In den Bereichen der Höhenlagen, in denen das Relief stärker ausgebildet ist, sind Mittelgebirgsbäche und -flüsse ausgebildet, die am Übergang zum breiten Tal in große Mittelgebirgsflüsse zusammenfließen. In der Einstufung für Fließgewässer nach Pottgiesser & Sommerhäuser (2008) ergeben sich für diese Typen die folgenden Merkmale:

- Typ 7: Grobmaterialreiche, karbonatische Mittelgebirgsbäche

Bäche dieses Typs sind typisch für Fließgewässer in Muschelkalklandschaften und weisen gestreckte bis stark geschwungene Verläufe mit Steinen und Schotter an der Gewässersohle auf. In strömungsarmen Bereichen kommen auch feinkörniges Sediment und organische Substrate vor.

Meist liegen karbonatreiche Wässer vor, die eine Gesamthärte von 8–34 °dH und eine Karbonathärte von 6–17 °dH aufweisen. Der pH-Wert liegt bei 7,5–8,5 und die elektrische Leitfähigkeit zwischen 400–900 µS/cm.

Im Jahresverlauf zeigen die Bäche große Abflussschwankungen, außerdem ist zeit- und abschnittsweises Trockenfallen möglich. Typisch für Bäche dieses Typs sind Bachschwinden, in denen die Gewässer versickern, wenn im Untergrund Karsthohlräume auftreten. Sie fließen dann unterirdisch weiter und können in Quelltöpfen wieder an die Oberfläche treten.

– Typ 9.1: Karbonatische, fein- bis grobmaterialreiche Mittelgebirgsflüsse

Es handelt sich um gewundene bis mäandrierende kleine Flüsse mit Schnellen und Stillen im regelmäßigen Wechsel. Ihr Profil ist meist flach bis mäßig eingeschnitten mit von Schotter, Steinen oder Kiesen dominierten Sohlen. In ruhigen Abschnitten kann Sand als Feinsediment auftreten. Typisch sind außerdem Verlagerungen der Flussläufe. Im Übergang zu den flacheren Talbereichen des Modells treten erste z. T. auch breitere Auenbereiche auf.

Die karbonatreichen Wässer weisen eine Gesamthärte von 11–25 °dH und eine Karbonathärte von 8–14 °dH auf. Der pH-Wert liegt bei 7,5–8,5 und die elektrische Leitfähigkeit zwischen 400–800 µS/cm.

Im Jahresverlauf zeigen die Flüsse große Abflussschwankungen.

– Typ 9.2: Große Flüsse des Mittelgebirges

Im flacher werdenden Relief sind gewundene bis mäandrierende Einbettgerinne oder nebengerinnereiche bis hin zu verflochtenen Gewässerabschnitten ausgebildet. Insbesondere in breiteren Tälern entwickeln sich Auen, deren Breite laut Gewässertyp bis mehrere hundert Meter erreichen kann. Im Modell „überlagernder ewG“ werden Auenbreiten von mehreren 10er bis 100er Metern angenommen. Im Flussbett der meist flachen Flüsse kommen hauptsächlich Steine, Schotter sowie Kies vor und in strömungsberuhigten Bereichen auch großräumig sandig-schluffige Ablagerungen. Insbesondere im Auenbereich kommt es bei diesem dynamischen Gewässertyp auch zu großflächigen Laufverlagerungen.

Die vorwiegend karbonatreichen Wässer weisen eine Gesamthärte von 5–13 °dH und eine Karbonathärte von 4–10 °dH auf. Der pH-Wert liegt bei 7,0–8,5 und die elektrische Leitfähigkeit zwischen 300–600 µS/cm.

Im Jahresverlauf zeigen die Flüsse große Abflussschwankungen mit stark ausgeprägten Extremabflüssen als Einzelereignisse.

In den vergangenen Kaltzeiten sind bei abnehmenden Niederschlagsmengen und/oder Niederschlag in Form von Schnee vor allem kleinere Fließgewässer trockengefallen. In der Weichsel-Kaltzeit fielen in Mitteleuropa beispielsweise ca. 500 mm Niederschlag pro Jahr weniger als heute (Martin et al. 2000). Vor allem im flacheren Relief und bei geringdurchlässigem Untergrund konnten sich in der Vergangenheit aber auch stehende Gewässer in Form von Seen ausbilden. Durch Eisüberdeckung kam es zur Umgestaltung der Morphologie. Auch eine für das Modell angenommene zukünftige Eisüberdeckung wird zu einer Umgestaltung der Morphologie führen. In Folge dessen können Flussläufe verändert werden und Seen entstehen. Grundsätzlich werden aber auch bei einer veränderten Morphologie Oberflächengewässer entstehen, die den heutigen ähnlich sind.

### **4.3 Geologischer Aufbau**

Das Modell gliedert sich in sechs flächendeckend verbreitete Einheiten mit unterschiedlichen Mächtigkeiten (vgl. Abb. 9). Als Deckgebirge werden die mesozoischen Einheiten aus dem Muschelkalk und dem Buntsandstein betrachtet. Eine stratigraphisch denkbare Rotliegend-Formation zwischen Zechstein und Wirtsgestein ist nicht vorgesehen. Die paläozoische Barriereformation aus dem Zechstein überlagert somit direkt das kristalline Wirtsgestein.

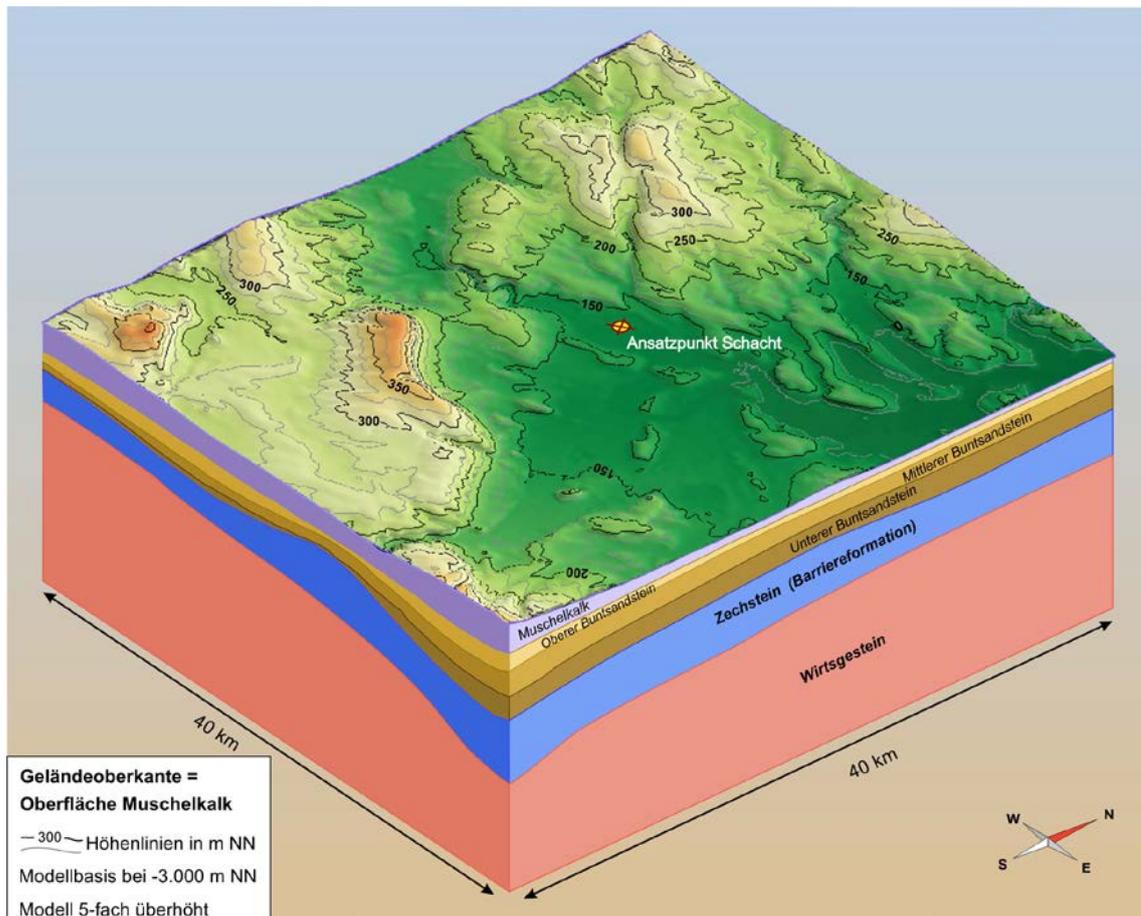


Abb. 9: Modell „überlagernder ewG“ mit allen Modelleinheiten und Schachtansatzpunkt

#### 4.3.1 Wirtsgestein

Im Modellgebiet weist das kristalline Grundgebirge eine granitische Zusammensetzung auf. Da sich die physikalischen Eigenschaften verschiedener granitischer Gesteine oft nur geringfügig unterscheiden, wurde im geologischen Modell auf eine petrographische Differenzierung des Wirtsgesteins verzichtet.

Obwohl bei der Größe des Modells von 1.600 km<sup>2</sup> nicht zwangsläufig von einem einzelnen Pluton ausgegangen werden kann, werden für das komplette Wirtsgestein inklusive des Einlagerungsbereichs dieselben Parameter festgelegt (siehe Anhang).

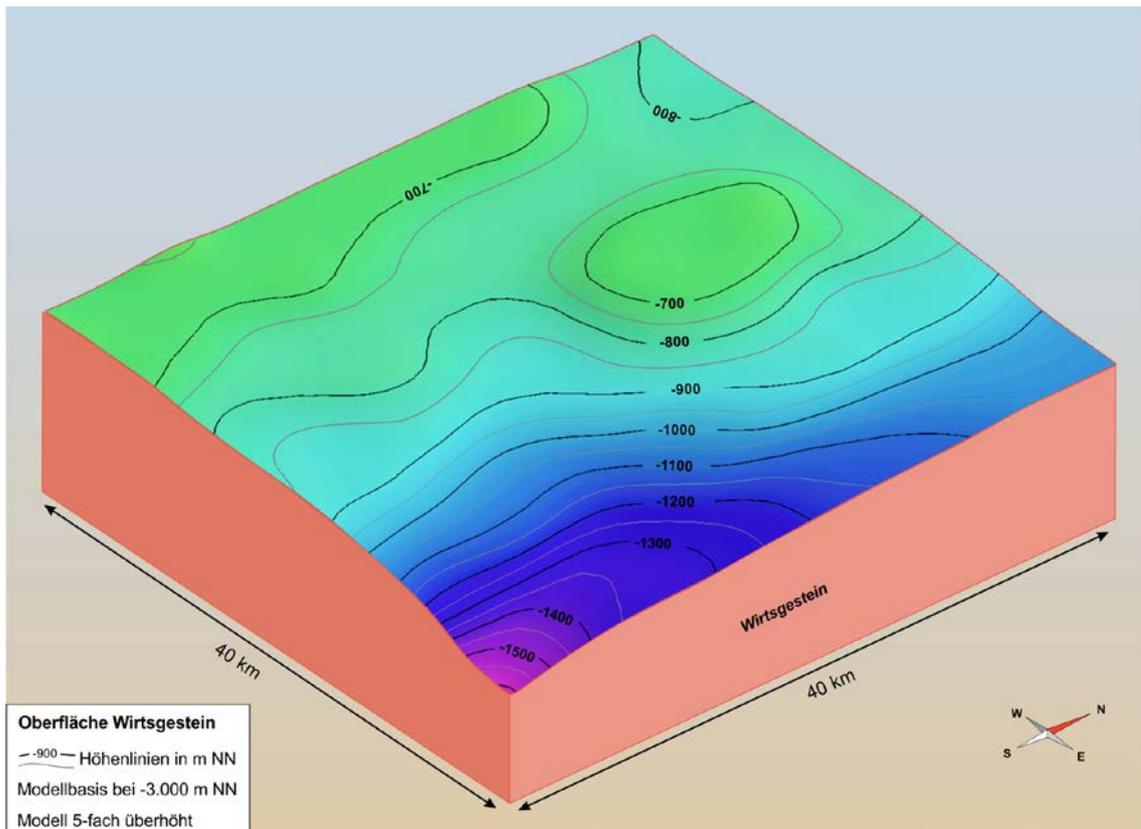


Abb. 10: Modell „überlagernder ewG“ mit der Oberfläche des Wirtsgesteins. Diese entspricht der Grenze Grundgebirge – Zechstein.

Das Wirtsgestein wird im Modell nur bis in eine Tiefe von -3.000 m NN dargestellt. Die Oberfläche des Wirtsgesteins befindet sich zwischen ca. -650 m und -1.600 m NN (vgl. Abb. 10) bzw. zwischen 850 m und 1.900 m u. GOK (vgl. Abb. 11). Hochlagen befinden sich im westlichen und zentralen Bereich des Modellgebietes, wo sich auch das Endlagerbauwerk befinden soll (Abb. 12). In Richtung südöstlicher Modellgrenze sinkt sie kontinuierlich bis auf maximal ca. 1.900 m u. GOK ab, weshalb dort keine Einlagerung der Abfälle vorgesehen ist.

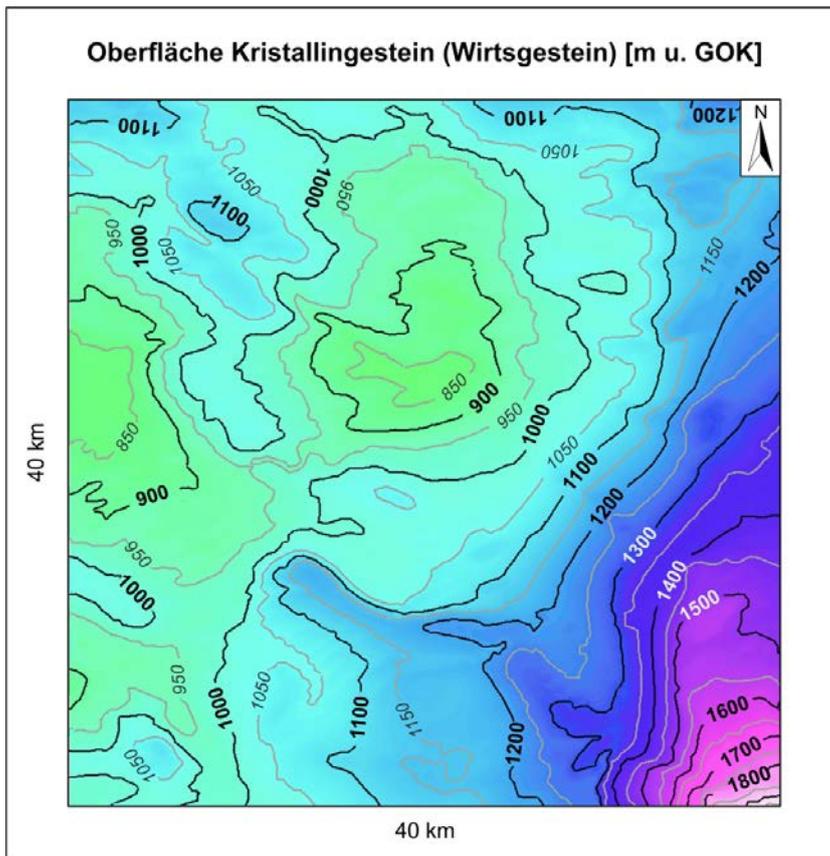


Abb. 11: Tiefenlage der Oberfläche des Wirtsgesteins bezogen auf die Geländeoberkante

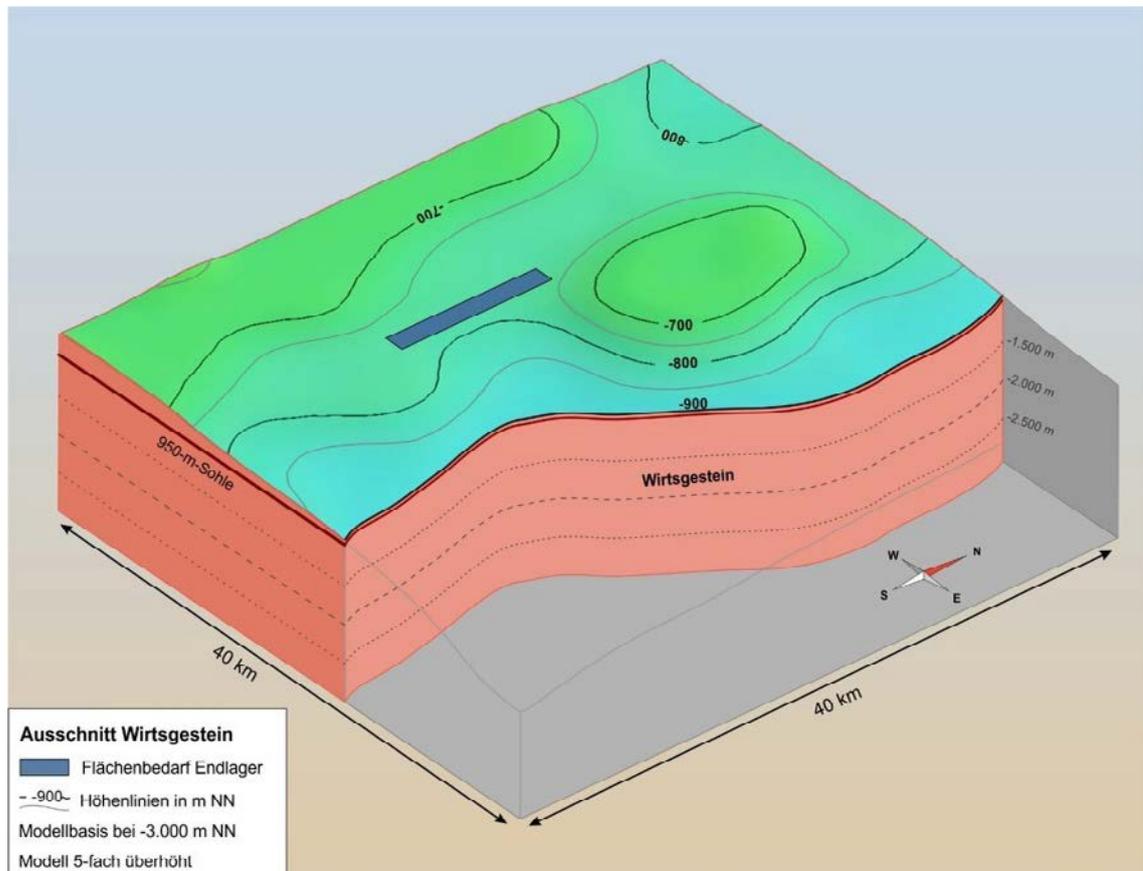


Abb. 12: Angeschnittenes Modell „überlagernder ewG“ mit der Oberfläche des Wirtsgesteins, einer möglichen Lokation und dem Flächenbedarf des Endlagers (blaues Rechteck) von der 950-m-Sohle auf die Oberfläche des Wirtsgesteins projiziert.

Am Top des Wirtsgesteins wird ein infolge von oberflächennahen Verwitterungsvorgängen in der geologischen Vergangenheit ehemals aufgelockerter und stärker geklüfteter Bereich von ca. 20 m Mächtigkeit angenommen (vgl. auch Abb. 26), der an die hangende Barriereformation angrenzt. Dieser wird allerdings im Kluftmodell (vgl. Kapitel 4.5) nicht getrennt behandelt und dargestellt. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da schon während der Ablagerung der Zechstein-Gruppe hochsalinare Lösungen in Klüfte des kristallinen Wirtsgesteins eindringen, weshalb durch anschließende Ausfällung von Mineralen das Kluftvolumen abnahm. Außerdem sind in der im Modell angenommenen Tiefenlage durch den dort herrschenden Überlagerungsdruck die meisten der Klüfte wieder geschlossen, was ebenfalls Auswirkungen auf die hydraulische Leitfähigkeit und Vernetzung hat.

Für die hydrogeologische Modellbetrachtung sind die hydraulisch wirksamen Klüfte relevant. Es ist davon auszugehen, dass Permeabilitätsdifferenzen sowohl innerhalb eines Kluftsystems, einer Kluftchar als auch über die Fläche einer einzelnen Kluft auftreten. Einzelne Klüfte sind oft nicht durchgehend durchlässig, sondern zeichnen sich vor allem

aufgrund von Aperturschwankungen durch ein stark variierendes hydraulisches Verhalten aus.

Mit der Tiefe verringern sich insbesondere die Häufigkeit horizontaler Entlastungsklüfte und die Öffnungsweiten innerhalb des Kluftnetzwerkes, was Auswirkungen auf die hydraulische Leitfähigkeit und Vernetzung hat. Aufgrund einer konservativen Betrachtungsweise und zur Vereinfachung des Modells wird eine gleichmäßige Verteilung der Klüfte gewählt. Das Hauptkluftnetzwerk besteht aus einem System von orthogonal angeordneten, NE-SW und NW-SE streichenden, subvertikalen Klüften und einer flach einfallenden, subhorizontalen Kluftschar. Zusätzlich tritt eine subvertikale, N-S streichende Kluftschar auf (Abb. 23).

Für das Modellgebiet wird ein Umfeld angenommen, in dem nur mit sehr geringen tektonischen Bewegungen gerechnet werden muss und das maximal der Erdbebenzone 1 entspricht. Großräumige Störungszonen treten nicht auf und werden aufgrund der geologischen Rahmenbedingungen auch zukünftig nicht erwartet.

#### **4.3.2 Barriereformation**

Im Gegensatz zu Salzdiapiren (Salzstöcken, Salzmauern), bei denen die Salinarschichten infolge des Salzaufstiegs Einheiten des Deckgebirges durchbrochen haben, sind flach lagernde Salzschichten innerhalb der sedimentären Schichtenfolge durch großräumige konkordante (subparallele) Lagerungsverhältnisse gekennzeichnet (Völkner et al. 2017). In flach lagernden, steinsalzführenden Schichtenfolgen können, lokal begrenzt, flachwellige Deformationsstrukturen (Intrasalinarstrukturen mit Schichtneigung und Mächtigkeitsschwankungen des Steinsalzes) und kleinräumig verfaltete Salinarschichten vorkommen. Salzkissen als domförmige Sonderform flach lagernder Salinarschichten, die durch Salzzuwanderung entstehen, sind im Modell nicht enthalten.

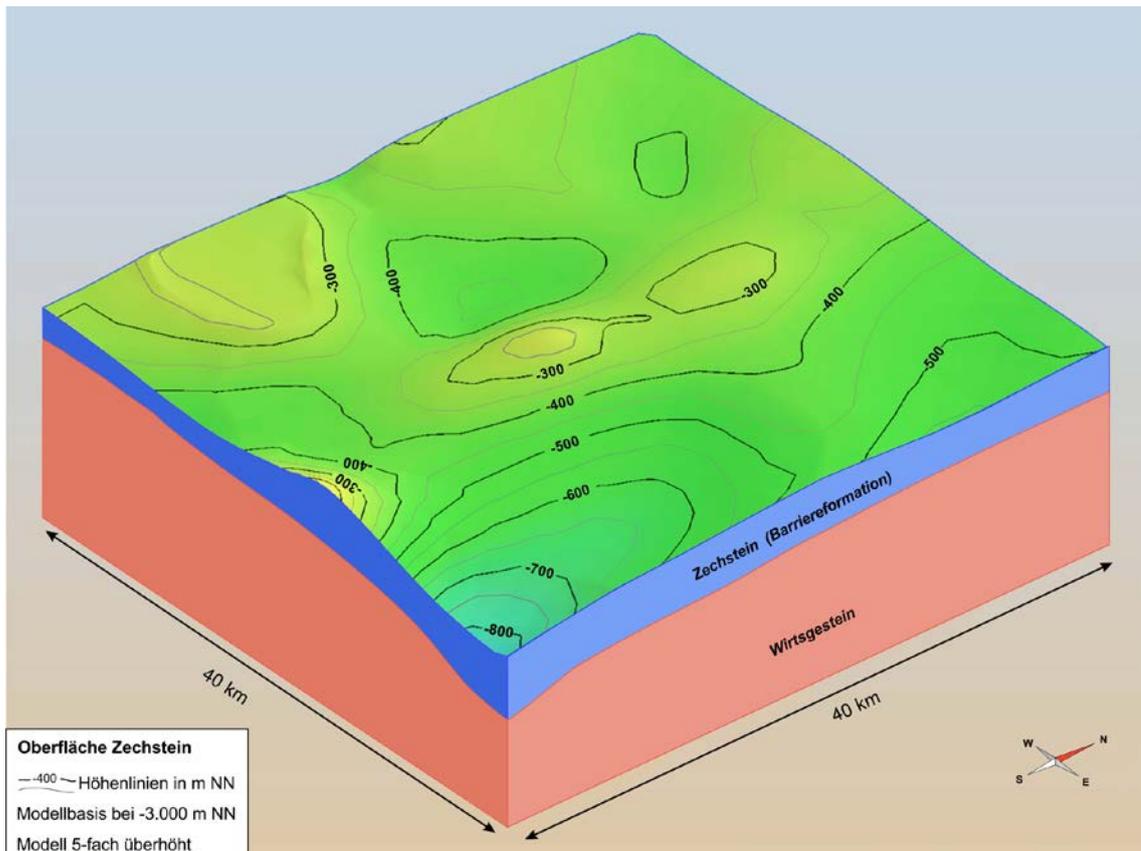


Abb. 13: Oberfläche der Barriereformation

Die den ewG beinhaltende Barriereformation wird im Modell „überlagernder ewG“ vereinfachend als eine stratigraphisch nicht näher klassifizierte Einheit angenommen, die sich aus einer zechsteinzeitlichen Gesteinsabfolge zusammensetzt, die überwiegend aus Anhydritgestein, Stein- und Kalisalz aufgebaut ist. Die häufig an der Basis der Salinarzyklen abgelagerten geringmächtigen Ton- und Sandsteine sowie Karbonatgesteine werden den Anhydritlagen zugeordnet und nicht gesondert betrachtet.

