



BGE TECHNOLOGY GmbH

CHRISTA-II

**FEP-Katalog zum Endlagersystem
„modifiziertes KBS-3-Konzept“**

BGE TEC 2020-23



BGE TECHNOLOGY GmbH

CHRISTA-II

FEP-Katalog zum Endlagersystem „modifiziertes KBS-3-Konzept“

BGE TEC 2020-23

Autoren

Sabine Mrugalla (Editorin)

Britta Frenzel

Michael Jobmann

Michael Krumbholz

Andree Lommerzheim

Kim-Marisa Meyer

Artur Meleshyn

Ulrich Noseck

André Rübel

Axel Weitkamp

Datum

02.07.2020

Auftraggeber

BMWi

Vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, KIT

Förderkennzeichen

02E11385A/B

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes
"Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland (CHRISTA-II)".

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von der BGE TECHNOLOGY GmbH in Zusammenarbeit mit BGR und GRS durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA

Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung.....	1
II.	Gliederung des FEP-Katalogs	2
III.	Eigenschaftsdefinitionen	5
IV.	FEP-Liste für das Modell „mKBS-3“	10
V.	Literaturverzeichnis.....	13

Komponenten-FEP

1	Abfallmatrix.....	15
2	Abfallinventar	18
3	Brennelement-Behälter	20
4	Behälter für hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle	24
5	Behälter für schwach- und mittelradioaktive Abfälle	28
6	Buffer.....	32
7	Versatz	35
8	Bohrlochwiderlager	38
9	Schachtverschlüsse.....	40
10	Rampenverschlüsse	46
11	Kluftverschlüsse	50
12	Schachtausbau	55
13	Streckenausbau.....	60
14	Rampenausbau	63
15	Technische Einrichtungen.....	66
16	Auflockerungszone und Abschalungen	68
17	Korrosionsprodukte aus Metallkorrosion	73
18	Korrosionsprodukte aus Betonkorrosion	77
19	Lösungen im Grubengebäude	80
20	Gase im Grubengebäude.....	83
21	Übertägige Erkundungsbohrungen	85
22	Untertägige Erkundungsbohrungen	89
23	Wirtsgestein.....	94
24	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	98

25	Lösungen im Wirtsgestein.....	102
26	Gase im Wirtsgestein.....	107
27	Deckgebirge	110
28	Störungen und Klüfte im Deckgebirge.....	115
29	Lösungen im Deckgebirge	118
30	Gase im Deckgebirge	122
31	Oberflächengewässer	124

Prozess-FEP

32	Vertikale Bewegungen der Lithosphäre	126
33	Orogenese.....	129
34	Isostatische Bewegungen der Lithosphäre	131
35	Grabenbildung	134
36	Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten.....	137
37	Erdbeben	140
38	Gesteinsmetamorphose.....	144
39	Diagenese	146
40	Erosion	148
41	Sedimentation.....	153
42	Klimatisch bedingter Wärmestrom	155
43	Terrestrischer Wärmestrom	159
44	Permafrost.....	162
45	Niederschlagseintrag	167
46	Transgression oder Regression	169
47	Inland- oder Vorlandvereisung	171
48	Glaziale Rinnenbildung.....	174
49	Meteoriteneinschlag.....	177
50	Korrosion der Brennstoffmatrix	180
51	Alteration der Glasmatrix	184
52	Korrosion von Baustoffen mit Zementphasen	186
53	Metallkorrosion	190
54	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	196
55	Metallversprödung durch Strahlung	199

56	Alteration von Bentonit.....	201
57	Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen	207
58	Alteration von Organika	212
59	Mikrobielle Prozesse.....	214
60	Quellen und Schrumpfen von Bentonit.....	220
61	Quellen, Schwinden und Kriechen von Beton	224
62	Konvergenz	228
63	Endlagerinduzierter Wärmestrom	231
64	Thermische Expansion oder Kontraktion	235
65	Phasenübergänge	239
66	Übertragung von Spannungen.....	241
67	Strömungsvorgänge in der Geosphäre	246
68	Strömungsvorgänge im Grubengebäude	250
69	Migration von Asphalt	253
70	Dispersion	257
71	Diffusion	259
72	Lösen und Ausgasen	262
73	Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung.....	264
74	Radiolyse.....	268
75	Strahlungsinduzierte Aktivierung.....	271
76	Zündung von Gasgemischen	273
77	Sorption und Desorption	275
78	Komplexbildung	279
79	Kolloidbildung und -filtration	281
80	Thermochemische Sulfatreduktion.....	285

I. Einleitung

Ziel des Projektes CHRISTA-II ist die Entwicklung eines Konzeptes zur sicherheitstechnischen Bewertung eines Endlagers für hoch-radioaktive Abfälle an einem generischen Standort in Kristallingestein. Es wird gemeinsam bearbeitet von der BGE TECHNOLOGY GmbH, der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS).

Im StandAG (2017) sind für die Endlagerung im Kristallingestein mehrere Optionen genannt, so kann das Wirtsgestein Kristallingestein den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) beinhalten oder er liegt oberhalb des Kristallingesteins, so dass das Wirtsgestein die Anforderungen an die Barriere nicht erfüllen muss. Es werden daher drei Endlagerstandortmodelle betrachtet.

1. Das Modell „multipler ewG“ (mewG) enthält im kristallinen Wirtsgestein mehrere Bereiche, die die Anforderungen an die Barriere erfüllen und als ewG die Abfälle aufnehmen können.
2. Im Modell „überlagernder ewG“ (üewG) wird das Wirtsgestein durchgehend geklüftet angenommen und der ewG wird durch eine salinare Ablagerung oberhalb des Kristallingesteins gebildet.
3. Im Modell „modifiziertes KBS-3 Konzept“ (mKBS-3) wird ebenfalls ein durchgehend geklüftetes Wirtsgestein angenommen, in dem kein ewG ausweisbar ist. Die Einschlussfunktion wird allein von den technischen Barrieren übernommen.

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Beschreibung der Modellvariante „mKBS-3“. Die Varianten werden einzeln betrachtet, um unterschiedliche Inhalte behandeln und eindeutig voneinander trennen zu können.

Ein wichtiger Teilaspekt einer Sicherheitsbewertung ist die vollständige Beschreibung des Endlagersystems und der darin ablaufenden Prozesse. International werden dafür in der Regel Zusammenstellungen von sog. „*Features, Events, Processes*“ (FEP) genutzt. Eine Kompilierung der bisher erarbeiteten FEP wird von der Nuclear Energy Agency (NEA) in Form einer internationalen FEP-Liste (NEA 2019) zur Verfügung gestellt. Der vorliegende FEP-Katalog orientiert sich ebenfalls an dieser Liste. Um den nationalen Gegebenheiten gerecht zu werden und im Hinblick auf die in Deutschland erarbeitete Methode der Szenarienentwicklung (z. B. Beuth et al. 2012, Lommerzheim et al. 2015, 2018) wurden einige FEP der internationalen Liste zusammengefasst, getrennt oder in anderer Form behandelt. Durch die Angabe der NEA FEP-Nummern wird der Bezug zur internationalen Liste dokumentiert.

II. Gliederung des FEP-Katalogs

Das Kürzel FEP steht für die englischen Begriffe „*Features, Events, Processes*“, die eine erste Gliederung des Endlagersystems und seiner Entwicklung darstellt. Eine Schwierigkeit tritt bei der Unterscheidung zwischen „*Events, Processes*“ auf, da die Abgrenzung nicht scharf ist und individuell sehr unterschiedlich bewertet wird. In der neuesten Version der NEA FEP-Liste (IFEP) ist diese Unterscheidung oft nicht erfolgt. Einige FEP werden dort als „*Event*“ und „*Process*“ aufgeführt. In deutschen FEP-Katalogen, und auch im vorliegenden, wird daher auf Basis der methodischen Weiterentwicklung im Forschungsprojekt ANSICHT (Stark et al. 2016) eine Unterscheidung in Komponenten und Prozesse vorgenommen.

Komponenten sind alle Bestandteile des Endlagersystems. Ihre räumliche Ausdehnung ist eindeutig und überschneidungsfrei. Für jede Komponente werden auch deren Eigenschaften erfasst, auf die die Prozesse im Rahmen der Systementwicklung verändernd eingreifen können. Die Definition dieser Eigenschaften erfolgt in Kapitel III.

Nachfolgend wird in Unterkapiteln die Gliederung der FEP innerhalb des Katalogs vorgestellt, anhand derer die Inhalte beschrieben sind. Die Gliederung der Komponenten und Prozess FEP unterscheidet sich insofern voneinander, dass Eigenschaften nur für Komponenten erfasst werden. In der Beschreibung der Gliederung ist gekennzeichnet, wenn sich eine Ebene nur auf eine FEP Art bezieht. Insgesamt beinhaltet die Gliederung folgende Elemente:

- FEP Titel,
- NEA-Gruppe,
- Definition/Kurzbeschreibung,
- Allgemeine Informationen und Beispiele,
- Komponentenbeschreibung,
- Eigenschaften im Überblick (nur Komponenten),
- Prozessbeschreibung,
- Zeitliche Beschränkung,
- Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung,
- Ungewissheiten und
- Literaturquellen.

FEP Titel und NEA-Gruppe

Der Titel ist die namentliche Bezeichnung des FEP, er wurde soweit möglich in Anlehnung an den NEA FEP-Katalog gewählt. Ausschlaggebend für die Namensgebung sind jedoch die lokalen Bedingungen und Erfordernisse, die sich im Titel widerspiegeln sollen.

Die Angabe der NEA-Gruppe erfolgt auf Grundlage des IFEP-Katalogs (NEA 2019) und zeigt welche FEP der internationalen Liste im aktuellen Katalog verwendet werden. An dieser Stelle wird auch deutlich, ob ein FEP direkt übernommen wurde oder ob es eine Zusammenfassung bzw. Aufspaltung der NEA FEP-Gruppe gab.

Definition/Kurzbeschreibung

Dieses Feld gibt die Definition des FEP und gegebenenfalls eine kurze Beschreibung wieder. Neben allgemeingültigen werden für einige FEP auch projektspezifische Definitionen oder Beschreibungen gemacht, die z. B. auf lokale Bedingungen oder Besonderheiten eingehen. Daher sind die Informationen in diesem Feld nicht beliebig auf andere Standorte oder betrachtete Wirtsgesteine übertragbar.

Allgemeine Informationen und Beispiele

In diesem Feld werden allgemeingültige Informationen zum FEP zusammengestellt und der aktuelle Stand der Forschung zu dem Thema wird aufgezeigt. Dadurch kann das FEP ausführlicher beschrieben werden und es kann verdeutlicht werden, ob eine allgemeingültige Situation vorliegt, oder ob lokal starke Unterschiede auftreten können. Dadurch kann gezeigt werden, ob das jeweils beschriebene FEP ein Regel- oder Sonderfall ist.

Komponentenbeschreibung

Beschrieben wird der Ist-Zustand aller im Endlagersystem enthaltenen Komponenten. Neben der Raumlage wird auch der Aufbau und die Zusammensetzung erläutert, außerdem werden Besonderheiten gekennzeichnet. Bei den Komponenten der Geosphäre wird neben der rezenten Ausprägung auch auf die vergangene Entwicklung eingegangen, sofern diese für die Betrachtung der zukünftigen Entwicklung eine Rolle spielt.

Eigenschaften im Überblick (nur Komponenten)

Tabellarisch werden für jede Komponente deren thermische, hydraulische, mechanische und chemische/mineralogische/biologische Eigenschaften angegeben. Die Einwirkung der Prozesse kann dann für die jeweilige Beeinflussung der Eigenschaft beurteilt werden. Definiert sind die Eigenschaften im Kapitel III.

Prozessbeschreibung

An dieser Stelle werden die Prozesse mit ihrer Ausprägung am Standort oder im Modell beschrieben. Neben dem eigentlichen Ablauf und den steuernden Elementen werden auch die möglichen Einwirkungen auf das Endlagersystem erläutert.

Zeitliche Beschränkung

Einige Prozess FEP wirken innerhalb der nächsten einen Million Jahre nur zu bestimmten Zeiten und sind nicht dauerhaft aktiv. In diesem Feld werden solche vermerkt und kurz erläutert.

Auch bei Komponenten FEP kann es zeitliche Beschränkungen geben, wenn z. B. die Sicherheitsfunktion einer Barriere für einen bestimmten Zeitraum angegeben ist. In diesem Fall ist die Komponente zwar noch Teil des Endlagersystems, sie verliert jedoch ab einem bestimmten Zeitpunkt ihre Relevanz und wird in der Sicherheitsbetrachtung anders behandelt.

Die zeitliche Beschränkung kommt daher vor allem bei der Szenarienentwicklung zum Tragen, in der betrachtet werden muss welche Prozesse wann wirken und ob sie dann sicherheitsrelevante Veränderungen der Komponenten bewirken können.

Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

Mit Hilfe eines Auswahlfeldes erfolgt eine Klassifizierung der Wahrscheinlichkeit, unter der ein FEP innerhalb des Bewertungszeitraumes in der Endlagersystementwicklung eintritt. Die Klassen beruhen derzeit auf den Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen von 2010 (BMU 2010) und sind in Zukunft an eventuelle Änderungen der Vorgaben anzupassen. Sie lauten:

- **wahrscheinlich:** Beträgt die Eintrittswahrscheinlichkeit eines FEP bezogen auf den Bewertungszeitraum mindestens 10 % wird es nach BMU (2010) dieser Klasse zugeordnet. Der Ablauf von Prozessen in dieser Klasse wird demnach innerhalb des Bewertungszeitraumes erwartet. In diese Klasse fallen auch die im Endlagersystem enthaltenen Komponenten wie z. B. die der Geosphäre und des Grubengebäudes inklusive der technischen Komponenten und Abfälle.
- **weniger wahrscheinlich:** Laut BMU (2010) werden FEP mit einer auf den Bewertungszeitraum bezogenen Eintrittswahrscheinlichkeit von mindestens 1 % in diese Klasse eingeordnet. In der Systementwicklung sind solche FEP also nicht zu erwarten, aber auch nicht auszuschließen.
- **unwahrscheinlich:** Diese Klasse wird gewählt, wenn das FEP in der Endlagersystementwicklung innerhalb des Bewertungszeitraumes nicht eintreten kann oder nur eine geringe Restwahrscheinlichkeit hat.

Da es eine wichtige Aufgabe des FEP-Kataloges ist, die wissenschaftlichen Sichtweisen und die darauf basierenden getroffenen Entscheidungen transparent und nachvollziehbar zu dokumentieren, wird für diese Einordnung jeweils eine Begründung angegeben.

Ungewissheiten

In diesem Kapitel werden Ungewissheiten und offene Fragen aufgelistet und der sich daraus ergebende aktuelle Forschungsbedarf im Zusammenhang mit dem jeweiligen FEP aufgeführt. Außerdem werden auch Fragestellungen genannt, die keinen F&E-Bedarf im eigentlichen Sinne darstellen, aber zu deren Beantwortung noch konkrete Arbeiten durchgeführt werden müssen. Offene Arbeiten, die in einem Genehmigungsverfahren endlagerspezifisch durchzuführen wären, werden nicht aufgeführt (z. B. Durchführung einer Störfallanalyse).

Literaturquellen

Das Feld beinhaltet die Zitate der für die FEP-Beschreibung verwendeten Literatur. Um die Transparenz und Nachvollziehbarkeit des FEP-Kataloges zu gewährleisten, wird nur auf veröffentlichte Literatur zurückgegriffen.

III. Eigenschaftsdefinitionen

In der Endlagersystementwicklung wirken Prozesse auf die Komponenten ein und verändern diese gegebenenfalls. Diese Veränderungen betreffen in der Regel nicht die gesamte Komponente, sondern abhängig vom wirkenden Prozess nur bestimmte Eigenschaften der Komponente. Außerdem können veränderte Eigenschaften auch dazu führen, dass andere Prozesse auftreten oder dass die bereits wirkenden in anderer Weise ablaufen. Um solche Wechselwirkungen bei der Systemanalyse mittels Szenarien möglichst genau erfassen zu können ist die Ausweisung der Eigenschaften einer Komponente ein wichtiger erster Schritt.

Basierend auf der erstmaligen Ausweisung und Definition von Eigenschaften im Forschungsprojekt ANSICHT (Stark et al. 2016) erfolgte die Zuweisung in den vorliegenden FEP Beschreibungen anhand einer Tabelle, welche zunächst in vier Themenbereiche der Eigenschaften gegliedert ist. Diese sind:

- Thermische,
- Hydraulische,
- Mechanische und
- Chemische/Mineralogische/Biologische Eigenschaften.

Zu jedem Themenbereich gehören mehrere Eigenschaften, die nachfolgend entsprechend dem Verständnis im Forschungsprojekt CHRISTA-II definiert und erläutert sind.

Thermische Eigenschaften

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine lokale stoffspezifische physikalische Größe, die die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung beschreibt. Die Wärmeleitfähigkeit ist prinzipiell eine anisotrope Materialeigenschaft und damit eine tensorielle Größe. D. h., sie kann in unterschiedlichen Raumrichtungen unterschiedliche Werte annehmen. Sie ist prinzipiell abhängig vom Druck, der Temperatur und bei porösen Körpern auch von der Porosität und der Porenfüllung (Fluid). Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffs ist definiert durch die Gleichung der stationären Wärmeleitung $q = -\lambda \text{ grad } T$, d. h. als Proportionalitätsfaktor zwischen der Wärmestromdichte q und der räumlichen Änderung der Temperatur T (Temperaturgradient); das negative Vorzeichen bedeutet dabei einen Wärmestrom von höheren zu niedrigeren Temperaturen. λ gibt die Wärmemenge an, die im stationären Zustand je Sekunde durch eine Fläche von 1 m^2 fließt, wenn senkrecht dazu ein Temperaturgefälle von 1 K pro Meter herrscht.

Die SI-Einheit der Wärmeleitfähigkeit ist $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Spezifische Wärmekapazität

Die Wärmekapazität eines Körpers gibt an, wie viel thermische Energie der Körper bezogen auf eine Temperaturänderung ΔT aufnimmt oder abgibt. Die spezifische Wärmekapazität ist die auf die Masse des Körpers bezogene Wärmekapazität. Die umgesetzte Energie hängt im Allgemeinen von der Prozessführung bei der Temperaturänderung ab. Man definiert daher insbesondere die Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p und die Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_v . Abgesehen von Gasen ist der Unterschied aber meist vernachlässigbar.

Die SI-Einheit der spezifischen Wärmekapazität ist $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Temperatur

Die Temperatur beschreibt den Wärmezustand eines Körpers. Sie kennzeichnet das thermodynamische Gleichgewicht: Wenn zwei Körper dieselbe Temperatur haben, dann fließt keine Wärme zwischen ihnen, auch wenn sie miteinander in direktem Kontakt stehen. Unterscheidet sich jedoch die Temperatur der beiden Körper, so fließt Wärme vom Körper höherer Temperatur zu dem mit niedrigerer Temperatur bis sich die Temperaturen einander angeglichen haben. Die Gleichgewichtstemperatur liegt dann zwischen den beiden Ausgangstemperaturen. Die SI-Einheit der Temperatur ist Kelvin.

Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist ein Kennwert, der das Verhalten eines Stoffes bezüglich Veränderungen seiner Abmessungen bei Temperaturveränderungen beschreibt; deswegen oft auch thermischer Ausdehnungskoeffizient genannt. Der hierfür verantwortliche Effekt ist die temperaturabhängige Änderung der Dichte. Da die Wärmeausdehnung bei vielen Stoffen nicht gleichmäßig über alle Temperaturbereiche erfolgt, ist auch der Wärmeausdehnungskoeffizient selbst temperaturabhängig und wird deshalb für eine bestimmte Bezugstemperatur oder einen bestimmten Temperaturbereich angegeben. Es wird zwischen dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten (auch linearer Wärmeausdehnungskoeffizient) und dem thermischen Raumausdehnungskoeffizienten (auch räumlicher Ausdehnungskoeffizient oder Volumenausdehnungskoeffizient oder kubischer Ausdehnungskoeffizient) unterschieden. Für isotrope Festkörper gilt, dass sich die Längenänderung in allen drei Raumrichtungen gleich verhält. Für isotrope Festkörper kann das Dreifache des Längenausdehnungskoeffizienten verwendet werden, um die Volumenausdehnung zu berechnen. Für die FEP-Beschreibungen kann in erster Näherung diese vereinfachte „isotrope“ Beziehung angewendet werden, um die Volumenausdehnung zu beschreiben.

Die SI-Einheit des thermischen Ausdehnungskoeffizienten ist $1/K$.

Diffusionskoeffizient

Der Diffusionskoeffizient, auch Diffusionskonstante oder Diffusivität genannt, ist der Proportionalitätsfaktor in den Fick'schen Gesetzen zur Berechnung der thermisch bedingten zufälligen Bewegung eines Teilchens in einem Gas oder einer Lösung. Der Diffusionskoeffizient ist daher ein Maß für die Beweglichkeit der Teilchen. Zur Angabe des Diffusionskoeffizienten gehört immer die Angabe, welcher Stoff in welchem anderen diffundiert, sowie als wichtigste Einflussgröße die Temperatur.

SI-Einheit des Diffusionskoeffizienten ist m^2/s .

Die Diffusion in Feststoffen wird im FEP-Katalog nicht betrachtet.

Hydraulische EigenschaftenPermeabilität

Die Permeabilität ist eine Kenngröße für die Durchströmbarkeit eines porösen oder geklüfteten Mediums. Die Eigenschaft Permeabilität umschließt auch die teilweise verwendeten Kenngrößen hydraulische Leitfähigkeit und hydraulischer Widerstand inkl. der technischen Barrieren. Eine geringe Permeabilität ist gleichbedeutend mit einem hohen Strömungswiderstand. Die SI-Einheit der Permeabilität ist m^2 .

Porosität

Die Porosität ist das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu dem gesamten Volumen eines Festkörpers. Die effektive Porosität bezeichnet den Porenanteil, der miteinander verbunden ist und somit für Strömungs- und Transportprozesse die relevante Größe darstellt. Die Porosität schließt einerseits auch Resthohlräume innerhalb der Behälter und in der Umgebung techni-

scher Bestandteile ein (Firstspalte, Kontaktzonen) und andererseits auch offene Risse in Verschlussbauwerken und Diskontinuitäten in der geologischen Barriere. Die Eigenschaft Porosität umfasst in den CHRISTA-II FEP-Katalogenauch alle Eigenschaften, die mit der Porenraumstruktur zusammenhängen, wie z. B. die teilweise verwendeten Kenngrößen Tortuosität und Konstriktivität.

Die Porosität ist dimensionslos.

Kompressibilität

Die Kompressibilität bezeichnet in den CHRISTA-II FEP-Katalogenausschließlich eine Eigenschaft von Gasen und ist eine Kenngröße für die Abhängigkeit des Gasdrucks bei einer Veränderung des Volumens. Sie ist der Kehrwert des Kompressionsmoduls.

Die SI-Einheit der Kompressibilität ist $1/\text{Pa}$.

Fluiddruck

Der Fluiddruck bezeichnet den Druck von Lösungen und/oder Gasen in einem Volumen.

Die SI-Einheit des Fluiddrucks ist Pa.

Viskosität

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Der Kehrwert der Viskosität ist die Fluidität, ein Maß für die Fließfähigkeit eines Fluids. Je größer die Viskosität, desto dickflüssiger (weniger fließfähig) ist das Fluid; je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger (fließfähiger) ist es, kann also bei gleichen Bedingungen schneller fließen. Man unterscheidet zwischen der dynamischen und der kinematischen Viskosität. Die dynamische Viskosität und die kinematische Viskosität stehen über die Dichte in direktem Zusammenhang.

Die Einheit der Viskosität ist Pa s.

Mechanische Eigenschaften

Dichte

Die Dichte ist der Quotient aus der Masse eines festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffes und seinem Volumen.

Die SI-Einheit ist kg/m^3 .

Volumen

Das Volumen ist der Rauminhalt eines festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffes, der eine bestimmte Ausdehnung aufweist.

Die SI-Einheit ist m^3 .

Festigkeit

Die Festigkeit beschreibt das Widerstandsverhalten eines Festkörpers gegenüber Verformungen. Man kann nach Belastungsart und -richtung beispielsweise zwischen Zug-, Druck- und Scherfestigkeit unterscheiden. 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.

Die SI-Einheit der Festigkeit ist Pa.

Deformationsvermögen

Der Begriff Deformationsvermögen beschreibt das Verformungsverhalten von Festkörpern, das im Allgemeinen durch eine Änderung der Spannungen hervorgerufen wird. Die maximal erreichbare Verformung wird entweder beim Eintreten irreversibler Veränderungen der Materialeigenschaften (Schädigung, plastisches Fließen, Dilatanz) erreicht, was dem elastischen Verformungsvermögen entspricht, oder beim Materialversagen (Bruch), womit das „Gesamt“-Verformungsvermögen abgebildet ist. Die Deformation hängt von vielen Einflussgrößen ab, z. B. von

- der Größe und Art der mechanischen Belastung: eine Zugbelastung führt im Vergleich zu einer Scherbelastung nicht nur zu ganz anderen (meist viel geringeren) maximalen Deformationen, sondern auch zu einer anderen Art von Verformung (lineare Verformung im Gegensatz zu Scherverformung),
- den Materialeigenschaften, wie z. B. Zusammensetzung, Anisotropie, Homogenität,
- der Geschwindigkeit, mit der die mechanische Belastung aufgebracht wird. Während die elastische Verformbarkeit oft kaum von der Belastungsgeschwindigkeit abhängt, steigt die Gesamtverformbarkeit meist mit der Belastungsgeschwindigkeit und
- der Temperatur: Das Verformungsverhalten und damit auch die Verformbarkeit hängen bei allen Materialien mehr oder weniger stark von der Temperatur ab. Dabei kann auch das Fehlen oder Auftreten viskoser Verformungsanteile temperaturabhängig sein.

Für kriechfähige Materialien, also solche, die auch viskose Verformungsanteile zeigen (z. B. plastische Tone), ist die Angabe einer maximal erreichbaren Verformung nur eingeschränkt möglich bzw. sinnvoll. Bei Einhaltung einer vom Stützdruck abhängigen Obergrenze (Schädigungs-/Dilatanzgrenze) der aufgetragenen Scherspannung ist hier eine beliebig hohe Verformung erreichbar, ohne das Material zu schädigen – sofern man nur lange genug abwartet. Das Deformationsvermögen wird näherungsweise durch rheologische Materialmodelle und deren Kennwerte (wie z. B. Elastizitätsmodul, Schermodul, Querkontraktionszahl, Kohäsion, Winkel innerer Reibung, Fließgrenze, Dilatanzwinkel, Festigkeit, Viskosität) beschrieben.

Effektive Spannung

Das Prinzip der effektiven Spannungen geht zurück auf Terzaghi & Fröhlich (1936) und besagt, dass für die Festigkeit und die Formänderung eines Bodens oder Gesteins nur die um den Porenwasserdruck verminderten totalen Spannungen von Bedeutung sind. Die effektive Spannung σ' ist die gedachte mittlere Korn-zu-Korn-Spannung und berechnet sich aus der totalen Spannung σ vermindert um den Porenwasserdruck p_w :

$$\sigma' = \sigma - \alpha p_w.$$

Wobei α den Biot Koeffizienten darstellt, über den die Kompressibilität der Körner berücksichtigt wird.

Unter trockenen gasdruckfreien Bedingungen ($p_w = 0$) und nach Abschluss der Konsolidation oberhalb des Grundwasserspiegels entsprechen die effektiven Spannungen σ' den totalen Spannungen σ . Ggf. muss auch der Gasdruck in den Poren berücksichtigt werden, wofür verschiedene Ansätze existieren.

Die SI-Einheit der effektiven Spannung ist Pa.

Chemische/Mineralogische/Biologische Eigenschaften

Löslichkeit

Die Löslichkeit eines gasförmigen oder festen Stoffes gibt seine Menge (Masse oder Teilchenzahl) an, die sich maximal im Einheitsvolumen einer Flüssigkeit lösen (d. h. sich unter homogener Verteilung von Atomen, Ionen oder Molekülen vermischen) kann. Im Fall von gasförmigen Stoffen gibt sie die Menge an, die sich bei einem an der Gas-Flüssigkeit Grenzfläche herrschenden Gasdruck löst.

Die Löslichkeit wird in g/l (Massenkonzentration) oder mol/l (Stoffmengenkonzentration) angegeben.

Stoffliche Zusammensetzung

Die stoffliche Zusammensetzung gibt die Mengen (Massen oder Teilchenzahlen) an Atomen, Ionen bzw. Molekülen verschiedener Identitäten innerhalb eines gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffes an. Im Fall von Feststoffen gibt sie zudem die Menge (Massen) an verschiedenen Mineralen an.

Radioaktivität

Die Radioaktivität gibt die Anzahl der Kernzerfälle pro Zeiteinheit innerhalb eines gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffes an.

Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt

Die Oberflächenbeschaffenheit gibt neben dem Flächeninhalt (in m²) pro Einheitsmasse eines Feststoffes auch seine Oberflächenladung und Oberflächenrauheit sowie das Vorhandensein von Biofilmen oder anderer dünnen Schichten (z. B. Farbanstrich) an seiner Oberfläche an.

Die Eigenschaft beinhaltet außerdem die Gestalt von Oberflächen, wozu die Topographie der Geländeoberfläche aber z. B. auch das Oberflächenrelief eines Salzspiegels zählen.

Mikrobenpopulation

Die Mikrobenpopulation gibt die Anzahl von Mikroben in einem Einheitsvolumen oder einer Einheitsmasse eines gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffes an.

IV. FEP-Liste für das Modell „mKBS-3“

Es wurde im Abgleich mit der NEA IFEP-Liste und basierend auf den Erfahrungen aus den FEP-Katalogen für Salinar und Tongestein die nachfolgende FEP-Liste zusammengestellt.

Nr.	FEP-Name	NEA-Gruppe
Komponenten im Grubengebäude		
1	Abfallmatrix	2.1.2
2	Abfallinventar	2.1.4
3	Brennelement-Behälter	2.2.1
4	Behälter für Wiederaufarbeitungsabfälle	2.2.1
5	Behälter für schwach- und mittelradioaktive Abfälle	2.2.1
6	Buffer	3.1.2
7	Versatz	3.1.2
8	Bohrlochwiderlager	3.1.4
9	Schachtverschlüsse	3.1.3
10	Rampenverschlüsse	3.1.3
11	Kluftverschlüsse	3.1.2
12	Schachtausbau	3.1.5
13	Streckenausbau	3.1.5
14	Rampenausbau	3.1.5
15	Technische Einrichtungen	3.1.5
16	Auflockerungszone	3.1.6
17	Korrosionsprodukte aus Metallkorrosion	2.2.1, 2.2.2, 3.1
18	Korrosionsprodukte aus Betonkorrosion	3.1
19	Lösungen im Grubengebäude	3.1
20	Gase im Grubengebäude	3.1
21	Übertägige Erkundungsbohrungen	3.1.4, 3.1.6
22	Untertägige Erkundungsbohrungen	3.1.4, 3.1.6
Komponenten in der Geosphäre		
23	Wirtsgestein	4.1
24	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	4.1, 4.1.2
25	Lösungen im Wirtsgestein	4.1.5 (6,7,8,9)
26	Gase im Wirtsgestein	4.1.5 (7,8,9)
27	Deckgebirge	4.1, 5.1.1
28	Störungen und Klüfte im Deckgebirge	4.1, 4.1.2
29	Lösungen im Deckgebirge	4.1.6 (8,9), 5.1.4
30	Gase im Deckgebirge	4.1.5 (7,8,9)
31	Oberflächengewässer	5.1.5

Nr.	FEP-Name	NEA-Gruppe
Geologische Prozesse		
32	Vertikale Bewegungen der Lithosphäre	1.2.1, 4.2.3
33	Orogenese	1.2.2, 4.2.3
34	Isostatische Bewegungen der Lithosphäre	1.2.3, 1.3.5, 4.2.3
35	Grabenbildung	1.2.3, 4.2.3
36	Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten	1.2.5 (7)
37	Erdbeben	1.2.4, 4.2.3
38	Gesteinsmetamorphose	1.2.6
39	Diagenese	1.2.9
40	Erosion	1.2.8, 5.1.13
41	Sedimentation	1.2.8, 5.1.13
42	Klimatisch bedingter Wärmestrom	1.3.1 (2), 4.2.1
43	Terrestrischer Wärmestrom	4.2.1
44	Permafrost	1.3.4
45	Niederschlagseintrag	1.3.1 (2,7), 5.1.11
46	Transgression oder Regression	1.3.3, 5.1.7
47	Inland- oder Vorlandvereisung	1.3.5
48	Glaziale Rinnenbildung	1.3.5, 4.2.3, 5.1.13
49	Meteoriteneinschlag	1.5.1
Alterations Prozesse		
50	Korrosion der Brennstoffmatrix	2.3.4
51	Alteration der Glasmatrix	2.3.4
52	Korrosion von Baustoffen mit Zementphasen	3.2.4
53	Metallkorrosion	2.3.4, 3.3.4
54	Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme	2.3.4, 3.3.4
55	Metallversprödung durch Strahlung	2.3.6
56	Alteration von Bentonit	3.2.4
57	Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen	3.2.4, 4.2.4
58	Alteration von Organika	3.2.4, 4.2.4
59	Mikrobielle Prozesse	2.3.5, 3.2.5, 4.2.5
THM Prozesse		
60	Quellen und Schrumpfen von Bentonit	3.2.3
61	Quellen, Schwinden und Kriechen von Beton	3.2.3.1, 3.2.4
62	Konvergenz	3.2.3, 3.2.3.2
63	Endlagerinduzierter Wärmestrom	2.3.1, 3.2.1, 4.2.1
64	Thermische Expansion oder Kontraktion	2.3.1, 3.2.1, 4.2.1
65	Phasenübergänge	2.3.1, 3.2.1
66	Übertragung von Spannungen	2.3.3, 3.2.3, 4.2.3
67	Strömungsvorgänge in der Geosphäre	4.2.2
68	Strömungsvorgänge im Grubengebäude	2.3.2, 3.2.2
69	Migration von Asphalt	3.2.2, 4.2.2

Nr.	FEP-Name	NEA-Gruppe
70	Dispersion	3.3.1, 4.3.1
71	Diffusion	3.3.1 (2), 4.3.1
72	Lösen und Ausgasen	2.3.2, 3.2.2, 4.3.1
Chemische und radiologische Prozesse		
73	Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung	2.3.6, 3.2.6, 4.2.6
74	Radiolyse	2.3.6
75	Strahlungsinduzierte Aktivierung	2.3.6
76	Zündung von Gasgemischen	2.3.3, 3.2.3
77	Sorption und Desorption	2.5.1, 3.3.1, 4.3.1
78	Komplexbildung	2.5.1, 3.3.1, 4.3.1
79	Kolloidbildung und -filtration	2.5.1, 3.3.1, 4.3.1
80	Thermochemische Sulfatreduktion	3.2.1 (4), 4.2.1 (4)

V. Literaturverzeichnis

- Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A. & Wolf, J.W. (2012): Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), GRS-284, Anhänge A-D; Köln.
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): 22 S.; Bonn.
- EndlSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, 06.10.2020, Berlin.
- Lommerzheim, A., Bebiolka, A., Jahn, S., Jobmann, M., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A. & Stark, L. (2015): Szenarienentwicklung für das Endlagerstandortmodell NORD - Methodik und Anwendung. – DBE Technology GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Techn. Bericht, TEC-17-2014-AP, Projekt AnSichT - Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein; Hannover/Berlin.
- Lommerzheim, A., Jobmann, M., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Rübel, A. & Stark, L. (2018): Safety concept, FEP catalogue and scenario development as fundamentals of a long-term safety demonstration for HLW repositories in German clay formations. – In: Norris, S., Neeft, E.A.C. & Van geet, M. (eds.): Multiple Roles of Clays in Radioactive Waste Confinement. Geol. Soc. London, Spec. Pub. 282 (6), London.
- NEA (2019): International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), NEA/RWM/R(2019)1, Version 3.0: 165 pp.; Paris.
- 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. Deutscher Bundestag.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K. & Rübel, A. (2016): FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD - Konzept und Aufbau. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Technischer Bericht, TEC-16-2016-TB, Projekt ANSICHT – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, FKZ: 02E11061A/B; Peine.
- Terzaghi, K., & Fröhlich, O. (1936): Theorie der Setzung von Tonschichten. Eine Einführung in die analytische Tonmechanik. – Franz Deuticke, Wien.

Komponenten FEP

1 Abfallmatrix

NEA-Gruppe: 2.1.2 *Waste form characteristics and properties*

1.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Abfallmatrix wird das Material bezeichnet, in dem die Radionuklide gebunden sind, die in den Behältern in das Endlager eingebracht wurden. Das FEP beschreibt die möglichen Zusammensetzungen und die daraus resultierenden chemischen, mechanischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften der Abfallmatrix.

1.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Radioaktive Abfälle können auf unterschiedliche Weise in einen Behälter eingebracht werden:

- homogen verteilt in einem Fixierungsmaterial (z. B. Glas),
- als kompaktierte, kontaminierte Materialien (vor allem Metallteile),
- oder als Brennelemente direkt eingelagert (komplett oder zerlegt).

Der hier verwendete Begriff "Abfallmatrix" geht über international verwendete Definitionen hinaus (z. B. IAEA 2003), da hier nicht nur die Stoffe, in denen die Radionuklide fixiert werden, unter dem Begriff Abfallmatrix subsumiert werden, sondern auch der Brennstoff der direkt endgelagerten abgebrannten Brennelemente.

Endlagerbehälter, die aufgrund der strahlungsinduzierten Aktivierung radioaktiv geworden sind, werden hier nicht als Abfallmatrix behandelt.

1.3 Komponentenbeschreibung

Das im Endlagerkonzept zu Grunde gelegte Abfallmengengerüst entspricht den Abfallmengen der Brennelemente aus Leistungs- und Forschungsreaktoren sowie aus der Wiederaufarbeitung (Bertrams et al. 2017, Jobmann & Lommerzheim 2015). Folgende Abfallmatrices sind daher zu betrachten:

1. Direkt endgelagerte Brennstäbe werden nicht mit einem Zusatzstoff fixiert. Die Abfallmatrices sind der Brennstoff und die Metallteile der Brennelemente. Die zu betrachtenden Brennstoffe sind UO_2 und MOX für die Brennelemente aus SWR, DWR und WWER-DWR.
2. Hochradioaktive Abfälle aus dem Wiederaufarbeitungsprozess werden in einem Borosilikat-Glas fixiert und in Kokillen (CSD-V) gefüllt. Die Abfallmatrix ist hier der gesamte Glaskörper. Dekontaminations- und Spülwässer aus der Wiederaufarbeitung werden ebenfalls verglast und in Kokillen gleicher Abmessung eingebracht (CSD-B).

3. Brennelementhülsen, Strukturteile und sonstige technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (z. B. Glas und Teile des Schmelzers und anderer Einbauten aus der Vergasungszelle). Diese werden kompaktiert und ohne zusätzliches Fixierungsmittel in Kokillen (CSD-C) eingelagert. CSD-C-Kokillen können maximal 10 g Organika pro CSD-C enthalten (RSK 2005), die mikrobiell zersetzt werden können.
4. Metallische Strukturteile, die bei der Zerlegung der seit 2005 nicht wiederaufgearbeiteten Brennelemente anfallen, müssen zerlegt und wie die CSD-C kompaktiert und ohne zusätzliches Fixierungsmittel eingelagert werden.
5. Versuchs-, Prototyp- und Forschungsreaktoren: Die zu betrachtenden Brennstoffe sind UO_2 für die Brennelemente aus einigen Forschungsreaktoren bzw. Prototypreaktoren (z. B. BER II, FRMZ, KNK II), kugelförmige Brennstoffpartikel aus UO_2 und ThO_2 in HTR- (bzw. AVR-) Graphitkugeln und U_3Si_2 für die Brennelemente aus dem FRM-II.

1.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität		Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

1.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

1.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Abfallmatrix der eingelagerten Abfälle stellt eine Randbedingung des Endlagersystems dar. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

1.7 Ungewissheiten

Keine.

1.8 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- IAEA (2003): Radioactive Waste Management Glossary. – IAEA; Wien.
- Jobmann, M. & Lommerzheim, A. (2015): FuE-Projekt AnSichT: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Anhang B, Inventarbericht. – DBE Technology GmbH, TEC-08-2014-Z: FKZ 02E11061B; Peine.
- RSK (2005): Spezifikation der Fa. Areva/Cogema zu hochdruckkompaktierten radioaktiven Abfällen (CSD-C) aus der Wiederaufarbeitung von deutschen LWR-Brennelementen. – RSK-Stellungnahme, 386. Sitzung der Reaktorsicherheitskommission.

2 Abfallinventar

NEA-Gruppe: 2.1.4 *Contaminant inventory*

2.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Abfallinventar umfasst die Aktivitäten aller Radionuklide, die mit den Abfällen in das Endlager eingebracht werden.

2.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die eingelagerten Radionuklide verbleiben weitgehend am Einlagerungsort und verringern sich aufgrund des radioaktiven Zerfalls. Kommt es zum Ausfall eines Endlagerbehälters, können die darin bereits mobilisierten Radionuklide freigesetzt und gegebenenfalls weitere Radionuklide mobilisiert werden. Das Verhalten der gelösten und gasförmigen mobilisierten Radionuklide wird in den FEP „Strömungsvorgänge im Grubengebäude“, „Strömungsvorgänge in der Geosphäre“, „Dispersion“ und „Diffusion“ beschrieben.

2.3 Komponentenbeschreibung

Zu den radioaktiven Abfällen, die an einem Endlagerstandort zu berücksichtigen sind, gehören:

- bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren (direkte Endlagerung),
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe,
- bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren sowie
- verpresste Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung.

Detaillierte Angaben zu den jeweiligen Abfallströmen werden in Peiffer et al. (2011) und Jobmann & Lommerzheim (2015) dargestellt.

Die in Peiffer et al. (2011) zusammengestellten Daten zum Radionuklidinventar zeigen, dass die Aktivität des Inventars nachhaltig durch die endgelagerten bestrahlten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren sowie durch die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestimmt wird. Unter Berücksichtigung der Altersstruktur der Brennelemente sowie der Wiederaufarbeitungsabfälle ergibt sich für das Jahr 2075 eine Gesamtaktivität im Endlager von ca. $6,2 \cdot 10^{19}$ Bq (Brennelemente: ca. $5,3 \cdot 10^{19}$ Bq, Wiederaufarbeitungsabfälle: ca. $9,0 \cdot 10^{18}$ Bq) ergeben.

Zur Gesamtaktivität liefern die endzulagernden bestrahlten Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren einen Beitrag in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{16}$ Bq. Gegenüber der Gesamtaktivität der bestrahlten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren und den verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung ist der Beitrag der bestrahlten Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren nachrangig.

Unter Endlagerbedingungen sind bei den gasförmigen Radionukliden unter Berücksichtigung der Halbwertszeiten vor allem ^{14}C und ^{129}I zu betrachten. Tritium kann durch Korrosionsprozesse neu gebildet werden, ist aber aufgrund seiner sehr kurzen Halbwertszeit für Langzeitbetrachtungen nicht relevant.

Bei ^{129}I ist bei den Bedingungen in einem Endlager in Kristallingestein hauptsächlich von seiner anionischen Form als Iodit auszugehen, so dass ^{129}I hauptsächlich in der wässrigen Phase transportiert wird und nur in äußerst geringem Maße in die Gasphase übergehen kann.

2.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
	Wärmeleitfähigkeit		Dichte
	Spezifische Wärmekapazität		Volumen
	Temperatur		Festigkeit
	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität	x	Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität		Mikrobenpopulation

2.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

2.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Das Abfallinventar der eingelagerten Abfälle stellt eine Randbedingung des Endlagersystems dar. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

2.7 Ungewissheiten

Keine.

2.8 Literaturquellen

Jobmann, M. & Lommerzheim, A. (2015): FuE-Projekt AnSichT: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Anhang B, Inventarbericht. – DBE Technology GmbH, TEC-08-2014-Z: FKZ 02E11061B; Peine.

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A. & Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst (AP 3). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – GRS-278, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln.

3 Brennelement-Behälter

NEA-Gruppe: 2.2.1 *Container characteristics and properties*

3.1 Definition/Kurzbeschreibung

Es werden die Materialien und Eigenschaften der Endlagerbehälter beschrieben, die den Einschluss von ausgedienten Brennelementen aus Leistungsreaktoren während der Betriebs- und Nachverschlussphase des Endlagers gewährleisten.

3.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Brennelement-Behälter enthalten volatile Radionuklide, die bei einer Beschädigung des Behälters während der Betriebs- und Nachverschlussphase freigesetzt werden. Daher besteht gemäß Sicherheitsanforderungen (EndlSiAnfV 2020) an die Brennelement-Behälter die Anforderung, dass die Freisetzung radioaktiver Aerosole für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers zu vermeiden ist. Außerdem muss der Brennelement-Behälter während der Betriebsphase rückholbar und über einen Zeitraum von 500 Jahren im Zuge einer Bergung handhabbar sein. Dabei ist die wahrscheinliche Standortentwicklung zu unterstellen.

Für die direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente in einem Endlager in Kristallingestein wurden verschiedene Behälterkonzepte entwickelt.

Das am weitesten entwickelte Behälterkonzept ist der skandinavische Kupferbehälter für das KBS-3-Endlagerkonzept (Carlsson & Muurinen 2007, Posiva & SKB 2017, Raiko 2013, SKB 2010a, b). Es handelt sich um einen zweischaligen Behälter für die Endlagerung in kurzen Vertikalbohrlöchern. Der Innenbehälter besteht aus Stabilitätsgründen aus Kugelgraphitguss und dessen Außenbehälter als Korrosionsschutz aus 5 cm starkem Kupfer. Der Deckel des Innenbehälters wird mit dem Behälterkörper verschraubt, der Deckel des Außenbehälters verschweißt. Verschiedene Kanister-Varianten mit Längen von 3,4 bis 5,3 m sind für die verschiedenen Brennelement-Typen vorgesehen. Eine Funktionszeit für diese Behälter von über 100.000 Jahren ist für das durch den Bentonit-Buffer gepufferte Milieu nachgewiesen, eine längere Funktionsdauer ist wahrscheinlich (King et al. 2001). Dieses Behälterkonzept ist ebenso für die Endlagerung in Kristallingesteinen in Kanada (Johnson et al. 1996, Noronha 2016, NWMO 2012, 2017), Frankreich (ANDRA 2005) und der Schweiz (Johnson & King 2003, Patel et al. 2012) entwickelt. In Kanada wurde alternativ auch ein Außenbehälter aus Titanium analysiert.

Für eine Funktionsdauer von mindestens 10.000 Jahren wurde für die Streckenlagerung von ausgedienten Brennelementen in Kristallingesteinen ein einschaliges Behälterkonzept aus Kugelgraphitguss in der Schweiz (Nagra 1994, Johnson & King 2003, Patel et al. 2012) und in Frankreich (ANDRA 2005) entwickelt. Verschiedene Kanister-Varianten mit Längen von 4,6 bis 5,0 m sind für die unterschiedlichen Brennelement-Typen vorgesehen. Bezüglich der Herstellung ist es vorgesehen, den Behälterkörper, den Boden und den Deckel separat herzustellen und dann zu verschweißen. Die Behälter gewährleisten die mechanische Stabilität und – durch eine Wandstärke von 14–15 cm – trotz Korrosion die Behälterintegrität für die vorgesehene Funktionsdauer.

3.3 Komponentenbeschreibung

Das deutsche Behälterkonzept für eine Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in einem modifizierten KBS3-Konzept in einem Kristallinkomplex basiert auf der rückholbaren BSK-Edelstahlkokille (Bollingerfehr et al. 2012), die durch eine 5 cm starke Kupferaußenhülle vor Korrosion geschützt wird (Bertrams et al. 2017, King et al. 2001). Die Auslegung der Kokille berücksichtigt gesetzliche Anforderungen sowie thermische, mechanische (incl. Erdbeben), hydraulische und chemische Einwirkungen die während der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems auftreten können. Die Funktionsdauer des Behälters soll 1 Million Jahre betragen.

Die Kokille hat eine leicht konische Form (Länge: 5,070 mm, Durchmesser oben: 530 mm, Durchmesser unten: 480 mm) um ihre Rückholung aus dem Buffer zu erleichtern. Die Wandstärke des Stahlbehälters beträgt 44,5 mm am Top und 19,5 mm an der Basis. Aus Gründen des betrieblichen Strahlenschutzes weist die Kokille an der Deckelinnenseite eine Platte aus Polyethylen oder Graphit zur Abschirmung auf. Der innere Deckel ist mit dem Behälterkörper verschraubt, der äußere ist verschweißt. Der Deckel weist zur Handhabung einen Ringwulst mit Furche auf, in die ein Greifer fassen kann. Das Maximalgewicht der Kokille beträgt 5,7 Mg (incl. 0,4 Mg Kupfer).

Gemäß dem im Forschungsprojekt KONEKD (Bertrams et al. 2017) beschriebenen Einlagekonzept wird die BSK-Cu Kokille mit den Brennstäben von 1,8 DWR Brennelementen, 5,4 SWR Brennelementen und 15,25 WWER-DWR Brennelementen beladen werden. Die Kokillen für Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktor-Brennelemente sind weitgehend baugleich mit den Behältern für die Leistungsreaktorbrennelemente. Unterschiede ergeben sich bei den Innenstrukturen (Tragkörbe), die an die abweichende Form der Forschungs-, Prototyp- und Versuchsreaktor-Brennelemente angepasst werden.

Das Risiko, dass ein Endlagerbehälter Produktionsfehler aufweist, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können, wird grundsätzlich durch umfangreiche Prüfmaßnahmen bei der Behälterfertigung im Zuge der Qualitätssicherung minimiert. Angesichts der großen Anzahl einzulagernder Gebinde (10.988 mit Leistungsreaktor-Brennelementen und 290 Kokillen mit Forschungsreaktor-Brennelementen) ist gleichwohl für die Sicherheitsbewertung zu prüfen, ob Kontroll- und Fertigungsdefizite soweit ausgeschlossen werden können, dass möglichst kein Behälter während der Nachverschlussphase frühzeitig ausfällt.

Die SKB in Schweden hat in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Deutschland untersucht, welche Unsicherheiten bei der Prüfung der schwächsten Stellen des Kupferbehälters, also der Schweißnähte, verbleiben und welche Konsequenzen daraus zu ziehen sind. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass Fertigungsfehler in Form von kleinen Rissen mit einer Tiefe von 4 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% erkannt werden und Risse mit einer Tiefe von 10 mm mit nahezu 100% (SKB 2010a). Für die Einlagerungsoption des „modifizierten KBS3-Konzeptes“ lässt sich daraus folgendes ableiten:

Im Falle des „modifizierten KBS3-Konzeptes“ wird der Behälter durch eine 50 mm starke Kupferhülle umschlossen. Für diesen Behältertyp kann davon ausgegangen werden, dass selbst im Falle eines Defektes mit einer Tiefe von bis zu 10 mm immer noch etwas 40 mm der Kupferhülle als Korrosionsschutz verbleiben. Das im Bewertungskonzept definierte Kriterium zur Langzeitbeständigkeit kann damit erfüllt werden. Damit ist ein Ausfall aufgrund von Fertigungsfehlern während des Bewertungszeitraumes nicht anzunehmen.

Andere Einflussfaktoren können aber, wenn sie in einer auslegungsüberschreitenden Intensität auftreten, zu einem Versagen der BSK-Cu während der vorgesehenen Funktionsdauer führen:

- ein hoher Fluiddruck: z. B. durch Gasbildung infolge Metallkorrosion,
- eine starke Metallkorrosion, z. B. Lochfraßkorrosion,
- eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme (Rissbildung) und
- hohe, anisotrope Spannungen (Rissbildung).

3.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

3.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

3.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Abfallgebinde stellen eine Randbedingung des Endlagersystems dar. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

3.7 Ungewissheiten

- Korrosionsraten von Kupfer unter verschiedenen, für Deutschland typischen, standortspezifischen hydrochemischen Bedingungen sind noch zu analysieren.

3.8 Literaturquellen

ANDRA (2005): Safety analysis of a geological repository. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Dossier 2005 Granite: 221 pp.; Châtenay-Malabry Cedex.

Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches

- Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-
gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516,
TEC-20-2017-AB; Peine.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thom-
auske, B., Bracke, G. & Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. – Ge-
sellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 6,
Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), GRS-281; Köln.
- Carlsson, T. & Muurinen, A. (2007): Copper Corrosion in Bentonite: Studying of Parameters
(pH, EH/O₂) of Importance for Corrosion. – Work.Rep.2007-62, Eurajoki.
- EndlSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Ent-
sorgung hochradioaktiver Abfälle, 06.10.2020, Berlin.
- Johnson, L.H., Leneveu, D.M., King, F., Shoesmith, D.W., Kolar, M., Oscarson, D.W., Sunder,
S., Onofrei, C. & Crosthwaite, J.L. (1996): The disposal of Canada's nuclear fuel waste:
a study of postclosure safety of in-room emplacement of used CANDU fuel in copper
canisters in permeable plutonic rock. Volume 2: Vault model. Atomic Energy of Canada
Limited Report AECL-11494-2, COG-95-552-2.
- Johnson, L.H. & King, F. (2003): Canister Options for the Disposal of Spent Fuel. – Nagra,
Tech. Rep. 02-11; Wettingen.
- King, F., Ahonen, I., Taxen, C., Vuorinen, U. & Werme, L. (2001). Copper corrosion under
expected conditions in a deep geologic repository. SKB Technical Report TR-01-23.
- Nagra (1994): Kristallin-I. Safety Assessment Report. – Nagra, Tech.Rep. 93-22, Wettingen.
- Noronha, J. (2016): Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sed-
imentary Rock Environment. – Nuclear Waste Management Organization Report; To-
ronto, Canada.
- NWMO (2012): Adaptive Phased Management: Used Fuel Repository Conceptual Design and
Postclosure Safety Assessment in Crystalline Rock. – Pre-Project Report NWMO TR-
2012-16, Nuclear Waste Management; Toronto, Canada.
- NWMO (2017): Used Fuel Repository Conceptual Design and Postclosure Safety Assessment
in Crystalline Rock. – Report NWMO TR-2017-02, Nuclear Waste Management; To-
ronto, Canada.
- Patel, R., Punshon, C., Nicholas, J., Bastid, P., Zhou, R., Schneider, C., Bagshaw, N., Howse,
D., Hutchinson, E., Asano, R. & King, F. (2012): Canister Design – Concepts for Disposal
of Spent fuel and High Level Waste. – Nagra, Tech.Rep. 12-06; Wettingen.
- Posiva & SKB (2017): Safety functions, performance targets and technical design require-
ments for a KBS-3V repository. – Posiva SKB, Report 2017-01; Stockholm, Sweden.
- Raiko, H. (2013): Canister design 2012. – Posiva Rep. 2012-13; Eurajoki.
- SKB (2010a): Design, production and initial state of the canister. – Svensk Kärnbränslehan-
tering AB (SKB), TR-10-14; Stockholm, Sweden.
- SKB (2010b): Corrosion calculations report for the safety assessment SR site. – Svensk Kärn-
bränslehantering AB (SKB), TR-10-66; Stockholm, Sweden.