Das Top der Formation liegt etwa in einem Tiefenbereich zwischen -150 m NN und -850 m NN (Abb. 13) bzw. unter Berücksichtigung des Reliefs (100–400 m NN) zwischen 350 m und 1.230 m u. GOK (s. Abb. 15). Dabei variiert ihre Mächtigkeit zwischen 275 und 770 m (s. Abb. 14).

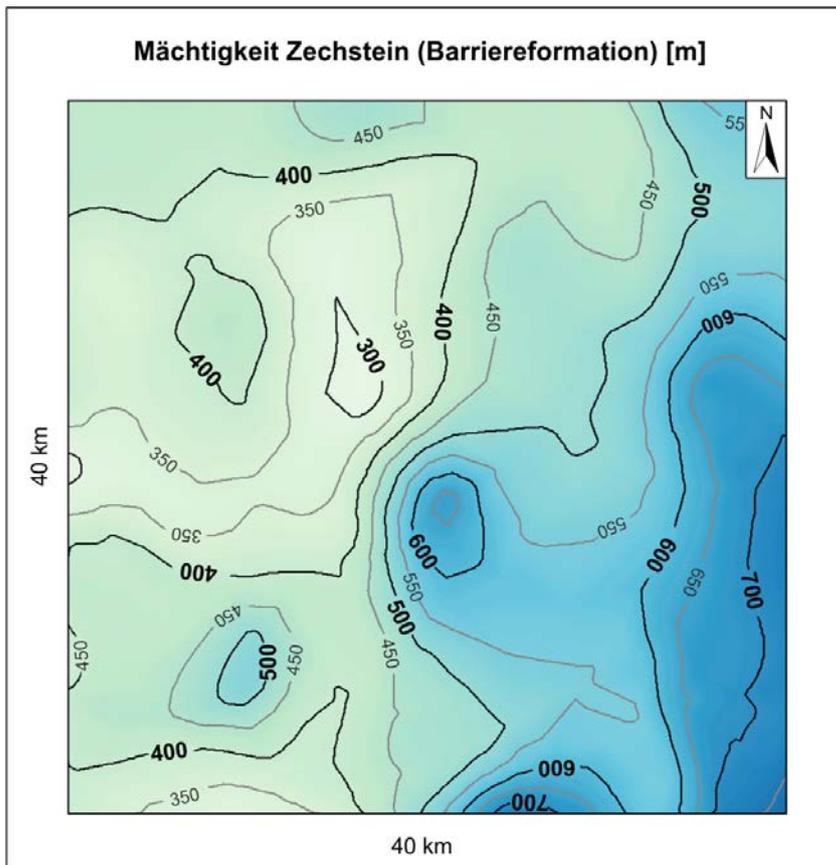


Abb. 14: Mächtigkeit der Barriereformation

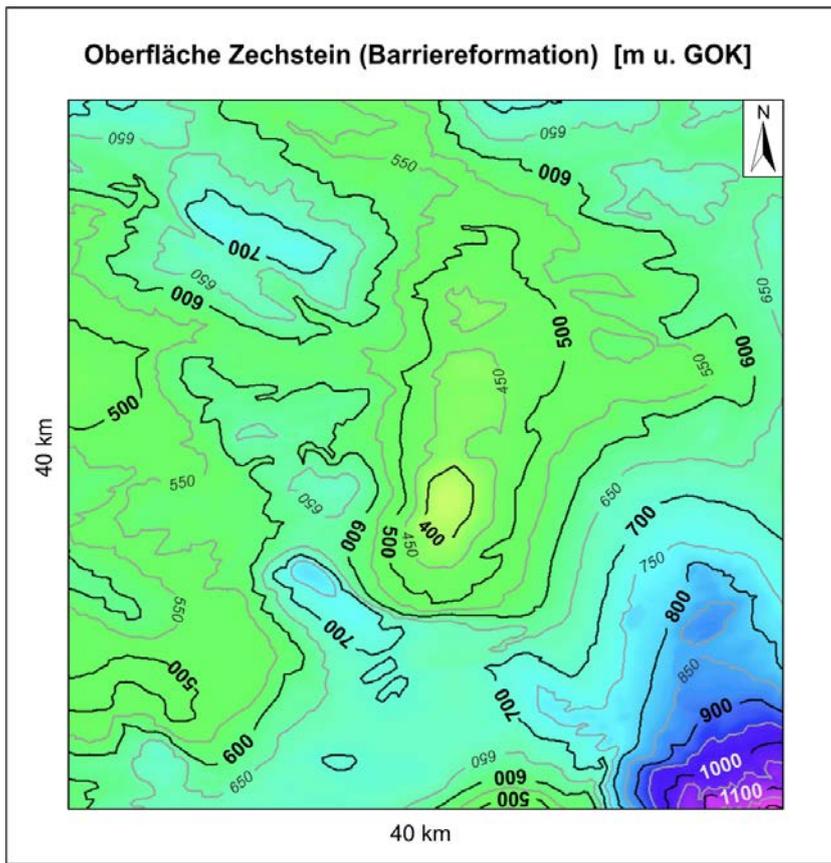


Abb. 15: Tiefenlage der Barriereformation unter Geländeoberkante

Sie setzt sich vom Liegenden zum Hangenden aus einer geringmächtigen basalen Einheit aus Anhydritgestein mit karbonatischen Anteilen, gefolgt von einer mächtigen Steinsalzlage zusammen. Darüber schließt sich eine Wechselfolge aus Kalisalz, Anhydritgestein mit tonigen Anteilen, Steinsalz und wiederum Kalisalz in unterschiedlichen Mächtigkeiten an. Zuoberst folgt eine Steinsalzlage, in die eine geringmächtige Schicht aus Anhydritgestein mit tonigen Anteilen eingelagert ist. Ein Hutgestein wird nicht dargestellt. Der Horizont, in dem der „überlagernde ewG“ ausgewiesen wird, ist das Steinsalz an der Basis der Formation. Dieses liegt im Modell in einer Tiefe zwischen ca. 650 m und 1.800 m u. GOK (Top ca. 175 m über dem Wirtsgestein) und besitzt eine angenommene Mächtigkeit von ca. 150 m. Für den Bereich des geplanten Endlagers im zentralen westlichen Teil des Modells (vgl. Abb. 12) kann somit von einer Tiefenlage zwischen ca. 700 und 800 m u. GOK ausgegangen werden. Dieser Horizont wird jedoch nicht gesondert im Modell dargestellt.

Innerhalb der Barriereformation sind Klüfte lokal in den Grenzbereichen von kompetenten (Anhydritgestein) und inkompetenten (Stein- und Kalisalz) bzw. in den kompetenten Gesteinen selbst vorhanden. Die Klüfte sind durch Steinsalz und Carnallit sowie untergeordnet Sylvin und Polyhalit verschlossen. Derartige Prozesse führen dazu, dass die geomechanischen Eigenschaften wieder denen von ungeklüfteten Gesteinen entsprechen

(z. B. Brodsky & Munson 1994; Plischke 2014). Offene, Fluid-gefüllte Klüfte werden hauptsächlich im Anhydritgestein angenommen (siehe FEP „Lösungen bzw. Gase in der Barriereformation“ (Mrugalla et al. 2020)). Sie stellen im Modell räumlich isolierte Hohlräume dar, die kein größeres zusammenhängendes Klufsystem ergeben.

Der Bereich des Steinsalzes, in dem der „überlagernde ewG“ ausgewiesen ist, wird als klutfrei angesehen. Aufgrund der Kriechfähigkeit des Steinsalzes und des isotropen Spannungszustandes können in diesen Gesteinspartien langfristig offene Klüfte ausgeschlossen werden. Verschlussene bzw. verheilte Klüfte stellen keine Beeinträchtigung des ewG dar.

### 4.3.3 Deckgebirge

Das Deckgebirge im Modell umfasst eine vereinfachte Abfolge triassischer Sedimentgesteine, bestehend aus einer dreigliedrigen Buntsandsteinabfolge (Unterer, Mittlerer und Oberer Buntsandstein) und dem hangenden, stratigraphisch nicht weiter unterteilten Muschelkalk. In Flussauen wird von quartären Sedimenten ausgegangen, die aber aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit nicht im Modell dargestellt werden. Die einzelnen Einheiten des Deckgebirges liegen in subhorizontaler Lagerung mit Mächtigkeitsschwankungen, die zum Teil mehrere 100 m betragen, vor. Aufgrund der Topographie (Abb. 9) und des gewellten Verlaufs der Schichtgrenze Zechstein/Buntsandstein (Abb. 13) variiert auch die Gesamtmächtigkeit des postpermischen Deckgebirges stark. Minimalwerte von ca. 350 m befinden sich im Zentrum des Modellgebiets, maximale Mächtigkeiten von über 1000 m werden im Südosten erreicht. In den folgenden Abschnitten wird genauer auf die einzelnen Schichtglieder des Deckgebirges eingegangen.

#### Unterer Buntsandstein

Abb. 16 zeigt die Oberfläche des Unteren Buntsandstein. Diese weist vor allem im nördlichen und im östlichen Bereich Höhenlagen auf. Im Südosten ist eine Senke erkennbar. Auf die Geländeoberkante bezogen (Abb. 17, links) wird der Untere Buntsandstein im nordöstlichen Modellgebiet bereits in ca. 300 m Tiefe angetroffen und erreicht im Südosten seine maximale Tiefe von über 800 m u. GOK. Die Mächtigkeit des Unteren Buntsandstein (Abb. 17, rechts) nimmt generell von Westen nach Osten hin zu. Im Osten erreicht er mit bis zu 350 m deutlich größere Mächtigkeiten als im Westen, wo z. T. nur wenige Zehnermeter verbleiben.

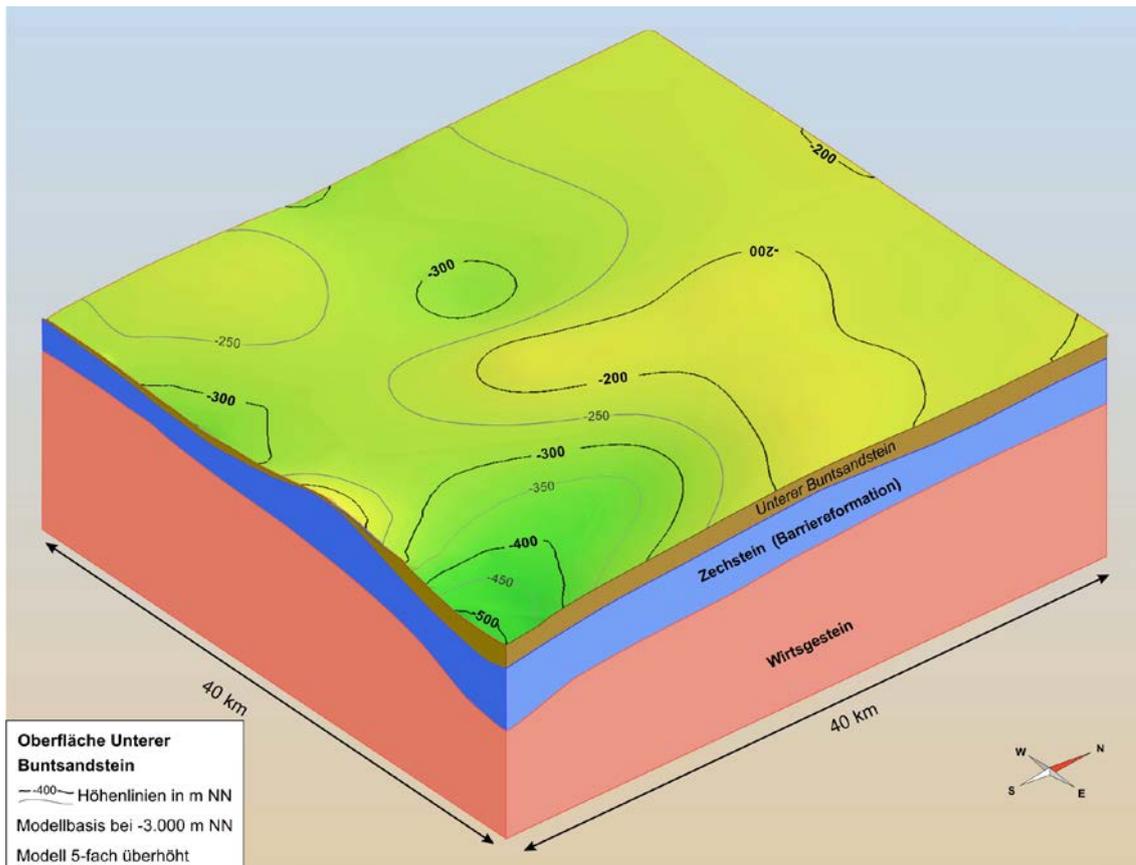


Abb. 16: Modell „überlagernder ewG“ bis zur Oberfläche des Unteren Buntsandstein. Diese entspricht der Grenze Unterer Buntsandstein – Mittlerer Buntsandstein.

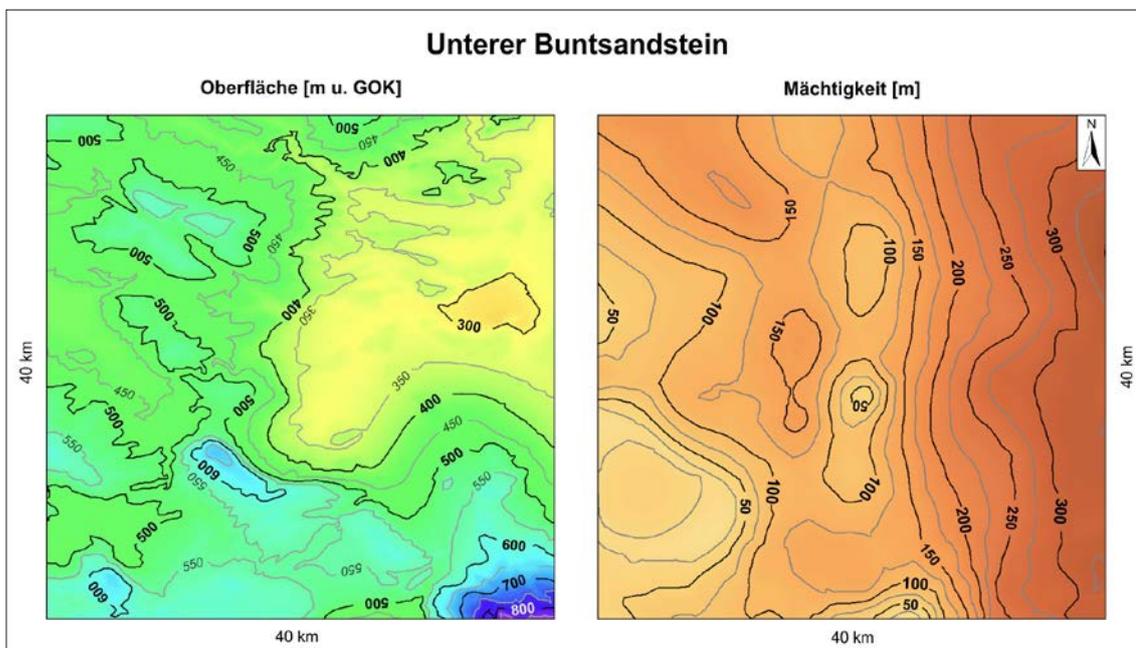


Abb. 17: Lage der Oberfläche unter Geländeoberkante und Mächtigkeit des Unteren Buntsandstein

## Mittlerer Buntsandstein

Auch die Oberfläche des Mittleren Buntsandstein weist Höhenmaxima im nordöstlichen Modellgebiet auf und zeigt eine Tieflage im Südosten (Abb. 18). Diese sind auch bei der Darstellung mit Bezug zur Geländeoberkante erkennbar (Abb. 19, links). Die Mächtigkeit des Mittleren Buntsandstein nimmt generell von Westen nach Osten hin zu und liegt zwischen ca. 75 m Westen und ca. 250 m im Südosten (vgl. Abb. 19, rechts).

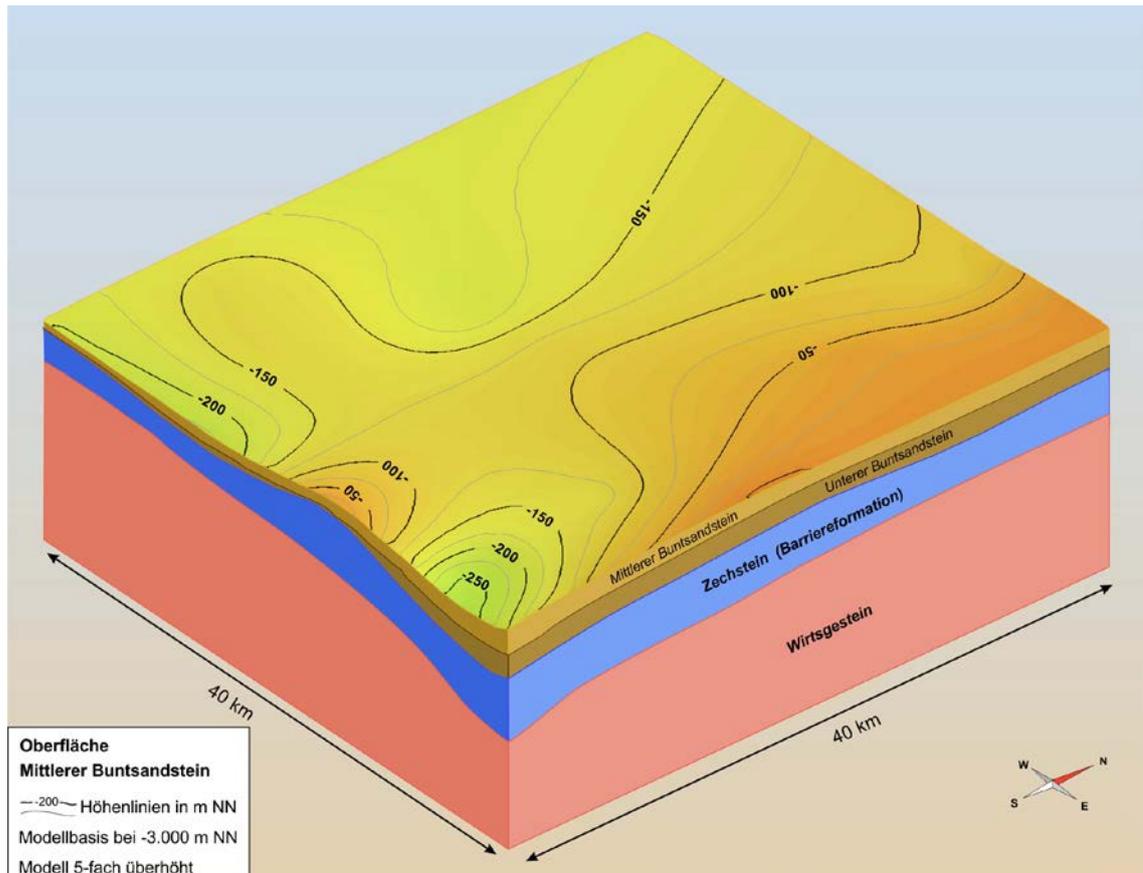


Abb. 18: Modell „überlagernder ewG“ bis zur Oberfläche des Mittleren Buntsandstein. Diese entspricht der Grenze Mittlerer Buntsandstein – Oberer Buntsandstein.

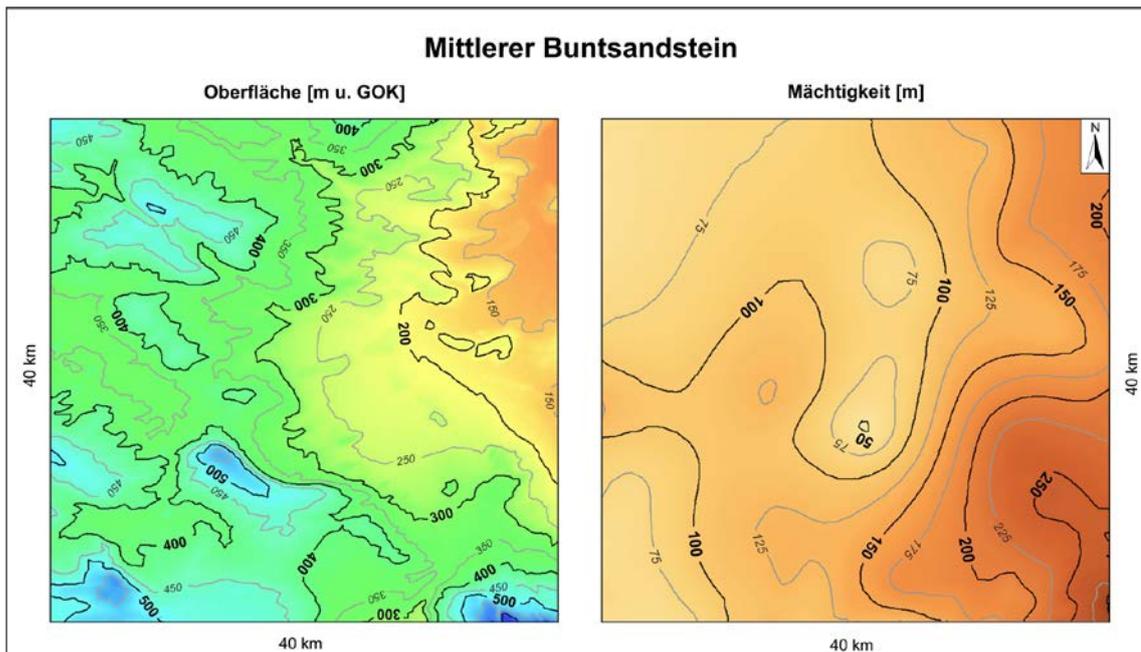


Abb. 19: Lage der Oberfläche unter Geländeoberkante und Mächtigkeit des Mittleren Buntsandstein

### Oberer Buntsandstein

Die Oberfläche des Oberen Buntsandstein stellt eine flach von Ost nach West einfallende Fläche dar (Abb. 20). Im nordöstlichen Teil des Modellgebietes wird der Obere Buntsandstein bereits in 50 m u. GOK angetroffen (Abb. 21, links). Seine Tiefenlage erhöht sich von Ost nach West und erreicht in den südwestlichen Abschnitten mit stärkerem Relief über 400 m u. GOK. In weiten Bereichen des Modellgebietes sind die Ablagerungen des Oberen Buntsandstein ca. 100 m mächtig, größere Mächtigkeiten bis über 200 m werden im SSW und SSE erreicht (Abb. 21, rechts).