4 Behälter für hochradioaktive Wiederaufarbeitungsabfälle

NEA-Gruppe: 2.2.1 *Container characteristics and properties*

4.1 Definition/Kurzbeschreibung

Es werden die Materialien und Eigenschaften der Endlagerbehälter beschrieben, die den Einschluss der Kokillen mit verglasten, hochradioaktiven Wiederaufarbeitungsabfällen aus La Hague, Sellafield und Karlsruhe (Sammelbezeichnung: HAW-Kokillen) während der Betriebs- und Nachverschlussphase des Endlagers gewährleisten.

4.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Im Unterschied zu den Brennelement-Behältern enthalten die Behälter mit verglasten hochradioaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V) keine volatilen Radionuklide. Daher trifft die entsprechende Anforderung bezüglich der Rückhaltung volatiler radioaktiver Aerosole gemäß EndlSiAnfV (2020) auf diese Behälter nicht zu. Die Behälter müssen aber während der Betriebsphase rückholbar eingelagert werden und während der ersten 500 Jahre der Nachverschlussphase, bei Annahme einer wahrscheinlichen Standortentwicklung, handhabbar sein (Bergungsoption).

Für die Endlagerung von Wiederaufarbeitungsabfällen in HAW-Kokillen bzw. Abfällen aus der Brennelement-Konditionierung in einem Endlager in Kristallingestein wurden verschiedene Behälterkonzepte für die Bohrloch- und Streckenlagerung entwickelt:

Im französischen Konzept werden die einzelnen HAW-Kokillen jeweils in Overpacks aus nicht oder schwach legiertem Stahl (16MnD5, Typ 235, geringer C-Gehalt) eingeschlossen, die in kurzen Vertikalbohrlöchern eingelagert werden (ANDRA 2005). Der Overpack hat eine Länge von 1,61 m, einen Durchmesser von 55 cm sowie Wandstärken von 55 mm am Behälterkörper, 83 mm am Boden und 180 mm am Deckel. Der Behälter ist gegen Drucke von bis zu 10 MPa ausgelegt und soll eine Funktionsdauer von einigen 1.000 Jahren haben.

Das Schweizer Konzept sieht eine Endlagerung von jeweils zwei HAW-Kokillen in einem Overpack aus Kugelgrafitguss (EN-GJS-400-15U) vor, die in Einlagerungsstrecken abgelegt werden (Nagra 1994). Die Länge der Behälter beträgt 3,23 m, der Durchmesser 72 cm und die Wandstärken 140 mm am Behälterkörper, 170 mm am Deckel und 150 mm am Boden. Das Maximalgewicht beträgt 7,4 Mg. Die Funktionsdauer soll mehr als 10.000 Jahre umfassen.

Bei den deutschen Endlagerkonzepten für Salinargesteine ist eine Endlagerung der Wiederaufarbeitungsabfälle in POLLUX® und/oder CASTOR®-Behältern bzw. – für die Endlagerung in Bohrlochern – in Bohrlochkokillen (Triple-Packs) vorgesehen (Bollingerfehr et al. 2012). Es handelt sich um Gussstahl- (POLLUX®/CASTOR®) bzw. Edelstahlbehälter (Bohrlochkokillen).

4.3 Komponentenbeschreibung

Analog zum skandinavischen Endlagerkonzept sieht das deutsche „modifizierte KBS-3“ Konzept eine Endlagerung in kurzen vertikalen Einlagerungsbohrlöchern vor. Daher entspricht das Behälterkonzept weitgehend dem Behälter für die ausgedienten Brennelemente. Es handelt sich um zweiseitige Behälter mit einer inneren Edelstahlkokille und einer 50 mm starken Kupferaußenhülle (Bertrams et al. 2017). Die Auslegung der Kokille berücksichtigt gesetzliche Anforderungen sowie thermische, mechanische (incl. Erdbeben), hydraulische und chemische

Einwirkungen, die während der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems auftreten können. Die Funktionsdauer des Behälters soll 1 Million Jahre betragen.

Die Kokille hat eine leicht konische Form und entspricht in ihren Abmessungen der Kokille für die ausgedienten Brennelemente (Länge: 5,08 m, Durchmesser oben: 54 cm, Durchmesser unten: 49 cm). Die Wandstärke des Stahlbehälters beträgt 44,5 mm am Top und 19,5 mm an der Basis. Aus Gründen des betrieblichen Strahlenschutzes weist die Kokille an der Deckelinnenseite eine Platte aus Polyethylen oder Graphit zur Abschirmung auf. Der innere Deckel ist mit dem Behälterkörper verschraubt, der äußere Deckel ist verschweißt. Da die Wiederaufarbeitungs- und Konditionierungsabfälle keine volatilen Radionuklide enthalten, ist bei diesen Behältern keine Gasdichtheit erforderlich. Der Deckel weist zur Handhabung einen Ringwulst mit Furche auf, in die ein Greifer fassen kann. Das Maximalgewicht der Kokille beträgt 9,8 Mg (incl. 4,5 Mg Kupfer).

Die vorgesehene Kokille unterscheidet sich von den Brennstabkokillen vor allem durch die Innenstrukturen (Tragkörbe). Zur Einhaltung des 100 °C-Kriteriums wird im Forschungsprojekt KONEKD (Bertrams et al. 2017) die Beladung auf zwei HAW-Kokillen beschränkt. Von den CSD-B und CSD-C Kokillen kann der Behälter jeweils drei Kokillen aufnehmen („Triple-Pack“).

Das Risiko, dass ein Endlagerbehälter Produktionsfehler aufweist, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können, wird grundsätzlich durch umfangreiche Prüfmaßnahmen bei der Behälterfertigung im Zuge der Qualitätssicherung minimiert. Angesichts der großen Anzahl einzulagernder Gebinde (1845 BSK-RCu mit HAW-Kokillen) ist gleichwohl für die Sicherheitsbewertung zu prüfen, ob Kontroll- und Fertigungsdefizite soweit ausgeschlossen werden können, dass möglichst kein Behälter während der Nachverschlussphase frühzeitig ausfällt.

Die SKB in Schweden hat in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Deutschland untersucht, welche Unsicherheiten bei der Prüfung der schwächsten Stellen des Kupferbehälters, also der Schweißnähte, verbleiben und welche Konsequenzen daraus zu ziehen sind. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass Fertigungsfehler in Form von kleinen Rissen mit einer Tiefe von 4 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% erkannt werden und Risse mit einer Tiefe von 10 mm mit nahezu 100% (SKB 2010).

Da der Behälter im „modifizierten KBS3-Konzept“ durch eine 50 mm starke Kupferhülle umschlossen wird, kann davon ausgegangen werden, dass selbst im Falle eines Defektes mit einer Tiefe von bis zu 10 mm immer noch etwas 40 mm der Kupferhülle als Korrosionsschutz verbleiben. Das für die Sicherheitsbewertung definierte Kriterium zur Langzeitbeständigkeit kann damit erfüllt werden. Damit ist ein Ausfall aufgrund von Fertigungsfehlern während des Bewertungszeitraumes nicht anzunehmen.

Andere Einflussfaktoren können aber, wenn sie in einer auslegungsüberschreitenden Intensität auftreten, zu einem Versagen der BSK-Cu während der vorgesehenen Funktionsdauer führen:

- ein hoher Fluiddruck: z. B. durch Gasbildung infolge Metallkorrosion,
- eine starke Kupfer- und Stahlkorrosion, z. B. Lochfraßkorrosion,
- eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme (Rissbildung) und
- hohe, anisotrope Spannungen (Rissbildung).

4.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

4.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

4.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die eingelagerten Endlagergebäude stellen eine Randbedingung des Endlagersystems dar. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

4.7 Ungewissheiten

- Das Behälterdesign ist an standortspezifische Rahmenbedingungen noch anzupassen.
- Für die neu zu entwickelnden Behälter sind Fertigungsprozesse und Prüfverfahren festzulegen. Auf dieser Grundlage müssen Fertigungs- und Prüffehlerquoten ermittelt werden.

4.8 Literaturquellen

ANDRA (2005): Safety analysis of a geological repository. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), Dossier 2005 Granite, Tome: 221 pp.; Châtenay-Malabry Cedex.

Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallinegestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G. & Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), GRS-281; Köln.

- EndlSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, 06.10.2020, Berlin.
- Nagra (1994): Kristallin-I. Safety Assessment Report. – Nagra, Tech.Rep. 93-22, Wettingen.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the canister. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-14; Stockholm, Sweden.

5 Behälter für schwach- und mittelradioaktive Abfälle

NEA-Gruppe: 2.2.1 *Container characteristics and properties*

5.1 Definition/Kurzbeschreibung

Es werden die Materialien und Eigenschaften der Endlagerbehälter beschrieben, die den weitgehenden Einschluss für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (aus La Hague, Sellafield und Karlsruhe) mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sowie aus der Brennelementkonditionierung während der Betriebs- und Nachverschlussphase des Endlagers gewährleisten.

5.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Für Behälter, die schwach- und mittelradioaktive Abfälle enthalten, bestehen gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU weder Anforderungen bezüglich der Rückhaltung volatiler Radionuklide noch bezüglich Rückholbarkeit oder Bergbarkeit (EndlSiAnfV 2020). Die Endlagerung der langlebigen, schwach und mittelradioaktiven Abfälle (LL-LILW) erfolgt in den meisten internationalen Endlagerkonzepten in kubischen Betoncontainern, in die die Primärbehälter (Kokillen oder Stahlfässer) in vorgefertigten Betonhalterungen eingestellt und/oder mit Beton vergossen werden. Die Betoncontainer werden in Einlagerungskammern gestapelt.

Das französische Behälterkonzept für die Endlagerung von LL-LILW ist bereits bis zur Fertigung von Prototypen fortgeschritten (ANDRA 2005). Es wird zwischen den Standard-Containern sowie Containern mit erhöhten Anforderungen an den Radionuklideinschluss (hoher Anteil langlebiger Radionuklide) unterschieden. Die Behälter bestehen aus HPC Faserbeton mit Druckfestigkeiten von 60–75 MPa (Standard-Behälter, Anteil an Edelstahlfasern: 25–30 kg/m³) bis 90 MPa (Behälter mit erhöhten Anforderungen, Anteil an Edelstahlfasern: 55–90 kg/m³). Als Zementmatrix werden zwei Portlandzementtypen mit unterschiedlichen Silikat- und Kalikanteilen betrachtet: CEM I und CEM V. Die Wandstärken der Behälter betragen 110 bzw. 150 mm. Der Standard-Container wird mit einem Betondeckel verschlossen, während die Behälter mit erhöhten Anforderungen einen konischen Verschluss haben, der anschließend noch mit Beton vergossen wird.

Die Betonbehälter des skandinavischen Konzeptes unterscheiden sich vor allem durch das abweichende Behältermaterial: So ist ein Degerhamn Standard Portland Zement (DSPZ) vorgesehen, der für die Zementherstellung mit Quarzsand vermischt wird (SKB 1999). Eine Bewehrung ist nicht vorgesehen.

Das Schweizer Behälterkonzept ähnelt dem französischen. Das Material der kubischen Betonbehälter besteht aus Faserbeton, wobei die Rezeptur der Zementmatrix entsprechend den Standortverhältnissen festgelegt werden soll (Nagra 2002).

Für schwach- und mittelradioaktive Abfälle wurde in Deutschland – für verschiedene Wirtsgesteine – ein breites Spektrum an Behältertypen für die Endlager Morsleben und Konrad entwickelt. Dabei handelt es sich um Stahl- oder Betonbehälter, die bei mittelradioaktiven Abfällen auch mit Bleiabschirmungen versehen sein können (Brennecke 1995, Bollingerfehr et al. 2012)

5.3 Komponentenbeschreibung

Im modifizierten KBS3-Konzept ist es z. Z. vorgesehen, dass die kompaktierten Strukturteile aus der Brennelement-Konditionierung in BSK-RCu endgelagert werden (Bertrams et al.

2017). Es handelt sich um zweischalige Behälter mit einer inneren Edelstahlkokille und einer 50 mm starken Kupferaußenhülle (Bertrams et al. 2017). Die Auslegung der Kokille berücksichtigt gesetzliche Anforderungen sowie thermische, mechanische (incl. Erdbeben), hydraulische und chemische Einwirkungen, die während der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems auftreten können. Die Funktionsdauer des Behälters soll 1 Million Jahre betragen.

Die Kokille hat eine leicht konische Form und entspricht in ihren Abmessungen der Kokille für die ausgedienten Brennelemente (Länge: 5,08 m, Durchmesser oben: 54 cm, Durchmesser unten: 49 cm). Die Wandstärke des Stahlbehälters beträgt 44,5 mm am Top und 19,5 mm an der Basis. Aus Gründen des betrieblichen Strahlenschutzes weist die Kokille an der Deckelin-nenseite eine Platte aus Polyethylen oder Graphit zur Abschirmung auf. Der innere Deckel ist mit dem Behälterkörper verschraubt, der äußere Deckel ist verschweißt. Da die Wiederaufarbeitungs- und Konditionierungsabfälle keine volatilen Radionuklide enthalten, ist bei diesen Behältern keine Gasdichtheit erforderlich. Der Deckel weist zur Handhabung einen Ringwulst mit Furche auf, in die ein Greifer fassen kann. Das Maximalgewicht der Kokille beträgt 9,8 Mg (incl. 4,5 Mg Kupfer).

Die vorgesehene Kokille unterscheidet sich von den Brennstab-Kokillen vor allem durch die Innenstrukturen (Tragkörbe). Der Behälter kann jeweils drei CSD-B oder CSD-C Kokillen aufnehmen („Triple-Pack“). Weiterhin kann die Kokille mit kompaktierten Strukturteilen aus der Brennelement-Konditionierung beladen werden. Dann sind keine Innenstrukturen (Tragkörbe) erforderlich.

Das Risiko, dass ein Endlagerbehälter Produktionsfehler aufweist, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können, wird grundsätzlich durch umfangreiche Prüfmaßnahmen bei der Behälterfertigung im Zuge der Qualitätssicherung minimiert. Angesichts der großen Anzahl einzulagernder Gebinde (103 Triple Packs mit CSD-B, 1369 Triple Packs mit CSD-C und 874 BSK-RCu mit Strukturteilen) ist gleichwohl für die Sicherheitsbewertung zu prüfen, ob Kontroll- und Fertigungsdefizite soweit ausgeschlossen werden können, dass möglichst kein Behälter während der Nachverschlussphase frühzeitig ausfällt.

Die SKB in Schweden hat in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Deutschland untersucht, welche Unsicherheiten bei der Prüfung der schwächsten Stellen des Kupferbehälters, also der Schweißnähte, verbleiben und welche Konsequenzen daraus zu ziehen sind. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass Fertigungsfehler in Form von kleinen Rissen mit einer Tiefe von 4 mm mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% erkannt werden und Risse mit einer Tiefe von 10 mm mit nahezu 100% (SKB 2010).

Da der Behälter im „modifizierten KBS3-Konzept“ durch eine 50 mm starke Kupferhülle umschlossen wird, kann davon ausgegangen werden, dass selbst im Falle eines Defektes mit einer Tiefe von bis zu 10 mm immer noch etwas 40 mm der Kupferhülle als Korrosionsschutz verbleiben. Das für die Sicherheitsbewertung definierte Kriterium zur Langzeitbeständigkeit kann damit erfüllt werden. Damit ist ein Ausfall aufgrund von Fertigungsfehlern während des Bewertungszeitraumes nicht anzunehmen.

Andere Einflussfaktoren können aber, wenn sie in einer auslegungsüberschreitenden Intensität auftreten, zu einem Versagen der BSK-RCu während der vorgesehenen Funktionsdauer führen:

- ein hoher Fluiddruck: z. B. durch Gasbildung infolge Metallkorrosion,
- eine starke Kupfer- und Stahlkorrosion, z. B. Lochfraßkorrosion,
- eine Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme (Rissbildung) und
- hohe, anisotrope Spannungen (Rissbildung).

5.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

5.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

5.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die eingelagerten Endlagergebäude stellen eine Randbedingung des Endlagersystems dar. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

5.7 Ungewissheiten

- Das Behälterdesign ist an standortspezifische Rahmenbedingungen noch anzupassen.
- Für die neu zu entwickelnden Behälter sind Fertigungsprozesse und Prüfverfahren festzulegen. Auf dieser Grundlage müssen Fertigungs- und Prüffehlerquoten ermittelt werden.

5.8 Literaturquellen

- Andra (2005): Safety analysis of a geological repository. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), Dossier 2005 Granite, Tome: 221 pp.; Châtenay-Malabry Cedex.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G. & Kilger, R. (2012): Endlagerauslegung und -optimierung. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), GRS-281; Köln.

- Brennecke, P. (1995): Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 1995), - Schachtanlage Konrad. – Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), ET-IB-79; Salzgitter.
- EndlSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, 06.10.2020, Berlin.
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston. Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers.- Tech.Ber. NTB 02-02, Wettingen.
- SKB (1999): Deep repository for long-lived low- and intermediate-level waste. Preliminary safety assessment. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-99-28.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the canister. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-14; Stockholm, Sweden.

6 Buffer

NEA-Gruppe: 3.1.2 *Buffer/backfill*

6.1 Definition/Kurzbeschreibung

Der Buffer soll den Lösungszutritt bzw. -abfluss zum/vom Endlagerbehälter begrenzen, das hydrochemische Milieu stabilisieren und zur Radionuklidrückhaltung beitragen. Das FEP beschreibt die Funktion, die Zusammensetzung und die Eigenschaften der in die Einlagerungsbohrlöcher eingebrachten Buffermaterialien.

6.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das KBS-3V-Konzept ist ein von SKB (Schweden) und Posiva (Finnland) entwickeltes Endlagerkonzept für Kristallingesteine (Posiva & SKB 2017, SKB 2006, 2010a, b, c), das für derartige Gesteine auch in verschiedenen anderen Ländern vorgesehen ist. Bei diesem Konzept soll der Einschluss der Radionuklide durch die Eigenschaften eines langzeitstabilen Kupferbehälters in Wechselwirkung mit dem umgebenden Bentonit-Buffer in einem vertikalen Bohrloch gewährleistet werden.

Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung bei diesem Endlagerkonzept ist eine Korrosionsresistenz der Behälter während des gesamten Bewertungszeitraums (Posiva & SKB 2017). Der umgebende Buffer trägt dazu bei, den Lösungszutritt zu verzögern, das hydrochemische Milieu günstig zu beeinflussen, Scherbewegungen im Gestein vor dem Behälter zu dämpfen und freigesetzte Radionuklide (in geringem Maße aufgrund der geringen Größe des Buffers) durch Sorption zurückzuhalten (Luterkort et al. 2018). Die anderen geotechnischen Barrieren im Grubengebäude dienen der Begrenzung des Lösungszutritts und der Vermeidung einer Erosion des Buffers (SKB 2010a, Posiva & SKB 2017).

6.3 Komponentenbeschreibung

Im Konzept für das Modell „mKBS-3“ findet die Einlagerung in vertikalen, 11,35 m tiefen Bohrlochern (Durchmesser ca. 1,30 m) statt (Jobmann & Burlaka 2021). Nach der Erstellung des Bohrlochs werden Bentonitscheiben und -ringe aus hoch kompaktiertem Buffermaterial eingebracht.

Die Bentonitscheiben und -ringe haben eine Höhe von 50 cm und einen Durchmesser von 120 cm. Der Innendurchmesser der Bentonitringe beträgt 60 cm. Die Bentonitscheiben bilden im Bohrlochtiefsten einen 1 m starken Boden. Die Herstellung der Bentonitscheiben und -ringe sowie ihr Einbau wurden für das skandinavische Konzept bereits erprobt (SKB 2010b, Luterkort et al. 2018). Der Ringspalt zwischen den ihnen und dem umgebenden Kristallingestein, der u. a. zum Ausgleich der Einbautoleranzen dient, wird mit Bentonitpulver aufgefüllt. Bis 5,35 m unterhalb der Sohle der Bohrloch-überfahrungsstrecke folgen 30 cm breite Tonringe, deren innere Öffnung dem Durchmesser der Kokille entspricht. Zum Abschluss werden fünf, 50 cm hohe Bentonitscheiben eingebracht. Funktionalitätsnachweise für die Bentonit-Barrieren wurden durch Labor- und in situ Versuche erbracht (z. B. Luterkort et al. 2018, Posiva 2016, 2017).

Im Hinblick auf die Langzeitstabilität soll der Bentonit-Typ entsprechend den hydro- und geochemischen Eigenschaften am Standort ausgewählt werden. Als Arbeitshypothese wird aus

praktischen Gründen (Erfahrung im Rahmen deutscher Forschungsprojekte) ein Ca-Bentonit angenommen (Engelhardt et al. 2011, Pöhler et al. 2010, Lommerzheim & Jobmann 2015).

Die Trockendichte des kompaktierten Ca-Bentonits, mit der die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Materials eingestellt werden, soll ca. 2.000 kg/m³ betragen. Die resultierende Feuchtdichte von > 2.600 kg/m³ nach der Aufsättigung führt zu geringen Permeabilitäten von < 10⁻¹⁸ m² und schränkt den Lebensraum für Mikroben stark ein. Mit zunehmender Aufsättigung und damit erhöhtem Wassergehalt verbessert sich die Wärmeleitfähigkeit des Buffers leicht (Yildizdag et al. 2008). Die gleichmäßige Aufsättigung des Bentonits ist die Voraussetzung, um die Entstehung von Kanalisierungen zu verhindern (Neretnieks & Moreno 2018).

Bei Bedarf kann durch Sandbeimengungen die Wärmeleitfähigkeit und die mechanische Stabilität des Buffers erhöht werden (Luterkort et al. 2018). Nachteilig bei einer Sandbeimischung ist, dass der Porenraum vergrößert wird, wodurch sich der Lebensraum für Mikroben und damit die Mikrobenpopulation vergrößert, was zu einer erhöhten mikrobiellen Korrosionsaktivität an den Kokillen führen kann. Es wird erwartet, dass das Quell- und Sorptionsvermögen des Bentonits in begrenztem Umfang durch mikrobielle Aktivitäten beeinflusst werden kann (Bengtsson et al. 2017, Carlson 2007, Gaudin 2009, Herbert 2011). Im Rahmen der Sicherheitsbewertung ist zu zeigen, dass der Buffer trotzdem die vorgesehenen Funktionen erfüllen kann.

6.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

6.5 Zeitliche Beschränkung

Die Funktionsdauer des Buffers entspricht dem Bewertungszeitraum (1 Mio. Jahre).

6.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Der Buffer ist Teil des Endlagerkonzeptes und damit wahrscheinlich.

6.7 Ungewissheiten

- Kann durch die Verwendung von Bakteriziden die mikrobielle Aktivität verändert werden?

6.8 Literaturquellen

- Bengtsson, A., Blom, A., Hallbeck, B., Heed, C., Johansson, L., Stahlen, J. & Pedersen, K. (2017): Microbial sulphide-producing activity in water saturated MX-80, Asha and Calci-gel bentonite at wet densities from 1.500 to 2.000 kg m⁻³. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-16-09; Stockholm.
- Carlson, L., Karnland, O., Oversby, V.M., Rance, A.P., Smart, N.R., Snellman, M., Vähänen, M. & Werme, L.O. (2007): Experimental studies of the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. – Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Vol. 32, 1: 334-345.
- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-Hoeppel, N. (2011): Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE TECHNOLOGY GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Gaudin, A., Gaboreau, S., Tinseau, E., Bartier, D., Petit, S., Grauby, O., Focht, F. & Beaufort, D. (2009): Mineralogical reactions in the Tournemire argillite after in-situ interaction with steels. – Applied Clay Science, Vol. 43, (2): 196-207.
- Herbert, H.-J., Kasbohm, J., Lan, N.T., Meyer, L., Thao, H.T.M. & Xie, M. (2011): Fe-Bentonite. Experiments and modeling of the interactions of bentonites with iron. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Report GRS-295: BMWi-FKZ 02 E 10538; Braunschweig.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Lommerzheim, A. & Jobmann, M. (2015): Projekt ANSICHT. Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Technischer Bericht, TEC-14-2015-TB, FKZ 02E11061B; Peine.
- Luterkort, D., Johannesson, L.E. & Eriksson, P. (2018): Buffer design and installation method. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-17-06; Stockholm.
- Neretnieks, I. & Moreno L. (2018): Revisiting bentonite erosion understanding and modelling based on the BELBAR project findings. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-17-12; Stockholm
- Pöhler, M., Amelung, P., Bollingerfehr, W., Engelhardt, H.J., Filbert, W. & Tholen, M. (2010): Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle im Tongestein. – DBE TECHNOLOGY GmbH, FuE-Vorhaben ERATO, Abschlussbericht, TEC-28-2008-AB; Peine.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Posiva (2016): Design and Construction of Equipment and Experimental Deposition Holes, in ONKALO Demonstration Tunnel 2. – WR-2016-27; Eurajoki.
- Posiva (2017): Design and Construction of Equipment and Experimental Deposition Holes, in ONKALO Demonstration Tunnel 1. – WR 2015-25; Eurajoki.
- Posiva & SKB (2017): Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. – Posiva-SKB report 01-2017.
- SKB (2006): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Loxenar. A first evaluation. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-06-09; Stockholm.
- SKB (2010a): Design, production and initial state of the closure. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-17; Stockholm.
- SKB (2010b): Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-47; Stockholm.
- SKB (2010c): Design and production of the KBS- 3 repository. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-12; Stockholm.
- Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M. & Uhlig, L. (2008): Investigation on THM behavior of a heated bentonite barrier by measurements and numerical calculations. R&D Project: MUSTER, Final Report. – DBE TECHNOLOGY GmbH, FKZ: 02E9743, TEC-25-2008-AB; Peine.

7 Versatz

NEA-Gruppe: 3.1.2 *Buffer/backfill*

7.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Versatz werden alle bergmännisch eingebrachten Materialien verstanden, die zur Verfüllung untertägiger Hohlräume verwendet werden. Das FEP beschreibt die Materialien, deren Funktion, den Einbau und die Eigenschaften des Versatzes.

7.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In den aktuellen Verschlusskonzepten der schwedischen und finnischen Endlagerorganisationen spielt der Versatz in den Einlagerungsstrecken eine wichtige Rolle (Posiva & SKB 2017). Er stellt einen Teil der ingenieurtechnischen Barrieren dar und soll die Einlagerungsstrecken komplett ausfüllen. Seine Funktion ist zweigeteilt, zum einen soll er den in den vertikalen Einlagerungsbohrlöchern eingebrachten Buffer daran hindern, aus den Bohrlöchern herauszuquellen. Zum anderen soll er advective Flüssigkeitsbewegungen in den Einlagerungsstrecken einschränken.