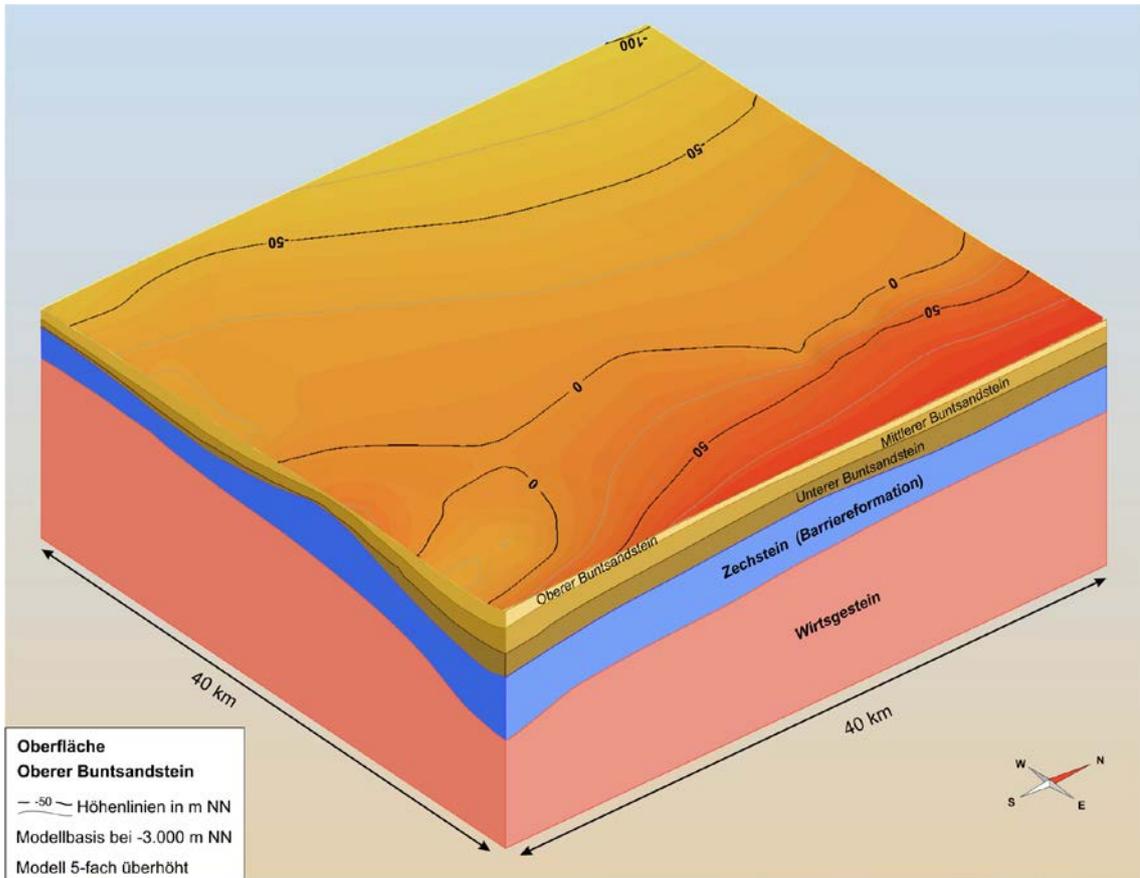


Abb. 20: Modell „überlagernder ewG“ bis zur Oberfläche des Oberen Buntsandstein. Diese entspricht der Grenze Oberer Buntsandstein – Muschelkalk.

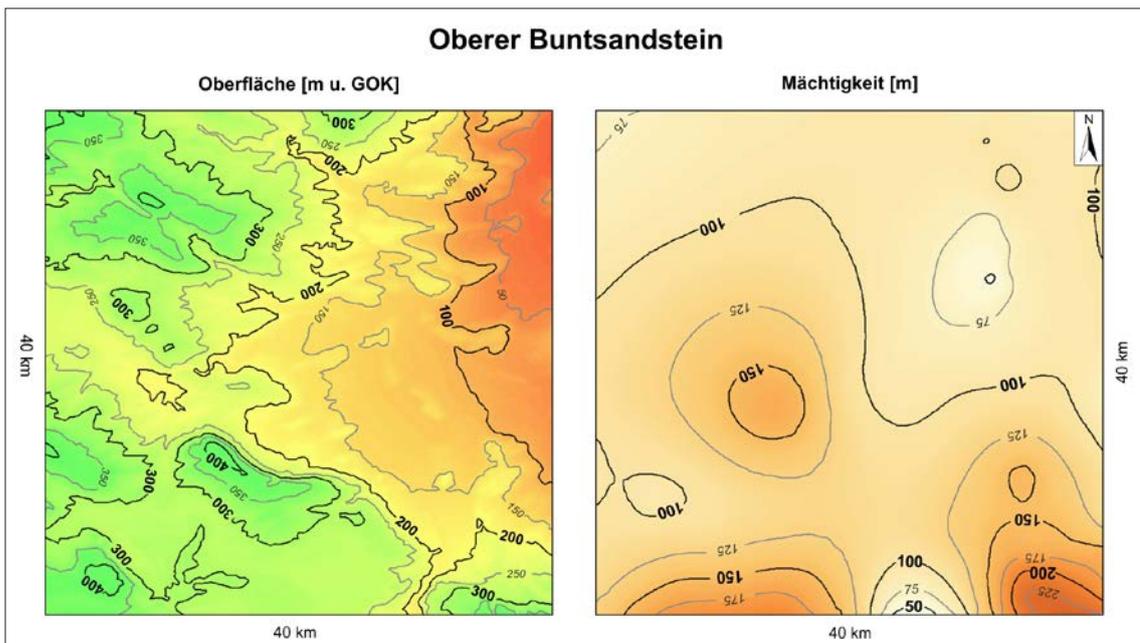


Abb. 21: Lage der Oberfläche des Oberen Buntsandstein unter Geländeoberkante und Mächtigkeit

## Muschelkalk und Quartär

Die quartären Schichten, die die Ablagerungen des Muschelkalk vor allem in den Niederungen und Flussauen überlagern, sind aufgrund ihrer geringen Verbreitung und Mächtigkeit im Modell nicht visualisiert. Es wird angenommen, dass sie im Modell Maximalmächtigkeiten bis ca. 10 m erreichen. Somit entspricht die in Abb. 9 dargestellte Geländeoberfläche in etwa der Oberfläche des Muschelkalk. Die Ablagerungen des Muschelkalk erreichen im Westen des Modellgebiets Mächtigkeiten bis ca. 400 m, im Osten verringert sich die Mächtigkeit auf weniger als 50 m (Abb. 22).

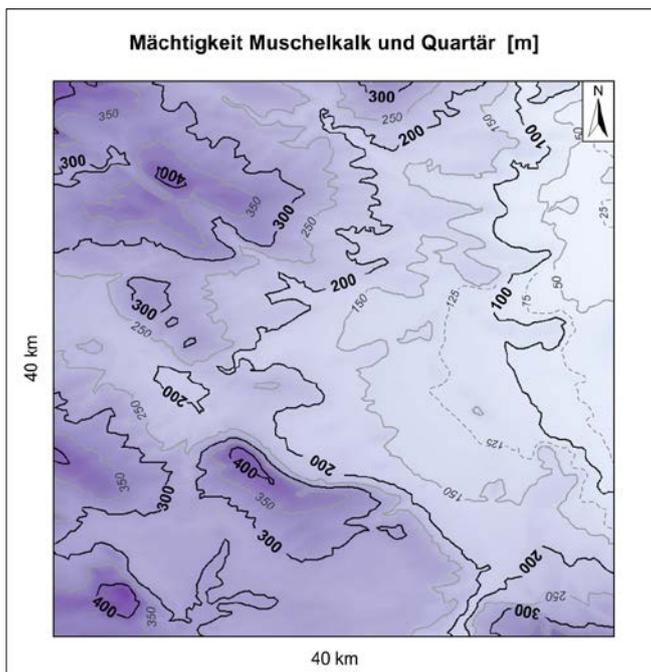


Abb. 22: Mächtigkeit von Muschelkalk und Quartär

Die Lage des Modellgebiets wurde so festgelegt, dass darin keine großräumigen Störungszonen vorkommen. Die mesozoische Schichtenfolge ist nicht durch markante bruchtektonische, salinartektonische oder halokinetische Strukturen verstellt. Für das Deckgebirge wird ein Kluftsystem angenommen, das durch in der Vergangenheit aufgetretene Gebirgs- spannungen entstanden ist. Ein generisches Kluftinventar wurde für das Deckgebirge nicht modelliert.

Aufgrund der unterschiedlichen Lithologien der Deckgebirgs-Einheiten kann angenommen werden, dass die Klüfte in den einzelnen Modell-Einheiten hinsichtlich ihrer hydraulischen Wirksamkeit unterschiedlich ausgeprägt sind (vgl. Kapitel 4.7.1). So sind in den durch Kalkstein dominierten Einheiten des Muschelkalk sowie in den sandigen Schichtenfolgen des Mittleren Buntsandstein hydraulisch wirksame Klüfte zu erwarten, während für den Unteren und Oberen Buntsandstein nur wenige Klüfte mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit

vermutet werden. In den oberflächennahen, nur lokal auftretenden Lockersedimenten der Modelleinheit des Quartär werden keine Klüfte angenommen.

#### **4.4 Genese und tektonische Entwicklung**

Für das Kristallingestein im Modellgebiet wird eine Entwicklung und ein regionalgeologisches Umfeld wie beim Saxothuringikum angenommen (vgl. Kapitel 3.1.1). Während der variszischen Orogenese drangen syn- bis spätorogene granitische bis dioritische Magmen in Sedimente und metamorphe Serien ein und bildeten ausgedehnte Plutone. Im Rahmen der variszischen und alpinen Orogenese kam es zur Anlage von großräumigen Störungen. Diese können im weiteren Umfeld des Modells auftreten. Innerhalb des Modells selbst sind keine Störungen vorhanden, da Bereiche mit aktiven Störungszonen wie auch Gebiete mit zu erwartenden seismischen Gefährdungen, großräumigen Hebungen und Vulkanismus im StandAG (2017) und folglich auch im generischen Modell ausgeschlossen werden. Die im Umfeld des Modells auftretenden Störungen hatten jedoch Einfluss auf das Spannungsregime des Gebirges und trugen zur Anlage des Kluftsystems (vgl. Kapitel 4.5) im Modellgebiet bei.

Die generelle Absenkungstendenz während des späten Mesozoikums (Jura und Kreide) führte zur Erhaltung der triassischen und permischen Gesteine im Beckenbereich. Känozoische Entwicklungen betrafen insbesondere das Deckgebirge im Modell. Von besonderer Bedeutung sind insbesondere die kaltzeitlich bedingten Vorgänge im Pleistozän, da aus ihnen die möglichen Entwicklungen für das Modell „überlagernder ewG“ im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre abgeleitet werden können. Ausführungen zu den zukünftig zu erwartenden glazialen Prozessen wie z. B. glaziale Erosion und Rinnenbildung erfolgen im FEP-Katalog (Mrugalla et al. 2020).

Im Pleistozän wurden das Modellgebiet und sein Umfeld von den Randausläufern der ausgedehnten Eisschilde (Saale und Elster) erreicht. In diesen Randbereichen betrug die Eisüberdeckung bei maximaler Ausdehnung des Inlandgletschers einige 100 Meter; im Modellgebiet wurden maximale Eismächtigkeiten von ungefähr 500 m erreicht. Die Eismassen haben die heute vorliegende Topographie (siehe Abb. 7) durch Gletscherschurf und Aufweitung der Talbereiche mitbestimmt. Insgesamt war die angenommene flächenhafte Erosion bei den gegebenen klimatischen und topografischen Verhältnissen im Modellgebiet nur gering ausgeprägt, durchschnittlich lagen die Denudationsraten deutlich unter 0,1 mm/a (vgl. Mrugalla et al. 2020).

Aufgrund der dem Modell zugrunde liegenden Randlage innerhalb der Vereisungsgebiete, lag die Eisüberdeckung während der pleistozänen Kaltzeiten nur zeitlich begrenzt vor, so dass

entsprechend wenig Zeit für die linienhafte Erosion durch glaziale Rinnen zur Verfügung stand. Diese trat im Modellgebiet vorwiegend in tiefer gelegenen Reliefabschnitten auf und es bildeten sich lediglich flache Rinnen mit einer Tiefe von maximal 50 m.

Neben der Erosion müssen im Zusammenhang mit der Vereisung auch die zusätzliche Auflast und die Beeinflussungen der Hydrogeologie betrachtet werden. Die Hydrogeologie wurde im Zusammenhang mit der Vereisung beeinflusst durch zeitweise Änderung des Grundwasserstroms im oberen Grundwasserleiter (Muschelkalk, Karst). Darüber hinaus wurde durch den gesteigerten Zustrom von Süßwässern in Form von Schmelzwässern der Chemismus der Wässer verändert und die Karstbildung begünstigt.

#### **4.5 Geologisches 3D-Kluftmodell**

Der Modellierung von Kluftnetzwerken kommt im Projekt CHRISTA-II eine wesentliche Bedeutung zu, da die Permeabilität im Kristallingestein nahezu ausschließlich durch die Klüfte bestimmt wird. Zur Generierung und Implementierung von Kluftnetzwerken in 3D-Modellen können „discrete fracture network Modelle“ (DFN-Modelle) eingesetzt werden (Lei et al. 2017). Das geologische Kluftmodell des Modellgebietes wurde mit dem Programm FracMan® (Fracman 7.80 Nuclear Edition) der Fa. Golder Associates (Dershowitz & Einstein 1988; Dershowitz et al. 2004) erstellt. Details zu den in FracMan® verwendet Methoden zur räumlichen Verteilung der Klüfte im Modellvolumen und zur Berechnung ihrer Größenverteilung sind in (Golder Associates 2017a, 2017b) beschrieben.

Zu den wichtigsten permeabilitätsbestimmenden Kluftparametern gehören u. a. Orientierung, Dimension (Länge, Höhe, Öffnungsweite), Kluftintensität sowie Vernetzung. Diese Daten bilden die Grundlage für DFN-Modelle und stammen in Projekten mit Lokalbezug aus Aufschlüssen, Bohrungen und/oder untertägigen Auffahrungen. Obwohl Kluftorientierungen im Kristallingestein über große Distanzen konstant sein können (Krumbholz 2010), sollten lokal erhobenen Daten von Kluftnetzwerken nicht direkt auf größere Gesteinsvolumen übertragen werden, da die Eigenschaften von Kluftnetzwerken insgesamt räumlich sehr variabel sein können (Bauer et al. 2017). Um der räumlichen Variabilität Rechnung zu tragen, sollten die einzelnen Parameter von Klüften und Kluftnetzwerken mit stochastischen Methoden im Modell variiert werden.

Für deutsche Kristallinvorkommen liegen jedoch kaum repräsentative Daten aus für Endlager geeigneten Tiefenbereichen vor. Daher wurden für die Erzeugung des generischen Kluftsystems Annahmen getroffen, die typisch für Kluftsysteme in Kristallingestein sind, wie zum Beispiel, dass ein orthogonales Kluftsystem vorliegt (vgl. z. B. Reuther 2012).

Zusätzlich wurde auf Erfahrungen aus internationalen Projekten wie z. B. in der Schweiz (Amiguet 1985; Keusen et al. 1989) und in Schweden (SKB 2008) zurückgegriffen.

Für das kristalline Grundgebirge im generischen Modell „überlagernder ewG“ erfolgt keine Trennung in verschiedene Modellbereiche. In der Modellbeschreibung wird lediglich am Top ein stärker geklüfteter bzw. ehemals aufgelockerter Bereich von ca. 20 m Mächtigkeit angenommen (vgl. Kapitel 4.3.1), der im Kluffmodell aber nicht getrennt behandelt und dargestellt wird.

Die räumliche Verteilung und die Geometrie der Klüfte wurden in FracMan<sup>®</sup> entsprechend dem „Enhanced baecher model“ (Golder Associates 2017a, 2017b) festgelegt. Zudem wurde initial die Auswirkung der Anwendung verschiedener statistischer Verteilungen (Exponential, Log-normal, Power-law) untersucht, indem die Dimensionierung jeder Kluff als stochastisch angenommen wurde. Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den mit den verschiedenen statistischen Verteilungen erzeugten Kluffpopulationen/Kluffsystemen mit steigender Kluffanzahl im Modell abnahmen. Für das generische Modell wurde für die Größenverteilung der Kluffdimensionen (Länge, Höhe), wie üblich bei der Generierung von Kluffmodellen (vgl. Bonnet et al. 2001), eine Power-law Verteilung angenommen.

Die in den Modellen angenommenen Klüfte bilden nicht die in der Natur häufig zu beobachtenden zahlreichen kleinen vernetzten Klüfte ab, sondern eine Klufffläche im Modell stellt eine vereinfachende Zusammenfassung von Klüften mit annähernd gleicher Ausrichtung dar. Diese Zusammenfassung deterministisch verbundener Klüfte wird als Upscaling bezeichnet (Bossart et al. 2001; Hartley & Roberts 2013) und war aufgrund der Größe des Modellgebietes notwendig. Die Orientierungen der Klüfte innerhalb der verschiedenen Kluffscharen wurden mit einer Fisher-Verteilung variiert um eine natürliche Streuung zu simulieren.

Für das Modell „überlagernder ewG“ wurden verschiedene Kluffnetzwerke generiert. Für die verschiedenen Modellvarianten wurden die Parameterwerte zu Kluffintensität, -länge und -orientierung variiert. Eine Differenzierung zwischen hydraulisch wirksamen und unwirksamen Klüften wurde dabei nicht vorgenommen. Aus den verschiedenen Varianten wurde eine gewählt, die vor allem bei den Klufflängen und -orientierungen gut zu Erfahrungswerten aus anderen Projekten (Amiguet 1985; Keusen et al. 1989; SKB 2008) passt.

Das Kluftsystem im 3D-Modell besteht aus sechs Kluftrichtungen (Tab. 1, Abb. 23). Die drei Hauptkluftrichtungen (K2, K3, K4; Abb. 23) bilden ein orthogonales Kluftsystem, das von den untergeordneten Kluftscharen K1, S1 und S2 begleitet wird.

Tab. 1: Kluftorientierung des generischen Kluftsystems

<b>Kluftsystem</b>	<b>Orientierung</b>		<b>Dimension</b>			
<b>Kluftchar</b>	<b>Fallrichtung</b>	<b>Fallwinkel</b>	<b>Länge [m]</b>		<b>Höhe [m]</b>	
			<b>von</b>	<b>bis</b>	<b>von</b>	<b>bis</b>
K1	083	87	100	500	50	100
K2	040	85	100	1000	100	1000
K3	320	82	100	1000	100	1000
K4	010	5	100	1000	100	1000
S1	007	50	100	1000	100	1000
S2	50	65	100	1000	100	1000

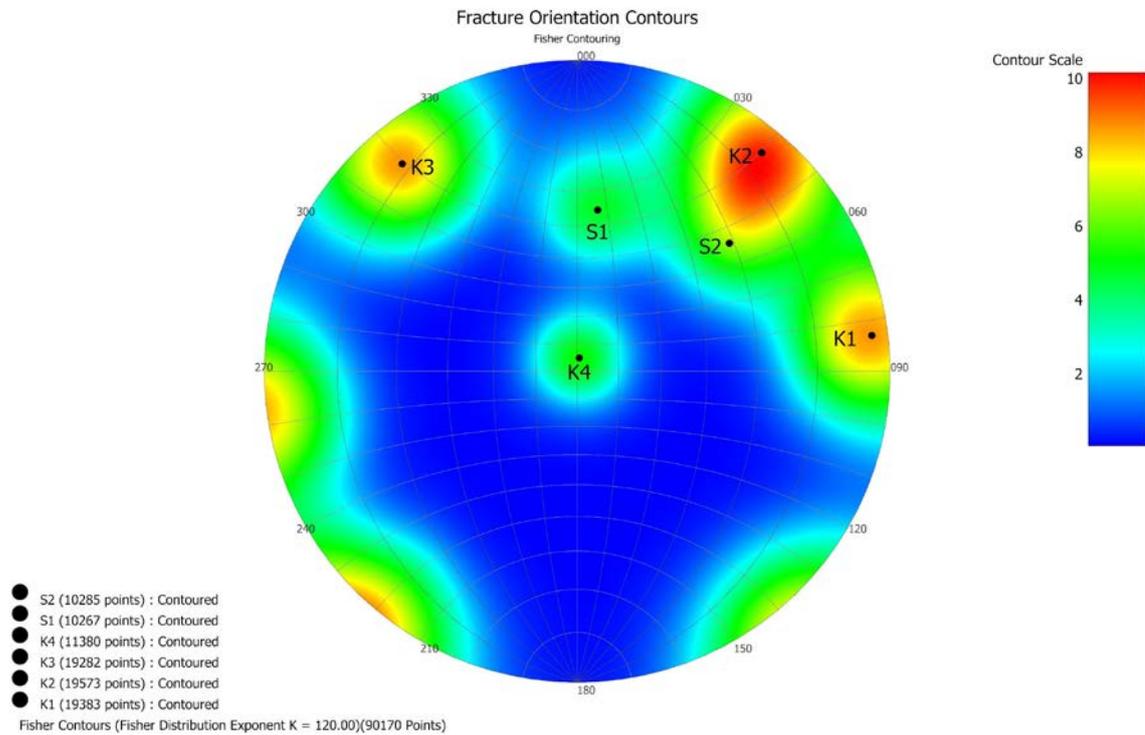


Abb. 23: Klufrichtungen aus Tab. 1 unter Verwendung der Fisherverteilung (Projektion in die obere Hemisphäre)

#### Rahmenbedingungen für das Kluftsystem:

- Ausgewählte Variante: Kluflängen reichen von 100 bis 1000 m.
- Kluflänge: Die im Modell angenommenen Kluflängen ergeben sich aus der kumulativen Länge einzelner miteinander vernetzter Kluftabschnitte (Upscaling).
- Kluftanzahl: Die Kluftanzahl resultiert über die von FracMan<sup>®</sup> bereitgestellte Funktion P32 (fracarea/volume, 1/m) aus dem Verhältnis maximale Kluflänge zur Größe des Modellgebietes und beträgt ca. 90.000).

Im Folgenden wird das Ergebnis der Modellberechnungen zur Kluftverteilung mit FracMan<sup>®</sup> exemplarisch dargestellt (Abb. 24 und Abb. 25).

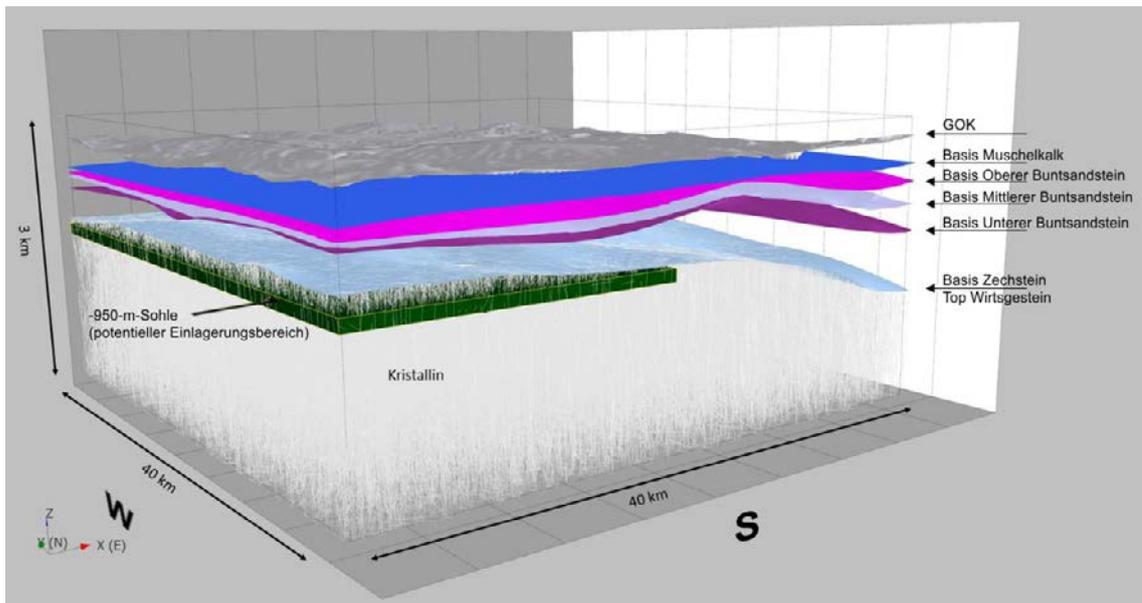


Abb. 24: Geologisches 3D-Kluftmodell „überlagernder ewG“

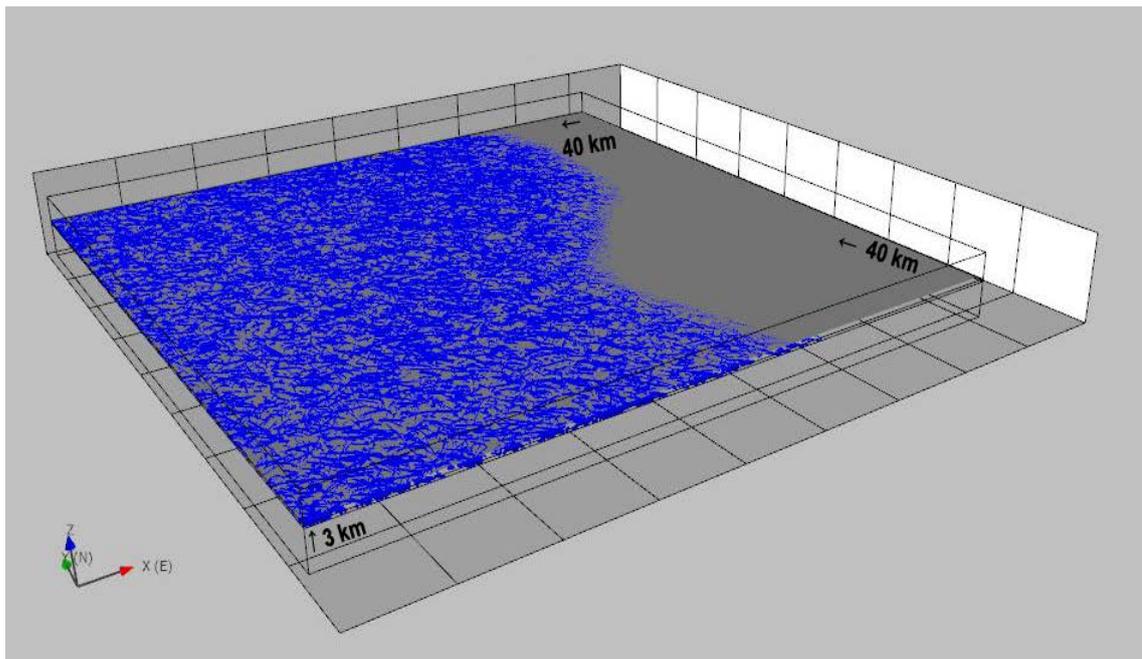


Abb. 25: Ausschnitt des geologischen Kluftmodells mit den Klüften (blau dargestellt), die die Einlagerungs-  
 sohle (-950-m-Sohle) schneiden.

## **4.6 Gesteinscharakterisierung**

Die in Kapitel 4.3 für den geologischen Aufbau beschriebenen stratigraphischen Einheiten werden in Kapitel 4.6.1 lithologisch näher beschrieben. Dies wäre noch wesentlich detaillierter möglich, wird aber für die angestrebte Anwendung des Modells nicht benötigt und daher auf das vorliegende vereinfachte Säulenprofil beschränkt (s. Abb. 26), dessen Lage dem Schachtstandort entspricht (vgl. Abb. 9). Als Grundlage für potentielle Modellierungen wurden petrophysikalische Parameter aus verschiedenen Literaturquellen zusammengestellt. Diese werden im Kapitel 4.6.2 sowie in den Kapiteln 4.7 und Kapitel 4.8 überwiegend tabellarisch aufgeführt. Insbesondere die Varianz dieser Werte bzw. die damit verbundenen Ungewissheiten sind für die Sicherheit eines Endlagers von Interesse.

Da im Rahmen des Modells „überlagernder ewG“ keine speziellen Berechnungen für Deckgebirgseinheiten durchgeführt werden, wurden für die grundlegende petrophysikalische Gesteinscharakterisierung vereinfachte Lithologien genutzt und auf typische Werte der entsprechenden Sedimentgesteine aus der Literatur oder auf Vorarbeiten z. B. aus dem Vorhaben „AnSichT“ (Jahn et al. 2016; Maßmann 2016) zurückgegriffen. Zur Charakterisierung der Barriereformation liegen umfangreiche Vorarbeiten der BGR zu flach lagernden Salzformationen aus dem Vorhaben KOSINA vor, die an dieser Stelle zur Parametrisierung herangezogen werden (Liu et al. 2018; Liu et al. 2017).

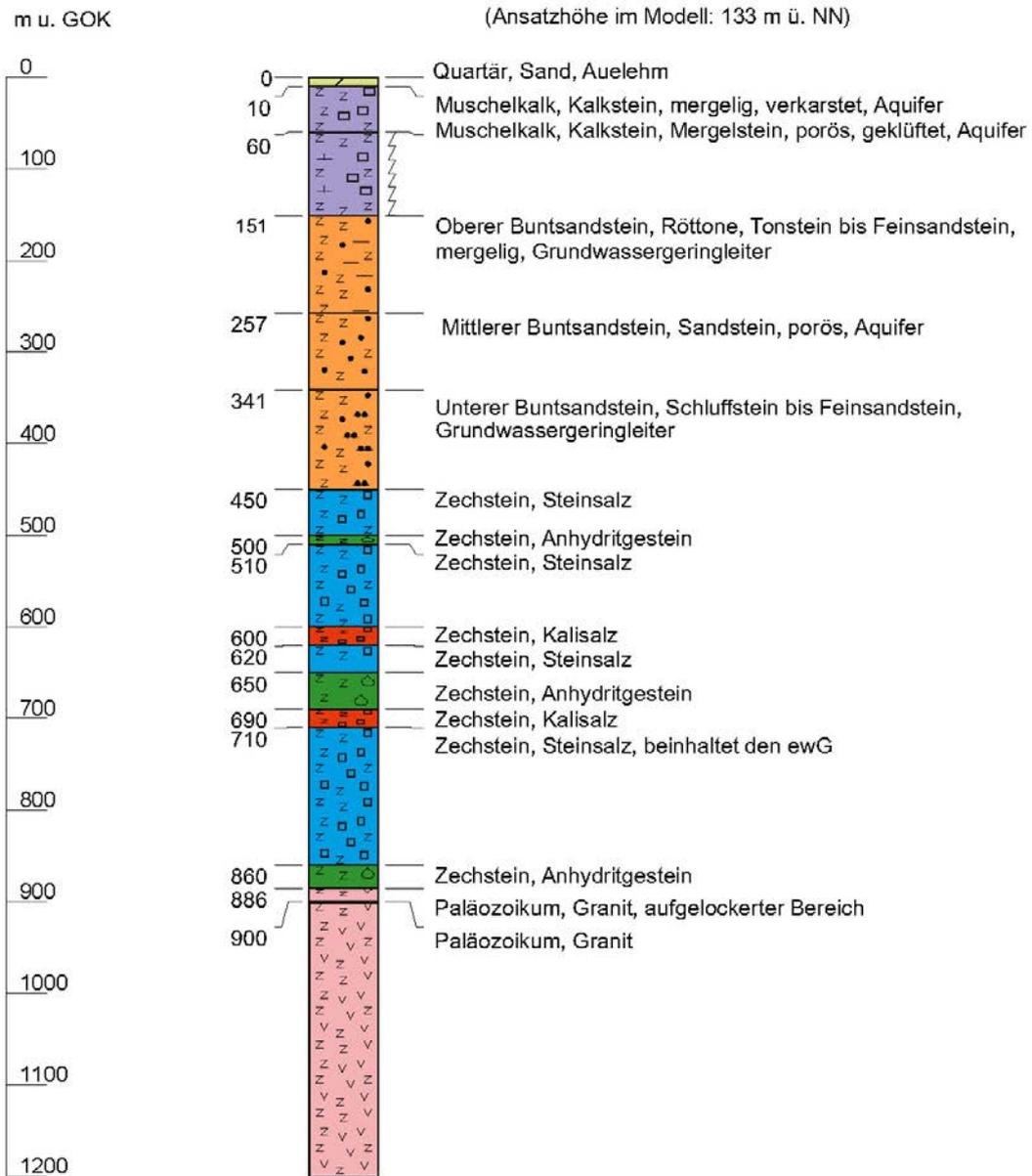


Abb. 26: Bohrprofil im Bereich des Schachtstandortes des Modells „überlagernder ewG“ mit Angaben zur Stratigraphie und Lithologie

#### 4.6.1 Petrographie/Lithologie

##### Wirtsgestein

Kristalline Gesteine können in ihrer Zusammensetzung, ihrem Gefüge, in ihrem Deformations- und Metamorphosegrad etc. stark heterogen sein. Für das Wirtsgestein im Modell werden allerdings relativ homogene Eigenschaften, wie sie oft in Graniten angetroffen werden, angenommen. Das granitische Wirtsgestein ist durch folgende Zusammensetzung charakterisiert:

- Quarz 32 %, Alkalifeldspat 30 %, Plagioklas 26 %, Biotit 9 %, Muskovit 2 % und 1 % Nebengemengteile.

Der Granit zeichnet sich durch ein richtungsloses kompaktes Mineralgefüge aus. Als Nebengemengteile bzw. Akzessorien sind Augit, Hornblende, Apatit, Zirkon, Magnetit, Rutil, Ilmenit und Titanit von Bedeutung. Die Korngröße der einzelnen Minerale variiert stark, liegt aber vornehmlich im mittelkörnigen Bereich (1 - 5 mm). Im Wirtsgestein kommen auch Klüfte vor, die mit Quarz, Feldspäten, Calcit und Chlorit gefüllt sein können. In geringen Mengen können z. B. auch Hämatit, Pyrit, Fluorit und Apatit als Kluftminerale vorkommen.

##### Barriereformation

Die Zechstein Abfolge der Barriereformation besteht überwiegend aus Anhydritgestein, Stein- und Kalisalz. Die häufig an der Basis von Salinarzyklen abgelagerten geringmächtigen Ton- und Sandsteine sowie Karbonatgesteine sind hauptsächlich in den Anhydriteinheiten enthalten und werden mit diesen zusammen parametrisiert und beschrieben. Anhydritgestein ist ein Sulfatsalzgestein, das zu mehr als 80 % aus wasserfreiem Calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) besteht. Steinsalz ist ein Chloridsalzgestein, das zu mehr als 80 % aus Halit ( $\text{NaCl}$ ) besteht. Kalisalze setzen sich aus Mineralen wie Sylvit ( $\text{KCl}$ ), Carnallit ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) und Kainit ( $\text{KMg}[\text{Cl}|\text{SO}_4] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) zusammen. Diese enthalten viel Kalium in Form unterschiedlicher Kaliumverbindungen, weshalb der Kaliumchloridanteil über 80 % liegt (vgl. Ad-hoc-AG Geologie 2008). Weitere typische Minerale im Kalisalz sind Halit und Kieserit ( $\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).

##### Deckgebirge

Die Beschreibung der geologischen Schichtenfolge des Deckgebirges im Modellgebiet orientiert sich an der Germanischen Trias (vgl. Kapitel 3.1.3). Im Folgenden werden die sedimentologischen Eigenschaften der Schichtfolgen vom stratigraphisch Älteren zum Jüngeren beschrieben.

Über dem Zechstein folgen die Ablagerungen des Buntsandstein, die durch eine zyklisch aufgebaute Schichtenfolge aus tonigen bis sandigen Sedimenten gekennzeichnet sind. Der

Untere Buntsandstein besteht vorwiegend aus feinkörnigen, z. T. siltig-tonigen Sandsteinen mit Einschaltungen von mittel- bis grobkörnigen Sandsteinen. Im Mittleren Buntsandstein dagegen dominieren zunächst Mittel- bis Grobsandsteine, zum Hangenden gehen diese in eine Wechselfolge aus Ton- und Siltsteinen mit nur noch geringem Sandanteil über. Im Oberen Buntsandstein kam es zur Ablagerung von Feinsandsteinen, die zum Hangenden in immer feinere Sedimente bis hin zu den Röt-Tonen und -Mergeln übergehen.

Die über dem Buntsandstein folgenden Ablagerungen des Muschelkalk sind im Modellgebiet durch eine marine, karbonatische Fazies ohne saline Einschaltungen gekennzeichnet. Im Liegenden sind Wechselfolgen aus Kalk- und Mergelsteinen charakteristisch, im Hangenden steht mergeliger z. T. verkarsteter Kalkstein an.

Die Schichten des Quartär besitzen im Modellgebiet keine flächendeckende Verbreitung. Die geringmächtigen Lockergesteine sind fluviatilen Ursprungs und bestehen vorwiegend aus Sanden, bereichsweise sind die jungen Talfüllungen von Auenlehm überlagert.

#### **4.6.2 Petrophysik**

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Parameter, die für Sicherheitsbewertungen verwendet werden, kurz erläutert und anschließend beispielhafte Werte aus der Literatur in tabellarischer Form erfasst. Teilweise ergeben sich bei der Zusammenstellung für einige Parameter auch größere Bandbreiten. Eine Zusammenstellung von Vorschlägen für Parameterwerte, die basierend auf den Bandbreiten in den beispielhaften Modellberechnungen in diesem Vorhaben verwendet werden können, ist dem Anhang zu entnehmen.

##### Dichte

Die Dichte von Gestein (Gesteinsdichte) bestimmt sich aus der Masse einer Gesteinsprobe einschließlich der Hohlräume und deren möglichen Füllungen und ihrem Volumen. Sie wird über die Masse des bergfeuchten Gesteins ermittelt. Die Trockendichte hingegen wird nach Trocknung bei 105 °C aus der ermittelten Trockenmasse und dem unveränderten Volumen bestimmt. Die Korndichte (auch Reindichte) ist die auf das Volumen der festen Bestandteile bezogene Trockenmasse von Festgesteinen ohne Berücksichtigung der Hohlräume. Bei dichten Gesteinen mit geringer Porosität ist die Differenz zwischen Trockendichte und Korndichte sehr gering.

Aufgrund der häufig nur geringen Unterschiede zwischen diesen Dichtearten im Granit und im Salzgestein wird in Tab. 2 nicht zwischen ihnen unterschieden und die Gesteinsdichte angegeben. Die in Tab. 2 auftretenden Dichteunterschiede lassen sich in erster Linie auf Variationen in der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine, Verunreinigungen und variierende Porositäten zurückführen.

Tab. 2: Gesteinsdichte (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine)

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Quelle
Quartär	Sand (wassergesättigt)	1.900	Prinz & Strauß (2018)
Muschelkalk	Kalkstein	2.640–2.650	Müller et al. (2019)
	Kalkstein	2.400–2.800	Dachroth (2017)
Buntsandstein	Tonstein	2.350–2.450	Dachroth (2017)
	Sandstein	2.000–2.300	Dachroth (2017)
	Sandstein	2.100–2.900	Wohlenberg (1982)
Barrieregestein	Steinsalz (Halit)	2.160	Liu et al. (2017)
	Steinsalz mit Polyhalit u. Anhydrit	2.275	
	Kalisalz	1.850	
	Anhydrit	2.700	
Wirtsgestein	Granit (Barre)	2.660	Selvadurai et al. (2005)
	Granit	2.630	
	Granit (Sila Massiv)	2.690 ± 13	Amiguet (1985)
	Granit	2.600–2.900	Attewell & Farmer (1976)
	Granit	2.580	Jung (1986)
	Granit	2.600–2.650	Stober (1986)
	Granit (Aare)	2.660 ± 23,8	Keusen et al. (1989)
	Granit	2.500–2.800	Schön (2011)
	Granit (Kirchberg)	2.620–2.640	
	Granit (Ävrö)	2.655	Sundberg (2002)
	Granit (feinkörnig)	2.640	
	Granit (pegmatitisch)	2.635 ± 38	Posiva (2012)
	Granit	2.587–2.687	Vondrovic (2017)
	Granit	2.640–2.660	Scholz (2003)
	angewitterter Granit	2.600–2.640	
Granit	2.600–2.800	Prinz & Strauß (2018)	

## E-Modul und Poissonszahl

Der E-Modul (Tab. 3) kennzeichnet den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten. Die Poissonzahl (Tab. 4) beschreibt das Verhältnis der Querverformung zur Längsverformung.

Tab. 3: E-Modul (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine)

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	E-Modul [GPa]	Quelle
Quartär	Sand	0,1	Nipp & Heusermann (2000)
Muschelkalk	Kalkstein	6 – 105	Jahn et al. (2016)
	Kalkstein	46 – 70	Müller et al. (2019)
	Kalkstein	15	Nipp & Heusermann (2000)
Buntsandstein	Sandstein	13 / 21	Müller et al. (2019)
	Sandstein	15	Liu et al. (2017)
	Sandstein	15	Nipp & Heusermann (2000)
Barrieregestein	Steinsalz	25 – 33	Liu et al. (2017)
	Steinsalz	27	Müller et al. (2019)
	Kalisalz	16 – 17	Liu et al. (2017)
	Kalisalz (Sylvinit)	24	Müller et al. (2019)
	Anhydrit	30 – 60	Liu et al. (2017)
	Anhydrit	67	Müller et al. (2019)
Wirtsgestein	Granit	30 – 65	Stober (1986)
	Granit (statisch)	26 – 74, $\approx$ 59,3	Schön (2011)
	Granit	17,6 – 78,7	Amiguet (1985)
	Granit (Aare)	53,3 $\pm$ 11,0	Keusen et al. (1989)
	Granit (feinkörnig)	59 – 80	Makurat et al. (2006)
	Granit (Småland)	62 – 79	
	Granit (pegmatitisch)	60 $\pm$ 8	Posiva (2012)
	Granit	38,3 – 64,4	Vondrovic (2017)
	Granit	40 – 60	Scholz (2003)
	angewitterter Granit	25 – 40	

Tab. 4: Poissonzahl (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine)

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Poissonzahl [-]	Quelle
Quartär	Sand	0,33	Nipp & Heusermann (2000)
Muschelkalk	Kalkstein	0,22 – 0,35	Müller et al. (2019)
Buntsandstein	Sandstein	0,22 / 0,23	Müller et al. (2019)
	Sandstein	0,27	Liu et al. (2017)
Barrieregestein	Steinsalz	0,29	Müller et al. (2019)
	Steinsalz	0,25 – 0,27	Liu et al. (2018) und Liu et al. (2017)
	Kalisalz (Sylvinit)	0,30	Müller et al. (2019)
	Kalisalz	0,26 – 0,28	Liu et al. (2018) und Liu et al. (2017)
	Anhydrit	0,34	Müller et al. (2019)
	Anhydrit	0,25 – 0,27	Liu et al. (2018) und Liu et al. (2017)
Wirtsgestein	Granit (Oberpfalz)	0,32	Jung (1986)
	Granit	0,12 – 0,20	Stober (1986)
	Granit	0,1 – 0,39	Schön (2011)
	Granit	0,13 – 0,37	Amiguet (1985)
	Granit (pegmatitisch)	0,29 ± 0,06	Posiva (2012)
	Granit (feinkörnig)	0,20 – 0,25	Makurat et al. (2006)
	Granit (Småland)	0,23 – 0,24	
	Granit	0,18 – 0,19	Vondrovic (2017)

### Gesteinsfestigkeit

In der Geomechanik wird unter dem Begriff „Festigkeit“ die Fähigkeit eines Materials, Schub- bzw. Zugspannungen mit begrenzten Verformungen zu ertragen und einen neuen Gleichgewichtszustand zu erreichen, verstanden (Prinz & Strauß 2018). Sie ist der Grenzwert der Spannung, bei dem es zum Versagen und irreversibler Verformung kommt (Martin et al. 2000). Je nach Belastungsart und -richtung wird beispielsweise zwischen Zug-, Druck- und Scherfestigkeit unterschieden. Im Allgemeinen beschreibt die Festigkeit eine Grenzspannung, ab der sich das Spannungs-Dehnungsverhalten charakteristisch verändert, was u. a. zum Reißen, plastischen Fließen oder Brechen führen kann. Kennwerte für die Festigkeit sind u. a. die einaxiale Druckfestigkeit, die dreiaxiale Druckfestigkeit und die Zugfestigkeit.

Die gesteinsbildenden Minerale haben unterschiedliche Einflüsse auf die Druck- und Zugfestigkeit eines Gesteins. Im Granit führt ein hoher Quarzgehalt zu einer hohen

Druckfestigkeit, mit zunehmendem Gehalt an spaltbaren Mineralen (z. B. Glimmer) nimmt sie jedoch ab. Sie nimmt außerdem mit zunehmender Porosität ab.

Tab. 5: Einaxiale Druckfestigkeit (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine)

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Druckfestigkeit [MPa]	Quelle
Quartär	Sand	k. A.	-
Muschelkalk	Kalkstein	146,7 – 228,8	Müller et al. (2019)
	Kalkstein	80 – 347 (σ 104)	Jahn et al. (2016)
Buntsandstein	Sandstein	67,4 – 103,7	Müller et al. (2019)
	Sandstein	30 – 180 (σ 95)	Jahn et al. (2016)
Barrieregestein	Steinsalz (Sarstedt)	ca. 32 – 42	Plischke (1987)
	Steinsalz (Gorleben)	ca. 25	Bräuer et al. (2011)
	Kalisalz (Gorleben)	ca. 30	
	Anhydrit (Pöthen)	78,5 (± 14,3)	Kamlot (2009)
	Anhydrit (Bernburg)	63,4 (± 8,8)	
	Anhydrit	40 – 128	Jahn et al. (2016)
Wirtsgestein	Granit (Falkenberg)	136	Jung (1986)
	Granit	70 – 343,5	Amiguet (1985)
	Granit	48,8 – 324	Johnson & DeGraff (1988)
	Granit (Aare)	169,1 ± 37,1	Keusen et al. (1989)
	Granit – Granodiorit	166 – 289 (± 22)	Lanaro & Fredriksson (2005)
	Granit	175,6 – 27,4	Vondrovic (2017)
	Granit (Bonnet)	226	Carter et al. (1991)
	Granit	180 – 250	Scholz (2003)
	Granit	100 – 250	Attewell & Farmer (1976)

Tab. 6: Zugfestigkeit (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine)

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Zugfestigkeit [MPa]	Quelle
Quartär	Sand	k.A.	-
Muschelkalk	Kalkstein	2,5 – 17,5	abgeleitet aus Jahn et al. (2016)
Buntsandstein	Sandstein (D)	1 – 4	
	Sandstein	3,1	Müller et al. (2019)
Barrieregestein	Steinsalz	2	Hunsche et al. (2003)
	Kalisalz	2	
	Anhydrit	7	Bruno (2005)
Wirtsgestein	Granit (Falkenberg)	17 ± 3	Jung (1986)
	Granit (Aare)	9,06 ± 1,48	Keusen et al. (1989)
	Granit (CZ)	8,9 – 13,3	Vondrovic (2017)
	Granit (D)	10 – 25	Scholz (2003)
	Granit	7 – 25	Attewell & Farmer (1976)

Die Scherfestigkeit des Gebirges ist eine komplexe Eigenschaft, die durch Kombination der Scherfestigkeit des Festgesteins und des Reibungswiderstands auf den Trennflächen beschrieben wird. Je zahlreicher und größer die Trennflächen sind, desto geringer wird die Verbandsfestigkeit eines Gebirgsbereichs (Prinz & Strauß 2018). Die Scherfestigkeit auf Trennflächen ist abhängig vom Gestein, der Rauigkeit der Flächen, der Öffnungsweite, der Art der Kluffüllung und der Normalspannung. Die Scherfestigkeitsparameter sind der Reibungswinkel und die Kohäsion (siehe Tab. 7 und Tab. 8).

Tab. 7: Kohäsion (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine)

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Kohäsion [MPa]	Quelle
Quartär	Sand	k.A.	-
Muschelkalk	Kalkstein	20 – 41	abgeleitet aus Müller et al. (2019)
Buntsandstein	Sandstein	8 – 14,4	
Barrieregestein	Steinsalz	17,8	Müller et al. (2019)
	Kalisalz (Sylvinit/Kieserit)	13,7 – 22,7	
	Anhydrit	20 – 40,8	Bruno (2005) bzw. Müller et al. (2019)
Wirtsgestein	Granit (Stone Mountain)	55,1	Schön (2011)
	Granit (pegmatitisch)	12,9	Siren (2012)
	Kristallingestein (Äspö)	31,0 (σ)	Andersson (2007)
	Granit	14 – 50	Attewell & Farmer (1976)

Tab. 8: Winkel der inneren Reibung (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine)

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Winkel der inneren Reibung [°]	Quelle
Quartär	Sand	30 – 35	Prinz & Strauß (2018)
Muschelkalk	Kalkstein	35	Bruno (2005)
Buntsandstein	Sandstein	30 – 35	Müller et al. (2019)
Barrieregestein	Steinsalz	k. A.	-
	Kalisalz	k. A.	-
	Anhydrit	35	Bruno (2005)
Wirtsgestein	Granit (Stone Mountain)	51	Schön (2011)
	Klüfte im Granit (Aare)	33	Keusen et al. (1989)
	Granit (pegmatitisch)	47	Siren (2012)
	Klüfte im Granit (pegmatitisch)	35	Posiva (2012)
	Granit	24,8 – 41	Amiguet (1985)

### Effektive Spannungen

Die totalen oder auch äußeren Spannungen in einem porösem Medium stehen mit den effektiven Spannungen, die auf dem Korngerüst wirken, und den Fluiddrücken, die in den Poren wirken, im Gleichgewicht. Nach dem Konzept der effektiven Spannungen (Biot 1941) berechnet sich in einem wassergesättigten Medium die totale Spannung durch Addition der effektiven Spannung und des mit dem Biot-Koeffizienten multiplizierten Porenwasserdrucks.

Der dimensionslose Biot-Koeffizient beschreibt in Abhängigkeit vom porösen Gefüge des Gesteins die mechanische Wirksamkeit des Porenfluiddrucks auf die Deformation, d. h. die Effektivität der Druckübertragung, und charakterisiert die hydromechanische Kopplung in einer gesättigten oder teilgesättigten porösen Umgebung. Der Biot-Koeffizient kann theoretisch Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei niedrige Werte charakteristisch für sehr feste Gesteine mit isolierten Poren(räumen) (bspw. Quarzit) sind und hohe Werte für hochporöse Gesteine (bspw. schwach zementierter Sandstein) (Zoback 2007).

Die Ermittlung des Biot-Koeffizienten erfolgt bei der Untersuchung von Kristallingesteinen nicht standardmäßig, daher wird an dieser Stelle auf eine tabellarische Auflistung verzichtet. Nach Untersuchungen von Selvadurai et al. (2019) ergibt sich für den Grimsel-Granit eine Bandbreite von 0,46 bis 0,72. Eine Übersicht mit Werten zu unterschiedlichen Sedimentgesteinen wie Siltstein (0,172 – 0,210), Tonstein (0,358), Sandstein (0,645) und Anhydrit (0,082) befindet sich in Luo et al. (2015).