Gemäß den Designvorgaben für das derzeitige Referenzkonzept der SKB besteht der Versatz aus kompaktierten Bentonitblöcken, die in der Strecke gestapelt werden (SKB 2010). Der verbleibende Resthohlraum zwischen den Blöcken und dem Gebirge soll mit Bentonit-Pellets ausgefüllt werden. Die Mächtigkeit dieses Resthohlraums wird mit durchschnittlich ca. 10 cm, je nach Rauigkeit der Ausbruchsoberfläche angegeben. Der Untergrund auf dem die Blöcke gestapelt werden soll ebenfalls mit granularem Bentonitmaterial belegt und anschließend verdichtet werden. Dieses Bentonit-Bett soll auch eine Mächtigkeit von ca. 10 cm haben. Als Referenzmaterial wird der sogenannte "Milos-Bentonit" (IBECO-RWC-BF) angegeben (Akesson et al. 2010). Die Design-Spezifikationen für die Bentonitblöcke und Pellets, die damit verbundenen thermo-hydro-mechanischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften sowie die dezidierte Materialzusammensetzung können den entsprechenden Berichten der SKB (Johannesson & Nilsson 2006, Johannesson 2008, SKB 2010) entnommen werden.

Alternativ zum Referenzmaterial werden die Bentonite Asha (aus Kutch, Indien) und MX-80 (aus Wyoming) betrachtet. Alternativ wird auch ein Verfüllkonzept betrachtet, bei dem der Versatz nicht aus vorkompaktierten Blöcken sondern aus einem Gemisch aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit besteht (Mata & Ledesma 2003, Pusch 1998).

7.3 Komponentenbeschreibung

Der Versatz in der Bohrlochüberfahrungsstrecke und in den Zugangsstrecken und Querschlägen stellt ein Element des Verschlussystems dar (Bertrams et al. 2017, Jobmann & Burlaka 2021). Der Versatz besteht aus einem Gemisch aus aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit. Eine optimale Korngrößenverteilung ist durch entsprechende Untersuchungen zu bestimmen. Wichtig ist in dem Zusammenhang, dass der Bentonitanteil nicht aus dem Korngerüst ausgespült wird. Für das Mischungsverhältnis von Bentonit und Ausbruchsmaterial wird als Arbeitshypothese derzeit von ca. 70:30 ausgegangen. Bei diesem Mischungsverhältnis wurden Permeabilitäten von 10^{-17} bis 10^{-18} m² gemessen (Pusch 1998). Das Korngerüst aus Festgestein (Ausbruchsmaterial) soll darüber hinaus zusammen mit dem quellfähigen Tonanteil für einen zeitnahen Kraftschluss mit dem Gebirge sorgen. Durch den Kraftschluss werden die Widerlager der Einlagerungsbohrlöcher in ihrer Funktion unterstützt. Durch Ausfüllen des

Porenraums des Schottergerüsts mit Bentonit wird nach dessen Quellung eine geringe Permeabilität in der Strecke erreicht, die zur Einhaltung des Advektionskriteriums beiträgt. Bzgl. der Leistungsziele und den damit verbundenen Konstruktionsanforderungen wird auf den Bericht zum Verschlusskonzept verwiesen (Zitat Verschlusskonzeptbericht)

Grubenräume des Endlagerbergwerks werden, aus Gründen der Betriebssicherheit, ggf. mit einem Betonausbau gesichert und so stabilisiert. Der Ausbau verbleibt – abgesehen von den Positionen der geotechnischen Barrieren – beim Verschluss des Bergwerks in den Strecken. Die Verfüllung in den Bohrlochüberfahrungsstrecken, Querschlägen und Zugangsstrecken erfolgt mit demselben Versatzmaterial. Außerhalb der Einlagerungsfelder wird auf die Beimengung von quellfähigem Ton im Versatz verzichtet.

Ein eventueller Streckenausbau behindert aufgrund seiner hydraulischen Leitfähigkeit das Aufsättigen des Versatzes durch zutretende Gebirgslösungen nicht. Wohl aber kann es im Randbereich des Versatzes zu einer Veränderung des Quellverhaltens kommen, da korrodierte Zementphasen des Betons die hydrochemischen Verhältnisse dort verändern können. Entsprechend der sehr geringen hydraulischen Leitfähigkeit, verläuft die Aufsättigung des Versatzes sehr langsam. Bei einem Anschluss an wasserführende Klüfte, wird der Versatzkörper ggf. auch von einer (oder beiden) Stirnseite(n) mit Flüssigkeit angeströmt. Eine Aufsättigung verläuft in diesem Fall schneller als bei einer ausschließlichen Anströmung über die Seitenflächen. Die Dauer der Aufsättigung sollte durch Prozessanalysen weiter konkretisiert werden. Beim Einbau des Versatzes werden möglichst homogene Materialeigenschaften angestrebt, um eine gleichmäßige Aufsättigung sicherzustellen.

Der genaue Ablauf der Versatzentwicklung unter endlagerspezifischen Randbedingungen sollte ebenfalls durch Prozessanalysen ermittelt werden. Wichtig zu betrachten ist in dem Zusammenhang die Entwicklung des Lösungs- und Gasdruckes im Versatz sowie die erreichbare Permeabilität nach Abschluss des Quellvorgangs.

7.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

7.5 Zeitliche Beschränkung

Als Funktionsdauer für die Dicht- und Stützwirkung des Versatzes wird der Bewertungszeitraum angesetzt.

7.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Der Versatz ist Teil des Endlagerkonzeptes.

7.7 Ungewissheiten

- Wie sieht eine optimale Korngrößenverteilung für das aufbereitete Ausbruchsmaterial innerhalb eines Gemisches mit Bentonit aus?
- Was wäre ein optimales Mischungsverhältnis zwischen aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit?
- Wie verläuft die Versatzentwicklung unter endlagerspezifischen Randbedingungen?
- Über welchen Zeitraum herrschen signifikante hydraulische Antriebskräfte aufgrund der eingebrachten Wärme und der Gasproduktion vor, die eine advective Strömung im Versatz ermöglichen?

7.8 Literaturquellen

- Akesson, M., Börgesson, L. & Kristensson, O. (2010): SR-Site Data report. THM modelling of buffer, backfill and other system components. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, TR-10-44; Stockholm.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Johannesson, L.E. & Nilsson, U. (2006): Deep Repository – Engineered Barrier Systems, Geotechnical Behaviour of Candidate Backfill Materials, Laboratory Tests and Calculations for determining Performance of the Backfill. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-06-73; Stockholm.
- Johannesson, L.E. (2008): Backfilling and closure of the deep repository. Phase 3 – pilot tests to verify engineering feasibility. Geotechnical investigations made on unsaturated backfill materials. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-08-131; Stockholm.
- Mata, C. & Ledesma, A. (2003): Permeability of a bentonite–crushed granite rock mixture using different experimental techniques. – Géotechnique, Vol. 53 (8): 747-758. DOI: 10.1680/geot.53.8.747.37399
- Posiva & SKB (2017): Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. – Posiva SKB, Report 2017-01; Stockholm, Sweden.
- Pusch, R. (1998): Backfilling with mixtures of bentonite/ballast materials or natural smectite clay? – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-98-06; Stockholm.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-16; Stockholm.

8 Bohrlochwiderlager

NEA-Gruppe: 3.1.4 Borehole seals

8.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Bohrlochwiderlager dient dazu, den Buffer in seiner Einbauposition zu halten. Das FEP beschreibt die Funktion, die Zusammensetzung und die Eigenschaften eines Festgesteinswiderlagers einschließlich einer Filterschicht, die an der Basis des Widerlagers eingebaut wird.

8.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das KBS-3V-Konzept ist ein von SKB (Schweden) und Posiva (Finnland) entwickeltes Endlagerkonzept für Kristallingesteine (Posiva & SKB 2017, SKB 2006, 2010a,b,c), das für derartige Gesteine auch in verschiedenen anderen Ländern vorgesehen ist. Bei diesem Konzept soll der Einschluss der Radionuklide durch die Eigenschaften des eines langzeitstabilen Kupferbehälters in Wechselwirkung mit dem umgebenden Bentonit-Buffer in einem vertikalen Bohrloch gewährleistet werden. Voraussetzung für die Funktion des Buffers ist, dass er in seiner Einbauposition gehalten wird. Dies soll im KBS-3-Konzept durch den Versatz in der Bohrlochüberfahrungsstrecke sichergestellt werden.

8.3 Komponentenbeschreibung

Durch den Einbau des Widerlagers soll der Buffer in seiner Einbauposition gehalten und dadurch dessen Funktion gewährleistet werden. Im Modell „mKBS-3“ ist die Einlagerung in vertikalen, 11,35 m tiefen Bohrlöchern (Durchmesser ca. 1,30 m) geplant (Jobmann & Burlaka 2021). Nach der Erstellung des Bohrlochs werden Bentonitscheiben und -ringe aus hochkompaktiertem Buffermaterial eingebracht (vgl. Luterkort et al. (2018)). Der Buffer soll den Lösungszutritt und den Lösungsabfluss zum/vom Behälter begrenzen, das hydrochemische Milieu stabilisieren und zur Radionuklidrückhaltung beitragen (Posiva & SKB 2017). Voraussetzung dafür ist, dass der Buffer für den Bewertungszeitraum durch das Widerlager in seiner Einbauposition gehalten wird.

Dies soll durch ein kegelförmiges Festgesteinswiderlager gewährleistet werden. Das Widerlager soll aus Festgesteinsplatten bestehen, wobei die mittleren Steine kegelförmig präpariert werden, um bei Druckbelastung von unten die gewünschte Gewölbewirkung zu erzielen (Jobmann & Burlaka 2021). Der mittlere kegelförmige Stein, der als letztes eingesetzt wird, muss zunächst tiefer gesetzt werden. Dazu ist eine Vertiefung in der darunter liegenden Filterschicht vorzusehen. Durch den vorhandenen Hohlraum im mittleren Stein kann Lösung aus der Bohrlochüberfahrungsstrecke zur Filterschicht fließen. Die Filterschicht sorgt dafür, dass sich die Lösung gleichmäßig auf der Bufferoberfläche verteilt. Der Bentonit im Buffer sättigt sich mit dem Wasser auf und beginnt zu quellen. Der mittlere Stein des Widerlagers wird dadurch hochgeschoben. Der entstehende Hohlraum wird durch das Quellen zugedrückt und das Widerlager wird seine Stützfunktion übernehmen.

Der Grund für die Verwendung eines Widerlagers – im Unterschied zur Stützung des Buffers durch überlagernden Versatz im KBS-3-Konzept – ist die bessere Prognostizierbarkeit der ablaufenden Prozesse bei Verwendung eines Widerlagers. Dies ist im Hinblick auf den erforderlichen Funktionsnachweis der geotechnischen Barriere von großer Bedeutung.

8.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

8.5 Zeitliche Beschränkung

Die Funktionsdauer vom Bohrlochwiderlager entspricht dem Bewertungszeitraum (1 Mill. J.)

8.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Bohrlochwiderlager sind Teile des Endlagerkonzeptes und damit wahrscheinlich.

8.7 Ungewissheiten

Keine.

8.8 Literaturquellen

- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Luterkort; D., Johannesson, L.E. & Eriksson, P. (2018): Buffer design and installation method. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-17-06; Stockholm.
- Posiva-SKB (2017): Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository. – Posiva-SKB report 01-2017.
- SKB (2006): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Loxenar. A first evaluation. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-06-09; Stockholm.
- SKB (2010a): Design, production and initial state of the closure. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-17; Stockholm.
- SKB (2010b): Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-47; Stockholm.
- SKB (2010c): Design and production of the KBS- 3 repository. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-12; Stockholm.

9 Schachtverschlüsse

NEA-Gruppe: 3.1.3 *Shaft/ramp seals*

9.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bei den Schachtverschlüssen handelt es sich um Abdichtbauwerke von vertikalen Tageszugängen, die räumlich getrennt von den Einlagerungsfeldern angeordnet werden. Das FEP beschreibt die Funktion, das Design und die eingesetzten Materialien.

9.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Abdichtbauwerke in Zugangsstrecken, Querschlägen und Schächten sind Kernelemente in deutschen Endlagerkonzepten im Salz- und Tongestein und der damit verbundenen Sicherheitskonzepte sowie der Bewertungsstrategie. Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde ein erstes Beispiel für die Vorbemessung eines möglichen Schachtverschlusses gegeben (Müller-Hoeppe et al. 2012b, Herold & Müller-Hoeppe 2012). Im Detail liegen von deutscher Seite Konzepte zum Verschluss von Schächten vor oder werden aktuell entwickelt. Dies erfolgte zum einen ebenfalls im Rahmen der VSG (Müller-Hoeppe et al. 2012a) und erfolgt zum anderen im Rahmen des Forschungsvorhabens ELSA, dessen erste Phase bereits abgeschlossen ist und dessen Ergebnisse in einem Bericht dokumentiert sind (Kudla et al. 2013). In diesen Vorhaben werden u. a. grundsätzliche Anforderungen an Schachtverschlüsse formuliert. Detailliertere Planungen und Großversuche zur technischen Machbarkeit wurden bisher nur für die Vorhaben Salzdetfurth (Breidung 2002) und RESEAL (Volckaert et al. 1997) durchgeführt. Im Rahmen des F&E-Vorhabens Schachtverschluss Salzdetfurth wurde im Zuge von Technikums- und in situ Versuchen die Funktionalität von Dichtelementen aus Ca-Bentonit erfolgreich untersucht (Breidung 2002).

Das Endlager Konrad wird oberhalb des Wirtsgesteins durch mächtige unterkretazische Tongesteine abgedichtet. Das Schachtverschlusskonzept sieht oberhalb eines Widerlagers aus nicht kompaktierbarem Schotter im Bereich der Unterkreidetone 626 bzw. 454 m mächtige Dichtelemente aus einem Bentonit/Sand/Kies-Gemisch vor. Im Bereich des Dichtelementes sollen vorher alle Schachteinbauten sowie die Auflockerungszone entfernt werden. Zwischen der Schachtwandung und dem Dichtelement wird eine Gleitschicht eingefügt, die die Mantelreibung zwischen Schachtwandung und Mineralgemisch bis zum vollständigen Aufbau des horizontalen Stützdrucks verringern. Die Gleitschicht kann entweder aus wassergesättigtem Ton bestehen oder aus einem Ring aus hochverdichteten Bentonitformsteinen, die nach dem Einbau gezielt bewässert werden müssen. Im Bereich des wasserführenden Deckgebirges (Oberkreide, Quartär) ist eine Asphaltabdichtung vorgesehen (BfS 2002). Im Rahmen des Stilllegungsverfahrens wird das Konzept überarbeitet und dem Stand der Technik angepasst.

Im Zuge des belgischen RESEAL-Projektes wurde ein Schachtverschlusskonzept für Tonformationen erprobt (Volckaert et al. 1997). Das Verschlussdesign bestand aus einem unteren Widerlager aus Beton, einem Dichtelement aus Ca-Bentonit (FoCa-Clay) und einem oberen Widerlager aus Beton. Im Bereich des Dichtelementes wurde vor dem Einbau der Schachtausbau entfernt und die Auflockerungszone weggeschnitten. Die Betonwiderlager wurden zum Dichtelement hin mit einer Harzschicht abgedichtet. Außerdem wurde zwischen dem oberen Widerlager und dem Dichtelement zur gleichmäßigen Aufsättigung eine Sandschicht eingefügt. Der Bentonit wurde als Pellets und Pulver eingebracht und mit einer Vibrationsplatte verdichtet.

Für das französische Endlagerkonzept im Tongestein wurde ein ähnliches Schachtverschlusskonzept entwickelt (Betonwiderlager und Dichtelemente aus Na-Bentonit (MX-80) (ANDRA

2005a). Entsprechend den geologischen Verhältnissen werden dort zwei Dichtelemente in der Schachtröhre angeordnet. Bezüglich der technischen Machbarkeit wird u. a. auf den TSX-Versuch abgestellt (AECL 2005, ANDRA 2005b).

Das Schweizer Schachtverschlusskonzept ist im Prinzip auch ähnlich gestaltet und sieht Bentonit-Dichtelemente zwischen Widerlagern vor, wobei dort als Widerlager Schottersäulen vorgesehen sind (Nagra 2002). Wie im französischen Konzept sind ein Dichtelement im Wirtsgestein und eins im Deckgebirge vorgesehen.

Für kristalline Gesteine sind die Verschlusskonzepte der Posiva und der SKB zu nennen. In dem aktuellen gemeinsamen Referenzkonzept werden Schächte weitestgehend mit aufbereitetem Ausbruchsmaterial verfüllt (z. B. SKB 2012). Lediglich im oberen stark verwitterten Bereich ist das Einbringen von grobem Felsmaterial vorgesehen. Die wesentliche Funktion der Verfüllung beschränkt sich auf eine Stützwirkung für das Gebirge und eine Erschwerung des menschlichen Eindringens. Hydraulische Dichtwirkungen werden nur den Komponenten im Einlagerungsbereich zugewiesen (Behälter, Buffer, Streckenversatz).

Bezüglich der Materialparameter für einzelne Module von Abdichtbauwerken liegt bereits eine Reihe von Informationen vor, deren Quellen im Folgenden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, angegeben sind. Im Rahmen vorliegender Verschlusskonzepte wird als Dichtelement häufig Bentonit angenommen, da dieser als Abdichtmaterial anerkannt ist und eine Vielzahl von Untersuchungen bezüglich des Materialverhaltens vorliegen (Bertrams et al. 2017).

Thermische Parameter und Ausdehnungseffekte von Bentonit und Tongesteinen wurden u. a. in Yildizdag et al. (2008), Jobmann et al. (2013) und Jobmann et al. (2007) untersucht. Abhängigkeiten der Permeabilität vom Quelldruck und damit indirekt vom Sättigungsgrad wurden u. a. von Jobmann (2002) im Rahmen des F&E-Vorhabens „Schachtverschluss Salzdetfurth“ untersucht. Aussagen zum anfänglichen Sättigungsgrad von Bentonit-Dichtelementen wurden von Engelhardt & Müller-Hoeppe (2011) im Rahmen der Entwicklung eines Schachtverschlusskonzeptes für die Schächte in Gorleben getroffen. Weitere Materialspezifikationen sind in Engelhardt et al. (2011) sowie in Sitz et al. (1999) nachzulesen. Aussagen zur mikrobiellen Aktivitäten bei Tonsteinen und Bentoniten können in Meleshyn (2011) nachgelesen werden.

Dichtelemente aus Bentonit werden in allen Konzepten durch Widerlager aus Beton in ihrer Position fixiert, sodass ein im Zuge der Aufsättigung des Bentonits eingestellter Quelldruck einen Gebirgsverbund herstellt und keine Volumenausdehnung in den Hohlraum erfolgt. Informationen zur Dauerhaftigkeit von Beton und zum thermomechanischen Verhalten von Beton sind u. a. in Thienel (2011) und Huismann (2010) beschrieben. Hinweise zur Oberflächenrauigkeit sind in Kadhim El-Tornachi (2003) nachzulesen.

Für die Verwendung von Bitumen oder Asphalt als Abdichtmaterial im Rahmen geotechnischer Barrieren liegen bereits einschlägige Untersuchungen vor (Kudla et al. 2009 und 2014).

Zur Stabilisierung von Schächten und zur Gewährleistung des sicheren Bergwerksbetriebes werden die Schachtröhren für die Betriebsphase durch einen Schachtausbau stabilisiert. Die Materialien und die Konstruktion des Schachtausbaus richten sich einerseits nach den geologischen Rahmenbedingungen und andererseits nach den bergwerksspezifischen Anforderungen. Auslegungsbestimmend sind die gebirgsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Gebirges, wobei sich die Bauwerkslasten aus dem lithostatischen und dem hydrostatischen Druck ergeben. Während die mechanische Stabilität der Schachtröhre in jedem Fall durch den Schachtausbau zu gewährleisten ist, richten sich die hydraulischen Anforderungen nach der Stärke der Wasserführung des Gebirges und betrieblichen Anforderungen hinsichtlich eines begrenzt tolerablen Wasserzutritts. Entscheidend ist, dass der Wasserzutritt soweit begrenzt wird, dass er den sicheren Betrieb der Schachtförderanlagen nicht beeinträchtigt.

Eine weitere Anforderung an die gewählten Baustoffe ist die chemische Stabilität über die vorgesehene Funktionsdauer.

9.3 Komponentenbeschreibung

Schächte sind nach Verschluss des Grubengebäudes bis zur Tagesoberfläche zu verfüllen. Bei der Endlageroption vom Typ "mBSK-3" befinden sich die Tageszugänge räumlich getrennt von den Einlagerungsfeldern.

Eine Schutzfunktion des Schachtverschlusses besteht darin, Störungen des hydrochemischen Milieus im Einlagerungshorizont zu minimieren. Das heißt, der Verschluss soll gewährleisten, dass nur ein möglichst geringer Zustrom meteorischer Wässer bzw. Wässer unterschiedlicher mineralischer Zusammensetzung aus dem Deckgebirge in den Einlagerungshorizont erfolgt. Entsprechend sind verschiedene Dichtelemente bestehend aus Bentonit, Bentonit-Asphalt-Kombinationen oder aus einer bitumenverfüllten Schottersäule im Konzept enthalten um wasserführende Bereiche bzw. hydraulisch wirksame Kluftzonen abzudichten. Der übrige Teil des Schachtes wird zur mechanischen Stabilisierung mit schotterförmigem (aufbereitetem) Ausbruchsmaterial verfüllt.

Module eines Schachtverschlusses (Trennmodule) dienen unter anderem dazu, eventuell vorhandene wasserführende Kluftnetzwerke voneinander zu trennen, die ansonsten über den Schacht miteinander kurzgeschlossen wären. Dies ist eine bergrechtliche Auflage (OCZ, 1996), die aber in erster Linie auf Aquifere innerhalb sedimentärer Formationen ausgerichtet ist. Sinngemäß wird diese Auflage hier auch auf Kluftzonen im kristallinen Gebirge angewendet, die in unterschiedlichen Teufenlagen angefahren wurden.

Ein Beispiel für einen Schachtverschluss ist im Verschlusskonzept gegeben (Jobmann & Burlaka 2021). Darin sind das detaillierte Design und die eingesetzten Materialien beschrieben. Derzeit wird davon ausgegangen, dass für die Errichtung eines Schachtverschlusses alle Einbauten und auch ein eventueller Spritzbetonausbau im Bereich der Dichtelemente entfernt werden.

Ohne Standortinformationen ist nicht abschätzbar, ob aufgrund der geologischen Verhältnisse des Modells „mKBS-3“ ein kompletter Ausbau der Schächte – insbesondere im unteren Teil – erforderlich ist. Dies hängt von der mechanischen Stabilität des Gebirges und von der Wasserführung der Klüfte ab. Da es sich um ein generisches Modell handelt, wurde noch keine detaillierte Ausbauplanung durchgeführt. Es kann hier daher nur ein Grobkonzept dargestellt werden. Die Auswahl der Ausbaumaterialien und die Dimensionierung des Ausbaus sind auf der Grundlage standortspezifischer, geologischer und hydrogeologischer Daten noch durch Auslegungsrechnungen zu ermitteln.

Entsprechend dem geologischen Aufbau ist ein Schachtausbau wie für die Gorleben-Schächte denkbar. In stark geklüfteten Bereichen kann die direkte Anströmung der Schachtsäule durch Injektionsmaßnahmen verringert werden. Demnach könnte im oberen Bereich ein zweiwandiger, gleitender Schachtausbau eingesetzt werden. An der Basis stützt sich der Außenausbau auf einem Aufstandsfundament ab. Für die oberen ca. 100 m der Außenröhre ist ein einlagiger Aufbau der Betonsteine (Güteklasse B 55), darunter ein zweilagiger Aufbau vorzusehen. Die entsprechenden Aufhänge- und Aufstandsfundamente bestehen aus Stahlringen (T-Profil, Stahlgüte St 52-3) und Verfüllmörtel.

Der Innenausbau setzt sich aus einer Asphaltfuge zu Abdichtzwecken, einem Stahlzylinder und einem inneren Betonmantel zusammen und erstreckt sich durch die ganze Schachtröhre.

Da der tiefere Teil der Gesteinsfolge aus standfesten, geringfügig wasserführenden Formationen besteht, kann hier der Innenausbau als gebirgsverbundener, einwandiger Ausbau bis zum Schachtsumpf fortgeführt werden.

Der Schachtausbau wird für die Betriebszeit des Endlagers (ca. 70 bis 80 Jahre) ausgelegt. Er wird während der Nachverschlussphase korrodieren und dann versagen. Für die frühe Nachverschlussphase wird er aber den Lösungszutritt zum Schacht noch begrenzen. Dies ist von Vorteil, da bis zum Versagenszeitpunkt des Schachtausbaus die Einspannung der Schachtverschluss-Widerlager im Gebirge und die Aufsättigung des Bentonits in den Dichtelelementen voranschreiten.

9.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck (Asphalt)	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität (Asphalt)	x	Mikrobenpopulation

9.5 Zeitliche Beschränkung

Als Funktionsdauer für die Dichtelemente wird der Bewertungszeitraum angesetzt. Die Funktionsdauer des eventuellen Ausbaus hauptsächlich auf die Betriebsphase beschränkt.

9.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Schachtverschlüsse sind Teil des Endlagerkonzeptes.

9.7 Ungewissheiten

- Optimales Mischungsverhältnis für das Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch zur Herstellung der Trennmodule.
- Sobald die Standortbedingungen bekannt sind, ist das Ausbaukonzept neu zu bewerten, z. B. Spezifizierung des Ausbaumaterials.

9.8 Literaturquellen

- AECL (2005): Tunnel sealing experiment five year report. – Rapport Andra: n° G.RP.DPG.05.0002.
- ANDRA (2005a): Architecture and management of a geological repository. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Dossier 2005 Argile, Tome: 495 pp.; Châtenay-Malabry Cedex.
- ANDRA (2005b): Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Rapport Andra: n° C.RP.ASCM.04.0015.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- BfS (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter.- Bundesamt für Strahlenschutz; Salzgitter.
- Breidung, K. P. (2002): Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. – K+S AG, Abschlussbericht, FKZ: 02C0516; Kassel.
- Engelhardt, H., & Müller-Hoepe, N. (2011): Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE TECHNOLOGY GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-Hoepe, N. (2011): Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE TECHNOLOGY GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Herold, P. & Müller-Hoepe, N. (2012): Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse – Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und Variante A). – DBE TECHNOLOGY GmbH, Memo im Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben; Peine.
- Huismann, S. (2010): Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung. – Thesis, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Jobmann, M. (2002): Hydraulische Modellierungen, F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. – DBE Technology GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Jobmann, M., Breustedt, M., Li, S., Polster, M. & Schirmer, S. (2013): Investigations on THM effects in buffer, EDZ and argillaceous host rock. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Final Report FKZ: 02E10086; Peine.
- Jobmann, M., Polster, M., & Schonebeck, M. (2007): Investigation on thermal expansion effects in clay formations. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Final Report FKZ: 02E9531; Peine.
- Kadhim El-Tornachi, M. (2003): Rauheit von Betonoberflächen, 3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen, Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton unter nicht ruhender Belastung. – Thesis, Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund.
- Kudla, W., Dahlhaus, F., Glaubach, U., Gruner, M., Haucke, J., Hofmann, M., & Wasowicz, B. (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Abschlussbericht; Freiberg.

- Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Müller-Hoeppe, N., Herold, Ph., Freyer, D., Wilsnack, T. & Grafe, F. (2013): Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1–. – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau & DBE TECHNOLOGY GmbH, Abschlussbericht; Freiberg, Peine.
- Kudla, W., Jobmann, M. & Herold, P. (2014): „Forschungsvorhaben ELSA 2 – Halb-technische Versuche zur Verdichtung von Salzgrus und Schachtverschlusskonzepte im Tonstein und Salz“. – Projektstatusgespräch, 25./26.11.2014; Karlsruhe.
- Meleshyn, A. (2011): Microbial processes relevant for the long-term performance of radioactive waste repositories in clays. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktor-sicherheit (GRS) mbH, Final Report, GRS-291, FKZ 02E10548; Braunschweig.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K. & Xie, M. (2012a): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-287; Köln.
- Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Wolf, J., Czaikowski, O. & Wieczorek, K. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 2, Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-288; Peine, Braunschweig.
- Nagra (2002): Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). – National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra), Technical Report 02-05; Wettingen, Switzerland.
- OCZ (1996): Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld: Richtlinien des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten vom 15.02.1996-11.2-10.2-3/95II-BIf5.2-II.
- Sitz, P. (1999): Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar. – Abschlussbericht, FKZ 02C0193, TU Bergakademie Freiberg.
- SKB (2012): Closure of the Spent Fuel Repository in Forsmark, Studies of alternative concepts for sealing of ramp, shafts and investigation boreholes. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-12-08; Stockholm.
- Thienel, K.-C. (2011): Werkstoffe des Bauwesens, Dauerhaftigkeit von Beton. – Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Tech. rep..
- Volckaert, G., Holvoet, F.-X. G., Vaunat, J. A., Imbert, C., Villar, M. A., & Lepotier, C. A. (1997): A large scale in situ demonstration for REpository SEALing in an argillaceous host rock. In-situ testing in underground research laboratories for radioactive waste disposal, Proceedings of a Cluster seminar held in Alden Biesen, Belgium. – 10 and 11 December 1997.
- Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M. & Uhlig, L. (2008): Investigation on THM behavior of a heated bentonite barrier by measurements and numerical calculations. R&D Project: MUSTER, Final Report. – DBE TECHNOLOGY GmbH, FKZ: 02E9743, TEC-25-2008-AB; Peine.

10 Rampenverschlüsse

NEA-Gruppe: 3.1.3 *Shaft/ramp seals*

10.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bei den Rampenverschlüssen handelt es sich um Abdichtbauwerke von geneigten Tageszugängen, die räumlich getrennt von den Einlagerungsfeldern angeordnet werden. Das FEP beschreibt die Funktion, das Design und die eingesetzten Materialien.

10.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Abdichtbauwerke sind Kernelemente in Endlagerkonzepten und der damit verbundenen Sicherheitskonzepte sowie der Bewertungsstrategie. Im Detail liegen von deutscher Seite zwar keine Verschlüsse für Rampen, dafür aber Konzepte zum Verschluss von Schächten vor oder sie werden aktuell entwickelt. Dies geschah zum einen im Rahmen der VSG (Müller-Hoeppe et al. 2012) und geschieht zum anderen im Rahmen des Forschungsvorhabens ELSA, dessen erste Phase bereits abgeschlossen ist und dessen Ergebnisse in einem Bericht dokumentiert sind (Kudla et al. 2013).

Im schwedischen Konzept werden für verschiedene Abschnitte der dort geplanten Rampe ein oberflächenferner, unterer Abschnitt und ein oberflächennaher, oberer Abschnitt (Verwitterungsbereich) unterschieden. Während die Verfüllung im unteren Abschnitt aus hinsichtlich der Korngrößenverteilung aufbereitetem Ausbruchsmaterial besteht und damit der Verfüllung der Transport- und Zugangsstrecken entspricht, werden im oberen Abschnitt kompaktiertes, zerkleinertes Ausbruchsmaterial, grob zerkleinertes Ausbruchsmaterial und Felsblöcke verwendet (SKB 2010).

Im Rahmen vorliegender Verschlusskonzepte wird als Material für die Dichtelemente häufig Bentonit genommen, da dieser als Abdichtmaterial anerkannt ist und eine Vielzahl von Untersuchungen bezüglich des Materialverhaltens vorliegen (Bertrams et al. 2017). Bezüglich der Materialparameter für einzelne Module von Abdichtbauwerken liegt bereits eine Reihe von Informationen vor, deren Quellen im Folgenden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, angegeben sind.

Thermische Parameter und Ausdehnungseffekte von Bentonit und Tongesteinen wurden u. a. in Yildizdag et al. (2008), Jobmann et al. (2013) und Jobmann et al. (2007) untersucht. Abhängigkeiten der Permeabilität vom Quelldruck und damit indirekt vom Sättigungsgrad wurden u. a. von Jobmann (2002) im Rahmen des F&E-Vorhabens „Schachtverschluss Salzdetfurth“ untersucht. Aussagen zum anfänglichen Sättigungsgrad von Bentonit-Dichtelementen wurden von Engelhardt & Müller-Hoeppe (2011) im Rahmen der Entwicklung eines Schachtverschlusskonzeptes für die Schächte in Gorleben getroffen. Weitere Materialspezifikationen sind in Engelhardt et al. (2011) sowie in Sitz et al. (1999) zusammengestellt. Aussagen zu mikrobiellen Aktivitäten in Tonsteinen und Bentoniten können in Meleshyn (2011) nachgelesen werden.

Für die Verwendung von Bitumen oder Asphalt als Abdichtmaterial im Rahmen geotechnischer Barrieren liegen bereits einschlägige Untersuchungen vor (z. B. Kudla et al. 2009 und 2014).

10.3 Komponentenbeschreibung

Rampen sind nach dem Verschluss des Grubengebäudes bis zur Tagesoberfläche zu verfüllen. Bei der Endlageroption vom Typ „mKBS-3“ befinden sich die Tageszugänge und damit auch eventuelle Rampen räumliche getrennt von den Einlagerungsfeldern.

Da es sich bei einer Rampe prinzipiell um eine geneigte Strecke handelt, wird diese analog zu den Strecken mit aufbereitetem Ausbruchsmaterial verfüllt. In Bereichen der Rampe, an denen hydraulisch wirksam Klüfte durchfahren werden, werden, analog zu den Schachtverschlüssen, sogenannte "Trennmodule" implementiert. Diese bestehen aus einer Kombination aus Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch, Asphalt und nochmal Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch, die ggf. über Filterschichten untereinander und mit dem reinen Ausbruchsmaterial gekoppelt werden. Das Gemisch entspricht dem Versatz in den Strecken im Grubengebäude.

Der untere Teil des Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisches lehnt sich an den einfachen Streckenversatz an. Letzterer wird sich im Laufe der Zeit mit Wasser füllen und das Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch erreichen, so dass dieses nicht nur über die seitliche Kontur, sondern auch über die untere Stirnseite mit dem Quellprozess beginnt. Das obere Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch ist unterhalb der hydraulisch wirksamen Kluft angeordnet und wird so, ggf. über eine Filterschicht, von dem Kluftwasser angeströmt und beginnt mit dem Quellprozess. Zwischen beiden Versatzgemischen liegt eine geringmächtige Asphalttschicht, die vor allem in der Anfangsphase die Dichtwirkung übernehmen soll. Diese wird durch den Quellprozess des Bentonits zusammengedrückt und wirkt so auch längerfristig als Quetschdichtung gegenüber der Rampenkontur.

Diese Dichtelement-Kombination minimiert zum einen das Einströmen von Wasser aus höheren Grundwasserbereichen und zum anderen wird dadurch eine Trennung von wasserführenden Bereichen hergestellt, die ein unterschiedliches hydrochemisches Milieu aufweisen. Dies ist eine bergrechtliche Auflage (OCZ 1996), die aber in erster Linie auf Aquifere innerhalb sedimentärer Formationen ausgerichtet ist. Sinngemäß wird diese Auflage hier auch auf Kluftzonen im kristallinen Gebirge angewendet, die in unterschiedlichen Teufenlagen angefahren wurden. Zwischen welchen wasserführenden Klüften ein solches "Trennmodul" sinnvoll einzusetzen ist, wird bei einer Standorterkundung untersucht werden.

Im oberen Bereich der Rampe, der innerhalb des Deckgebirges liegt, wird der Einfachheit halber auf eine Aufbereitung des Versatzes auf eine bestimmte Korngrößenverteilung verzichtet.

Ein Beispiel für einen Rampenverschluss ist im Verschlusskonzept gegeben (Jobmann & Burlaka 2021). Darin sind das detaillierte Design und die eingesetzten Materialien beschrieben. Derzeit wird davon ausgegangen, dass für die Errichtung eines Rampenverschlusses alle Einbauten und auch ein eventueller Spritzbetonausbau im Bereich der Dichtelemente entfernt werden.

10.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck (Asphalt)	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität (Asphalt)	x	Mikrobenpopulation

10.5 Zeitliche Beschränkung

Als Funktionsdauer für die Dichtelemente wird der Bewertungszeitraum angesetzt.

10.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Rampenverschlüsse sind Teil des Endlagerkonzeptes.

10.7 Ungewissheiten

- Optimales Mischungsverhältnis für das Ausbruchsmaterial-Bentonit-Gemisch zur Herstellung der Trennmodule.
- Optimale Konstruktion der Trennmodule inklusive Filterschichten zur Erosionsvermeidung.
- Sobald die Standortbedingungen bekannt sind, ist das Ausbaukonzept neu zu bewerten, z. B. Spezifizierung des Ausbaumaterials.

10.8 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Engelhardt, H., & Müller-Hoeppel, N. (2011): Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE Technology GmbH, Technischer Bericht; Peine.

- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-Hoeppe, N. (2011): Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE Technology GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Jobmann, M. (2002): Hydraulische Modellierungen, F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. – DBE Technology GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Jobmann, M., Breustedt, M., Li, S., Polster, M. & Schirmer, S. (2013): Investigations on THM effects in buffer, EDZ and argillaceous host rock. – DBE Technology GmbH, Final Report FKZ: 02E10086; Peine.
- Jobmann, M., Polster, M., & Schonebeck, M. (2007): Investigation on thermal expansion effects in clay formations. – DBE Technology GmbH, Final Report FKZ: 02E9531; Peine.
- Kudla, W., Dahlhaus, F., Glaubach, U., Gruner, M., Haucke, J., Hofmann, M., & Wasowicz, B. (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Abschlussbericht; Freiberg.
- Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Müller-Hoeppe, N., Herold, Ph., Freyer, D., Wilsnack, T. & Grafe, F. (2013): Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1–. – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau & DBE Technology GmbH, Abschlussbericht; Freiberg, Peine.
- Kudla, W., Jobmann, M. & Herold, P. (2014): „Forschungsvorhaben ELSA 2 – Halb-technische Versuche zur Verdichtung von Salzgrus und Schachtverschlusskonzepte im Tonstein und Salz“. – Projektstatusgespräch, 25./26.11.2014; Karlsruhe.
- Maidl, B., Thewes, M. & Maidl, U. (2014): Handbook of Tunnel Engineering II Basics and Additional Services for Design and Construction. – Berlin (Ernst & Sohn).
- Meleshyn, A. (2011): Microbial processes relevant for the long-term performance of radioactive waste repositories in clays. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktor-sicherheit (GRS) mbH, Final Report, GRS-291, FKZ 02E10548; Braunschweig.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, K. & Xie, M. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-287; Köln.
- OCZ (1996): Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld: Richtlinien des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten vom 15.02.1996-11.2-10.2-3/95II-BII5.2-II.
- Sitz, P. (1999): Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar. – Abschlussbericht, FKZ 02C0193, TU Bergakademie Freiberg.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the closure. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-17; Stockholm.
- Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M. & Uhlig, L. (2008): Investigation on THM behavior of a heated bentonite barrier by measurements and numerical calculations. R&D Project: MUSTER, Final Report. – DBE TECHNOLOGY GmbH, FKZ: 02E9743, TEC-25-2008-AB; Peine.

11 Kluftverschlüsse

NEA-Gruppe: 3.1.2 *Room/tunnel seals*

11.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bei den Kluftverschlüssen handelt es sich um Abdichtbauwerke, die in den Querschlügen und Zugangsstrecken an Lokationen errichtet werden sollen, in denen hydraulisch wirksame wasserführende Klüfte angetroffen wurden. Das FEP beschreibt die Funktion, das Design und die eingesetzten Materialien.

11.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Abdichtbauwerke in Querschlügen, Zugangsstrecken und Schächten sind Kernelemente in Endlagerkonzepten im Salz- und Tongestein und der damit verbundenen Sicherheitskonzepte sowie der Nachweisstrategie. Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde ein erstes Beispiel für die Vorbemessung eines möglichen Streckenverschlusses gegeben (Müller-Hoeppe et al. 2012b, Herold & Müller-Hoeppe 2012). Im Detail liegen von deutscher Seite Konzepte zum Verschluss von Schächten vor oder werden aktuell entwickelt. Dies geschah zum einen ebenfalls im Rahmen der VSG (Müller-Hoeppe et al. 2012a) und geschieht zum anderen im Rahmen des Forschungsvorhabens ELSA, dessen erste Phase bereits abgeschlossen ist und dessen Ergebnisse in einem Bericht dokumentiert sind (Kudla et al. 2013). Darüber hinaus wurden Konzepte für Streckenverschlüsse im Tongestein im Rahmen des Forschungsprojekts ANSICHT in zwei Varianten entwickelt (Jobmann et al. 2017).

Für das belgische, das französische und das schweizerische Endlagerkonzept liegen bereits detailliertere Planungen für Streckenverschlüsse vor. Sie bestehen aus Bentonit-Dichtelementen, die von Betonwiderlagern eingegrenzt sind (ANDRA 2005a, b; ONDRAF-NIRAS 2001; Nagra 2002). Unterschiede bestehen bezüglich der ausgewählten Bentonit-Baustoffe (Ca-Bentonit vs. Na-Bentonit) und der Art der Einbringung (hoch verdichtete Formsteine vs. Pellets und Pulver). In allen Fällen soll die Auflockerungszone an der Streckenkontur vor der Errichtung der Barriere so weit wie möglich entfernt und vorhandene Risse durch Injektionen von Dichtmaterialien verschlossen werden.

In den existierenden Untertagelaboratorien (URLs) werden Versuche geplant oder bereits durchgeführt, um sowohl die Herstellbarkeit als auch die anforderungsgerechte Funktion solcher Bauwerke zu testen und die Konzeptionen zu optimieren. In diesem Zusammenhang ist z. B. das Forschungsprojekt DOPAS (Full scale demonstration of plugs and seals) beendet. Informationen und Berichte können der Website der IGD-TP oder dem Abschlussbericht (Hansen et al. 2016) entnommen werden. Im Rahmen dieses von 14 europäischen Partnern getragenen Projektes wurden in mehreren europäischen URLs, darunter die Kristallin-Standorte Äspö, Schweden, Onkalo, Finnland und Josef in Tschechien, in situ Versuche im Maßstab 1:1 zur Errichtung und Erprobung von Abdichtbauwerksmodulen durchgeführt bzw. dauern zum jetzigen Zeitpunkt noch an. Im tschechischen Untertagelabor Josef wurde ein großtechnischer in situ Versuch mit der Bezeichnung EPSP zur Querschnittsabdichtung einer Strecke im Maßstab 1:1 gestartet (White et al. 2016). Bei diesem Versuch wird ein Dichtelement bestehend aus kleinen, hoch kompaktierten Bentonit-Pellets errichtet, das beidseitig von einem Betonwiderlager eingespannt ist. Als Beton wird 'low-pH Beton' verwendet.

Im Rahmen vorliegender Verschlusskonzepte wird als Dichtelemente häufig Bentonit angenommen, da dieser als Abdichtmaterial anerkannt ist und eine Vielzahl von Untersuchungen bezüglich des Materialverhaltens vorliegen (Bertrams et al. 2017).

Thermische Parameter und Ausdehnungseffekte von Bentonit und Tongesteinen wurden u. a. in Yildizdag et al. (2008), Jobmann et al. (2013) und Jobmann et al. (2007) untersucht. Abhängigkeiten der Permeabilität vom Quelldruck und damit indirekt vom Sättigungsgrad wurden u. a. von Jobmann (2002) im Rahmen des F&E-Vorhabens „Schachtverschluss Salzdetfurth“ untersucht. Aussagen zum anfänglichen Sättigungsgrad von Bentonit-Dichtelementen wurden von Engelhardt & Müller-Hoeppe (2011) im Rahmen der Entwicklung eines Schachtverschlusskonzeptes für die Schächte in Gorleben getroffen. Weitere Materialspezifikationen sind in Engelhardt et al. (2011) sowie in Sitz (1999) nachzulesen. Aussagen zu mikrobiellen Aktivitäten bei Tongesteinen und Bentoniten können in Meleshyn (2011) nachgelesen werden.

Dichtelemente aus Bentonit werden in allen Konzepten durch Widerlager aus Beton in ihrer Position fixiert, sodass ein sich im Zuge der Aufsättigung des Bentonit einstellender Quelldruck einen Gebirgsverbund herstellt und keine Volumenausdehnung in den Hohlraum erfolgt. Informationen zur Dauerhaftigkeit von Beton und zum thermomechanischen Verhalten von Beton sind u. a. in Thienel (2011) und Huismann (2010) beschrieben. Hinweise zur Oberflächenrauigkeit sind in Kadhim El-Tornachi (2003) nachzulesen.

Für die Verwendung von Bitumen oder Asphalt als Abdichtmaterial im Rahmen geotechnischer Barrieren liegen bereits einschlägige Untersuchungen vor (z. B. Kudla et al. 2009 und 2014).

11.3 Komponentenbeschreibung

Die Verfüllung des Streckensystems incl. des Infrastrukturbereiches, das sich an die ewG abdichtenden Streckenverschlüsse anschließt, erfolgt unter Verwendung von aufbereitetem Ausbruchsmaterial (vgl. FEP "Versatz"). Da der Versatz hier eine Stütz- und keine Dichtfunktion hat, ist eine Zugabe von Bentonit in diesen Bereichen nicht notwendig. Eine Ausnahme bilden durchörterte Klüfte mit hoher hydraulischer Wirksamkeit. Diese werden mit speziellen kleinen Verschlussmodulen versehen. Diese bestehen aus einer Kombination von Bentonit-Dichtelement, Asphaltdichtelement und Widerlagern und werden zu beiden Seiten einer wasserführenden Kluft angeordnet. Der Bereich zwischen den Dichtelementkombinationen, also im Kontaktbereich der Kluft, wird mit Schotter (Ausbruchsmaterial) verfüllt. Das Prinzip gleicht den kombinierten Asphalt-Bentonit-Modulen in dem Konzept des Streckenverschlusses (vgl. FEP "Streckenverschlüsse"), nur dass in diesem Fall die Wasserzufuhr zu der mit Schotter gefüllten Aufsättigungskammer aus der wasserführenden Kluft erfolgt und nicht künstlich. Der Vorteil dieser Art der Abdichtung liegt darin, dass das Strömungs- und Druckniveau innerhalb der Kluftzone nicht durch direkte Abdichtungen gestört werden und es zu keinen Druckumlagerungen in der Umgebung kommt. Dieser Grundgedanke wird auch von der SKB im Zusammenhang mit Schachtverschlüssen verfolgt (SKB 2010).

Die Dichtelementkombinationen zu beiden Seiten der wasserführenden Kluft verhindern ein schnelles Eindringen von Wasser in die Einlagerungsbereiche. Ein Beispiel für so einen Kluftverschluss ist im Verschlusskonzept gegeben (Jobmann & Burlaka 2021). Bei diesen Verschlüssen übernehmen die Asphaltelemente eine zeitnahe Dichtwirkung, die den Bentonitelementen genügend Zeit verschafft, ihre volle Dichtwirkung zu entfalten, was erst nach einer ausreichenden Aufsättigung der Fall ist. Ersten Abschätzungen zufolge wird das nach ca. 100 Jahren der Fall sein. Es wird eingeschätzt, dass die Beständigkeit des Asphalts für diesen Zeitraum gewährleistet werden kann (Herold et al. 2015). Ebenfalls sollte durch Prozessanalysen abgeschätzt werden, wann mit einer nahezu vollständigen Aufsättigung der einzelnen Bentonit-Dichtungsmodule gerechnet werden kann. Der Zeitraum bis zur Aufsättigung ist gleichzeitig der Funktionszeitraum für das Asphaltdichtelement. Die langzeitliche Dichtwirkung

wird durch das Bentonitelement erreicht. Wie "zeitnah" die Dichtwirkung des Asphaltes erreicht werden kann, ist durch Prozessanalysen zu klären.

Für die Bentonit-Dichtelemente wurden folgende Anforderungen definiert:

Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$, Quelldruck 1 MPa und das Element soll frei von Zugspannungen sein. Ein wichtiges Designmerkmal ist das Kriterium, dass die quellbedingte Verformung des Bentonit-Dichtelementes nicht größer als 3 % seiner Länge sein darf, um die hydraulischen Anforderungen zu erreichen. Dies muss bei der Auslegung der Kombinationsmodule berücksichtigt werden.

Derzeit wird davon ausgegangen, dass für die Errichtung eines Kluftverschlusses alle Streckeneinbauten, wie Schienen, die Betonfahrbahn sowie Leitungen und Kabel und auch ein eventueller Spritzbetonausbau, im Bereich der Dichtelemente und Widerlager entfernt werden.

11.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck (Asphalt)	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität (Asphalt)	x	Mikrobenpopulation

11.5 Zeitliche Beschränkung

Als Funktionsdauer wird der Bewertungszeitraum angesetzt.

11.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Kluftverschlüsse sind Teil des Endlagerkonzeptes.

11.7 Ungewissheiten

- Eine Konkretisierung der Funktionsdauer der Asphalteslemente sollte durch Prozessanalysen erfolgen.
- Ebenfalls sollte durch Prozessanalysen abgeschätzt werden, wann mit der nahezu vollständigen Aufsättigung der einzelnen Bentonit-Dichtungsmodule gerechnet werden kann.
- Zu klären ist auch, inwieweit eine Degradation des Asphaltes Auswirkungen auf das Bentonit-Dichtelement hat.

11.8 Literaturquellen

- ANDRA (2005): Architecture and management of a geological repository. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Dossier 2005 Argile, Tome: 495 pp.; Châtenay-Malabry Cedex.
- ANDRA (2005b): Référentiel des matériaux d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Rapport Andra: n° C.RP.ASCM.04.0015.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-Hoepe, N. (2011): Materialspezifikationen für Dicht-elemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE TECHNOLOGY GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Engelhardt, H., & Müller-Hoepe, N. (2011): Ermittlung der anfänglichen Porenraumsättigung vom Salzbeton Typ Asse und vom Sorelbeton A1 und Ca-Bentonit Typ Salzdetfurth (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE Technology GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Engelhardt, J., Jobmann, M., & Müller-Hoepe, N. (2011): Materialspezifikationen für Dicht-elemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (VSG Arbeitspaket 9.1.2). – DBE Technology GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Hansen, J., Doudou, S., Palmu, M. & White, M. (2016): DOPAS Project Final Summary Report. – Deliverable D6.4, European Commission; Luxembourg.
- Herold, P. & Müller-Hoepe, N. (2012): Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse – Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und Variante A). – DBE TECHNOLOGY GmbH, Memo im Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben; Peine.
- Herold, P., Gruner, M., Jobmann, M. & Kudla, W. (2015): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse. – DBE TECHNOLOGY GmbH, TUBAF, Technischer Bericht; Peine, Freiberg.
- Huismann, S. (2010): Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung. – Thesis, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Jobmann, M. (2002): Hydraulische Modellierungen, F+E-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth. – DBE Technology GmbH, Technischer Bericht; Peine.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Jobmann, M., Breustedt, M., Li, S., Polster, M. & Schirmer, S. (2013): Investigations on THM effects in buffer, EDZ and argillaceous host rock. – DBE Technology GmbH, Final Report FKZ: 02E10086; Peine.
- Jobmann, M., Polster, M., & Schonebeck, M. (2007): Investigation on thermal expansion effects in clay formations. – DBE Technology GmbH, Final Report FKZ: 02E9531; Peine.
- Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Maßmann, J., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L. & Ziefle, G. (2017): Projekt ANSICHT. Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Synthesebericht, TEC-19-2016-AB, FKZ 02E11061A/B: 137 S.; Peine.
- Kadhim El-Tornachi, M. (2003): Rauheit von Betonoberflächen, 3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen, Reibung und Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton unter nicht ruhender Belastung. – Thesis, Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund.
- Kudla, W., Dahlhaus, F., Glaubach, U., Gruner, M., Haucke, J., Hofmann, M., & Wasowicz, B. (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Abschlussbericht; Freiberg.

- Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Müller-Hoeppe, N., Herold, Ph., Freyer, D., Wilsnack, T. & Grafe, F. (2013): Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1–. – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau & DBE TECHNOLOGY GmbH, Abschlussbericht; Freiberg, Peine.
- Kudla, W., Jobmann, M. & Herold, P. (2014): „Forschungsvorhaben ELSA 2 – Halb-technische Versuche zur Verdichtung von Salzgrus und Schachtverschlusskonzepte im Tonstein und Salz“. – Projektstatusgespräch, 25./26.11.2014; Karlsruhe.
- Meleshyn, A. (2011): Microbial processes relevant for the long-term performance of radioactive waste repositories in clays. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktor-sicherheit (GRS) mbH, Final Report, GRS-291, FKZ 02E10548; Braunschweig.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K. & Xie, M. (2012a): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-287; Köln.
- Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Wolf, J., Czaikowski, O. & Wieczorek, K. (2012b): Integrität geotechnischer Barrieren - Teil 2, Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-288; Peine, Braunschweig.
- Nagra (2002): Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). – National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra), Technical Report 02-05; Wetingen, Switzerland.
- ONDRAF/NIRAS (2001): Technical overview of the SAFIR 2 report. – NIROND 2001-05 E, December 2001.
- Sitz, P. (1999): Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar. – Abschlussbericht, FKZ 02C0193, TU Bergakademie Freiberg.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the closure. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-17; Stockholm.
- Thienel, K.-C. (2011): Werkstoffe des Bauwesens, Dauerhaftigkeit von Beton. – Universität der Bundeswehr München, Institut für Werkstoffe des Bauwesens Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Tech. rep..
- White, M., Doudou, S., Bosgiraud, J.-M., Foin, R., Czaikowski, O., Gentles, D., et al. (2016). DOPAS Work Package 4 - Summary of Progress on, and Performance Evaluation of, Design, Construction and Monitoring of Plugs and Seals. – Integrated Report, DOPAS Consortium, European Commission; Luxembourg.
- Yildizdag, K., Herklotz, M., Jobmann, M., Polster, M., Schonebeck, M. & Uhlig, L. (2008): Investigation on THM behavior of a heated bentonite barrier by measurements and numerical calculations. – R&D Project: MUSTER, Final Report. – DBE TECHNOLOGY GmbH, FKZ: 02E9743, TEC-25-2008-AB; Peine.

12 Schachtausbau

NEA-Gruppe: 3.1.5 *Other engineered features*

12.1 Definition/Kurzbeschreibung

Der Schachtausbau ist die Stabilisierung der Schachtwandung eines Bergwerks aus Gründen der Betriebssicherheit während der Betriebsphase. Das FEP beschreibt die Konstruktion und Eigenschaften eines Schachtausbaus.

12.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Zur Stabilisierung der Schächte und zur Gewährleistung des sicheren Bergwerksbetriebes werden die Schachtröhren für die Betriebsphase durch einen Schachtausbau stabilisiert. Die Materialien und die Konstruktion des Schachtausbaus richten sich einerseits nach den geologischen Rahmenbedingungen und andererseits nach den bergwerksspezifischen Anforderungen. Auslegungsbestimmend sind die gebirgsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Gebirges, wobei sich die Bauwerkslasten aus dem lithostatischen und dem hydrostatischen Druck ergeben. Während die mechanische Stabilität der Schachtröhre in jedem Fall durch den Schachtausbau zu gewährleisten ist, richten sich die hydraulischen Anforderungen nach den geologischen Rahmenbedingungen (mäßige oder starke Wasserführung des Gebirges) und den betrieblichen Anforderungen (begrenzter Wasserzutritt tolerabel?). Entscheidend ist, dass der Wasserzutritt soweit begrenzt wird, dass er den sicheren Betrieb der Schachtförderanlagen nicht beeinträchtigt. Eine weitere Anforderung an die gewählten Baustoffe ist die chemische Stabilität über die vorgesehene Funktionsdauer.