## 4.7 Hydrogeologie

### 4.7.1 Hydraulische Eigenschaften

Im Modell „überlagernder ewG“ sind die Modelleinheiten Muschelkalk und Mittlerer Buntsandstein im Deckgebirge als GWL ausgeprägt. Alle anderen Einheiten liegen als GWGL vor (s. Abb. 27).

Modelleinheit	Lithologische Abfolge	Hohlraumtyp	hydraulische Leitfähigkeit
Muschelkalk	quartäre Sande u. Auelehm, lokal in Flusstälern Kalkstein, mergelig	Poren, Klüfte, Karst	
	Kalkstein bis Mergelstein	Klüfte, Poren	
Oberer Buntsandstein	Tonstein bis Feinsandstein, mergelig	Klüfte	
Mittlerer Buntsandstein	Ton- und Siltstein Wechselfolge, leicht sandig	Klüfte	
	Mittel- bis Grobsandsteine	Klüfte, Poren	
Unterer Buntsandstein	Tonstein, Schluffstein bis Feinsandstein, Einschaltungen von Mittel- bis Grobsandstein	Klüfte, z. T. Poren	
Zechstein (Barriere-formation)	Steinsalz		
	Wechselfolge aus Anhydritgestein, Kalisalz und Steinsalz in unterschiedlichen Mächtigkeiten	z. T. Klüfte	
	Steinsalz (Bereich des überlagernden ewG)		
	Anhydritgestein, geringmächtig	Klüfte	
Wirtsgestein	Granit	Klüfte	sehr variabel

### Hydraulische Eigenschaften

hydraulische Leitfähigkeit	Grundwasserleiter				Grundwassergeringleiter			
	sehr hoch	hoch	mittel	mäßig	gering	sehr gering	äußerst gering	)*
k <sub>r</sub> -Wert Grenzen [m/s]	>10 <sup>-2</sup>	>10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-2</sup>	>10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-3</sup>	>10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-4</sup>	>10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-5</sup>	>10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>-7</sup>	≤ 10 <sup>-9</sup>	<10 <sup>-10</sup>

)\* Gesteine mit k<sub>r</sub>-Werten <10<sup>-10</sup> m/s erfüllen die Mindestanforderung § 23 Absatz 5, Punkt 1 nach StandAG (2017) und sind deshalb gesondert gekennzeichnet

Abb. 27: Lithologische und hydrogeologische Eigenschaften der Modelleinheiten. Die Einteilung der hydraulischen Leitfähigkeit orientiert sich an der k<sub>r</sub>-Wert basierten Einstufung nach Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (1997).

## Wirtsgestein

Die Grundwasserführung in Kristallingesteinen wird im Allgemeinen von der Ausbildung und Häufigkeit der durchflusswirksamen Klüfte bestimmt (vgl. Kapitel 3.2 und 4.5). Die ungeklüftete und unverwitterte Gesteinsmatrix selbst führt nur sehr geringe Wassermengen. Insgesamt schwankt die hydraulische Leitfähigkeit im granitischen Wirtsgestein über alle Durchlässigkeitsklassen der GWGL (vgl. Abb. 27). Dies passt zu Werten für die hydraulische Leitfähigkeit in Kristallingesteinen, wie sie in der Literatur zu finden sind (siehe Tab. 9). Eine Umrechnung zwischen dem  $k_f$ -Wert und der Permeabilität erfolgt in grober Näherung mit einem Faktor von  $10^{-7}$ . Ein  $k_f$ -Wert von  $10^{-10}$  m/s für Wasser bei  $10\text{ °C}$  entspricht etwa einer Permeabilität von  $10^{-17}$  m<sup>2</sup>.

Tab. 9: Mögliche Bandbreiten der hydraulischen Leitfähigkeit für das Wirtsgestein aus verschiedenen Quellen

Art der Angabe	Wert	Gestein	Quelle
Permeabilität [m <sup>2</sup> ]	$10^{-21}$ bis $10^{-12}$	geklüftetes Kristallingestein	Stober & Bucher (2015)
Permeabilität [m <sup>2</sup> ]	$10^{-15}$	geklüftetes Kristallingestein, ab 4 km Tiefe	
$k_f$ -Wert [m/s]	$1 \cdot 10^{-13}$ bis $4 \cdot 10^{-4}$	Granit	Stober (1995)
$k_f$ -Wert [m/s]	$0,1 \cdot 10^{-12}$ bis $5 \cdot 10^{-12}$	intakter Granit	Amiguet (1985)
$k_f$ -Wert [m/s]	$1,00 \cdot 10^{-12}$ bis $4,00 \cdot 10^{-04}$	Granit, gestörtes Gefüge, 300 – 1.500 m u. GOK	Appel & Habler (2002)
	$1,25 \cdot 10^{-12}$ bis $1,64 \cdot 10^{-01}$	Granit, gestörtes Gefüge, > 1.500 m u. GOK	
$k_f$ -Wert [m/s]	$2,23 \cdot 10^{-15}$ bis $7,80 \cdot 10^{-08}$	Granit, intaktes Gefüge, 300 – 1.500 m u. GOK	Appel & Habler (2002)
	$9,03 \cdot 10^{-15}$ bis $5,00 \cdot 10^{-12}$	Granit, intaktes Gefüge, > 1.500 m u. GOK	
$k_f$ -Wert [m/s]	$1,21 \cdot 10^{-14}$ bis $1,26 \cdot 10^{-06}$	Granit, unbekanntes Gefüge, 300 – 1.500 m u. GOK	Appel & Habler (2002)
	$9,03 \cdot 10^{-15}$ bis $3 \cdot 10^{-08}$	Granit, unbekanntes Gefüge, > 1.500 m u. GOK	
$k_f$ -Wert [m/s]	$< 10^{-13}$ bis $10^{-10}$	unverwittertes kristallines Grundgebirge	Zeitlhöfler et al. (2015)

Das hydraulische Gefälle ist in geklüfteten Gesteinen schwer zu bestimmen, da die Klüfte in getrennten Clustern vernetzt vorliegen können. Auch unmittelbar nebeneinanderliegende Klüfte müssen nicht hydraulisch verbunden sein. Für die Bewertung der möglichen Fließwege und -geschwindigkeiten, z. B. für die Radionuklid Ausbreitung, sollten verschiedene hydraulische Gradienten und Wegsamkeiten zu Grunde gelegt werden. Im Fall des Modells „überlagernder ewG“, bei dem das kristalline Wirtsgestein unterhalb des geringdurchlässigen Zechstein in einer Tiefe von mehr als 800 m u. GOK liegt, können auch stagnierende Verhältnisse vorliegen. Dies tritt z. B. ein, wenn die Wegsamkeiten der Klufnetzwerke nicht an ein Grundwasserfließsystem angebunden sind. Ein Nachweis einer solchen Vernetzung wäre an einem realen Standort schwer zu führen, da das gesamte Klufnetzwerk nicht über größere Volumina (mehrere Kubikkilometer) mit der entsprechenden Genauigkeit prognostizierbar ist. Hinzu kommt, dass zukünftige Veränderungen des Klufnetzwerkes nicht ausgeschlossen werden können. Veränderte Wegsamkeiten können z. B. durch die Verbindung von Klüften über die auffahrungsbedingte Auflockerungszone eintreten.

#### Barriereformation

Das Top der Barriereformation im generischen Modell liegt in Tiefen zwischen 350 m und 1230 m u. GOK (vgl. Kapitel 4.3.2). Diese Tiefenlage lässt ein nahezu dichtes Salzgebirge im tektonisch bzw. bergmännisch unbeanspruchten Zustand erwarten. Für unverritztes Steinsalz in flacher Lagerung kann die mittlere Permeabilität vereinfachend mit  $\leq 10^{-22} \text{ m}^2$  angenommen werden (vgl. Liu et al. 2017). Die Annahme eines grundsätzlich dichten Salzgebirges im tektonisch und bergmännisch unbeanspruchten Ausgangszustand gilt auch für eingespanntes Kalisalz bzw. nicht geklüfteten Anhydrit (Liu et al. 2017). Für Permeabilitätswerte von geklüftetem Anhydritgestein nennen Liu et al. (2017) u. a. Laboruntersuchungen von Kamlot (2009), in denen Werte von  $< 10^{-23} \text{ m}^2$  bis  $10^{-17} \text{ m}^2$  und ein Mittelwert von  $7 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$  ermittelt wurden.

In der Barriereformation im Modell tritt Wasser nur in Form von Lösungseinschlüssen auf, eine Strömung findet nicht statt. Die hydraulische Leitfähigkeit erfüllt durchgehend die Mindestanforderungen nach StandAG (2017), die für den ewG einen  $k_f$ -Wert  $< 10^{-10} \text{ m/s}$  fordern. Dies gilt auch für das geringmächtige Anhydritgestein im Liegenden der Formation. Im überlagernden Steinsalz, in dem der ewG ausgewiesen ist, liegen die hydraulischen Leitfähigkeiten mit  $\leq 10^{-15} \text{ m/s}$  (entsprechend einer Permeabilität von ca.  $\leq 10^{-22} \text{ m}^2$ ) deutlich unterhalb der Mindestanforderung. Wegsamkeiten, die eine Strömung durch den Zechstein hindurch ermöglichen könnten, sind im unverritzten Gestein nicht vorhanden. Im Bereich der Schachtaufahrung werden Vorkehrungen getroffen, die die Wegsamkeiten minimieren und so eine Durchströmung der Formation verhindern (s. a. Jobmann & Burlaka 2021). Aufgrund der äußerst geringen hydraulischen Leitfähigkeit des Salzgesteins ist ein advektiver Stofftransport im Barrieregestein vernachlässigbar, so dass der Stofftransport einzig von der Diffusion (vgl. Kapitel 4.7.3) bestimmt wird.

## Deckgebirge

Für die Deckgebirgs-Schichten, im Modell bestehend aus Einheiten des Muschelkalk und des Buntsandstein, erfolgte die Einstufung in Durchlässigkeitsklassen auf Grundlage der hydrogeologischen Beschreibungen in Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (1997). Eine Zusammenstellung von Durchlässigkeitsbeiwerten von Sedimentgesteinen ist in Appel & Habler (2002) dokumentiert.

Der Muschelkalk steht in weiten Teilen an der Oberfläche an und weist neben Klüften auch verkarstete Bereiche auf. Die  $k_f$ -Werte liegen im Mittel zwischen  $> 10^{-4}$  und  $10^{-3}$  m/s, lokal können die hydraulischen Leitfähigkeiten im Karst deutlich höher sein. Im Nordosten des Modells sind weitläufige Flussauen mit geringmächtigen Vorkommen von quartären Ablagerungen ausgebildet. Sie stellen insgesamt trotz der heterogenen Zusammensetzung einen GWL dar. Beide Einheiten sind im Modell „überlagernder ewG“ zu einer Modelleinheit zusammengefasst. An der Oberfläche findet über den Niederschlag die Grundwasserneubildung statt. In den durchlässigen Sedimenten versickert das Wasser rasch und ist dann Teil des Grundwasserkörpers. Insbesondere in oberflächennahen verkarsteten Bereichen wirken sich Niederschlagsereignisse schnell aus. Starkregen können zu einem verstärkten Grundwasserabfluss führen und Trockenperioden können ein zeitweises Trockenfallen des Karst-GWL nach sich ziehen. Vor allem in solchen Perioden können auch die Fließgewässer in den Karst versickern und an der Geländeoberfläche trockenfallen. Zum Liegenden der Einheit nimmt die hydraulische Leitfähigkeit leicht ab, da dort vermehrt Kalkmergel auftreten, in denen kein Karst ausgebildet ist. In diesem Abschnitt ist die Modelleinheit ein Kluft- und Poren-GWL mit  $k_f$ -Werten zwischen  $> 10^{-5}$  und  $10^{-4}$  m/s.

Abb. 28 zeigt die Hauptrichtungen des Grundwasserstroms im obersten GWL der Modelleinheit Muschelkalk. Im zentralen Bereich des Modells strömt das Grundwasser über die vernetzten Klüfte und die Karstbereiche von den Hochlagen im Nordwesten und Süden in Richtung der breiten Talniederung, in denen die Fließgewässer als Vorfluter fungieren. Der Grundwasserabstrom erfolgt in diesem Grundwasserkörper in Richtung Nordosten aus dem Modellbereich heraus. Die Effekte der lokal auftretenden Karstzonen wurden für diese Darstellung nicht berücksichtigt. Es wird für das Modell unterstellt, dass sich eine freie Grundwasseroberfläche ausbildet, die mit geringen Flurabstand im Wesentlichen die Topographie nachzeichnet.

Im Bereich der Höhenlagen im Südwesten und Nordwesten sind Grundwasserscheiden ausgebildet. Diese haben zur Folge, dass Grundwasserfließrichtungen kleinräumig variieren (Abb. 28).

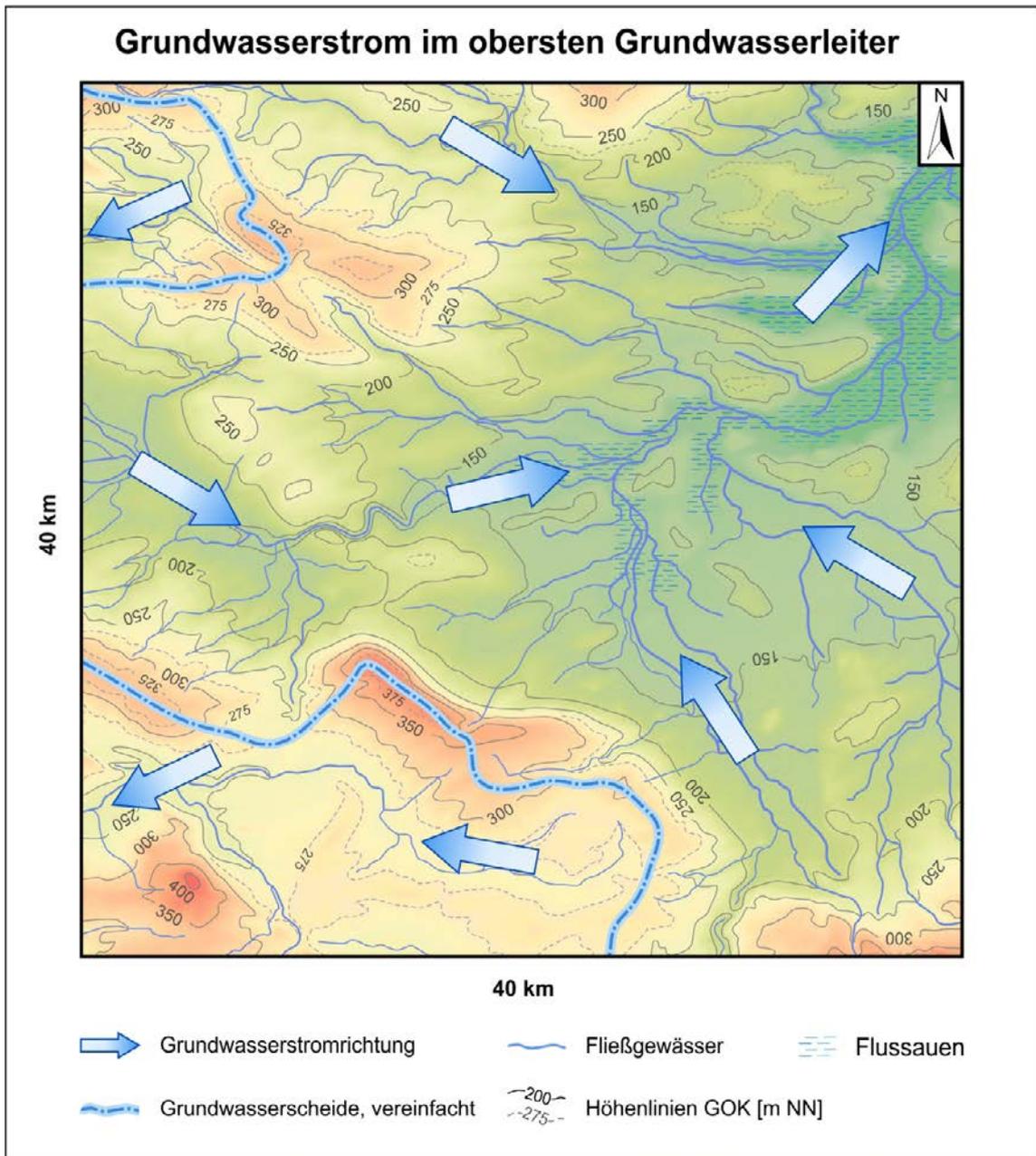


Abb. 28: Hauptausrichtungen des Grundwasserstroms im obersten GWL des Modells „überlagernder ewG“

Ein weiterer Kluft- und Poren-GWL tritt im Mittleren Buntsandstein mit  $k_f$ -Werten zwischen  $> 10^{-5}$  und  $10^{-4}$  m/s auf. Zum Hangenden werden die Mittel- bis Grobsande dieser Einheit zunehmend von Ton- und Siltsteinen mit sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit von  $> 10^{-9}$  und  $10^{-7}$  m/s abgelöst. Dieser hangende Bereich und der darüber liegende GWGL des Oberen Buntsandstein stellen eine hydraulische Trennung zum obersten GWL dar. Im GWL selbst herrschen stagnierende gespannte Grundwasserverhältnisse. Die Grundwasserdruckfläche weist ein leichtes Gefälle von rund 6 ‰ in westliche Richtung auf, ohne dass es zu einer Grundwasserströmung kommt. Unterlagert wird die Modelleinheit

von GWGL des Unteren Buntsandstein und des Zechstein. Im Unteren Buntsandstein liegen Klüfte und z. T. auch Poren als grundwassergefüllte Hohlräume vor, die hydraulische Leitfähigkeit ist jedoch gering, daher werden im Modell nahezu stagnierende Verhältnisse angenommen.

Nachfolgend werden beispielhaft aus verschiedenen Regionen Literaturdaten zur Porosität von Gesteinen, die denen der Modelleinheiten ähneln, in tabellarischer Form angegeben.

Tab. 10: Werte der effektiven z. T. auch der undifferenzierten Porosität aus der Literatur

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	effektive Porosität	Quelle
Quartär	Sand	k. A.	–
Muschelkalk	Kalkstein (Weferlinger Triasplatte)	0,03 – 0,1	Langkutsch et al. (1998)
	dolomitische Kalksteine und Kalksteine (Oberer Muschelkalk, Baden-Württemberg)	0,11 – 0,18 (Porosität undifferenziert)	Reinhold et al. (2011)
Buntsandstein	Sandstein	0,12 – 0,17	Huckriede & Zander (2011)
	Sandstein	0,04 – 0,18	Kött & Kracht (2011)
	tonig-siltige Feinsandsteine	0,08	Huckriede & Zander (2011)
	Sandstein (Weferlinger Triasplatte)	0,09 – 0,16	Langkutsch et al. (1998)
	Ton- und Schluffstein (Weferlinger Triasplatte)	0 – 0,05	
	Sandstein (Mittlerer Buntsandstein, Hauptaquifer)	0,2 – 0,3 (Porosität undifferenziert)	Reinhold et al. (2011)
	Solling-Sandstein (NW bis E Schleswig-Holstein)	< 0,10 – 0,16 (Porosität undifferenziert)	
	Sandstein (südl. Nordsee)	0,11 – 0,30 (Porosität undifferenziert)	Bachmann et al. (2010)
Barrieregestein	Karbonat-/ Anhydritgestein, (Werra/Staßfurt)	ca. 0,01 (Nutzporosität)	Langkutsch et al. (1998)
	Steinsalz	k. A.	–
	Kalisalz	k. A.	–

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	effektive Porosität	Quelle
Wirtsgestein	Granit	0,011	Selvadurai et al. (2005)
	Granit	0,005 – 0,015	Jung (1986)
	Granit	0,002	Schön (2011)
	Granit	0,004 – 0,022	Amiguet (1985)
	Granit	0,004 – 0,01	Keusen et al. (1989)
	Granit	0,0022 – 0,0215	Vondrovic (2017)
	Granit	0,0001 – 0,005	Scholz (2003)
	Granit	0,005 – 0,015	Attewell & Farmer (1976)

#### 4.7.2 Hydrochemische Verhältnisse

Bestimmt werden die hydrochemischen Verhältnisse von den löslichen Bestandteilen der Gesteine und der Verweildauer des Grundwassers im Gebirge. Über lange Zeiträume kann sich ein Lösungsgleichgewicht zwischen Gestein und Grundwasser einstellen. Dieser Zeitraum ist zum großen Teil abhängig von der Grundwasserchemie und der Löslichkeit der Mineralphasen des Gesteins. Oberflächennah erfolgt die Grundwasserneubildung meist über versickernde Niederschlagswässer, die zunächst gering mineralisiert sind. Bereits beim Versickern können Stoffe in der ungesättigten Zone in Lösung gehen, in der darunter liegenden gesättigten Zone setzt sich die Mineralisierung der Wässer fort.

##### Wirtsgestein

Als Grundlage für die hydrochemische Zusammensetzung der Tiefenwässer im Einlagerungsniveau des Modells „überlagernder ewG“ bei ca. -950 m NN wird eine hydrochemische Zusammensetzung des Grundwassers, wie sie in Gesteinen des Rotliegend vorliegt (Tab. 11), verwendet (vgl. Lüders et al. 2010; Mühlenweg et al. 1997; Müller & Papendieck 1975). Für dieses Tiefenwasser wird aufgrund der vergleichbaren Lage des Entnahmehorizontes im Liegenden des Zechstein eine für das kristalline Grundgebirge unterhalb einer Salinarformation repräsentative Grundwasserchemie erwartet.

Als Näherung wird aus der Zusammensetzung ein TDS-Wert von rund 272 g/l abgeleitet und dieser einheitlich für das Wirtsgestein im gesamten Modellgebiet angesetzt. Eine Übersicht der gelösten Bestandteile gibt Tab. 11.

Tab. 11: Charakteristische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung für das Tiefenwasser im Grundgebirge im Liegenden einer Salzstruktur

Eigenschaften		Wert / Gehalt
pH-Wert		6
Dichte (20 °C)		1,187 g/cm <sup>3</sup>
Karbonat (DIC)		ca. 0,2 g/l
TDS-Gehalt		ca. 272 g/l
Chemische Zusammensetzung		Gehalt
Kationen	Natrium (Na <sup>+</sup> )	60,2 g/l
	Kalium (K <sup>+</sup> )	2,3 g/l
	Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	41,1 g/l
	Lithium (Li <sup>+</sup> )	0,09 g/l
	Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )	Spuren
	Strontium (Sr <sup>2+</sup> )	0,71 g/l
	Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0,02 g/l
Anionen	Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	0,4 g/l
	Chlorid (Cl <sup>-</sup> )	167,2 g/l
	Bromid (Br <sup>-</sup> )	0,73 g/l
	Iodid (I <sup>-</sup> )	0,02 g/l

### Barriereformation

Aufgrund der für das Modell „überlagernder ewG“ angenommenen Tiefenlage der Barriereformation aus dem Zechstein und des tektonisch ruhigen Umfeldes wird im unverritzten Zustand der Zustrom von ungesättigten Salzlösungen aus dem Deckgebirge und eine Zirkulation von Lösungen innerhalb der Formation ausgeschlossen, so dass der Druck in den Lösungsvorkommen dem lithostatischen Druck entspricht.

Daraus ergibt sich, dass Fluidtyp und -menge stark von der stratigraphischen Position innerhalb der Formation abhängen. In der Barriereformation des Modells „überlagernder ewG“ sind saline Lösungen vor allem im Bereich von Anhydrit-Lagen mit vereinzelt kluft- und schichtgebundenen Speicherräumen anzutreffen, während im Steinsalz nur äußerst geringe Lösungsmengen inter- und intrakristallin vorkommen. Im Gegensatz zu Salzstöcken wurden die Steinsalzsichten in flach lagernden Formationen, z. B. in salzkissenähnlichen Strukturen, weniger stark mechanisch beansprucht, sodass die an das Steinsalz gebundenen Lösungen nicht so stark ausgetrieben wurden (Bornemann et al. 2008). Es wird erwartet, dass mit steigendem Anhydrit-Gehalt i. d. R. auch das Volumen eingeschlossener Lösungen zunimmt (vgl. Schramm et al. 2009; Kukla et al. 2011).

Für alle Lösungsvorkommen innerhalb der Barriereformation wird gemäß der Gliederung von Herrmann et al. (1978) eine Zugehörigkeit zu den dort definierten Hauptgruppen 4 (konzentrierte Salzlösungen > 14 – 27 % bzw. > 150 – 350 g/l gelöste Komponenten) oder 5 (stark konzentrierte Salzlösungen > 27 % bzw. > 350 g/l gelöste Komponenten) angenommen, was auch den von Schramm et al. (2009) beschriebenen Lösungsvorkommen entspricht.