Im Bergbau wird grundsätzlich zwischen vier geschlossenen Schachtausbautypen unterschieden (Reuther 1989):

- Die Schachtzimmerung (= Holzausbau) wurde bis zur 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts verwendet und ist nur in rechteckigen Schächten anzuwenden.
- Die Schachtmauerung erfolgt in zwei Schritten, wobei während des Schachtvortriebs zur Sicherung zunächst eine verlorene Abmauerung eingebracht wird. Sobald die vorgesehene Teufe erreicht ist, wird ein Widerlager erstellt und hierauf der endgültige Schachtausbau von unten nach oben aufgemauert. Die Fuge zwischen verlorener Abmauerung und dem Schachtausbau wird mit geeignetem Material verfüllt.
- Beim Eisenausbau werden speziell geformte Ausbausegmente (Schachtringe) eingebracht. Die einzelnen Schachtringe sind aus Profilstahl wie z. B. U-Eisen oder gebogenen Doppel-T-Trägern gefertigt und bestehen aus mehreren Segmenten, die miteinander verschraubt werden. Außerdem werden die einzelnen Schachtringe ebenfalls miteinander verschraubt. Der Eisenbau hat gegenüber der Schachtmauerung den Vorteil, dass bei gleicher Stabilität und Festigkeit weniger Platz benötigt wird und somit der getaufte Schachtdurchmesser kleiner sein kann. Außerdem kann der Eisenausbau sofort beim Teufen endgültig eingebracht werden, so dass der Schacht viel früher betriebsbereit ist.
- Bei neueren Schächten wird der Schachtausbau, besonders bei starkem Wasserzufluss aus dem Gebirge, meist aus Beton (Spritz-/Pumpbeton oder vorgefertigten Betonsegmenten) hergestellt. Dieser Baustoff bietet Vorteile bezüglich der Sicherheit, Präzision und Effizienz.

Bei stark wechselnden geologischen Verhältnissen ist auch die Kombination mehrerer Ausbautypen in einer Schachtröhre möglich.

Detaillierte Planungen für den Schachtausbau der Endlagerkonzepte in Kristallingestein liegen nicht vor. Randbedingungen und Anforderungen an die Auslegung des Schachtausbaus wurden aber durch großmaßstäbliche in situ Experimente untersucht. So wurden z. B. Versagensmechanismen in heterogenen und leicht geklüfteten Kristallingesteinen in Kombination mit aufahrungs- und thermisch induzierten Spannungen im Rahmen eines Mine-by Experiments im URL Pinawa (Kanada: Read 2004) und im Äspö Pillar Stability Experiment (Schweden: Andersson 2007) analysiert. Ein vorläufiges Grobkonzept für die Schächte in Onkalo (Finnland) gehen von einem Ausbau aus bewehrtem, wasserdichten Spritzbeton und Betoneinbauelementen aus (Ikonen & Kalliomäki 2003).

Entsprechend dem deutschen Gewinnungsbergbau auf verschiedene Rohstoffe liegen umfangreiche Erfahrungen für den Schachtbau in unterschiedlichen Gesteinen vor. Ein Beispiel für einen einwandigen, gebirgsverbundenen Schachtausbau aus Ziegelsteinen bieten die um 1900 abgeteufte Schächte Marie und Bartenslebens des Endlagers Morsleben (BfS 2009). Die durch die wasserdurchlässige Mauerung zutretenden begrenzten Deckgebirgslösungsmengen werden aufgefangen und nach Übertage gepumpt. Für diese Schächte wurde auch ein Nachweis der Standsicherheit bei Erdbebeneinwirkung gemäß KTA 2201 (1990: Teil 3) geführt.

Die Schächte des Endlagers Konrad haben ebenfalls einen einwandigen gebirgsverbundenen Schachtausbau, der aber aus Betonformsteinen besteht (BfS 2002). Entsprechend den Abschlaglängen beim Schachtteufen wurden in jedem Abschnitt zuunterst Mauerfüße aus Ziegelsteinen eingebaut. In Bereichen mit stärkeren Lösungszutritten (z. B. Hilssandstein) wurden durch Zementinjektionen in die Aquifere die Zuflussmengen begrenzt. Die Restmengen der Lösungen werden aufgefangen und nach Übertage gepumpt. Auch für die Schächte Konrad 1 und Konrad 2 wurde ein Nachweis der Standsicherheit bei Erdbebeneinwirkung gemäß KTA 2201 (1990) geführt.

Die Schächte des Erkundungsbergwerkes Gorleben wurden aufgrund des stark wasserführenden, lockeren Deckgebirges im Gefrierverfahren abgeteuft. Beim Schachtausbau kam (bis zum Salzspiegel) ein zweiwandiger gleitender Schachtausbau zum Einsatz (Linkamp & Müller-Hoepe 2011). Dieser besteht aus den folgenden Elementen:

- Außenausbau aus Betonsteinen (tragend), gebirgsverbunden, wasserdurchlässig und nachgiebig, Aufhänge- und Aufstandsfundamente: Stahlringausbau mit Zementverfüllung,
- Asphaltfuge (dichtend, Gleitfuge),
- Stahlblechmantel (abdichtend) und
- Innenausbau (tragend): monolithischer, bewehrter Beton, Fundament: Stahlübblinge mit Zementverfüllung.

Durch die dichtenden Ausbauelemente Asphaltfuge und Stahlblechmantel wird ein Zutritt von Deckgebirgslösungen in die Schächte verhindert. Der Innenausbau reicht als einwandiger Ausbau noch bis ca. 93 m unterhalb des Salzspiegels. Aufgrund der Standsicherheit der Salzformationen ist ein geschlossener Ausbau in den tieferen Teilen der Schächte nicht erforderlich.

12.3 Komponentenbeschreibung

Basierend auf den vereinfachten Annahmen für das Modell „mKBS-3“ ist nicht abschätzbar, ob aufgrund der geologischen Verhältnisse ein kompletter Ausbau der Schächte – insbesondere im unteren Teil – erforderlich ist. Dies hängt von der mechanischen Stabilität des Gebirges und von der Wasserführung der Klüfte ab. Da es sich um ein generisches Standortmodell handelt, wurde noch keine detaillierte Ausbauplanung durchgeführt. Es kann hier daher nur

ein Grobkonzept dargestellt werden. Die Auswahl der Ausbaumaterialien und die Dimensionierung des Ausbaus sind auf der Grundlage standortspezifischer, geologischer und hydrogeologischer Daten noch durch Auslegungsrechnungen zu ermitteln.

Im oberen Teil des Modells „mKBS-3“ wird als Deckgebirge (vgl. FEP „Deckgebirge“) eine ca. 200 m mächtige Verwitterungs- und Auflockerungszone des Kristallingesteins angenommen, die hydraulisch leitfähiger ist als das Wirtsgestein. Das unterlagernde Wirtsgestein besteht aus granitischen geklüfteten Gesteinen mit einer Ganggesteinsintrusion aus Lamprophyr. Das Gestein hat eine hohe Festigkeit und im Mittel eine geringe hydraulische Leitfähigkeit (vgl. FEP „Wirtsgestein“ und „Lösungen im Wirtsgestein“). Einzelne Klüfte können aber auch leitfähiger und stärker wasserführend sein.

Entsprechend dem skizzierten geologischen Aufbau ist ein Schachtausbau wie für die Schächte in Gorleben denkbar. In stark geklüfteten Bereichen kann die direkte Anströmung der Schachtsäule durch Injektionsmaßnahmen ins Gebirge hinein verringert werden.

Demnach könnte in den oberen hydraulisch leitfähigeren und wasserführenden 200 m des Modells „mKBS-3“ ein zweiwandiger, gleitender Schachtausbau eingesetzt werden, der darüber hinaus bis in eine Tiefe von 250 m u. GOK reicht. Der Außenausbau stützt sich an der Basis auf einem Aufstandsfundament ab, dass aus Stahlringen (T-Profil, Stahlgüte St 52-3) und Verfüllmörtel besteht. Der tragende gebirgsverbundene Außenausbau ist wasserdurchlässig und besteht aus Betonsteinen (Güteklasse B 55). Der Innenausbau setzt sich aus einer Asphaltfuge zu Abdichtzwecken, einem Stahlzylinder und einem inneren Betonmantel zusammen und erstreckt sich durch die ganze Schachtröhre. Da das Wirtsgestein aus standfesten, geringfügig wasserführenden Gesteinen besteht, kann hier der Innenausbau als gebirgsverbundener, einwandiger Ausbau bis zum Schachtsumpf fortgeführt werden.

Die Asphaltfuge hat eine Mächtigkeit von ca. 15 cm. Sie hat einerseits eine Dichtfunktion und andererseits – im oberen Teil – eine Ausgleichsfunktion für die Übertragung der Gebirgsspannungen vom Außenausbau auf den Innenausbau. Die Asphaltfuge wird unten mit Sandasphalt, darüber mit Gussasphalt der Güteklasse B 80 und oben mit Gussasphalt der Güteklasse B 200 befüllt. Da der Asphalt durch die Fugen der Betonsteine (Außenausbau) langsam ins Gebirge entweichen kann, wird der Asphaltpegel in der Nachverschlussphase absinken. Ggf. kann durch eine Anpassung der Asphaltrezeptur, also durch Wahl der Korngrößenverteilung der Zuschlagstoffe zum Bitumen, das Absinken verzögert werden.

Der anschließende Stahlblechmantel besteht aus Stahl der Güte 52-3. Die einzelnen Segmente werden lösungsdicht verschweißt.

Der monolithische Betoninnenausbau wird beim Schachtteufen in Abschnitten gegossen. Dieser Ausbau hat eine Bewehrung mit Betonstahl IV S. Da der Innenausbau unterhalb von 250 m u. GOK als einwandiger Ausbau den Gebirgsdruck komplett alleine abtragen muss, muss die Ausbaustärke hier deutlich erhöht sein. Das im Schachtsumpf befindliche Innenausbaufundament besteht aus bewehrten Betonkörpern (Betongüte B 45, Bewehrung IV S), Stahlringen mit T-Profil (Stahlgüte innen St E 460 und außen St 52-3) und einem umlaufenden Stahlblechmantel.

Der Schachtausbau wird für die Betriebszeit des Endlagers (ca. 70 bis 80 Jahre) ausgelegt. Er wird während der Nachverschlussphase korrodieren und dann versagen. Für die frühe Nachverschlussphase wird er aber den Lösungszutritt zum Schacht noch begrenzen. Dies ist von Vorteil, da bis zum Versagenszeitpunkt des Schachtausbaus die Einspannung der Widerlager der Schachtverschlüsse im Gebirge und die Aufsättigung des Bentonits in den Dichtelementen voranschreiten.

12.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck (Asphalt)	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität (Asphalt)	x	Mikrobenpopulation

12.5 Zeitliche Beschränkung

Die Funktionsdauer des Ausbaus ist hauptsächlich auf die Betriebsphase beschränkt.

12.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Der Schachtausbau stellt eine Randbedingung des vorgesehenen Endlagerkonzeptes dar. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

12.7 Ungewissheiten

- Bedeutung des Asphalts für die Entwicklung der Hydrochemie im Endlager.

12.8 Literaturquellen

- Andersson, C.J. (2007): Äspö Hard Rock Laboratory. Äspö Pillar Stability Experiment, Final report. Rock Mass Response to coupled thermal mechanical loading. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-07-01; Stockholm.
- BfS (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter. – Bundesamt für Strahlenschutz (BFS); Salzgitter.
- BfS (2009): Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. – Bundesamt für Strahlenschutz (BFS), A 281; Salzgitter.
- Ikonen, A. & Kalliomäki, M. (2004): ONKALO Underground Rock Characterisation Facility - Main Drawings Stage. – Posiva Oy, Working Report 2003-26; Olkiluoto.
- KTA 2201 (1990): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen. Teil 1: Grundsätze, Teil 2: Baugrund, Teil 3: Auslegung der baulichen Anlagen. – Sicherheits-technische Regel des kerntechnischen Ausschusses (KTA), Fassung Juni 1990.

- Linkamp, M. & Müller-Hoeppe, N. (2011): Ermittlung von Einwirkungen aus dem Deckgebirge auf die Schachtverschlüsse Gorleben 1 und Gorleben 2. Teil 1: Grundlagen zur Zusammensetzung der einwirkenden Deckgebirgswässer. – DBE TECHNOLOGY GmbH Arbeitspaket AP 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben; Peine.
- Read, R.S. (2004): 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory. – International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 8: 1251-1275.
- Reuther, E.U. (1989): Lehrbuch der Bergbaukunde. 1. Band. – 11. Aufl.: 812 S.; Essen (Glückauf).

13 Streckenausbau

NEA-Gruppe: 3.1.5 *Other engineered features*

13.1 Definition/Kurzbeschreibung

Der Streckenausbau ist die Stabilisierung der Streckenwandung eines Grubenbaus aus Gründen der Betriebssicherheit während der Betriebsphase. Das FEP beschreibt die Konstruktion eines Rampenausbaus sowie seine Eigenschaften.

13.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Zur Beurteilung des Gebirges zur Auslegung von Ausbausystemen sind einerseits die Eigenschaften des intakten Gesteins zu betrachten, andererseits ist eine Beschreibung des Kluftsystems notwendig. Zu diesem Zweck bieten sich verschiedene Klassifizierungssysteme (Rock mass classification schemes) für Festgesteine an (RQD, RMR, Q-System (Maidl et al. 2014)). Alle diese Systeme basieren darauf, einzelne Gesteinsparameter oder Parametergruppen so in einer Formel zusammenzufassen, dass sich die „Gebirgsqualität“ mit Hilfe eines einzelnen Wertes ausdrücken lässt. Aus diesem soll dann das passende Ausbausystem abgeleitet werden. In der Praxis werden diese Klassifizierungssysteme allerdings durch weitere analytische Verfahren ergänzt, da sie nicht in der Lage sind, jede geomechanische Problemstellung abzubilden (Anagnostou & Pimentel 2012).

Umfangreiche Erfahrungen bezüglich bergbaulicher Arbeiten in Kristallingesteinen liegen z. B. in Skandinavien vor. SKB nutzt ein eigenes Verfahren zur Gebirgsklassifikation und gibt zusätzlich die jeweiligen äquivalenten Klassen des Qualitäts(Q)-Systems an (SKB 2009). Die Modellierung des Gebirges am Standort Forsmark lässt auch das Aufstellen einer Verteilung dieser Gebirgsklassen entlang des Grubengebäudes zu. Demnach ist der überwiegende Anteil des Gebirges (ca. 90 %) gering geklüftet und hat annähernd isotrope Eigenschaften (Ground Type (GT 1)). Stärker geklüftetes, geblocktes Gestein, das auch wasserführende Störungen enthalten kann, tritt gelegentlich auf (GT 2) (< 10 %). Ein geringer Anteil des Gebirges (< 1 %) hat ein stark vernetztes Kluftnetzwerk, durch das das Gebirge bei einer Reaktivierung der Störungen in Blöcke zerfallen kann (GT 3). Zu großen Störungszonen wird ein Sicherheitsabstand eingehalten. Grundsätzlich ist also das Kristallingestein als Gebirge von mindestens „guter“ Standfestigkeit (Q-Wert > 10) zu betrachten. Zusätzlich unterteilt SKB (2009) auch das Gebirgsverhalten in drei Kategorien (Abschalungen und Löser durch Schwerkraft, gebirgsmechanische Spannungen und Fluidruck). Dabei sind verschiedene Kombinationen zwischen der Klassifikation der Standfestigkeit und des Gebirgsverhaltens möglich. Ungünstige Konstellationen ergeben sich dann, wenn die Grubenbaue um mehr als 30° von der Richtung der Hauptspannungsrichtung abweichen.

Das "Norwegian Geotechnical Institute" hat den Zusammenhang zwischen der Bewertung der Gebirgsqualität im Q-System und der entsprechend vorgeschlagenen Ausbaumethode beschrieben (NGI 2015). In die dort angeführte Gleichung zur Ableitung des Verhältnisses zwischen Auffahrung und Ausbau ("Excavation Support Ratio" ESR) geht neben der Gebirgsqualität die Grubenraumgeometrie ein. Bei Endlagerbergwerken liegt der ESR konservativ bei etwa 2,5 für temporäre und bei etwa 6,25 für dauerhafte Hohlräume. Für letztere werden die beiden Ausbauoptionen "systematische Gebirgsankerung" und "lokale Gebirgsankerung" empfohlen. Die Ankerung kann mit ca. 4–10 cm mächtigem Spritzbeton kombiniert werden, welcher "bewehrt" oder "unbewehrt" sein kann. Ankertyp, Ankerabstand und Ankerlänge müssen an die lokalen Verhältnisse angepasst werden.

Am Standort Forsmark wird jeder Grubenbau, unabhängig von der angetroffenen Standfestigkeit und dem Gebirgsverhalten mit Ausbau versehen (SKB 2009). Spritzbeton wird grundsätzlich mit Edelstahl-Fasern armiert und an der Firste und am oberen Rand der Stöße in deutlich größeren Mächtigkeiten, als vom Q-System empfohlen, verwendet. Diese Überdimensionierung schützt den Beton vor Dehydratation und die Einbauten an der Firste. Außerdem erleichtert der Beton das Erkennen von Sprödbbruch. Innerhalb der Strecken sind vor allem Drahtnetze statt Spritzbeton vorgesehen, um vor Abplatzungen zu schützen.

Zusätzlich zum Ausbau können Baustoffinjektionen in das Gebirge zur Herstellung der Standfestigkeit und zur Vermeidung von Lösungszuflüssen notwendig sein. Diese Injektionen werden in der Regel vorlaufend zum Vortrieb durchgeführt, um gering standfeste Bereiche durch Einbringen von z. B. Zement zu stabilisieren oder um wasserführende Klüfte gegenüber dem Grubengebäude abzudichten (NFF 2011, SKB 2010).

13.3 Komponentenbeschreibung

Da kaum Daten über deutsche Kristallinvorkommen vorliegen, wird – trotz der tieferen Lage der Endlagersohle in 600 m u. GOK (SKB: ca. 500 m, Posiva: 420 m) – auch bezüglich des Ausbaus exemplarisch auf die entsprechenden Planungen von SKB (2009) zurückgegriffen (Bertrams et al. 2017). Dies ist zulässig, da der Ausbau in den skandinavischen Konzepten aus Gründen der Konservativität überdimensioniert ist. Um eine negative Beeinflussung der als Verschluss- und Versatzmaterial eingebrachten Tone zu minimieren, wird ein "Niedrig-pH-Beton" vorgesehen, dessen genaue Rezeptur aber erst festgelegt werden kann, wenn die standortspezifische Hydrochemie bekannt ist.

In Analogie zu SKB (2009) ist für Gebirgsbereiche der Festigkeitsklasse GT 1 folgender Ausbau vorgesehen:

- Faserarmerter (Edelstahlfasern) Spritzbeton mit einer Stärke von 30 mm in der Firste und im oberen Meter der Stöße, kombiniert mit lokaler Ankerung in der Firste und den Stößen, Ankerdurchmesser: 25 mm, Ankerlänge: 3 m.

Für Gebirgsbereiche der Festigkeitsklassen GT 2 und GT 3 sieht das Konzept folgende Ausbaumaßnahmen vor:

- Faserarmerter (Edelstahlfasern) Spritzbeton mit einer Stärke von 50 mm in der Firste und im oberen Meter der Stöße, kombiniert mit
- lokaler Ankerung in den Stößen, Ankerdurchmesser: 25 mm, Ankerlänge: 3 m und
- systematische Ankerung in der Firste, Ankerdurchmesser: 25 mm, Ankerlänge: 3 m.

In den Überfahrungsstrecken ist (unabhängig von der Festigkeitsklasse) folgender Ausbau geplant:

- Stahlnetze und lokale Ankerung in der Firste und im oberen Meter der Stöße, Ankerdurchmesser: 25 mm, Ankerlänge: 3 m.

Der Streckenausbau wird für die Betriebszeit des Endlagers (ca. 70 bis 80 Jahre) ausgelegt. Er wird während der Nachverschlussphase korrodieren und dann versagen.

13.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck (Asphalt)	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität (Asphalt)	x	Mikrobenpopulation

13.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

13.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Das FEP ist wahrscheinlich, da der Streckenausbau eine Randbedingung des vorgesehenen Endlagerkonzeptes darstellt.

13.7 Ungewissheiten

Keine.

13.8 Literaturquellen

- Anagnostou, G & Pimentel, E. (2012): Zu den Felsklassifikationen mit Index-werten im Tunnelbau. – Geotechnik 35 Heft 2; Berlin (Ernst & Sohn Verlag).
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Maidl, B., Thewes, M. & Maidl, U. (2014): Handbook of Tunnel Engineering II Basics and Additional Services for Design and Construction. – Berlin (Ernst & Sohn).
- NFF (2011): Rock Mass Grouting. – Norwegian Tunneling Society (NFF), Publication N° 20; Oslo.
- NGI (2015): Using the Q-System Rock mass classification and support design. – Norwegian Geotechnical Institute (NGI); Oslo.
- SKB (2009): Underground Design Forsmark Layout D2 Rock mechanics and rock support. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-08-115; Stockholm.
- SKB (2010): Design, construction and initial state of the underground openings. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-18; Stockholm.

14 Rampenausbau

NEA-Gruppe: 3.1.5 *Other engineered features*

14.1 Definition/Kurzbeschreibung

Der Rampenausbau ist die Stabilisierung der Rampenwandung eines Grubenbaus aus Gründen der Betriebssicherheit während der Betriebsphase. Das FEP beschreibt die Konstruktion eines Rampenausbaus sowie seine Eigenschaften.

14.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Planung und Durchführung eines Rampenausbaus orientiert sich an Erfahrungen im Tunnelbau und im Bergbau (z. B. Anagnostou & Pimentel, 2012). Bei der Auslegung eines Ausbausystems in Festgesteinen ist die genaue Kenntnis der Gebirgseigenschaften und des Kluftsystems notwendig. Dabei können verschiedene Klassifizierungssysteme (rock mass classification schemes) für Festgesteine angewendet werden (RQD, RMR, Q-System (Maidl et al. 2014)). Alle diese Systeme basieren darauf, einzelne Gesteinsparameter oder Parametergruppen so in einer Formel zusammenzufassen, dass sich die „Gebirgsqualität“ mit Hilfe eines einzelnen Wertes ausdrücken lässt. Von diesem soll dann das passende Ausbausystem abgeleitet werden. In der praktischen Anwendung werden diese Klassifizierungssysteme allerdings durch weitere analytische Verfahren ergänzt, da sie nicht in der Lage sind, jede geomechanische Problemstellung abzubilden (Anagnostou & Pimentel 2012).

Umfangreiche Erfahrungen bezüglich bergbaulicher Arbeiten in Kristallingesteinen liegen z. B. in Skandinavien vor. SKB nutzt ein eigenes Verfahren zur Gebirgsklassifikation und gibt zusätzlich die jeweiligen äquivalenten Klassen des Qualitäts(Q)-Systems an (SKB 2009). Die Modellierung des Gebirges am Standort Forsmark lässt auch das Aufstellen einer Verteilung dieser Gebirgsklassen entlang des Grubengebäudes zu. Demnach ist der überwiegende Anteil des Gebirges (ca. 90 %) gering geklüftet und hat annähernd isotrope Eigenschaften (Ground Type (GT 1)). Stärker geklüftetes, geblocktes Gestein, das auch wasserführende Störungen enthalten kann, tritt gelegentlich auf (GT 2) (< 10 %). Ein geringer Anteil des Gebirges (< 1 %) hat ein stark vernetztes Kluftnetzwerk, durch das das Gebirge bei einer Reaktivierung der Störungen in Blöcke (GT 3) zerfallen kann. Zu großen Störungszonen wird ein Sicherheitsabstand eingehalten. Grundsätzlich ist also das Kristallingestein als Gebirge von mindestens „guter“ Standfestigkeit (Q-Wert > 10) zu betrachten. Zusätzlich unterteilt SKB (2009) auch das Gebirgsverhalten in drei Kategorien (Abschalungen und Löser durch Schwerkraft, gebirgsmechanische Spannungen und Fluidruck). Dabei sind verschiedene Kombinationen zwischen der Klassifikation der Standfestigkeit und des Gebirgsverhaltens möglich. Ungünstige Konstellationen ergeben sich dann, wenn die Grubenbaue um mehr als 30° von der Richtung der Hauptspannungsrichtung des Gebirges abweichen.

Das "Norwegian Geotechnical Institute" hat den Zusammenhang zwischen der Bewertung der Gebirgsqualität im Q-System und der entsprechend vorgeschlagenen Ausbaumethode beschrieben (NGI 2015). In die dort angeführte Gleichung zur Ableitung des Verhältnisses zwischen Auffahrung und Ausbau ("Excavation Support Ratio" ESR) geht neben der Gebirgsqualität die Grubenraumgeometrie ein. Bei Endlagerbergwerken liegt der ESR konservativ bei etwa 2,5 für temporäre und bei etwa 6,25 für dauerhafte Hohlräume. Für letztere werden die beiden Ausbauoptionen "systematische Gebirgsankerung" und "lokale Gebirgsankerung" empfohlen. Die Ankerung kann mit ca. 4–10 cm mächtigem Spritzbeton kombiniert werden, welcher "bewehrt" oder "unbewehrt" sein kann. Ankertyp, Ankerabstand und Ankerlänge müssen an die lokalen Verhältnisse angepasst werden.

Am Standort Forsmark wird jeder Grubenbau, unabhängig von der angetroffenen Standfestigkeit und dem Gebirgsverhalten mit Ausbau versehen (SKB 2009). Spritzbeton wird grundsätzlich armiert und an der Firste und am oberen Rand der Stöße in deutlich größeren Mächtigkeiten verwendet, als aufgrund der Festigkeitskategorien erforderlich. Diese Überdimensionierung schützt den Beton vor Dehydratation und die Einbauten an der Firste. Außerdem erleichtert der Beton das Erkennen von Sprödbbruch.

Zusätzlich zum Ausbau können Baustoffinjektionen zur Herstellung der Standsicherheit und zur Vermeidung von Lösungszuflüssen notwendig sein. Diese Injektionen werden in der Regel vorlaufend zum Vortrieb durchgeführt, um gering standfeste Bereiche durch Einbringen von z. B. Zement zu stabilisieren oder um wasserführende Klüfte gegenüber dem Grubengebäude abzudichten (NFF 2011, SKB 2010).

14.3 Komponentenbeschreibung

Es ist nicht eindeutig, ob aufgrund der geologischen Verhältnisse des Modells „mKBS-3“ ein kompletter Ausbau der Rampe – insbesondere im unteren Teil – erforderlich ist. Dies hängt von der mechanischen Stabilität des Gebirges und von der Wasserführung der Klüfte ab. Da es sich um ein generisches Standortmodell handelt, wurde noch keine detaillierte Ausbauplanung durchgeführt. Es kann daher hier nur ein Grobkonzept dargestellt werden. Die Auswahl der Ausbaumaterialien und die Dimensionierung des Ausbaus sind auf der Grundlage standortspezifischer, geologischer und hydrogeologischer Daten noch durch Auslegungsrechnungen zu ermitteln.

Im oberen Teil des Modells „mKBS-3“ wird als Deckgebirge (vgl. FEP „Deckgebirge“) eine ca. 200 m mächtige Verwitterungs- und Auflockerungszone des Kristallingesteins angenommen, die hydraulisch höher leitfähig ist als das Wirtsgestein. Das Deckgebirge zeichnet sich zudem durch eine verringerte mechanische Stabilität aus (Gebirgsklasse GT 2 und GT 3, SKB 2009).