Für die weitere Charakterisierung der Lösungen in der flach lagernden Barriereformation werden Untersuchungen aus dem Salzbergbau Mitteldeutschlands herangezogen, die in Herbert & Schwandt (2007) ausführlich beschrieben, zusammengefasst und bewertet wurden. Für die Beschreibung der Lösungszusammensetzung wird auf die dort festgelegten Lösungstypen zurückgegriffen, bei denen höchstwahrscheinlich keine oder nur eine geringe Beeinflussung durch Oberflächenwässer und das Vorliegen von überwiegend geschlossenen Systemen zu erwarten ist. Die gemittelten  $MgCl_2$ -Gehalte bewegen sich zwischen 350 und 260 g/l. Für NaCl liegt die durchschnittliche Bandbreite zwischen 19 und 48 g/l.

#### Deckgebirge

Im Buntsandstein kommt es infolge der zyklisch aufgebauten lithologischen Wechselfolge zur Ausbildung von Grundwasserstockwerken, die sich sowohl hydraulisch als auch hydrochemisch unterscheiden. Im Modell sind die Wechselfolgen vereinfacht dargestellt und in die drei Modelleinheiten Unterer, Mittlerer und Oberer Buntsandstein eingeteilt. Die Wässer im Buntsandstein sind generell niedrig mineralisiert ( $\ll 1$  g/l) mit neutralen pH-Werten. Für den Buntsandstein werden überwiegend autochtone Tiefenwässer eines Ca-Mg- $HCO_3$ -( $SO_4$ )-Typs erwartet, deren TDS-Werte um 300 mg/l liegen. An der Basis des Unteren Buntsandstein können höher mineralisierte NaCl-dominierte Solen die hydrochemische Beschaffenheit der Tiefenwässer beeinflussen, was lokal zu erhöhten TDS-Werten von über 50 g/l führen kann. In der Regel werden für den Unteren Buntsandstein jedoch eher TDS-Werte von ca. 5 g/l erwartet, da keine verstärkte Auslaugung/Subrosion wie in Beckenrandlagen vorkommt. Der Aufstieg von hochmineralisierten Wässern in höher gelegene Grundwasserleiter wird aufgrund des Fehlens von Störungzonen und der durchgängigen Verbreitung von Grundwasseringleitern im Modell nicht angenommen. Im Hangenden des Buntsandstein treten die Röttone als hydraulisch wirksame Grenze zu den Grundwässern des Muschelkalk in Erscheinung.

Die oberflächennahen Grundwässer im Muschelkalk sind überwiegend gering mineralisiert und können meist dem Ca-Mg- $HCO_3$ -Typ zugerechnet werden. Evaporitische Einheiten im Mittleren Muschelkalk, die zu stark erhöhten  $SO_4$ -Konzentrationen und NaCl-Gehalten führen können, sind im Modell nicht enthalten. Auch die Zufuhr von hochmineralisierten Zechstein-

Wässern wird im Muschelkalk durch die Abschirmung durch die Grundwasseringeleiter im liegenden Buntsandstein ausgeschlossen. Für die tieferen Wässer im Muschelkalk wird ein Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-Typ mit TDS-Werten von mehr als 10 g/l bzw. in Beckenrandbereichen ein Na-(Ca)-HCO<sub>3</sub>-(SO<sub>4</sub>)-Typ mit TDS-Werten unter 1 g/l angenommen (vgl. StMWi 2019).

### 4.7.3 Stofftransport

In allen Bereichen der Geosphäre werden mit dem Grundwasser stets auch gelöste Stoffe und Kolloide transportiert. An einem Endlagerstandort liegt ein wesentlicher Fokus auf der Bewertung einer möglichen Radionuklid Ausbreitung. Für diese Bewertung werden verschiedene Transportprozesse, wie Advektion, Dispersion, Diffusion und Sorption betrachtet und in Rechnungen berücksichtigt. Nachfolgend werden die genannten Prozesse zusammenfassend für das Modell „überlagernder ewG“ beschrieben (vgl. auch Mrugalla et al. 2020).

#### Advektion

Advektion findet im fluiden Medium statt und bezeichnet den Transport von gelösten Stoffen und von Stoffen, die sich in Suspension befinden, durch das bzw. mit dem Medium. Der Transport der Stoffe findet in Strömungsrichtung und mit der Strömungsgeschwindigkeit des Transportmediums statt.

Advektion ist ein effektiver Transportmechanismus, der im kristallinen Gestein vornehmlich über Trennflächen stattfindet und durch die von diesen bereitgestellte Permeabilität und durch den anliegenden Druckgradienten sowie die hydromechanischen Eigenschaften des Transportmediums kontrolliert wird. Das Zusammenspiel von Permeabilitätsanisotropien im Kluftsystem mit dem hydraulischen Gradienten und dessen Auswirkungen auf den advektiven Transport wird beispielhaft in Bauer et al. (2019) diskutiert.

#### Mechanische Dispersion

Mechanische Dispersion ist ein advektiver Prozess, bei dem die Konzentration gelöster Stoffe in einem strömenden Fluid beeinflusst wird. Die mechanische Dispersion wirkt sowohl longitudinal als auch transversal. Sie ist auf lokal unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten und Fließpfadlängen in einem porös-geklüfteten Gestein zurückzuführen und wird beim advektivem Transport berücksichtigt. Im Modell „überlagernder ewG“ kommen dafür Teile des Deckgebirgsbereiches (vornehmlich Muschelkalk und Mittlerer Buntsandstein) und ausreichend hydraulisch leitfähige, durchströmte Klüfte im Wirtsgestein in Frage. Generelle Angaben zur Dispersivität innerhalb des Modellbereichs können nicht gemacht werden, da zunächst die Fließpfade im Kluftnetzwerk und die hydraulischen Bedingungen erfasst

und bewertet werden müssen. Insbesondere in geklüfteten Fließsystemen ist zwischen longitudinaler und transversaler Dispersion zu unterscheiden.

### Diffusion

Diffusion läuft sowohl in der Gas- als auch in der Lösungsphase ab. Sie entsteht durch die temperaturabhängige Eigenbewegung der Teilchen (Brownsche Molekularbewegung) und reduziert Konzentrationsgefälle innerhalb eines Fluids. Im Poren- und Kluftwasser des Wirtsgesteins und Deckgebirges können gelöste Stoffe oder Radionuklide durch die Diffusion transportiert werden. In Teilen des Deckgebirges (vornehmlich Muschelkalk und Mittlerer Buntsandstein) wird aufgrund der höheren hydraulischen Leitfähigkeit die Advektion und nicht die Diffusion den Stofftransport bestimmen. In ungeklüfteten Wirtsgesteinsbereichen hingegen ist Diffusion (Matrixdiffusion) für den Stofftransport zu betrachten. Im Vergleich zur Kluftdurchlässigkeit wirkt die Matrixdiffusion sehr viel geringer. In Rechnungen wird sie mit dem Diffusionskoeffizienten berücksichtigt, der sowohl stoff- als auch temperaturabhängig ist. Im Modell „überlagernder ewG“ wird die Temperatur lokal, vor allem in der Nähe des Einlagerungsbereiches, temporär stärker verändert werden und auch die Lösungszusammensetzung im Umfeld des Grubengebäudes wird sich ändern. Daher werden für die Diffusionskoeffizienten in diesem Bericht keine Werte angegeben.

Da Diffusion und mechanische Dispersion oft gleichzeitig ablaufen und dann schwer zu trennen sind, wird das Zusammenspiel von beiden auch als hydrodynamische Dispersion bezeichnet.

### Sorption

Sorption ist die Aufnahme von Stoffen aus einem Fluid durch Feststoffe, hier durch Gesteine. Die Stoffe können dabei an den Mineraloberflächen verbleiben oder in die feste Phase eindringen. Werden Stoffe aus den gesteinsbildenden Mineralen abgegeben, wird dieser Prozess als Desorption bezeichnet.

Werden Radionuklide aus den Abfällen durch hydrodynamische Dispersion (diffusiv und advektiv) durch das Wirtsgestein transportiert, können sie durch Sorption von diesem aufgenommen werden. Ob und wie stark Sorption stattfindet, ist abhängig von der Nuklidart, von der Konzentration der Radionuklide in der Lösung, vom durchflossenen Gestein (Mineralbestand, innere Oberfläche und dgl.), von der chemischen Zusammensetzung des Grundwassers (pH-Wert, Mineralisation, Salzkonzentration etc.), von künstlichen und natürlichen Komplexbildnern und vom Volumenverhältnis Sorptionsmedium/Sorbensmasse.

Eine Angabe von generellen Werten für Sorptionskoeffizienten ( $K_D$ -Werte) ist im Anbetracht der zahlreichen Abhängigkeiten für diesen Bericht nicht sinnvoll. Im Fall der Betrachtung

einer Radionuklidenausbreitung würden die Rahmenbedingungen für die Rechnungen lokal definiert und die entsprechenden Sorptionskoeffizienten zielgerichtet festgelegt. Für das Fernfeldmodell eines Endlagers im Granit wurden von Keesmann et al. (2005) Verteilungskoeffizienten zur Beschreibung der Sorption festgelegt, die als Anhaltspunkt dienen können.

Tab. 12: Sorptionskoeffizienten in [m/kg] für ein Endlagermodell im Granit nach Keesmann et al. (2005)

Element	$K_D$ -Wert	Element	$K_D$ -Wert	Element	$K_D$ -Wert
C	$10^{-3}$	Pd	$10^{-1}$	Np	1
Ni	$5 \cdot 10^{-1}$	Sn	1	Pa	1
Se	$10^{-2}$	I	$10^{-3}$	Th	1
Rb	$4,2 \cdot 10^{-2}$	Cl	0	U	1
Sr	$10^{-2}$	Cs	$5 \cdot 10^{-2}$	Ra	$5 \cdot 10^{-1}$
Zr	$10^{-1}$	Eu	5	Pb	$1 \cdot 10^{-1}$
Mo	$10^{-2}$	Cm	5	Po	$5 \cdot 10^{-1}$
Nb	$10^{-1}$	Am	5	Sm	5
Tc	1	Pu	1	–	–

#### 4.8 Geothermische Verhältnisse

In Deutschland nimmt die Untergrundtemperatur im Mittel um ca. 30 K/km mit der Tiefe zu. Lokal und in Abhängigkeit von der Tiefe gibt es z. T. große Abweichungen von diesem geothermischen Gradienten. Ursachen für räumliche Heterogenitäten des Temperaturfelds im Untergrund können die Wärmeleitfähigkeit aneinandergrenzender Gesteinskörper, aufsteigende Tiefenwässer sowie eine mögliche räumliche Variabilität des terrestrischen Wärmestroms sein (Kunkel et al. 2019). So ist der Temperaturgradient in Gesteinen mit guter Wärmeleitfähigkeit, z. B. Salzgesteinen, kleiner als in Gesteinen mit schlechter Wärmeleitfähigkeit (Schaefer 1994). In Kristallingebieten in Bayern wurde z. T. ein eher unterdurchschnittlicher geothermischer Gradient beobachtet (StMWi 2019). Geringere Temperaturen wurden unter Salzüberdeckung beobachtet (Fromme et al. 2010). Für den zentralen Bereich des Thüringer Beckens geben Meinke et al. (1967) Temperaturwerte von 40 °C bis 45 °C im Niveau der Zechsteinbasis an, die dort bei etwa 1000 m unter NN liegt. Der rezente Wärmefluss im Thüringer Becken liegt nach Voigt et al. (2010) bei ca. 45 mW/m<sup>2</sup>. Die für Deutschland durchschnittliche Wärmestromdichte beträgt 65 mW/m<sup>2</sup> (Stober et al. 2016).

Für das Modell „überlagernder ewG“ wird ein Temperaturgradient von 30 K/km festgelegt. Analog der mittleren Jahrestemperatur an der Erdoberfläche in Deutschland (Stober et al. 2016) wird eine Oberflächentemperatur von 8 °C festgelegt. Insofern kann die aus dem angenommenen geothermischen Gradienten und der Oberflächentemperatur errechnete Temperatur im Endlagerniveau (ca. -950 NN) von ca. 38 °C als konservativer Wert angenommen werden. Die natürliche radiogene Wärmeproduktion von Kristallingesteinen wird im Modell nicht berücksichtigt. Nach Stober (2014) liegt diese in einem Bereich von etwa 0,5–3,0  $\mu\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^3)$ .

Für die Betrachtung des Wärmestroms im Gebirge und der Ausbreitung der von den Abfällen produzierten Wärme sind die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der Gesteine wichtige Parameter. Als Kopplungsparameter zwischen thermischen, mechanischen und hydraulischen Prozessen ist der thermische Ausdehnungskoeffizient unverzichtbar. Er erlaubt u. a. die Berechnung der Thermospannungen, die als Folge der Wärmeleistung der Behälter nach deren Einlagerung entstehen und im Zuge der mechanischen Integritätsanalyse berücksichtigt werden müssen. Er ist außerdem wichtig, um eventuell thermisch induzierte Hebungen und Senkungen an der Erdoberfläche zu bestimmen.

#### 4.8.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine stoffspezifische physikalische Größe mit der Einheit  $[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ , die die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung beschreibt. Sie ist prinzipiell eine anisotrope Materialeigenschaft, kann also in unterschiedlichen Raumrichtungen unterschiedliche Werte annehmen, und sollte unter Berücksichtigung der lokal vorliegenden Gesteinseigenschaften bewertet werden. Die Wärmeleitfähigkeit eines porösen Festkörpers hängt, wie seine Wärmekapazität, von seiner mineralogischen Zusammensetzung, Porosität, Porenfüllung (Fluid) sowie dem herrschenden Druck und der Temperatur ab. Mit steigender Temperatur verringert sich die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinen (Leitfähigkeit von Granit bei 500 °C gegenüber 0 °C ungefähr halbiert (Stober 1986)), während steigender Druck zu einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit führt.

Bei der Endlagerauslegung in kristallinen Gesteinen sollte die Temperaturabhängigkeit betrachtet werden. Angaben zur Verteilung thermischer Transportparameter in der Erdkruste finden sich in Seipold (2001). Dort wurde basierend auf den Ergebnissen der Messung von Druck- und Temperaturabhängigkeit an einer größeren Anzahl repräsentativer Gesteinsproben ein mathematisches Modell für die Verteilung der thermischen Transportparameter innerhalb der Erdkruste aufgestellt. Abb. 29 gibt die Ergebnisse für granitische Gesteine wieder.

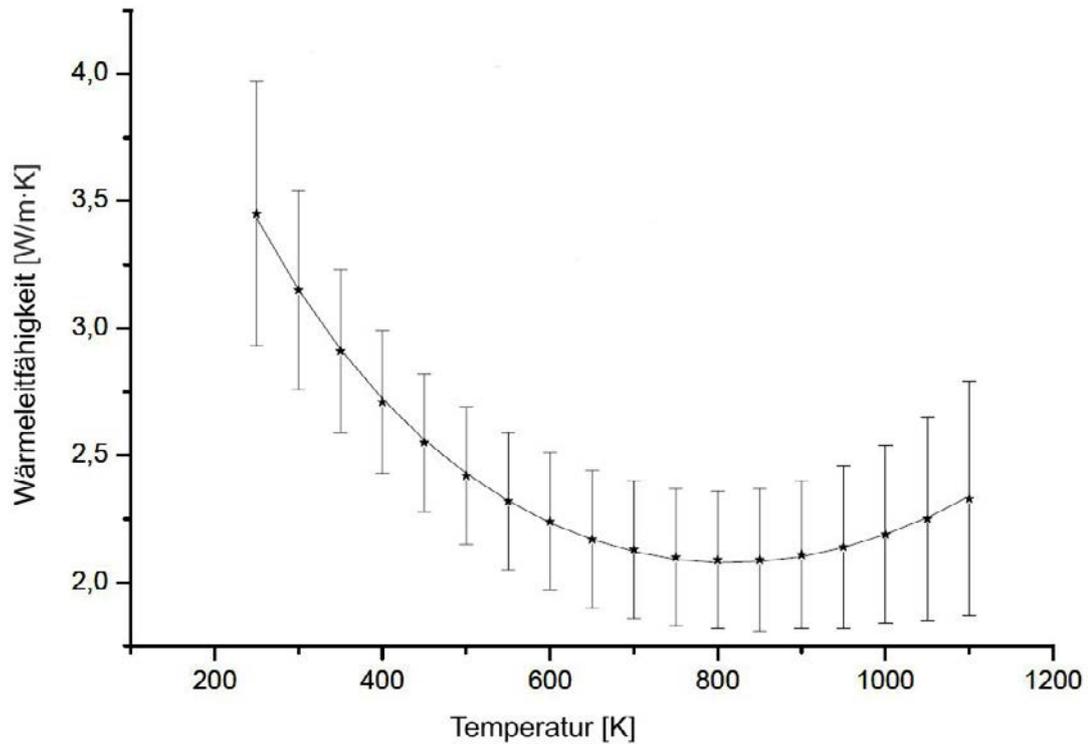


Abb. 29: Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit mit Standardabweichungen, in Abhängigkeit von der Temperatur, für Granite (verändert nach Seipold (2001))

Die Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Gesteinsarten können sich stark unterscheiden. Allgemein können Festgesteine wie Granite oder Gneise die Wärme besser leiten als Lockergesteine wie Kiese und Sande. Auch schwanken die Angaben für die einzelnen Gesteine oft deutlich, was auf Unterschieden in der mineralogischen Zusammensetzung bzw. einem unterschiedlichen Kompaktions- oder Alterationsgrad beruhen kann oder durch eine Schichtung des Gesteins (Anisotropie) hervorgerufen wird (Stober 2014). Tab. 13 zeigt eine Auswahl von Werten, die für die Modelleinheiten in der Literatur genannt werden. Vorschläge für Wärmeleitfähigkeiten, die in Integritätsberechnungen verwendet werden können, sind im Anhang zu finden.

Tab. 13: Wärmeleitfähigkeit für Gesteine aus unterschiedlichen Quellen

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Quelle
Quartär	Sand	1,5 – 2,3	Kock et al. (2012), Scheck-Wenderoth et al. (2014)
Muschelkalk	Kalkstein	1,9 – 3,0	Nipp & Heusermann (2000)
Buntsandstein	Sandstein	2,0 – 2,6	Kock et al. (2012), Scheck-Wenderoth et al. (2014)
Barrieregestein	Steinsalz	5,0 – 5,8	versch. Quellen in Liu et al. (2017)
	Kalisalz	1,5	Lerch et al. (2012)
	Anhydrit	3,2 – 5,2	
Wirtsgestein	Granit	2,9 – 3,2	Stober (1986)
	Granit	1,25 – 4,45	Schön (2011)
	Granit	2,37 – 3,5	Amiguet (1985)
	Granit (pegmatitisch)	3,20 ± 0,41	Posiva (2012)
	Granit (Ävrö)	2,99 – 3,55	Sundberg (2002)
	Granit (feinkörnig)	3,58 – 3,68	
	Granit	2,7 – 3,2	Vondrovic (2017)
	Aare Granit, trocken	2,58 ± 0,19	Keusen et al. (1989)
	Aare Granit, feucht	3,34 ± 0,35	
	Granit	2,1 – 4,1	Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (2008)
Granit (Böhmen)	3,1	Scheck-Wenderoth et al. (2014)	

#### 4.8.2 Spezifische Wärmekapazität

Allgemein gibt die Wärmekapazität an, wie viel thermische Energie ein Körper bezogen auf eine Temperaturänderung aufnimmt oder abgibt. Die spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)] gibt an, wieviel Energie einem Körper mit einer Masse von 1 kg zugeführt werden muss, um dessen Temperatur um 1 K zu erhöhen. Unterschieden wird zwischen der Wärmekapazität bei konstantem Druck  $c_p$  und der Wärmekapazität bei konstantem Volumen  $c_v$ . Abgesehen von Gasen ist der Unterschied aber meist vernachlässigbar. Tab. 14 zeigt Werte für kristalline Gesteine aus verschiedenen Literaturquellen, ein Vorschlag für das Modell „überlagernder ewG“ erfolgt im Anhang.

Tab. 14: Spezifische Wärmekapazität für im Modell vorkommende Gesteine

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	Quelle
Quartär	Sand	950	Kock et al. (2012)
Muschelkalk	Kalkstein	860	abgeleitet aus Jahn et al. (2016)
Buntsandstein	Sandstein	760	Kock et al. (2012)
Barrieregestein	Steinsalz	850 – 890	Lerch et al. (2012)
	Kalisalz	903	
	Anhydrit	864	
Wirtsgestein	Granit	787 – 975	Stober (1986)
	Granit	670 – 1.382	Amiguet (1985)
	Granit	670 – 1.550	Schön (2011)
	Granit (pegmatitisch)	689 ± 17	Posiva (2012)
	Granit	778 (bei Dichte von 2.700 kg/m <sup>3</sup> )	Prinz & Strauß (2018)

#### 4.8.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist ein temperaturabhängiger Kennwert, der die Volumen- und einhergehende Dichteänderung eines Stoffes bei Temperaturveränderungen beschreibt. Es wird zwischen dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten (linearer Wärmeausdehnungskoeffizient) und dem thermischen Raumausdehnungskoeffizienten (räumlicher Ausdehnungskoeffizient, Volumenausdehnungskoeffizient oder kubischer Ausdehnungskoeffizient) unterschieden.

Für isotrope Festkörper gilt, dass sich die Längenänderung in allen drei Raumrichtungen gleich verhält. Besonders bei grobkristallinen Gesteinen wie Graniten können je nach Gesteinsvarietät aufgrund variierender Texturen (z. B. Größe und Orientierung der Kristalle) signifikante Unterschiede im Expansionsverhalten auftreten (Siegesmund & Dürrast 2014).

Tab. 15: Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient

Modelleinheit	(vereinfachte) Lithologie	Thermischer Ausdehnungskoeffizient [ $10^{-6}$ 1/K]				Quelle
		x- Richtung	y- Richtung	z- Richtung	$\varnothing$	
Quartär	Sand	10				Kock et al. (2012)
Muschelkalk	Kalkstein	8				abgeleitet aus Jahn et al. (2016)
		5,1 – 5,5				Müller et al. 2019
Buntsandstein	Sandstein	10				Kock et al. (2012)
		10,4 – 12,15				Müller et al. (2019)
Barrieregestein	Steinsalz	40				Kock et al. (2012)
	Kalisalz	25				
	Anhydrit	16				
Wirtsgestein	–	x- Richtung	y- Richtung	z- Richtung	$\varnothing$	Siegesmund & Dürrast (2014)
	Granit (Thailand)	7,20	7,99	7,51	7,57	
	Granit (Thailand)	9,07	8,14	8,60	8,60	
	Granit (Kösseine)	9,37	8,12	10,20	9,23	
	Granit (Italien)	7,02	6,70	6,68	6,80	
	Granit (Argentinien)	9,65	9,72	10,00	9,79	
	Granit	8,1 – 11,85				Müller et al. (2019)

## 5 Diskussion

Bei der Recherche nach Informationen insbesondere zur Charakterisierung von Kristallingesteinen, die auf das Modell „überlagernder ewG“ übertragbar sind, sind einige generelle Fragen aufgekomen. Sie betreffen vor allem die Möglichkeiten und Grenzen der Datenerhebung im Kristallingestein, um die am jeweiligen realen Standort vorhandenen Strukturen sowie die dort zu erwartenden Prozessabläufe erfassen und bewerten zu können. Auch bei der Beschreibung des Modells, seiner Struktur und seiner Eigenschaften sind Fragen aufgetreten. In diesem Kapitel werden diese Fragen inhaltlich gegliedert zusammengestellt und kurz diskutiert. Einige der angesprochenen Punkte werden bei der Standortsuche nach StandAG (2017) und den darin vorgeschriebenen zukünftigen Sicherheitsuntersuchungen vermutlich als Ungewissheiten eingehen.

Eine offene Frage ist, ob sich ein Endlagerkonzept mit einem „überlagernden ewG“ entsprechend der Vorgaben in Artikel 1 der „Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ vom 06.10.2020 (BMU 2020) umsetzen lässt. Nach § 4 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) sind die Abfälle im Endlagersystem passiv und wartungsfrei durch ein robustes gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu konzentrieren und sicher einzuschließen. Wesentliche Barrieren können ein oder mehrere ewG oder im Falle des Wirtsgesteins Kristallin auch technische und geotechnische Barrieren sein. Nach § 4 Satz 4 muss der sichere Einschluss innerhalb der wesentlichen Barrieren so erfolgen, dass die Radionuklide aus den Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben. Dies ist mit dem Konzept eines „überlagernden ewG“ als wesentliche Barriere nicht erreichbar, wenn eine horizontale Migration der Radionuklide unterhalb der überlagernden Barriere nicht ausgeschlossen ist.