Das unterlagernde Wirtsgestein besteht aus granitischen geklüfteten Gesteinen mit einer Ganggesteinsintrusion aus Lamprophyr. Das Gestein hat eine hohe Festigkeit (Gebirgsklasse GT 1 bis GT 2, (SKB 2009)) und im Mittel eine geringe hydraulische Leitfähigkeit (vgl. FEP „Wirtsgestein“ und „Lösungen im Wirtsgestein“). Einzelne Klüfte können auch leitfähiger und stärker wasserführend sein. In stark geklüfteten Bereichen kann die direkte Anströmung des Rampenausbaus durch Injektionsmaßnahmen verringert werden. Um die negative Beeinflussung der als Verschluss- bzw. Versatzmaterial eingebrachten Tone zu minimieren, wird ein "Niedrig-pH-Beton" vorgesehen, dessen genaue Rezeptur aber erst festgelegt werden kann, wenn die standortspezifische Hydrochemie bekannt ist.

Für die Gesteine des Deckgebirges sieht das Konzept folgende Ausbaumaßnahmen vor:

- Faserarmerter (Edelstahlfasern) Spritzbeton mit einer Stärke von 50 mm in der Firste und im oberen Meter der Stöße, kombiniert mit
- lokaler Ankerung in den Stößen, Ankerdurchmesser 25 mm, Ankerlänge: 3 m,
- systematische Ankerung in der Firste, Ankerdurchmesser 25 mm, Ankerlänge: 3 m.

Im darunter liegenden Wirtsgestein ist folgender Ausbau vorgesehen:

- Faserarmerter (Edelstahlfasern) Spritzbeton mit einer Stärke von 30 mm in der Firste und im oberen Meter der Stöße, kombiniert mit lokaler Ankerung in der Firste und den Stößen, Ankerdurchmesser 25 mm, Ankerlänge: 3 m

Der Rampenausbau wird für die Betriebszeit des Endlagers (ca. 70 bis 80 Jahre) ausgelegt. Er wird während der Nachverschlussphase korrodieren und dann versagen. Für die frühe Nachverschlussphase wird er aber den Lösungszutritt zur Rampe noch begrenzen. Dies ist von Vorteil, da bis zum Versagenszeitpunkt des Ausbaus die Einspannung der Widerlager der

Rampenverschlüsse im Gebirge und die Aufsättigung des Bentonits in den Dichtelementen voranschreiten.

14.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

14.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

14.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Das FEP ist wahrscheinlich, da der Streckenausbau eine Randbedingung des vorgesehenen Endlagerkonzeptes darstellt.

14.7 Ungewissheiten

Keine.

14.8 Literaturquellen

- Anagnostou, G & Pimentel, E. (2012): Zu den Felsklassifikationen mit Index-werten im Tunnelbau. – Geotechnik 35 Heft 2; Berlin (Ernst & Sohn Verlag).
- Maidl, B., Thewes, M. & Maidl, U. (2014): Handbook of Tunnel Engineering II Basics and Additional Services for Design and Construction. – Berlin (Ernst & Sohn).
- NFF (2011): Rock Mass Grouting. – Norwegian Tunneling Society (NFF), Publication N° 20; Oslo.
- NGI (2015): Using the Q-System Rock mass classification and support design. – Norwegian Geotechnical Institute (NGI); Oslo.
- SKB (2009): Underground Design Forsmark Layout D2 Rock mechanics and rock support. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-08-115; Stockholm.
- SKB (2010): Design, construction and initial state of the underground openings. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-18; Stockholm.

15 Technische Einrichtungen

NEA-Gruppe: 3.1.5 *Other engineered features*

15.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als "Technische Einrichtungen" werden aus betrieblichen Gründen in die Grubenräume eingebaute Komponenten betrachtet, die zum Ende der Betriebsphase nicht zurückgebaut werden und somit während der Nachverschlussphase im Grubengebäude verbleiben.

15.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der Betrieb eines Endlagers und Bergwerks erfordert eine Vielzahl von technischen Einrichtungen, die bei einer Schließung des Endlagers nur teilweise zurückgebaut werden können. Der bei einer Auffahrung von Grubenräumen in Kristallingesteinen erforderliche Ausbau in Schacht-, Rampen und Strecken wird aufgrund seiner Bedeutung für die Nachverschlussphase in eignen FEP beschrieben. Außerdem werden die für die Langzeitsicherheit relevanten Komponenten (Strecken- und Schachtverschlüsse, Bohrlochverschlüsse, Buffer und Versatz) in separaten FEP behandelt. Umfang und Art der technischen Einrichtungen ergeben sich einerseits aus den geologischen Rahmenbedingungen sowie andererseits aus den jeweiligen technischen und betrieblichen Konzepten. So können die Einrichtungen z. B. Schienen, Messeinrichtungen, Kabel für Stromversorgung und Kommunikation, Drainageleitungen, Fundamente und Anker von Geräten und Anlagen, Bauteile der Wetterführung sowie Fahrbahnbau umfassen. Diese sonstigen technischen Einrichtungen können unter anderem Metalle, Kunststoffe und Beton enthalten. Die Entscheidung, welche Einrichtungen im Bergwerk verbleiben können, erfordert vor allem eine Bewertung der Relevanz für die Systementwicklung in der Nachverschlussphase und die daraus resultierenden Konsequenzen für die Langzeitsicherheit. Das Konzept der in der Betriebsphase einzubringenden technischen Einrichtungen ist an die Anforderungen zur Erfüllung der Langzeitsicherheit anzupassen.

15.3 Komponentenbeschreibung

Das Konzept für das Modell „mKBS-3“ sieht zwei Schächte bzw. einen Schacht und eine Rampe, einen Infrastrukturbereich sowie mehrere Einlagerungsbereiche für die Bohrlochlagerung von Brennstabkaskillen mit Kupferhülle für ausgediente Brennelemente und Wiederaufarbeitungsabfälle sowie eine Strecken- bzw. Kammerlagerung für Forschungsreaktor Brennelemente in CASTOR®-Behältern und Strukturteilen aus der Brennelementekonditionierung in MOSAIK®-Behältern vor (Bertrams et al. 2017). Die Einlagerung erfolgt im Rückbau, so dass befüllte Einlagerungsstrecken und -bereiche bereits in der Betriebsphase abgeworfen werden. Am Ende der Betriebsphase werden alle restlichen Grubenräume mit Versatzstoffen verfüllt. Im Grubengebäude können sich nach dem Verschluss z. B. noch folgende technische Einrichtungen und Bauwerke befinden:

- Schienen,
- Messeinrichtungen, Leitungen für Strom, Kommunikation und Abwasser (Drainage),
- Fundamente von ehemaligen technischen Geräten und Anlagen,
- Anker und Stahl-/Synthetiknetze zur Sicherung der Firste und der Streckenstöße,
- Material vom Wege- und Fahrbahnbau.

Die im Endlager nach dem Verschluss zurückgebliebenen technischen Einrichtungen stellen zum Zeitpunkt der Schließung den Ist-Zustand dar. Bei der Umsetzung des konkreten Pla-

nungskonzeptes des Endlagers ist festzulegen, welche technischen Einrichtungen im Grubengebäude verbleiben dürfen und welche beraubt bzw. demontiert werden müssen. Entsprechende Mengenermittlungen sind anhand des konkreten Endlagerkonzeptes durchzuführen.

Beim Rückbau des Endlagers erfolgt eine Abwägung zwischen dem Aufwand für die Rückholung technischer Einrichtungen und den möglichen Auswirkungen (z. B. Fließpfade, Beeinflussung der Hydrochemie und Gasbildung). Komponenten, die die Wirksamkeit von Verschlussbauwerken beeinträchtigen können oder mögliche Fließpfade induzieren (z. B. Schienen und Kabeltrassen), werden vor dem Verschluss zurückgebaut.

15.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

15.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

15.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die technischen Einrichtungen stellen eine Randbedingung des vorgesehenen Endlagerkonzeptes dar. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

15.7 Ungewissheiten

- Sobald eine detaillierte Endlagerplanung durchgeführt werden kann, ist zu prüfen und im Hinblick auf die Langzeitsicherheit zu bewerten, welche Einrichtungen im Bergwerk verbleiben können und welche rückgebaut werden müssen.

15.8 Literaturquellen

Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.

16 Auflockerungszone und Abschalungen

NEA-Gruppe: 3.1.6 *Excavation damaged and disturbed zone*

16.1 Definition/Kurzbeschreibung

Eine Auflockerungszone (ALZ) ist ein durch die Auffahrung geschädigter Gebirgsbereich mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit und verminderter mechanischer Stabilität im konturnahen Bereich der Grubenräume.

Wenn die Restfestigkeit der ALZ überschritten wird, kann es zu Abschalungen und Löserfällen kommen.

16.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Eine ALZ (engl.: Excavation Damaged Zone (EDZ)) entsteht durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes im Gebirge und die damit verbundene Überschreitung der Schädigungsgrenze. Infolge der Auffahrung reduzieren sich die Radialspannungen an der Hohlraumkontur auf Null, gleichzeitig steigen die Axial- und insbesondere die Tangentialspannungen im Gebirge an und erhöhen die Spannungsdifferenz. Abhängig von der Höhe der Primärspannungen und ihrer Orientierung, den spezifischen Gesteinseigenschaften, der Hohlraumgeometrie, der Temperatur und der Mineralogie des Gebirges sowie durch Spannungsüberlagerungen aus benachbarten Grubenräumen werden die Gesteine deformiert und an der Kontur bei Überschreiten der Schädigungsgrenze durch Rissbildung eine Auflockerungszone ausbilden. Einflussfaktoren auf den Grad der Schädigung sind die Materialeigenschaften des Gesteins (inkl. Anisotropie), die natürlichen Kluft- und Störungssysteme, die Hohlraumgeometrie, die Auffahrungsmethoden, die Bewetterung sowie der Ausbau und die Offenstandszeiten.

Die Entstehung der ALZ in Kristallingesteinen wurde durch in situ Experimente in verschiedenen Untertagelaboren untersucht:

Grimsel (Schweiz)

Entsprechende Untersuchungen in einer Teststrecke im Felslabor Grimsel haben ergeben, dass infolge der Auffahrungen im Stollennahbereich geringfügige Spannungserhöhungen und Mikrorisse auftreten, die auf eine plastische Zone schließen lassen (max. Konvergenz 10 mm) (Frieg & Blaser 2012). An Klüften und Rissen kann es zu Scherbewegungen von bis zu 5 mm kommen. Hydraulische Tests des umgebenden Gebirges im 1 m Radius um die Strecke ergaben hydraulische Leitfähigkeiten von $8 \cdot 10^{-12}$ bis $3 \cdot 10^{-7}$ m/s. Die hohen Leitfähigkeiten sind dabei an Bereiche gebunden, in denen bereits geogene Störungen und Klüfte vorhanden waren. Die Ergebnisse der Modellierung des Flusses durch die ALZ nach Verschluss der Strecke lassen auf Grenzwerte für die effektive hydraulische Leitfähigkeit (nach Verschluss) zwischen $3 \cdot 10^{-11}$ und ca. $6 \cdot 10^{-8}$ m/s schließen.

Onkalo (Finnland)

Untersuchungen an der ALZ in Onkalo haben ebenfalls zu vergleichbaren Ergebnissen geführt (Mustonen et al. 2010, Posiva 2011, 2012, Hartley et al. 2014). Hier wurden speziell auch die Auswirkungen der Auffahrungstechnik (Bohren und Sprengen) auf die Ausbildung der ALZ untersucht. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Risse der Auflockerungszone kein durchgehendes streckenparalleles hydraulisches Netzwerk bilden. Besonders ausgeprägt ist die ALZ in der Streckensohle. Die Risse der ALZ sind relativ kurz und treten im Umfeld der Sprengbohrlöcher auf, wobei meist eine Verbindung zur Streckenkontur besteht. Daher ist die

ALZ keine durchgehende Lage, sondern besteht aus Bereichen mit verringerter Gesteinsqualität und erhöhter Auflockerung und Porosität. Die Risshäufigkeit und -intensität der ALZ wird auch durch geogene Störungen und Klüfte beeinflusst. Die Ausdehnung der ALZ beträgt 15–70 cm, wobei Werte von 30 cm am häufigsten sind. Die hydraulischen Leitfähigkeiten sind in den konturnahen Bereich bis 20 cm am höchsten (im Mittel $2,5 \cdot 10^{-8}$ m/s). Im Bereich von Verschlussbauwerken soll die ALZ zurückgeschnitten werden, wodurch die hydraulische Leitfähigkeit auf ca. $2,0 \cdot 10^{-10}$ m/s reduziert werden soll.

Äspö und Forsmark (Schweden)

Mit einer schonenden Auffahrungen durch Bohren und Sprengen wurde in Äspö – vor allem in der Sohle – eine 25–35 cm mächtige ALZ erzeugt, die aber in der Regel nicht zu einem über längere Strecken hydraulisch verbundenem Netzwerk führt (Ericsson et al. 2009, Olsson et al. 2009). Häufigkeit und Eigenschaften der Risse in der ALZ werden auch durch vorhandene geogene Störungen und Klüfte beeinflusst. Die hydraulischen Leitfähigkeiten variieren über drei Größenordnungen, wobei die mittlere Leitfähigkeit bei $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s liegt. Dies entspricht ungefähr einer Permeabilität von 10^{-15} m².

In Forsmark werden die hydraulischen Standortbedingungen, z. B. die Häufigkeit und Verbreitung von hydraulisch leitenden Störungen und Klüften und deren Abhängigkeit von der Tiefe, als besonders sicherheitsrelevant angesehen (SKB 2011). Weiterhin wird die Erstellbarkeit des Endlagers von gesteinsmechanischen Eigenschaften, wie der Wahrscheinlichkeit und dem Umfang der Abschalungen in Einlagerungsbohrlöchern vor der Einlagerung bestimmt (Bäckblom 2009, Martin 2005, SKB 2009). Unterhalb von 300 m gibt es kaum Hinweise, dass die Größenordnung der horizontalen Spannungen an Störungen signifikant zunimmt. Daher führt in Forsmark eine Auffahrung des Endlagers zwischen 400 und 500 m nicht zu einer deutlichen Zunahme der Eintrittswahrscheinlichkeit für auffahrungsbedingte Abschalungen in den Grubenräumen.

Entsprechend den Angaben im Designreport SKB (2009) ist der in situ Spannungszustand des Gebirges in Forsmark in der Endlagerteufe nicht so hoch, dass er relevante spannungsinduzierte Stabilitätsprobleme, wie z. B. Abschalungen in Einlagerungsbohrlöchern, erzeugen wird. Jedoch gibt es Ungewissheiten bezüglich der zu erwartenden Gebirgsspannungen somit entsprechend auch bezüglich der erforderlichen Anpassungen des Endlagerdesigns. Die Bewertung der Bandbreite möglicher Gebirgsspannungen deutet darauf hin, dass die vorgesehenen Sicherungsmaßnahmen ausreichen, um die Sicherheit des Endlagers zu gewährleisten. Zu diesen Maßnahmen gehören der Ausbau (Spritzbeton und in Einlagerungsstrecken Anker/Netz-Verbundausbau) sowie die Anordnung und der Querschnitt von Grubenräumen, um die Intensität der Abschalungen auch im Bereich der Rampe, des Zentralteils und der Hauptstrecken, die nicht optimal zur Gebirgsspannung ausgerichtet werden können, zu minimieren.

Abschalungen treten in den Einlagerungsbohrlöchern durch mechanische Spannungsumlagerungen infolge der Bohrerherstellung nur selten auf. Die Häufigkeit von Abschalungen nimmt durch thermomechanische Spannungen nach Beginn der Einlagerung der Abfallgebinde durch Wechselwirkung zwischen beladenen und vorbereiteten Bohrlöchern zu. Untersuchungen haben gezeigt, dass in ca. 1,7–3,3 % (= 102–198 von 6.000) der Einlagerungsbohrlöcher Abschalungen von mehr als 5 cm (bis 9 cm sehr selten) auftreten können (SKB 2009). Resultierende Abweichungen von der vorgesehenen Bohrlochgeometrie sowie die technischen Möglichkeiten der Bohr- und Auffahrungstechniken müssen berücksichtigt werden, wenn die Übereinstimmung mit den Auslegungsanforderungen gezeigt werden soll. Die größeren Ausbrüche sollen durch das Quellen des Bentonits gefüllt werden.

Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden zur Minimierung der Eintrittswahrscheinlichkeit für die Abschalungsbildung parallel zur maximalen horizontalen Hauptspannung im Gebirge aufgeföhren (Martin 2005). So eine Anordnung reduziert auch das Potential für thermisch indu-

zierte Abschalungen. Dabei können Abweichungen von bis zu 30° akzeptiert werden. Bei stärkeren Abweichungen entstehen tangentiale Spannungskonzentrationen, die die Gesteinsfestigkeit überschreiten, so dass Abschalungen auftreten.

16.3 Komponentenbeschreibung

Entsprechend den Erfahrungen in Grimsel, Onkalo und Äspö wird z. Z. davon ausgegangen, dass ein deutsches Endlager in Kristallingestein ebenfalls durch schonendes Bohren und Sprengen aufgefahren würde (Bertrams et al. 2017). Es wird für das Modell „mKBS-3“ unterstellt, dass das Gebirge in ähnlicher Weise auf diese Art der Auffahrung reagiert, wie in den genannten Untersuchungsstandorten. Teilweise wurden auch die Gesteinsparameter für die geologische Charakterisierung des Modells aus diesen Gesteinen abgeleitet (vgl. Mrugalla et al. 2020). Allerdings werden die gebirgsmechanischen Rahmenbedingungen, auch aufgrund der größeren Tiefenlage des generierten Endlagers (ca. 600 m u. GOK), von den Verhältnissen in den Untertagelaboren abweichen.

Durch die parallele bis subparallele Anordnung der Bohrlochüberfahrungsstrecken zur maximalen horizontalen Hauptspannung des Gebirges werden konturnahe Auflockerungen in den Einlagerungsbereichen minimiert. Bei den anderen Grubenräumen (Schächte, Rampen, Infrastrukturräume, Verbindungs- und Wetterstrecken) wird aufgrund der Praktikabilität und Funktionalität sowie betrieblicher Anforderungen nicht auszuschließen sein, dass sie in einem Winkel von > 30° zur maximalen horizontalen Hauptspannung im Gebirge angeordnet sein werden. Dann wird es zu tangentialen Spannungsspitzen an der Hohlraumkontur kommen, die zu starken Auflockerungen und Abschalungen führen können. Daher werden die Schächte und Rampen ausgebaut und die untertägigen Grubenräume mit Spritzbeton stabilisiert.

In den Einlagerungsbereichen kann es durch die Wärmeentwicklung der hochradioaktiven Abfälle zu thermomechanischen Spannungen kommen, die zu Abschalungen führen können. Daher werden die Bohrlochüberfahrungsstrecken in den Einlagerungsbereichen mit Anker-Stahlnetz-Verbundausbau stabilisiert. Bei der Einlagerung wird direkt nach der Befüllung der Einlagerungsbohrlöcher die Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Versatz komplett verfüllt, so dass keine Abschalungen mehr auftreten können. Sobald alle Bohrlochüberfahrungsstrecken eines Einlagerungsbereiches befüllt sind, werden auch die Verbindungsstrecken verfüllt und abgeworfen.

Als Referenzwerte für die ALZ im Grubengebäude werden Mittelwerte von Messungen in Untertagelaboren zugrunde gelegt. Demnach wird eine streckenparallele, diskontinuierliche ALZ unterstellt, die insbesondere im Sohlenbereich der Strecken stark ausgebildet ist. Die Mächtigkeit der ALZ wird an den Stößen und an der Firste ca. 30 cm und an der Sohle ca. 50 cm betragen. Es wird eine mittlere Permeabilität für die ALZ von $2,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ angenommen (Bandbreite 10^{-13} bis 10^{-17} m^2). Sie ist somit ähnlich wie im geklüfteten Wirtsgestein. In Bereichen mit Abschalungen kann die Permeabilität noch deutlich höher sein.

Im Bereich von Verschlussbauwerken soll die ALZ im konturnahen Bereich ggf. zurückgeschnitten werden, wodurch die Permeabilität auf ca. $2,0 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ reduziert werden soll.

Im Bereich der Schächte und Rampen im Kristallingestein kann die Ausdehnung der ALZ aufgrund der Größe der Grubenräume und der langen Offenstandszeit auch größer sein (bis wenige Meter). Die ALZ wird vor der Errichtung von Schacht- und Rampenverschlüssen in den Einbaupositionen durch schonendes Nachschneiden der Kontur (mittels einer Teilschnittmaschine) so weit wie möglich entfernt. Die möglicherweise verbleibende Restschädigungszone kann bei Bedarf durch Injektionen mittels eines Dichtmittels (z. B. Zementsuspensionen oder Wasserglas) abgedichtet werden.

16.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

16.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

16.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Nach Erfahrungen im Bergbau und in den Untertagelaboren bildet sich nach der Auffahrung von Grubenräumen im Kristallingestein abhängig von den Randbedingungen eine Auflockerungszone. Das Auftreten der ALZ ist daher "wahrscheinlich".

16.7 Ungewissheiten

- Relevanz der ALZ und möglicher Abschalungen für die Sicherheitsbewertung zur Einlagerungsoption „mKBS-3“.

16.8 Literaturquellen

- Bäckblom, G. (2009): Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-08-08.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (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, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Ericsson, L O., Brinkhoff, P., Gustafson, G. & Kvartsberg, S. (2009): Hydraulic features of the Excavation Disturbed Zone. Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-09-45; Stockholm, Sweden.

- Frieg B. & Blaser, P.C. (2012): Excavation Disturbed Zone Experiment (EDZ). – National Co-operative for Disposal of Radioactive waste (Nagra), Tech.Rep. 98-01; Wettingen.
- Hartley, I., Hoek, J. & Swan, D. (2014): Modeling the performance of the CLOSURE design for the Olkiluoto Disposal Facility. – Posiva Oy, Work.rep. 2013-64; Olkiluoto.
- Martin, C.D. (2005): Preliminary assessment of potential underground stability (wedge and spalling) at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-05-71; Stockholm.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönneke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mkBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Mustonen, S., Norokallio, J., Mellanen, S., Lehtimäki, T. & Heikkinen, E. (2010): EDZ09 project and related EDZ studies in ONKALO 2008–2010. – Posiva Oy, Working Report 2010-27: 404 pp.; Eurajoki, Finland.
- Olsson, M., Markström, I., Pettersson, A. & Sträng, M. (2009): Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-09-39; Stockholm, Sweden.
- Posiva (2011): Olkiluoto Site description 2011. – Posiva 2011-02; Olkiluoto.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Siren, T. (2011): Fracture Mechanics Prediction for Posiva's Olkiluoto Spalling Experiment (POSE). – Posiva, WR 2011-23; Olkiluoto, Eurajoki.
- SKB (2009): Underground design Forsmark. Layout D2. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-08-116; Stockholm.
- SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project Volume I. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-11-01; Stockholm.

17 Korrosionsprodukte aus Metallkorrosion

NEA-Gruppe:	2.2.1	<i>Container characteristics and properties</i>
	2.2.2	<i>Overpack characteristics and properties</i>
	3.1	<i>Repository characteristics and properties</i>

17.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Korrosionsprodukte werden die Feststoffe inklusive ihrer Eigenschaften bezeichnet, die sich infolge einer Korrosion der in das Endlager eingebrachten Metalle bilden.

17.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In situ Untersuchungen in Untertagelabors zeigen, dass der Sauerstoffverbrauch im Grubengebäude durch mikrobielle Prozesse innerhalb einiger wenigen Wochen nach Verschluss eines Endlagers zu erwarten ist (z. B. Puigdomenech et al. 2001). Danach finden nur noch anaerobe Korrosionsprozesse ggf. unter Verbrauch von Wasser statt. Die Art der entstehenden Korrosionsprodukte hängt von der Art des korrodierenden Metalls, der Lösungszusammensetzung und der Temperatur ab.

17.3 Komponentenbeschreibung

Für die Bildung von Korrosionsprodukten im Nahfeld eines Endlagers sind hauptsächlich die Metalle der Behälter, der Abfallmatrices und geotechnische Einrichtungen wie Bohrlochliner zu betrachten (Bertrams et al. 2017, Stark et al. 2014, Wolf et al. 2012).

1. Innenbehälterkörper, Primär- und Sekundärdeckel der BSK-RCu bestehen aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3, Werkstoff 1.6210). Behälter und Sekundärdeckel haben eine 5 cm dicken Kupferummantelung.
2. Die Primärbehälter (CSD-V, CSD-B und CSD-C) bestehen aus Edelstahl (Werkstoff 1.4833).
3. In den BSK-RCu verwendete Brennelement-Büchsen bestehen aus Edelstahl (1.4541).
4. Von der Wasserstoffversprödung können auch das Zircaloy der Hüllrohre der abgebrannten Kernbrennstoffe und die Strukturteile der Brennelemente (Werkstoffe 1.451, 1.4568, 1.4571, Inc 717, Inc X-750) betroffen sein.

Unter anaeroben Bedingungen wird durch Korrosion von eisenhaltigen Materialien (Stähle, Gusseisen) Wasserstoffgas, geringe Konzentrationen von Fe(II) und Magnetit (Fe_3O_4) als wahrscheinlichstes Endprodukt gebildet (Posiva 2012). Dies bestätigen Beobachtungen an archäologischen und industriellen eisenhaltigen Materialien, die unter reduzierenden Bedingungen korrodiert sind (Smart & Adams 2006). Je nach Gehalt an Sulfiden und Karbonaten in der Lösung können sich auch andere Sekundärphasen bilden wie Sulfid-Spezies (CuFeS_2 oder Fe_xS) bzw. Karbonat-Spezies (FeCO_3 oder $\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$). Vergleichbare Korrosionsprodukte wurden auch von Romaine et al. (2013) für die anaerobe Korrosion von eisenhaltigen Materialien in Kontakt mit NaCl-Wässern gefunden, wie sie auch in granitischen Wässern auftreten können (vgl. Mrugalla et al. 2020). Unter Verbrauch von Wasser bilden sich eine innere Korrosionsschicht direkt an der Metalloberfläche und eine sich an die innere Schicht anschließende äußere Korrosionsschicht. Die innere Schicht besteht in den meisten Fällen aus Magnetit (Fe_3O_4) und Maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), während die äußere aus Siderit (FeCO_3) in vielen Fällen

begleitet durch Chukanovit ($\text{Fe}(\text{OH})_2\text{CO}_3$) besteht (Romaine et al. 2013). Thermodynamische Untersuchungen zeigen, dass sich Chukanovit mit der Zeit langsam zu Siderit umwandeln kann (Romaine et al. 2013). In Anwesenheit von gelöstem Sulfid können sich in diesen Schichten weitere Korrosionsprodukte wie FeS , Fe_3S_4 und FeS_2 bilden (Romaine et al. 2013; Sherar et al. 2013). Bei einer hohen Dosisleistung der ionisierenden Strahlung von 300 Gy/h wurde neben Magnetit als Hauptkorrosionsprodukt auch die Bildung von geringen Mengen an FeOOH beobachtet (Smart et al. 2008).