Eine überlagernde Formation kann dennoch als „weitere Barriere“ von Bedeutung sein, wenn es um die Optimierung des Endlagersystems nach § 12 EndlSiAnfV geht. Dafür müssen wichtige zu erwartende und abweichende Entwicklungen ermittelt, beschrieben und eingeordnet werden. Für die Langzeitsicherheitsanalyse ist das Verhalten des Endlagersystems als Ganzes zu betrachten. Hier kann eine zusätzliche Barriere in dem geforderten gestaffelten System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zur Verbesserung der Langzeitsicherheit und damit nach § 2 EndlSiAnfV zur Robustheit, also der Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, beitragen.

## **5.1 Gestein und struktureller Aufbau**

Bei der Auswahl der Gesteinsparameter für das generische Modell lag der Fokus auf den Erfordernissen der numerischen Integritätsnachweise und denen der Nachweise der Radionuklidenausbreitung. Für die Auswahl der Daten wurden verschiedene Literaturquellen verwendet. Da in Deutschland bisher keine Untersuchungen zu einem Endlagerstandort in kristallinen Gesteinen mit einem „überlagernden ewG“ erfolgten, musste insbesondere für das Wirtsgestein auf Daten zurückgegriffen werden, die entweder aus internationalen Vorhaben zur Endlagerung radioaktiver Abfälle, oder aus Projekten mit abweichenden Zielsetzungen wie z. B. zur Geothermie, stammen. Es ist zu betonen, dass keine der verwendeten Quellen einen geologischen Aufbau aufweist, der dem des Modells „überlagernder ewG“ gleicht. Dies hat zur Folge, dass zur Parametrisierung des generischen Modells reale Daten aus verschiedenen geologischen Situationen kombiniert werden. Beispielsweise wird für die hydrochemische Zusammensetzung der Tiefenwässer im Einlagerungsniveau des Modells eine Grundwasserzusammensetzung aus einer von Gesteinen des Zechstein überlagernden Rotliegendformation verwendet, da diese als repräsentativ für eine Grundwasserchemie im kristallinen Grundgebirge unterhalb einer Salinarformation angesehen wird. Insgesamt sind Informationen zu Kristallingesteinen und flach lagernden Salinarformationen aus größeren Tiefen seltener verfügbar und die übertragenen Werte stammen daher oft aus geologischen Situationen, die nicht gut mit denen des Modells übereinstimmen. Diese Unschärfen spielen jedoch für den Test des methodischen Vorgehens bei Sicherheitsnachweisen im Kristallingestein, wie beim Konzept des „überlagernden ewG“, keine Rolle.

## **5.2 Hydraulische Verhältnisse**

Im Rahmen eines standortbezogenen Sicherheitsnachweises müssen die hydraulischen Verhältnisse bis in große Tiefen erfasst und bewertet werden. Dabei sind im Falle eines „überlagernden ewG“ insbesondere die hydraulischen Verhältnisse im Liegenden der Barriereformation von Bedeutung, die eine möglichst vollständige Trennung der Grundwasserstockwerke gewährleisten soll. Das Kluftsystem eines Kristallinkomplexes stellt die wesentlichen Wegsamkeiten für die Grundwasserströmung im Wirtsgestein dar. Die Strömungsrichtungen des Grundwassers können je nach Vernetzung der Klüfte sehr komplex angelegt sein und es können sich auch mehrere voneinander getrennte Fließsysteme innerhalb eines Kristallinkörpers befinden. Auch die hydraulische Leitfähigkeit der einzelnen Klüfte ist nicht einheitlich, sie kann selbst innerhalb einer einzigen Kluft stark variieren. Generell ist von einer hohen Komplexität des Kluftnetzes auszugehen. Aufgrund dessen lässt sich auch mit lokalen Erkundungsdaten das Kluftnetzwerk mit seinen hydraulischen Eigenschaften nicht exakt bestimmen und realitätsgetreu abbilden. Daher werden z. B. unter

Verwendung eines DFN-Modells Annahmen getroffen, mit denen mehrere unterschiedliche Vernetzungen der Klüfte modelliert werden können. Da diese modellierten Klufnetzwerke nie das real existierende Klufnetz eines Standortes widerspiegeln, ist ungewiss, wie gut die darauf basierenden modellierten Grundwasserströmungen die Realität abbilden. Auch durch die Erkundung eines Standortes können diese Ungewissheiten nicht vollständig ausgeräumt werden, da Bohrungen und geophysikalische Untersuchungen nicht den gesamten Einlagerungsbereich und sein direktes Umfeld mit der nötigen Genauigkeit erfassen und abbilden können. Diese Ungewissheiten müssen bei der Bewertung der Radionuklidenausbreitung im Klufnetz berücksichtigt werden, spielen jedoch für den Test des methodischen Vorgehens bei Sicherheitsnachweisen im Kristallingestein, wie beim Konzept des „überlagernden ewG“, keine Rolle.

Darüber hinaus kann eine Bohrung oder die Auffahrung eines Grubengebäudes Klufnetzwerke verbunden haben, die vorher getrennt waren. Dadurch kann es zu einem hydraulischen Anschluss weiterer Klufnetzwerke und/oder zu einer Veränderung der Grundwasserströmung kommen. In diesen Fällen tragen die gewonnenen Daten zwar zu einem verbesserten Verständnis der realen Verhältnisse bei, diese künstlich geschaffenen Hohlräume stellen jedoch auch Veränderungen bzw. Eingriffe dar, die in Sicherheitsbewertungen berücksichtigt werden müssen, damit sie nach Betrieb des Endlagers wieder qualifiziert verfüllt werden können und sich die ursprünglichen Strömungsverhältnisse des Grundwassers nach Möglichkeit wieder einstellen.

### **5.3 DFN-Modelle für reale Standorte**

Eine vorrangige Aufgabe bei der Anwendung von DFN-Modellen an realen Standorten wird sein, möglichst viele Eigenschaften des realen Klufsystems widerzuspiegeln. Dazu zählen u. a. die Lokation, Orientierung, Dimension und in Konsequenz die hydraulisch wirksame Vernetzung der Klüfte. Alle Klufteigenschaften haben Auswirkungen auf geomechanische und hydraulische Prozesse, die im Endlagersystem ablaufen werden. Ein möglichst genaues Abbild der realen Verhältnisse verbessert die Integritätsnachweise und die Bewertung der Radionuklidenausbreitung für den Standort.

Im Zuge einer Standorterkundung, die zunächst übertägig erfolgt und zunehmend den Untertagebereich erschließt, können die DFN-Modelle sukzessive mit Messwerten verbessert werden und nähern sich damit den realen Verhältnissen an. Vor allem die Möglichkeit, schnell unterschiedlich vernetzte Klufsysteme zu generieren, führt zu einer Erfassung möglicher Bandbreiten, die Sicherheitsnachweise gut unterstützen können.

#### **5.4 Realisierung des Konzeptes „überlagernder ewG“**

Zur Realisierung des Konzeptes „überlagernder ewG“ muss an einem Standort ein Barrieregestein vorliegen, in dem ein ewG in ausreichender Ausdehnung und Mächtigkeit ausgewiesen werden kann, und ein darunter liegendes standsicheres Wirtsgestein, das die Anlage eines Endlagerbauwerkes unter Vermeidung stark Grundwasser-führender Bereiche ermöglicht. Nach StandAG (2017) muss der ewG eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner  $10^{-10}$  m/s aufweisen. Die den ewG beinhaltende Barriereformation muss eine Mächtigkeit von mindestens 100 m besitzen. Darüber hinaus ist das Grundwasserregime im Wirtsgestein von größter Bedeutung, da es, je nach Fließrichtung und -geschwindigkeit, der bestimmende Faktor für die Ausdehnung und Lage des ewG ist. Die Anordnung und/oder die Beladung der Endlagerbehälter im kristallinen Wirtsgestein muss u. a. unter Berücksichtigung des durch die eingebrachten Abfälle erzeugten Temperaturfeldes erfolgen und beeinflusst die Größe des Endlagerbauwerkes und damit die Realisierbarkeit.

Es ist wichtig, schon in einer frühen Erkundungsphase über aussagekräftige Daten zu verfügen, um die Realisierbarkeit des geplanten Endlagers belegen zu können. Der Erkundung sind jedoch, wie bereits erläutert, Grenzen gesetzt. Hauptsächlich mit übertägigen Methoden müsste nachgewiesen werden, ob sich im Untergrund ein Gebirgsbereich befindet, der die Anforderungen an einen „überlagernden ewG“ erfüllen kann. Untertägige Erkundungsmethoden, die vom Endlagerbauwerk aus eingesetzt werden, erreichen je nach Methode einen bestimmten Bereich im Umfeld des Bauwerkes. Ihre Aussagekraft ist somit räumlich begrenzt.

Durch den Einsatz von DFN-Modellen können Kluffverteilungen und somit auch hydraulische Wegsamkeiten simuliert und abgebildet werden. Diese können in numerischen Modellberechnungen zur Radionuklidenausbreitung unterhalb des ewG verwendet werden. Sie bieten außerdem die Möglichkeit, verschiedene Verteilungen zu erzeugen, die dann in den Berechnungen mögliche Bandbreiten abbilden. Die tatsächlichen Eigenschaften der Kluffnetzwerke in einem Kristallingestein sind damit jedoch nur bedingt darstellbar.

---

## Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Geologie (2008): Geologische Kartieranleitung. BLA-GEO; Krefeld/Jena, 25.10.2018. 01.10.2019. <https://www.geokartieranleitung.de>
- Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. Geologisches Jahrbuch, Band G 2, Reihe G: 157 S.; Hannover (Schweizerbart).
- Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (2008): Sachstandsbericht für einen bundeseinheitlichen Produktkatalog zur wirtschaftlichen Anwendung oberflächennaher geothermischer Daten. Personenkreis Oberflächennahe Geothermie (PK OG) der Ad-hoc-AG Hydrogeologie, Abschlussbericht, Vers. 1.3: 25 S.; online.
- Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland – Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. A 163. Geologisches Jahrbuch 456; Hannover (Schweizerbart).
- Amiguet, J.-L. (1985): Felskennwerte von intaktem Granit. Zusammenstellung felsmechanischer Laborresultate diverser granitischer Gesteine. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), NIB 85-08. Grimsel Test Site; Baden.
- Andersson, J.C. (2007): Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-07-01. Äspö Hard Rock Laboratory – Äspö Pillar Stability Experiment: 220 pp.; Stockholm.
- Appel, D. & Habler, W. (2002): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung – Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. AkEnd: XII, 206 S.; Hannover.
- Attewell, P.B. & Farmer, I.W. (1976): Principles of Engineering Geology. 1045 p.; Dordrecht (Springer). DOI:10.1007/978-94-009-5707-7
- Bachmann, G.H., Geluk, M.C., Warrington, G., Becker-Roman, A., Beutler, G., Hagdorn, H., Hounslow, M.W., Nitsch, E., Röhling, H.-G., Simon, T. & Szulc, A. (2010): Triassic. (In: Doornenbal, J.C. & Stevenson, A.G. (Eds.): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area). 149-173; Houten (EAGE Publications).

- Bauer, J.F., Krumbholz, M., Luijendijk, E. & Tanner, D.C. (2019): A numerical sensitivity study of how permeability, porosity, geological structure, and hydraulic gradient control the lifetime of a geothermal reservoir. *Solid Earth*, 10, 6: 2115-2135. DOI:10.5194/se-10-2115-2019
- Bauer, J.F., Krumbholz, M., Meier, S. & Tanner, D.C. (2017): Predictability of properties of a fractured geothermal reservoir: the opportunities and limitations of an outcrop analogue study. *Geothermal Energy*, 5, 1: 27 pp. DOI:10.1186/s40517-017-0081-0
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo, E.K. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. DBE TECHNOLOGY GmbH, Abschlussbericht, TEC-20-2017-AB, FKZ 02E11516; Peine.
- Biot, M.A. (1941): General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, (2): 155-164.
- BMU (2000): HAD – Hydrogeologischer Atlas von Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 239 S.; Bonn/Berlin.
- BMU (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 45, Bundesministerium für Umwelt, N.u.R., 06.10.2020.
- Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Buhmann, D., Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Liu, W., Minkley, W., Mönig, J., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Thiemeyer, T., Völkner, E. & Wolf, J. (2018): KOSINA – Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany. BGE Technology GmbH, Synthesebericht, BGE TEC 2018-13 116 S.; Peine.
- Bonnet, E., Bour, O., Odling, N.E., Davy, P., Main, I., Cowie, P. & Berkowitz, B. (2001): Scaling of fracture systems in geological media. *Reviews of Geophysics*, Vol. 39, 3: 347-383. DOI:10.1029/1999RG000074
- Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3 – Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. *Geologisches Jahrbuch, Reihe C 73*: 1-211.

- Bossart, P., Hermanson, J. & Mazurek, M. (2001): Äspö Hard Rock Laboratory – Analysis of fracture networks based on the integration of structural and hydrogeological observations on different scales. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-01-21: 109 pp.; Stockholm.
- Bräuer, V., Eickemeier, R., Eisenburger, D., Grisseemann, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T. & Plischke, I. (2011): Standortbeschreibung Gorleben Teil 4 – Geotechnische Erkundung des Salzstocks Gorleben: BGR, Abschlussbericht: 205 S., Hannover.
- Brodsky, N.S. & Munson, D.E. (1994): Thermomechanical Damage Recovery Parameters for Rocksalt From the Waste Isolation Pilot Plant. 1st North American Rock Mechanics Symposium, 01.-03.06.1994, Austin, Texas. 8; ARMA (American Rock Mechanics Association).
- Bruno, M.S. (2005): Geomechanical Analysis and Design Considerations for Thin-Bedded Salt Caverns. Terralog Technologies, Final Report, DE-FC26-03NT41813 142 pp.; Arcadia. DOI:10.2172/850502
- Carter, B.J., Scott Duncan, E.J. & Lajtai, E.Z. (1991): Fitting strength criteria to intact rock. Geotechnical and Geological Engineering, 9, 1: 73-81. DOI:10.1007/bf00880985
- Dachroth, W. (2017): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. 4. Auflage: XXI, 749 S.; (Springer). DOI:10.1007/978-3-662-46886-9
- Dallmeyer, R.D., Franke, W. & Weber, K. (Eds.) (1995): Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe. 1. IGCP-Project 233: XVI, 611; Berlin, Heidelberg (Springer). DOI:10.1007/978-3-642-77518-5
- Dershowitz, W. & Einstein, H.H. (1988): Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models. Rock Mechanics and Rock Engineering, 21: 21-51.
- Dershowitz, W., La Pointe, P. & Doe, T. (2004): Advances in discrete fracture network modeling. (In: Golder Associates (Ed.)). Proceedings of the US EPA/NGWA fractured rock conference, Portland. 882-894.
- Deutsche Stratigraphische Kommission (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). 2. Auflage, (Menning, M. & Hendrich, A. (Hrsg.); Potsdam.

- Deutscher Wetterdienst (2013): Die deutschen Klimabeobachtungssysteme. Inventarbericht zum Global Climate Observing System (GCOS). Deutscher Wetterdienst: 126 S.; Offenbach a. M.
- Erzinger, J. & Stober, I. (2005): Introduction to Special Issue: long-term fluid production in the KTB pilot hole, Germany. *Geofluids*, Vol. 5: 1-7. DOI:10.1111/j.1468-8123.2004.00107.x
- Franke, D. (2018): Regionale Geologie von Ostdeutschland – Ein Wörterbuch. – Website. [www.regionalgeologie-ost.de](http://www.regionalgeologie-ost.de)
- Franke, W., Rauche, H. & Stein, E. (1995): Saxothuringian Basin - Structure. (In: Weber, K. (Ed.): *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*). 235-248; (Springer).
- Freudenberger, W. & Schwerd, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1: 500.000. 4. Geologische Übersichtskarte; München, Germany (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- Fromme, K., Michalzik, D. & Wirth, W. (2010): The geothermal potential of salt structures in Northern Germany. *ZDGG*, Bd. 161, Heft 3: 323-333. DOI:10.1127/1860-1804/2010/0161-0323
- Geyer, O.F., Gwinner, M.P., Geyer, M., Nitsch, E., Simon, T., Ellwanger, D., Franz, M., Gebhardt, U., Hagdorn, H. & Kull, U. (2011): *Geologie von Baden-Württemberg*. Stuttgart (Schweizerbart).
- Glaser, S., Lagally, U., Loth, G., Schmid, H. & Schwerd, K. (2008): *Geotope in Oberbayern – Erdwissenschaftliche Beiträge zum Naturschutz*. 6: 192; Augsburg, (Bayerisches Landesamt für Umwelt).
- Golder Associates (2017a): *FracMan 7.6 Workshop*.
- Golder Associates (2017b): *Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling and Exploration Simulation. User Documentation FracMan7*.
- Hartley, L. & Roberts, D. (2013): Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites. *Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Report, R-12-04: 142 pp.*; Stockholm.

- Herbert, H.-J. & Schwandt, A. (2007): Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands – Erfassung und Bewertung der chemischen und physikalischen Analyseergebnisse. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS-226: 198 S.; Köln [u.a.].
- Herrmann, A.G., Siebrasse, G. & Könnecke, K. (1978): Computerprogramme zur Berechnung von Mineral- und Gesteinsumbildungen bei der Einwirkung von Lösungen auf Kali- und Steinsalzlagerstätten (Lösungsmetamorphose). Kali und Steinsalz, 7: 288-299.
- Huckriede, H. & Zander, I. (2011): Geologische Charakterisierung der Speicher- und Barrieregesteine im tieferen Untergrund des Freistaats Thüringen (Deutschland). SDGG, Heft 74: 188-204. DOI:10.1127/sdgg/74/2011/188
- Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F. & Plischke, I. (2003): Projekt Gorleben – Thermo-mechanisches Verhalten von Salzgestein. BGR, Abschlussbericht: 157 S.; Hannover.
- Jahn, S., Mrugalla, S. & Stark, L. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) – Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. BGR, Ergebnisbericht, B3/B50112-43/2015-0005/001. F+E Endlagerung: 146 S.; Hannover.
- Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A. & Wolf, J. (2016): Projekt CHRISTA. Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. DBE TECHNOLOGY GmbH, Technischer Bericht, TEC-07-2018-TB, FKZ 02E11617A/B: 122 S.; Peine.
- Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommertsheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L. & Ziefle, G. (2017): Projekt ANSICHT – Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland. Technischer Bericht, TEC-19-2016-AB: 137 S.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland. BGE Technology, Technischer Bericht, BGETEC 2019-05; Peine.
- Johnson, R.B. & DeGraff, J.V. (1988): Principles of Engineering Geology. 512 pp.; (Wiley).

- Jung, R. (1986): Erzeugung eines großflächigen Risses im Falkenberger Granit durch hydraulisches Spalten und Untersuchung seiner mechanischen und hydraulischen Eigenschaften. Dissertation, Schriften der Reihe A, Vol. 20, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Geophysik: V, 230 S.; Bochum.
- Kamlot, W.-P. (2009): Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk. Hochschulschrift, Institut für Geotechnik, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg; 2009-3; Freiberg.
- Keesmann, S., Noseck, U., Buhmann, D., Fein, E. & Schneider, A. (2005): Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salz- und Granitformationen. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Report, GRS - 206: 75 S.; Braunschweig.
- Keusen, H.R., Ganguin, J., Schuler, P. & Buletti, M. (1989): Felslabor Grimsel – Geologie. GEOTEST, Technischer Bericht, NTB 87-14; Bern.
- Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K. & Vogel, P. (2012): Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: 301 S.; Köln.
- Kött, A. & Kracht, M. (2011): Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Speicherung in tiefen Aquiferen Hessens. SDGG, Heft 74: 165-187. DOI:10.1127/sdgg/74/2011/165
- Kroner, U., Linnemann, U. & Romer, R.-L. (2004): Synthese der geologischen Geschichte des Saxothuringikums: Vom cadomischen Akkretionsorogen zum variszischen Kollisionsgebirge. (In: Linnemann, U. (Ed.): Das Saxothuringikum: Abriss der präkambrischen und paläozoischen Geologie von Sachsen und Thüringen). 48/49. *Geologica Saxonica*: 147-150.
- Krumbholz, M. (2010): Electromagnetic radiation as a tool to determine actual crustal stresses – applications and limitations. PhD, Georg-August-Universität Göttingen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultäten: 151 S.; Göttingen.
- Kuang, X. & Jiao, J.J. (2014): An integrated permeability-depth model for Earth's crust. *Geophysical Research Letters*, 41, 21: 7539-7545. DOI:10.1002/2014GL061999

- Kukla, P., Pechinig, R. & Urai, J. (2011): Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben – Bericht zum Arbeitspaket 2. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, GRS - 276. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben: 150 S.; Köln [u.a.].
- Kunkel, C., Agemar, T. & Stober, I. (2019): Geothermisches Nutzungspotenzial der Buntsandstein- und Keuperaquifere im Nordosten Bayerns mit Fokus auf tiefe Aquiferspeicher. *Grundwasser*, 24, 4: 251-267. DOI:10.1007/s00767-019-00430-1
- Lanaro, F. & Fredriksson, A. (2005): Rock Mechanics Model – Summary of the primary data. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Berg Bygg Konsult AB, Golder Associates, SKB Rapport, R-05-83: 45 pp.; Stockholm.
- Langkutsch, U., Käbel, H., Margane, A. & Schwamm, G. (1998): Projekt ERA Morsleben. Hydrogeologische Standortbeschreibung und Modellgrundlagen. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Verfahrensunterlage, P 70. Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben: 585 S.; Salzgitter.
- Lei, Q., Latham, J.-P. & Tsang, C.-F. (2017): The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics*, 85: 151-176. DOI:10.1016/j.compgeo.2016.12.024
- Lerch, C., Bollingerfehr, W., Filbert, W. & Zhang, Q. (2012): Thermo-mechanical analyses for evaluating a HLW-repository concept. (In: Bérest, P., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F. & Zijani, F. (Eds.)). *Mechanical Behavior of Salt VII: Proceedings of the 7th Conference, Paris*. 445 pp.; (CRC Press, Taylor & Francis Group).
- LHW Sachsen-Anhalt (2012): Bericht zur Beschaffenheit des Grundwassers in Sachsen-Anhalt 2001 - 2010. Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt – Gewässerkundlicher Landesdienst: 161 S.; Magdeburg.
- Linnemann, U. & Schauer, M. (1999): Die Entstehung der Elbezone vor dem Hintergrund der cadomischen und variszischen Geschichte des Saxothuringischen Terranes – Konsequenzen aus einer abgedeckten Karte. *Zeitschrift für geologische Wissenschaften*, 27, 5/6: 529-561.
- Littke, R., Bayer, U., Gajewski, D. & Nelskamp, S. (Eds.) (2008): Dynamics of complex intracontinental basins - The Central European Basin System. 519 pp.; Berlin (Springer).

- Liu, W., Knauth, M., Eickemeier, R., Fahland, S., Minkey, W. & Popp, T. (2018): TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. BGR, Ergebnisbericht: 135 S.; Hannover.
- Liu, W., Völkner, E., Minkley, W. & Popp, T. (2017): Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen - Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. BGR, Ergebnisbericht, B3.2/B50112-49/2018-0005/001: 88 S.; Hannover.
- Lüders, V., Plessen, B., Romer, R.L., Weise, S.M., Banks, D.A., Hoth, P., Dulski, P. & Schettler, G. (2010): Chemistry and isotopic composition of Rotliegend and Upper Carboniferous formation waters from the North German Basin. *Chemical Geology*, 276, 3: 198-208. DOI:10.1016/j.chemgeo.2010.06.006
- Luo, X., Were, P., Liu, J. & Hou, Z. (2015): Estimation of Biot's effective stress coefficient from well logs. *Environmental Earth Sciences*, 73, 11: 7019-7028. DOI:10.1007/s12665-015-4219-8
- Makurat, A., Løset, F., Wold Hagen, A., Tunbridge, L., Kveldsvik, V. & Grimstad, E. (2006): Äspö HRL – A descriptive rock mechanics model for the 380-500 m level. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Norwegian Geotechnical Institute, SKB Rapport, R-02-11; Stockholm.
- Martin, C., Eiblmaier, M., Kreuzwald, L., Bischof, N. & Pretsch, H. (2000): Lexikon der Geowissenschaften. 6 Bände: 2840 S.; Heidelberg (Springer Spektrum).
- Maßmann, J. (2016): Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) – Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. BGR, Ergebnisbericht. F+E Endlagerung: 20 S.; Hannover.
- Meinke, W., Hurtig, E. & Werner, J. (1967): Temperaturverteilung, Wärmeleitfähigkeit und Wärmefluss im Thüringer Becken. *Geophys. und Geol.*, Vol. 11: 140-171.
- Meschede, M. (2018): *Geologie Deutschlands – Ein prozessorientierter Ansatz*. 2. Aufl.: 252; Berlin, Heidelberg (Springer). DOI:10.1007/978-3-662-56422-6
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Noseck, U., Rübel, A., Weitkamp, A. & Wolf, J. (2020): FEP-Katalog zur Einlagerungsoption „überlagernder ewG“, Forschungsprojekt CHRISTA-II. BGR, GRS, BGE Technology, Technischer Bericht, BGETEC 2020-22; Hannover, Braunschweig, Peine.

- Mühlenweg, U., Brasser, T. & Hertes, U. (1997): Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen – Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Kurzfassung, GRS-144: 66 S.; Köln [u.a.].
- Müller, B., Pippig, U. & Sebastian, U. (2019): Geotechnische Klassifikationen von Festgesteinen und Festgebirgen. 197 S.; Berlin (Springer Spektrum). DOI:10.1007/978-3-662-59777-4
- Müller, E.P. & Papendieck, G. (1975): Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. Z. Geol. Wiss., 3, 2: 167-196.
- Nipp, H.-K. & Heusermann, S. (2000): Erkundungsbergwerk Gorleben: Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere im Erkundungsbereich EB1 für das technische Endlagerkonzept 1 (Bohrlochlagerung BSK3). BGR, Ergebnisbericht: 45 S.; Hannover.
- Pälchen, W. & Walter, H. (2008): Geologie von Sachsen – Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. Stuttgart (Schweizerbart).
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 4, (2): 439-473. DOI:10.5194/hess-11-1633-2007
- Plischke, I. (2014): Projekt Gorleben – Geotechnische Laborarbeiten im Rahmen der Erkundung Gorleben: Laboruntersuchungen zur Schädigung und Verheilung von Steinsalz. BGR, Ergebnisbericht, 9GE331400000: 27 S.; Hannover.
- Plischke, I. (1987): Laborbericht zu salzmechanischen Untersuchungen an Steinsalzproben aus dem Salzstock Sarstedt. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 14; Hannover.
- Posiva (2012): Olkiluoto Site Description 2011. Posiva Oy, Report, POSIVA 2011-02: 1028 pp.; Eurajoki.
- Pottgiesser, T. & Sommerhäuser, M. (2008): Beschreibung und Bewertung der deutschen Fließgewässertypen – Steckbriefe und Anhang. Umweltbundesamt, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Begleittext: 139 S.

- Prinz, H. & Strauß, R. (2018): Ingenieurgeologie. 6. Aufl.: XVI, 899 S.; (Springer Spektrum). DOI:10.1007/978-3-662-54710-6
- Ranjram, M., Gleeson, T. & Luijendijk, E. (2015): Is the permeability of crystalline rock in the shallow crust related to depth, lithology or tectonic setting? *Geofluids*, 15, 1-2: 106-119. DOI:10.1111/gfl.12098
- Reinhold, K. (2005): Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland. BGR, Abschlussbericht. F+E Endlagerung: 89 S.; Hannover, Berlin.
- Reinhold, K., Müller, C. & Riesenberger, C. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – Synthese –. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 133 S.; Berlin/Hannover.
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland. BGR: 98 S.; Hannover.
- Rhén, I., Forsmark, T., Hartley, L., Jackson, P., Roberts, D. & Swan, D. (2008): Hydrogeological conceptualisation and parameterisation – Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. Svensk Kärnbränslehantering AB, R-08-78: 306 S. ; Stockholm.
- Rupf, I. & Nitsch, E. (2008): Das Geologische Landesmodell von Baden-Württemberg – Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse. LGRB, 21. LGRB Informationen: 82; Freiburg i. Br.
- Reuther, C.-D. (2012): Grundlagen der Tektonik – Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur. X, 277 S.; Berlin/Heidelberg (Springer). DOI:10.1007/978-3-8274-2724-3
- Schaefer, H. (Ed.) (1994): VDI-Lexikon Energietechnik. 1. Ed. Energietechnik: XX, 1470 S.; Berlin, Heidelberg (Springer). DOI:10.1007/978-3-642-95748-2
- Scheck-Wenderoth, M., Cacace, M., Maystrenko, Y.P., Cherubini, Y., Noack, V., Kaiser, B.O., Sippel, J. & Björn, L. (2014): Models of heat transport in the Central European Basin System: Effective mechanisms at different scales. *Marine and Petroleum Geology*, 55: 315-331. DOI:10.1016/j.marpetgeo.2014.03.009
- Scholz, M. (2003): Geomechanische Eigenschaften verwitterter Granite und ihr Einfluss auf den Vortrieb beim Tunnelbau. *Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen*, Reihe B: Ingenieurgeologie – Hydrogeologie – Geothermie: XI + 114 S.

- Schön, J.H. (2011): Physical Properties of Rocks: A Workbook. Vol. 8. Handbook of Petroleum Exploration and Production: 494 pp.; (Elsevier).
- Schramm, M., Thiemeyer, T., Mingerzahn, G. & Hammer, J. (2009): Lösungen im Salzstock Gorleben – eine Dokumentation und genetische Interpretation. Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe, Bericht, 9G4121100000. Projekt Gorleben: 145 S. ; Hannover.
- Sebastian, U. (2018): Gesteinskunde – Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender. 4; (Springer). DOI:10.1007/978-3-662-55323-7
- Seidel, G. (Ed.) (2003): Geologie von Thüringen. 2. neubearbeitete Auflage: X, 601 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Seipold, U. (2001): Der Wärmetransport in kristallinen Gesteinen unter den Bedingungen der kontinentalen Kruste. Geoforschungszentrum Potsdam, Scientific Technical Report, STR01/13; Potsdam.
- Selvadurai, A.P.S., Boulon, M.J. & Nguyen, T.S. (2005): The Permeability of an Intact Granite. Pure and Applied Geophysics, Vol. 162: 373-407. DOI:10.1007/s00024-004-2606-2
- Selvadurai, P., Selvadurai, P. & Nejati, M. (2019): A Multi-phasic Approach for Estimating the Biot Coefficient for Grimsel Granite. Solid Earth Discuss., 2019: 1-17. DOI:10.5194/se-2019-82
- Shackelton, N.J., Berger, A. & Peltier, W.R. (1990): An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 81, 04: 251-261. DOI:10.1017/S0263593300020782
- Siegismund, S. & Dürrast, H. (2014): Physical and Mechanical Properties of Rocks. (In: Siegismund, S. & Snethlage, R. (Eds.): Stone in Architecture: Properties, Durability). 97-224; Berlin, Heidelberg (Springer Berlin Heidelberg). DOI:10.1007/978-3-642-45155-3\_3
- Siren, T. (2011): Fracture Mechanics Prediction for Posiva's Olkiluoto Spalling Experiment (POSE). Posiva Oy, Working Report, 2011-23: 30 pp.; Eurajoki.
- Siren, T. (2012): Fracture Toughness Properties of Rocks in Olkiluoto: Laboratory Measurements 2008-2009. Posiva Oy, Working Report, 2012-25: 76 pp.; Olkiluoto.

- SKB (2008): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) Technical Report, TR-08-05: 537 pp.; Stockholm.
- SKB (2009): Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Laxemar. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) Technical Report, TR-09-01: 644 pp.; Stockholm.
- Souček, K., Vavro, M., Staš, L., Vavro, L., Waclawik, P., Konicek, P., Ptáček, J. & Vondrovic, L. (2017): Geotechnical Characterization of Bukov Underground Research Facility. *Procedia Engineering*, 191: 711-718. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.236
- Souček, K., Vavro, M., Staš, L., Kaláb, Z. & Koniček, P. (2018): Complex Characterization of URF Bukov – Part II – Geotechnical Characterization. Institute of Geonics of the CAS, Final Report: 242 pp.; Ostrava.
- Stackebrandt, W. & Manhenke, V. (Eds.) (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1:1 000 000. 4. aktualisierte Auflage: 157 S.; Cottbus (LBGR).
- StandAG (2017): Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.
- StMWi (Ed.) (2019): Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung. Aktualisierte Fassung: 93 S.; München (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie).
- Stober, I. (1986): Strömungsverhalten von Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Heft 42, Reihe C Geologisches Jahrbuch: 204 S.; Hannover.
- Stober, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. 191 S.; Stuttgart (Enke).
- Stober, I. & Bucher, K. (Eds.) (2000): Hydrogeology of Crystalline Rocks. *Water Science and Technology Library*, 34: 275 pp.; Dordrecht, Boston, London (Kluwer Academic Publishers).

- Stober, I. (2014): Thermisches Regime der Erde. (In: Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. & Neu, T. (Eds.): Handbuch Tiefe Geothermie: Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung). 1-17; Berlin, Heidelberg (Springer). DOI:10.1007/978-3-642-54511-5\_1
- Stober, I., Wolfgramm, M. & Birner, J. (2014): Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland. Zeitschrift geologischer Wissenschaften, 41/42, 5-6: 339-380.
- Stober, I. & Bucher, K. (2015): Hydraulic conductivity of fractured upper crust: insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks. Geofluids, 15, 1-2: 161-178. DOI:10.1111/gfl.12104
- Stober, I., Fritzer, T., Obst, K., Agemar, T. & Schulz, R. (2016): Tiefe Geothermie - Grundlagen und Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Broschüre, 4. Auflage: 87 S.; Hannover.
- Sundberg, J. (2002): Determination of thermal properties at Äspö HRL. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Geo Innova AB, SKB Rapport, R-02-27: 73 pp.; Stockholm.
- Thiedau, J., Maßmann, J., Guevara, C., Weihmann, S. & Alfara, A. (2021): Analysen zur Integrität von geologischen Barrieren von Endlagersystemen im Kristallin. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); Hannover.
- Tsang, C. F., Neretnieks, I. & Tsang, Y. (2015): Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories. Water Resour. Res., 51: 6923–6972. DOI:10.1002/2015WR017641
- Voigt, T., Grobleben, J., Schöner, R. & Gaupp, R. (2010): Die thermische Reife permokarboner Ablagerungen in Thüringen – Schlussfolgerungen für die Versenkungsgeschichte der Thüringer Mulde. Beitr. Geol. Thüringen, Neue Folge, 17: 83-100.
- Völkner, E., Kühnlentz, T., Hammer, J. & Gast, S. (2017): Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. BGR, Ergebnisbericht, B3.2/B50112-49/2017-0007/001: 80 S.; Hannover.
- Vondrovic, L. (2017): Czech Properties Table. Excel-sheet, SURAO. – (Unveröff.)
- Walter, R. (2007): Geologie von Mitteleuropa. 7. The Geology of Central Europe; Stuttgart (Schweizerbart).

- Wittke, W. (1990): Rock mechanics: theory and applications with case histories. 1; (Springer-Verlag). DOI:10.1007/978-3-642-88109-1
- Wohlenberg, J. (1982): Dichte. (In: Angenheister, G. (Ed.): Geophysik und Weltraumforschung – Physikalische Eigenschaften der Gesteine). Bd. 1a. Landolt-Börnstein – Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik, Neue Serie – Gruppe V: 66-119; Berlin (Springer).
- Zeitlhöfler, M., Wagner, B. & Spörlein, T. (2015): Strukturgeologie und Grundwasserführung im ostbayerischen Grundgebirge. *Geologica Bavarica* 112; Augsburg.
- Zepp, H. (2008): Geomorphologie: Grundriß Allgemeine Geographie. 4. Aufl.: 385 S.; Stuttgart (UTB).
- Ziegler, P.A. (1992): European Cenozoic rift system. *Tectonophysics*, 208, 1-3: 91-111. DOI:10.1016/0040-1951(92)90338-7
- Zoback, M.D. (2007): Basic constitutive laws. (In: Zoback, M.D. (Ed.): Reservoir Geomechanics). 56-83; Cambridge (Cambridge University Press). DOI: 10.1017/CBO9780511586477.004

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
Br	Bromidion
BSk	kaltes, semiarides Steppenklima (Köppen-Geiger-Klassifikation)
BWk	kaltes, arides Wüstenklima (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Ca <sup>2+</sup>	Calciumion
CaSO <sub>4</sub>	Calciumsulfat
Cfa	feuchttemperiertes Klima mit heißen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Cfb	feuchttemperiertes Klima mit warmen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
CHRISTA-II	Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (Phase 2 des Vorhabens)
Cl <sup>-</sup>	Chloridion
Csa	warmes, sommertrockenes Klima mit heißen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Csb	warmes, sommertrockenes Klima mit warmen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Dfa	kontinentales winterfeucht-kaltes Klima mit heißen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Dfb	kontinentales winterfeucht-kaltes Klima mit warmen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Dfc	kontinentales winterfeucht-kaltes Klima mit kurzen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
DFN-Modelle	discrete fracture network Modelle
DIC	Dissolved Inorganic Carbon
Dsb	boreales, sommertrockenes Klima mit warmen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Dsc	boreales, sommertrockenes Klima mit kurzen Sommern (Köppen-Geiger-Klassifikation)
E-Modul	Elastizitätsmodul
EF	Dauerfrostklima (Köppen-Geiger-Klassifikation)
Eh-Wert	Redoxpotenzial
EKG	Europäisches Känozoisches Grabensystem

<b>Abkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
EndlSiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
ET	Tundrenklima (Köppen-Geiger-Klassifikation)
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
FEP	features, events and processes
GOK	Geländeoberkante
GWGL	Grundwassergeringleiter
GWL	Grundwasserleiter
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hydrogenkarbonation
I <sup>-</sup>	Iodidion
K <sup>+</sup>	Kaliumion
KCl	Kaliumchlorid (Sylvin)
K <sub>D</sub> -Wert	Sorptionskoeffizient
k <sub>r</sub> -Wert	Durchlässigkeitsbeiwert
KMg[Cl SO <sub>4</sub> ]·3H <sub>2</sub> O	wasserhaltiges Kaliummagnesiumsulfat mit einem zusätzlichen Chloridion (Kainit)
KONEKD	Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (Projekt)
KTB	Kontinentales Tiefbohrprogramm in Deutschland
Li <sup>+</sup>	Lithiumion
Mg <sup>2+</sup>	Magnesiumion
MgCl <sub>2</sub>	Magnesiumchlorid
KMgCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Kaliummagnesiumchlorid-Hexahydrat (Carnallit)
Mg[SO <sub>4</sub> ]·H <sub>2</sub> O	Magnesiumsulfat-Monohydrat (Kieserit)
mKBS-3	Modifikation des rein auf geotechnischen Barrieren beruhenden skandinavischen KBS-3-Konzept (modifiziertes KBS-3-Konzept)
MKZ	Mitteldeutsche Kristallinzone
multipler ewG	Konzept mit multiplen einschlusswirksamen Gebirgsbereichen
Na <sup>+</sup>	Natriumion
NaCl	Natriumchlorid (Halit)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammoniumion
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sulfation

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
Sr <sup>2+</sup>	Strontiumion
StandAG	Standortauswahlgesetz
TDS	total dissolved solids
Typ Ca-Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>	Calcium-Magnesium-Hydrogenkarbonat-Sulfat Grundwassertyp
Typ Ca-Na-Cl-SO <sub>4</sub>	Calcium-Natrium-Chlorid-Sulfat Grundwassertyp
Typ Ca-Na-Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub>	Calcium-Natrium-Chlorid-Sulfat-Hydrogenkarbonat Grundwassertyp
Typ Ca-Na-HCO <sub>3</sub>	Calcium-Natrium-Hydrogenkarbonat Grundwassertyp
Typ Ca-Na-Mg-Cl	Calcium-Natrium-Magnesium-Chlorid Grundwassertyp
Typ Na-Ca-HCO <sub>3</sub>	Natrium-Calcium-Hydrogenkarbonat Grundwassertyp
Typ Na-SO <sub>4</sub> -(Cl-HCO <sub>3</sub> )	Natrium-Sulfat-(Chlorid-Hydrogenkarbonat) Grundwassertyp
überlagernder ewG	Konzept mit einer überlagernden Schicht als einschlusswirksamer Gebirgsbereich
URL	Underground Research Laboratory (Untertagelabor)
z1	Werra-Folge (Zechstein)
z7	Fulda-Folge (Zechstein)

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Kluftorientierung des generischen Kluftsystems .....	43
Tab. 2: Gesteinsdichte (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine) .....	50
Tab. 3: E-Modul (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine) .....	51
Tab. 4: Poissonzahl (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine) .....	52
Tab. 5: Einaxiale Druckfestigkeit (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine) .....	53
Tab. 6: Zugfestigkeit (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine) .....	54
Tab. 7: Kohäsion (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine) .....	54
Tab. 8: Winkel der inneren Reibung (Literaturwerte für unterschiedliche Gesteine) .....	55
Tab. 9: Mögliche Bandbreiten der hydraulischen Leitfähigkeit für das Wirtsgestein aus verschiedenen Quellen .....	57
Tab. 10: Werte der effektiven z. T. auch der undifferenzierten Porosität aus der Literatur .....	61
Tab. 11: Charakteristische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung für das Tiefenwasser im Grundgebirge im Liegenden einer Salzstruktur .....	63
Tab. 12: Sorptionskoeffizienten in [m/kg] für ein Endlagermodell im Granit nach Keesmann et al. (2005) .....	67
Tab. 13: Wärmeleitfähigkeit für Gesteine aus unterschiedlichen Quellen .....	70
Tab. 14: Spezifische Wärmekapazität für im Modell vorkommende Gesteine .....	71
Tab. 15: Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient .....	72

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Verbreitung der Köppen-Geiger Klimatypen (vgl. Abkürzungsverzeichnis) in Europa (verändert nach Peel et al. 2007) .....	7
Abb. 2: Strukturgeologische Gliederung des variszischen Grundgebirges in Mitteleuropa (Meschede 2018) .....	10
Abb. 3: Schematische Verbreitung des Halit-führenden Zechstein-Salinars in Deutschland (verändert nach Reinhold et al. 2014) .....	11
Abb. 4: Paläogeographische Rekonstruktion Mitteleuropas zur Zeit des Buntsandstein (Meschede 2018) .....	13
Abb. 5: Paläogeographische Rekonstruktion Mitteleuropas zur Zeit des Muschelkalk (Meschede 2018) .....	14
Abb. 6: Beispiele für Durchlässigkeitsbeiwerte in geklüftetem Gebirge bei unterschiedlichen Kluftöffnungsweiten und einem Kluftabstand von einem Meter (verändert nach Wittke (1990) in Sebastian (2018)) .....	16
Abb. 7: Höhenlinienplan der Geländeoberfläche des Modells .....	22
Abb. 8: Gewässernetz im Modell „überlagernder ewG“ .....	23
Abb. 9: Modell „überlagernder ewG“ mit allen Modelleinheiten und Schachtansatzpunkt .....	26
Abb. 10: Modell „überlagernder ewG“ mit der Oberfläche des Wirtsgesteins. Diese entspricht der Grenze Grundgebirge – Zechstein. ....	27
Abb. 11: Tiefenlage der Oberfläche des Wirtsgesteins bezogen auf die Geländeoberkante .....	28
Abb. 12: Angeschnittenes Modell „überlagernder ewG“ mit der Oberfläche des Wirtsgesteins, einer möglichen Lokation und dem Flächenbedarf des Endlagers (blaues Rechteck) von der 950-m-Sohle auf die Oberfläche des Wirtsgesteins projiziert. ....	29
Abb. 13: Oberfläche der Barriereformation .....	31
Abb. 14: Mächtigkeit der Barriereformation .....	32
Abb. 15: Tiefenlage der Barriereformation unter Geländeoberkante .....	33
Abb. 16: Modell „überlagernder ewG“ bis zur Oberfläche des Unteren Buntsandstein. Diese entspricht der Grenze Unterer Buntsandstein – Mittlerer Buntsandstein. ....	35
Abb. 17: Lage der Oberfläche unter Geländeoberkante und Mächtigkeit des Unteren Buntsandstein .....	35
Abb. 18: Modell „überlagernder ewG“ bis zur Oberfläche des Mittleren Buntsandstein. Diese entspricht der Grenze Mittlerer Buntsandstein – Oberer Buntsandstein. ....	36
Abb. 19: Lage der Oberfläche unter Geländeoberkante und Mächtigkeit des Mittleren Buntsandstein .....	37

## Seite

Abb. 20: Modell „überlagernder ewG“ bis zur Oberfläche des Oberen Buntsandstein. Diese entspricht der Grenze Oberer Buntsandstein – Muschelkalk. ....	38
Abb. 21: Lage der Oberfläche des Oberen Buntsandstein unter Geländeoberkante und Mächtigkeit .....	38
Abb. 22: Mächtigkeit von Muschelkalk und Quartär .....	39
Abb. 23: Klufrichtungen aus Tab. 1 unter Verwendung der Fisherverteilung (Projektion in die obere Hemisphäre) .....	44
Abb. 24: Geologisches 3D-Kluftmodell „überlagernder ewG“ .....	45
Abb. 25: Ausschnitt des geologischen Kluftmodells mit den Klüften (blau dargestellt), die die Einlagerungssohle (-950-m-Sohle) schneiden. ....	45
Abb. 26: Bohrprofil im Bereich des Schachtstandortes des Modells „überlagernder ewG“ mit Angaben zur Stratigraphie und Lithologie .....	47
Abb. 27: Lithologische und hydrogeologische Eigenschaften der Modelleinheiten. Die Einteilung der hydraulischen Leitfähigkeit orientiert sich an der $k_f$ -Wert basierten Einstufung nach Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (1997). ....	56
Abb. 28: Hauptausrichtungen des Grundwasserstroms im obersten GWL des Modells „überlagernder ewG“ .....	60
Abb. 29: Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit mit Standardabweichungen, in Abhängigkeit von der Temperatur, für Granite (verändert nach Seipold (2001)) .....	69

Anhangverzeichnis	Seite
Anhang: .....	98
Vorschlag von Parameterwerten für Modellberechnungen im Vorhaben CHRISTA-II	

## Anhang:

### ***Vorschlag von Parameterwerten für Modellberechnungen im Vorhaben CHRISTA-II***

In diesem Anhang erfolgt in einer tabellarischen Zusammenstellung ein Vorschlag von möglichen Parameterwerten, die in den verschiedenen Berechnungen für Sicherheitsnachweise für das Modell „überlagernder ewG“ benötigt werden. Sie basieren auf den Bandbreiten und Literaturwerten, die in Kapitel 4 aufgeführt sind. Da im Rahmen des Modells „überlagernder ewG“ keine speziellen Berechnungen für die Deckgebirgseinheiten durchgeführt werden, werden für diese Schichten über die in Kapitel 4 gemachten Angaben hinaus keine Werte angegeben.

- Anhang -

Mechanische Eigenschaften

Parameter	Modelleinheit	Bandbreite/Wert	Kommentar
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Kalisalz	1.850	-
	Anhydritgestein	2.700	-
	Steinsalz	2.160	-
	Wirtsgestein	2.700	-
E-Modul [GPa]	Kalisalz	16 – 17	-
	Anhydritgestein	30 – 60	-
	Steinsalz	25 – 33	-
	Wirtsgestein	50	-
Poissonzahl [-]	Kalisalz	0,26 – 0,28	Zusammenfassend kann für die Barriereformation ein einheitlicher Koeffizient von 0,25 angenommen werden (vgl. Liu et al. 2017).
	Anhydritgestein	0,25 – 0,27	
	Steinsalz	0,25 – 0,27	
	Wirtsgestein	0,25	-
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	Kalisalz	30	-
	Anhydritgestein	70	-
	Steinsalz	30	-
	Wirtsgestein	200	-
Zugfestigkeit [MPa]	Kalisalz	2	-
	Anhydritgestein	7	-
	Steinsalz	2	-
	Wirtsgestein	17	-
Kohäsion [MPa]	Kalisalz	18	-
	Anhydritgestein	30	-
	Steinsalz	18	-
	Wirtsgestein	35	-
Winkel der innrerer Reibung [°]	Kalisalz	k. A.	-
	Anhydritgestein	35	-
	Steinsalz	k. A.	-
	Wirtsgestein	40	-
Biot-Koeffizient [-]	Wirtsgestein	0,7	-

- Anhang -

Hydraulische Eigenschaften

Parameter	Modelleinheit	Bandbreite/Wert	Kommentar
k <sub>f</sub> -Wert [m/s]	Kalisalz	≤ 10 <sup>-14</sup>	Zusammenfassend kann der Barriereformation eine mittlere hydraulische Leitfähigkeit von ≤ 10 <sup>-13</sup> m/s bzw. eine mittlere Permeabilität von ≤ 10 <sup>-21</sup> m <sup>2</sup> zugewiesen werden.
	Anhydritgestein	≤ 10 <sup>-13</sup>	
	Steinsalz	≤ 10 <sup>-15</sup>	
	Wirtsgestein	1·10 <sup>-13</sup> - 1·10 <sup>-6</sup>	geklüftet
Effektive Porosität [-]	Kalisalz	< 0,001	-
	Anhydritgestein	0,01	-
	Steinsalz	< 0,001	-
	Wirtsgestein	0,01	-

Thermische Eigenschaften

Parameter	Modelleinheit	Wert	Kommentar
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Kalisalz	1,5	-
	Anhydritgestein	4,2	-
	Steinsalz	5,0	-
	Wirtsgestein	3,0	-
Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	Kalisalz	903	-
	Anhydritgestein	860	-
	Steinsalz	860	-
	Wirtsgestein	960	-
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [1/K]	Kalisalz	25·10 <sup>-6</sup>	-
	Anhydritgestein	16·10 <sup>-6</sup>	-
	Steinsalz	40·10 <sup>-6</sup>	-
	Wirtsgestein	8,4·10 <sup>-6</sup>	-