Die Dichten von Magnetit (5.200 kg/m^3), Maghemit (4.900 kg/m^3), Siderit (3.900 kg/m^3) und Chukanovit (3.600 kg/m^3) sind geringer als die eines Stahls ($7.500\text{--}8.000 \text{ kg/m}^3$) oder Gusseisens ($6.800\text{--}7.800 \text{ kg/m}^3$). Dementsprechend sind die Volumina der Korrosionsprodukte größer als die der korrodierenden Metalle. Daher könnte eine korrosionsbedingte Expansion der Materialien erwartet werden. Jedoch zeigen die Experimente mit legierten und unlegierten Stählen sowie Gusseisen, dass unter den endlagerrelevanten Kompressionsdrücken von 1–10 MPa keine Expansion aufgrund der Bildung von Korrosionsprodukten erfolgt (Smart et al. 2006). Als ein Grund dafür wurde die hohe Kompaktionsfähigkeit der Korrosionsprodukte genannt, die zu deren Umverteilung in die Unebenheiten der rauen Oberfläche und andere verfügbare Hohlräume führte. Diese Ergebnisse werden auch durch Studien an bis zu 2300 Jahre alten archäologischen Analoga gestützt, bei denen an eisenhaltigen Proben, die durch kupferhaltige Materialien in ihrer Geometrie begrenzt waren, keine Verformung der Proben beobachtet wurden (Smart & Adams 2006).

Direkt nach Einlagerung der Behälter ist noch Sauerstoff vorhanden. Bei Anwesenheit von Feuchtigkeit kann sich an der Oberfläche der Kupfer-ummantelten Endlagerbehälter durch Korrosion eine Cu(I) oder Cu(II) -Oxidschicht bilden und durch Passivierung die weitere Korrosion verhindern (Posiva 2012). Die anaerobe Korrosion von Kupfer verläuft extrem langsam (siehe FEP „Metallkorrosion“). Entsprechend sind über den Bewertungszeitraum im Vergleich zur Korrosion von eisenhaltigen Materialien viel geringere Mengen an Korrosionsprodukten zu erwarten. Unter anaeroben Bedingungen beeinflusst die Zusammensetzung der Lösung die Art der Korrosionsprodukte entscheidend. Untersuchungen in deionisiertem Wasser mit sauerstofffreiem Kupfer unter reduzierenden Bedingungen deuten darauf hin, dass sich eine bisher unbekannte Kupferhydroxidverbindung H_xCuO_y bilden kann (Szakálos et al. 2007) s. auch FEP „Metallkorrosion“. Die Ergebnisse sind bisher allerdings nicht reproduziert worden und werden in der Literatur kritisch diskutiert, siehe z. B. (King 2010). Unter Anwesenheit von Sulfidionen wird die Oberfläche aktiviert und es bildet sich letztendlich Cu_2S . Sind zusätzlich Chloridionen vorhanden, kann sich nach Aktivierung der Oberfläche Kupferchlorid CuCl_2 bilden (Macdonald & Sharifi-Asl 2011), siehe auch FEP „Metallkorrosion“.

Falls bei der Bildung einer Korrosionsschicht aus porösem Eisensulfid an der Metalloberfläche in der kontaktierenden Lösung extrazelluläre Polymere aus der Aktivität von sulfatreduzierenden Mikroben vorhanden sind, können diese in die Korrosionsschicht eingebaut werden (Beech et al. 2004). Bereits ein Einbau von 10^{-8} g/cm^2 solcher Polymere kann die passivierende Wirkung der Korrosionsschicht am Edelstahl eliminieren (Beech et al. 1999). Eisen(III)-reduzierende Mikroben können die Bildung von Magnetit in der Korrosionsschicht an der Stahloberfläche und somit seine passivierende Wirkung verhindern (Schütz et al. 2015). An der Kupfer-Oberfläche führt die Aktivität der Mikroben zu einer veränderten Morphologie des Malachits ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) und zur Bildung von Cuprit (Cu_2O) neben dem sich auch unter abiotischen Bedingungen bildenden Tenorit (CuO) in der Korrosionsschicht (Vargas et al. 2014). Das Vorhandensein von Mikroben und der Einbau von extrazellulären Polymeren in die Korrosionsschicht kann die Passivierung der Kupferoberfläche verhindern sowie die Heterogenität und Oberflächenrauheit im Vergleich zu abiotischen Bedingungen erhöhen (Vargas et al. 2014).

Generell sind Korrosionsprodukte (insbesondere Eisenoxide/-hydroxide) gute Sorbentien für Kationen und können zur Radionuklidrückhaltung im Nahbereich beitragen.

17.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

17.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

17.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Bildung von Korrosionsprodukten setzt zwangsläufig mit Korrosionsreaktionen im Gruben- gebäude ein.

17.7 Ungewissheiten

- Da die Korrosion der eisenhaltigen Materialien erst auftritt, wenn eine Kupferummantelung versagt, ist das Ausmaß der Bildung entsprechender Korrosionsprodukte ungewiss.

17.8 Literaturquellen

- Beech, I. B., Gaylarde, C. C.: (1999) Recent advances in the study of biocorrosion – an over- view. – Revista de Microbiologia 30, 177–190.
- Beech, I. B., Sunner, J. (2004): Biocorrosion: towards understanding interactions between bio- films and metals. – Current Opinion in Biotechnology 15, 181–186.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin- gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- King, F. (2010): Critical review of the literature on the corrosion of copper by water. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-10-69: 51 pp.; Stockholm, Swe- den. ISSN 1404-0344.

- Macdonald, D.D. & Sharifi-Asl, S. (2011): Is copper immune to corrosion when in contact with water and aqueous solutions? – Swedish Radiation Safety Authority (SSM), Research 2011:09: 247 pp.; Stockholm, Sweden. ISSN: 2000-0456.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönnke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Puigdomenech, I., Ambrosi, J.-P., Eisenlohr, L., Lartigue, J.-E., Banwart, S.A., Bateman, K., Milodowski, A.E., West, J.M., Griffault, L., Gustafsson, E., Hama, K., Yoshida, H., Kotelnikova, S., Pedersen, K., Michaud, V., Trotignon, L., Rivas Perez, J. & Tullborg, E.-L. (2001): O₂ depletion in granitic media. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Report TR-01-05; Stockholm.
- Romaine, A., Sabot, R., Jeannin, M., Necib, S. & Refait, Ph. (2013): Electrochemical synthesis and characterization of corrosion products on carbon steel under argillite layers in carbonated media at 80°C. – *Electrochimica Acta* 114, 152–158.
- Schütz, M.K., Schlegel, M.L., Libert, M., & Bildstein, O. (2015): Impact of iron-reducing bacteria on the corrosion rate of carbon steel under simulated geological disposal conditions. – *Environmental science & technology* 49, 7483-7490.
- Sherar, B.W.A., Keech, P.G. & Shoesmith, D.W. (2013): The effect of aerobic corrosion on anaerobically-formed sulfide layers on carbon steel in dilute near-neutral pH saline solutions. – *Corrosion Science* 77, 257–264.
- Smart, N.R., Rance, A.P. & Fennell, P.A.H. (2006): Expansion due to the anaerobic corrosion of iron. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Report TR-06-41; Stockholm.
- Smart, N.R., Rance, A.P. & Werme, L. O. (2008): The effect of radiation on the anaerobic corrosion of steel. – *Journal of Nuclear Materials* 379, 97–104.
- Smart, N.R. & Adams, R. (2006): Natural analogue for expansion due to the anaerobic corrosion of ferrous materials. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-06-44: 37 pp.; Stockholm, Sweden. ISSN 1404-0344.
- Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Keller, S. & Gerardi, J. (2014): Projekt AnSichT – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Dokumentation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Technischer Bericht, TEC-22-2014-AP, FKZ: 02E11061B; Peine.
- Szakálos, P., Hultquist, G. & Wikmark, G. (2007): Corrosion of copper by water. *Electrochemical and Solid-State Letters*. – Vol. 10, no. 11: C63–C67. ISSN 10990062.
- Vargas, I. T., Alsina, M. A., Pavissich, J. P., Jeria, G. A., Pastén, P. A., Walczak, M., & Pizarro, G. E. (2014): Multi-technique approach to assess the effects of microbial biofilms involved in copper plumbing corrosion. – *Bioelectrochemistry* 97, 15-22.
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A. & Weber, J.R. (2012): FEP-Katalog für die VSG - Dokumentation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 7, GRS-283, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG); Köln.

18 Korrosionsprodukte aus Betonkorrosion

NEA-Gruppe: 3.1 *Repository characteristics and properties*

18.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Korrosionsprodukte werden hier die Feststoffe inklusive ihrer Eigenschaften bezeichnet, die sich infolge einer Korrosion der in das Endlager eingebrachten zementbasierten Baustoffe (Betone) bilden.

18.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Nach Verschluss des Endlagers wird Grundwasser in die Hohlräume eindringen und die geotechnischen Barrieren werden sich mit Wasser aufsättigen. Bei Kontakt mit Grundwasser werden sich die zementbasierten Baustoffe durch Korrosion verändern (s. FEP „Korrosion von zementbasierten Baustoffen“). Die entstehenden Korrosionsprodukte hängen von den verwendeten Baustoffen und der Zusammensetzung des Grundwassers ab.

Die Korrosion von Zementphasen setzt bereits vor Endlagerverschluss aufgrund einer Wechselwirkung mit dem CO_2 der Grubenatmosphäre ein (Lagerblad & Trägårdh 1994). CO_2 löst sich im Porenwasser des Betons und erzeugt CO_3^{2-} -Ionen, die eine Karbonatisierung des Betons hervorrufen. Dadurch entsteht aus dem Calciumhydroxid der Zementphasen Calcit als Korrosionsprodukt. Die Dicke der karbonatisierten Schicht beträgt für einen Qualitätsbeton maximal 5 mm und schützt den darunterliegenden Beton vor weiterer Karbonatisierung durch die reduzierte Permeabilität der calcithaltigen Schicht (Lagerblad & Trägårdh 1994). Ähnlich wie bei der Karbonatisierungsreaktion führt eine Reaktion des gelösten Magnesiums mit dem Calciumhydroxid der Zementphasen zu einer Abnahme der Permeabilität des Betons durch die Bildung von Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) als Korrosionsprodukt (Lagerblad & Trägårdh 1994).

Aufgrund der Alkali-Kieselsäure-Reaktion zwischen den alkalischen Zementphasen und amorphen Silikaten im Beton entstehen C-S-H Phasen als Korrosionsprodukte, die ein höheres Volumen als die Edukte der Reaktion haben und eine Abnahme der Porosität im Beton verursachen. Sofern die Reaktion langsam abläuft – dies ist u.a. der Fall, wenn ein Zement mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt in der Betonrezeptur verwendet wird – wird es nicht zu Rissbildungen im Zement kommen (Lagerblad & Trägårdh 1994).

Höhere Temperaturen als bei der Betonherstellung (oberhalb von 70 °C) und Zufluss von Lösungen mit alkalischen Ionen nach der Sättigung des Grubengebäudes werden die Stabilität des Ettringits, der sich beim Abbinden von Zement bildet, durch eine Freisetzung von Sulfat aus seiner Struktur negativ beeinflussen (Lagerblad & Trägårdh 1994). Ettringit wird darauffolgend eine Reaktion mit Chlorid unter Bildung des Friedelschen Salzes als Korrosionsprodukt eingehen. Hier wird keine große Volumenzunahme erwartet (Lagerblad & Trägårdh 1994). Nach Auslaugung und Verlust der Pufferkapazität im alkalischen pH-Bereich werden sich auch Zeolithe, Feldspäte und Tonminerale bilden. Unter diesen Bedingungen wird sich die Permeabilität des degradierten Zementkörpers erhöhen.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass Portland-Zementphasen im Beton zu einer Mischung aus Tobermorit (C-S-H), Ettringit, Friedel'schem Salz, Hydrogranat sowie verschiedenen Tonmineralen, Zeolithen korrodieren können (Lagerblad & Trägårdh 1994).

18.3 Komponentenbeschreibung

Im Endlager ist die Verwendung von zementbasierten Baustoffen in verschiedenen Bereichen mit unterschiedlicher Funktion geplant (Bertrams et al. 2017). Für die Standsicherheit der aufgefahrenen Hohlräume ist Spritzbeton als Strecken- und Schachtausbau in Widerlagern der Verschlussbauwerke vorgesehen.

- Für Verschlüsse in gestörten Gebirgsbereichen sollen Betonwiderlager zur Fixierung des Bentonit-Dichtelements verwendet werden.
- Als Referenzkonzept zur Abdichtung von Erkundungsbohrungen ist eine serielle Anordnung von Tiefbohr- und Quellzementen, Schwerspat und hochverdichteten Tonpellets vorgesehen.
- Als Abschlusswiderlager an den Enden der Einlagerungsstrecken soll Niedrig-pH-Beton verwendet werden.

Permeabilitäts- und Porositätsänderungen werden Auswirkungen auf den Wasser- und Stofftransport im Beton haben. Generell bilden die Zementphasen Sorbentien für Radionuklide. Dies gilt speziell auch für einen späten Zustand der Zementkorrosion, in dem sich Tonmineral und Zeolithe bilden, die besonders gute Sorptionseigenschaften für Kationen aufweisen. Die alkalische Lösung, die sich bei der Zementkorrosion bildet, kann mit Mineralen des Wirtsgesteins und Tonmineralen in den Verschlussbauwerken reagieren (s. FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“ und „Alteration von Bentonit“).

18.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

18.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

18.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Bildung von Korrosionsprodukten setzt zwangsläufig mit Korrosionsreaktionen im Grubengebäude ein.

18.7 Ungewissheiten

Keine.

18.8 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Lagerblad, B. & Trägårdh, J. (1994): Conceptual model for concrete long time degradation in a deep nuclear waste repository. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Report TR-95-21; Stockholm.

19 Lösungen im Grubengebäude

NEA-Gruppe: 3.1 *Repository characteristics and properties*

19.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP „Lösungen im Grubengebäude“ umfasst die Menge von Lösungen im Grubengebäude (inkl. Auflockerungszone) sowie deren Eigenschaften und chemische Zusammensetzung, pH-Wert, Eh-Wert, Ionenstärke und Sättigungsgrad gegenüber Festphasen.

19.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Während der Betriebsphase werden Lösungen durch die Bewetterung in das Bergwerk eingebracht. Durch die Einlagerung von Abfällen sowie die Versatz- und Verschlussmaterialien werden weitere Lösungen eingebracht. Zu den Lösungen im Grubengebäude werden dabei nur die physikalisch gebundenen Wasseranteile gerechnet. Chemisch gebundenes Wasser ist Teil der stofflichen Bestandteile der Komponenten des Endlagersystems.

Lösungen werden vor allem durch Eigenschaften, wie Konzentrationen der Hauptbestandteile, pH-Wert, Eh-Wert, Ionenstärke und Sättigungsgrad gegenüber Festphasen, gekennzeichnet. Bedeutsam sind die verfügbaren Stoffmengen und die chemische Wirksamkeit (Reaktivität) der Fluide und Feststoffe. Wechselwirkungen von Lösungen mit Feststoffen und Gasen verändern die Lösungszusammensetzung bzw. das hydrochemische Milieu (Lösung-Feststoff-System) stetig. Mikrobielle (biotische) und abiotische Umsetzungsprozesse, wie die Zersetzung von organischen Stoffen, können zusätzlich einwirken. Die Lösungszusammensetzungen unterscheiden und verändern sich räumlich und zeitlich in einzelnen Bereichen eines Endlagers.

Zusammensetzungen von Poren- und Grundwasser in Kristallingesteinen in Schweden und Finnland werden z. B. in (SKB 2006, SKB 2011, Posiva 2012) beschrieben. Diese Daten lassen sich aber nicht auf die Verhältnisse in Deutschland übertragen. In Deutschland gibt es überregionale Auswertungen zur Zusammensetzung von Grundwasser im Kristallingestein (z. B. Stober et al. 2014), es fehlen aber detaillierte Analysen in Teufen über 300 m, in denen ein Endlager errichtet würde.

19.3 Komponentenbeschreibung

Während der Betriebsphase kondensiert der Feuchtegehalt der Grubenluft, der durch die Bewetterung eingetragen wird (Wetterlösung). Des Weiteren fallen Lösungen während des Grubenbetriebs an. Es wird davon ausgegangen, dass Betriebs- und Wetterlösung aus der Betriebsphase gefasst und abgeleitet werden und keine Lösungen aus der Bewetterung mehr vorliegen. Nach Verschluss des Endlagers wird die Bewetterung eingestellt, so dass keine weitere Luftfeuchte eingetragen wird.

Die mit den eingelagerten Gebinden für wärmeentwickelnde Abfälle eingebrachten Restfeuchten sind gering. Restfeuchte wird auch über technische Verfüll- und Verschlussmaterialien eingebracht. Da diese Materialien im technischen Konzept (Bertrams et al. 2017) noch nicht spezifiziert sind, können keine quantitativen Angaben zu den eingebrachten Lösungsmengen gemacht werden. Nach dem Verschluss des Endlagers werden zusätzlich Lösungen über die Schächte, aus dem geklüfteten Wirtsgestein und Deckgebirge (siehe FEP „Lösungen im Wirtsgestein“ und „Lösungen im Deckgebirge“) in das Grubengebäude zutreten.

Lösungen im Grubenbau bestimmen das Lösungs-Feststoff-System (hydrochemisches Milieu) in den Grubenbauen entscheidend und bilden so die Voraussetzung für wichtige Prozesse, wie z. B. die Korrosion der Abfallmatrix, der Versatz- und Verschlussmaterialien sowie von Metallen, die Zersetzung von Organika, die Mobilisierung sowie die Auflösung und Ausfällung von Radionukliden. Die Lösungen im Grubenbau beeinflussen den Stofftransport (bzw. die Migration) im Grubengebäude und auch relevante Eigenschaften von Gesteinen und Versatzstoffen, wie z. B. die Spannungsverhältnisse von Gesteinen und die Kompaktion von Versatz. Durch Anwesenheit von Lösungen werden mikrobielle Abbauprozesse von organischen Bestandteilen der Abfälle und Versatzstoffe ausgelöst oder beschleunigt (siehe FEP „Mikrobielle Prozesse“).

Frieren die Lösungen ein, z. B. durch klimatische Einflüsse wie Permafrost, stehen sie in dieser Zeit den meisten Prozessen nicht mehr zur Verfügung.

Lösungen gelangen im Grubenbau in Kontakt mit Versatzmaterial und anstehenden Gesteinen und treten mit diesen in chemische Wechselwirkungen (siehe FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“). Infolge dessen verändern sich Lösungszusammensetzungen und -mengen sowie auch das Feststoffvolumen. Die Lösungszusammensetzung bestimmt Viskosität und Dichte, welche sich auch auf die Strömungsvorgänge im Grubengebäude auswirkt.

Mit zunehmender Lösungsmenge erhöhen sich Lösungspegel und Fluiddruck in den Grubenbauen. Durch den unterschiedlichen Anstieg des Lösungspegels in hydraulisch verbundenen Grubenbauen entstehen Fluiddruckdifferenzen, die Strömungsvorgänge auslösen.

19.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur		Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
x	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität		Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

19.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

19.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Lösungen im Grubengebäude stellen eine Randbedingung des Endlagersystems dar.

19.7 Ungewissheiten

- Die Höhe der Lösungsmengen in den Behältern ist noch nicht bewertet.
- Die zeitliche und räumliche Variation der Zusammensetzung der Lösung im Grubengebäude kann sehr hoch sein und ist mit einer hohen Ungewissheit behaftet. Diese wird vor allem verursacht durch die Ungewissheiten in folgenden Parametern:
 - der räumlichen Verteilung der verschiedenen Materialien im Grubengebäude
 - der Geschwindigkeit der Wechselwirkung der zutretenden Lösungen mit den Materialien im Grubengebäude.
 - der Geschwindigkeit des Austauschs bzw. der Durchmischung der unterschiedlichen Lösungen im Grubengebäude.
 - der Zusammensetzung der zutretenden Lösung zu späten Zeiten, z.B. nach zukünftigen Klimaänderungen.
- Daraus folgt, dass chemische Zusammensetzung, pH-Wert, Eh-Wert, Ionenstärke und Sättigungsgrad gegenüber Festphasen nicht bekannt sind.

19.8 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Performance Assessment 2012. – Posiva Oy, Report, 2012-04; Eurajoki.
- SKB (2006): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main report of the SR-Can project. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report: TR-01-30; Stockholm.
- SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Volume I. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR 11-01.
- Stober, I., Wolfram, M. & Birner, J. (2014): Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland. – Zeitschrift geologischer Wissenschaften, 41/42, 5-6: 339-380.

20 Gase im Grubengebäude

NEA-Gruppe: 3.1 *Repository characteristics and properties*

20.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses FEP beschreibt die zu einem gegebenen Zeitpunkt in einem Grubenbau vorliegende Menge und Zusammensetzung an Gasen.

20.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Der Gasdruck in einem Grubenbau ergibt sich über das allgemeine Gasgesetz unter der Berücksichtigung der Randbedingungen der herrschenden Temperatur und des Volumens im Grubenbau. Die Menge an Gasen wird üblicherweise in Mol angegeben.

Gase haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Bei Gasen ergibt sich die Wärmeleitfähigkeit direkt aus der Art der Gase und dem Gasdruck, solange die mittlere freie Weglänge der Teilchen klein gegen die Dimension des Volumens ist, in dem das Gas eingeschlossen ist. Bei idealen Gasen ergeben sich der thermische Ausdehnungskoeffizient direkt aus der Temperatur und die Kompressibilität aus dem Fluiddruck.

20.3 Komponentenbeschreibung

Die Menge und Zusammensetzung der Gase variieren mit der Zeit. Zu Beginn befindet sich Luft (u. a. N_2 , O_2) im Grubengebäude. Da angenommen werden muss, dass es von Beginn an Endlagerbehälter gibt, die Defekte aufweisen, können sich in der Gasphase auch Radionuklide befinden. Die Menge der eingeschlossenen Luft in jedem Grubenbau wird durch das freie Hohlraumvolumen und die Porosität und Sättigung im Versatz (s. FEP „Versatz“) sowie der eventuell vorhandenen geotechnischen Bauwerke (s. FEP „Streckenausbau“ usw.) bestimmt. Nach dem Verschluss des Endlagers wird der Sauerstoff der Luft durch aerobe Korrosionsprozesse mit der Zeit verbraucht und andere Gase werden gebildet, wie beispielsweise Wasserstoff durch die anaerobe Korrosion von Eisen (vgl. FEP „Metallkorrosion“) oder Methan und Kohlendioxid durch die Zersetzung von Organika (s. FEP „Alteration von Organika“ und „Mikrobielle Prozesse“).

Zusätzlich zu nicht-aktiven Gasen können sich in der Gasphase auch geringe Mengen radioaktiver Gase befinden, die für die Radionuklid Ausbreitung betrachtet werden müssen. Dies betrifft vor allem ^{14}C , das in der Form von Kohlendioxid oder Methan auftritt. Für den Fall, dass Brennelement-Behälter mit anfänglichen Defekten im Endlager vorhanden sind, können sich schon mit Beginn der Nachverschlussphase Radionuklide in der Gasphase befinden.

Neben den gasbildenden und -verbrauchenden Prozessen (FEP „Metallkorrosion“, „Mikrobielle Prozesse“, „Thermochemische Sulfatreduktion“, „Radiolyse“, „Radioaktiver Zerfall“ und „Korrosion der Brennstoffmatrix“) ergeben sich Veränderungen der Gasmenge zusätzlich durch Zu- bzw. Abstrom von Gasen (siehe FEP „Strömungsvorgänge im Grubengebäude“) und die Lösung von Gasen in der flüssigen Phase entsprechend dem Henry-Gesetz (FEP „Phasenübergänge“, „Lösen und Ausgasen“). Manche Gase wie CO_2 stehen neben der Lösung auch mit festen Phasen im Gleichgewicht. Liegen Gasgemische in bestimmten Volumenverhältnissen vor, kann es prinzipiell zu einer Verbrennung kommen (siehe FEP „Zündung von Gasgemischen“).

20.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur		Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
x	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität	x	Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
x	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität		Mikrobenpopulation

20.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

20.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Gase sind im Endlager als Randbedingung immer vorhanden.

20.7 Ungewissheiten

- Die Ungewissheiten der Gasbildungsraten und gebildeten Gasmengen hängen direkt ab von der Ungewissheit der stofflichen Zusammensetzung der Abfallbestandteile, der Umsetzungsgeschwindigkeit der gasbildenden Prozesse und der Lösungsmengen und -zusammensetzung im Grubengebäude.

20.8 Literaturquellen

21 Übertägige Erkundungsbohrungen

- NEA-Gruppe: 3.1.4 *Borehole seals*
 3.1.6 *Other engineered features*

21.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Geometrie der Erkundungsbohrungen, die an der Erdoberfläche angesetzt wurden und durch das Deckgebirge bis in das Wirtsgestein reichen, sowie relevante Eigenschaften ihrer Abdichtungen und der Kontaktzone.

21.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die übertägigen Erkundungsbohrungen und Altbohrungen werden im Forschungsprojekt CHRISTA-II als Teil des Grubengebäudes betrachtet, auch wenn sie keine direkte Verbindung zu diesem aufweisen.

Schwerpunkte der übertägigen geologischen Erkundungsarbeiten an potenziellen Endlagerstandorten in kristallinen Wirtsgesteinen sind die Lokalisierung von tektonischen Störungszonen oder Bereichen erhöhter Klüftigkeit sowie die Erfassung der räumlichen Ausdehnung von möglichst homogen zusammengesetzten Wirtsgesteinsblöcken (Posiva 2005, 2012).

Die Ausweisung potenziell geeigneter Standortregionen in kristallinen Wirtsgesteinen erfolgt vor allem auf der Grundlage struktur- und hydrogeologischer Informationen. Die Erfassung großer Störungszonen im kristallinen Gestein erfolgt zunächst anhand kleinmaßstäbiger geologisch-geophysikalischer Erkundungsarbeiten, wie z. B. gravimetrische und aeromagnetische Messungen (Posiva 2005, 2012). In den folgenden Schritten werden detailliertere Untersuchungen in räumlich eng begrenzten Gebieten durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassen neben der geologischen Oberflächenkartierung und geophysikalischen Messungen, tiefreichende Erkundungsbohrungen für geologische und/oder hydrogeologische Untersuchungen im Gebirge.

Einen wichtigen Stellenwert hat im Zuge der übertägigen Erkundungsarbeiten die hydrogeologische Charakterisierung des Deckgebirges und des Wirtsgesteins. Neben Untersuchungen in geologischen Erkundungsbohrungen werden hierfür häufig spezielle Bohrprogramme für hydrogeologische Bohrungen, Pegelbohrungen oder Brunnen sowie spezielle geophysikalische Methoden eingesetzt (vgl. Schreiner & Kreysing 1998, Langguth & Voigt 2004). An den Bohrungen können Pumpversuche sowie Tracer- und Injektionstests unter Einsatz von Packern und Drucksensoren (z. B. SKB 2007) durchgeführt werden. Die Endteufen der hydrogeologischen Bohrungen bleiben zum Schutz der geologischen Barriere i.d.R. deutlich über der Einlagerungssohle (Posiva 2005).

Die Kerne der Erkundungsbohrungen dienen zur petrographischen bzw. lithologischen Ansprache, zur Bewertung des Alterationsgrades, zur Analyse des Gesteinsgefüges sowie der thermischen, mechanischen und hydraulischen Eigenschaften. Von besonderer Wichtigkeit sind Aussagen zu Mineralneubildungen in Störungen und Klüften. Weitere Daten werden an den Erkundungsbohrungen durch geophysikalische Messverfahren gewonnen.

Für die Erfassung seismischer Ereignisse bzw. neotektonisch aktiver Störungszonen ist ein mikroseismisches Messnetz an der Erdoberfläche sowie in Bohrungen erforderlich (SKB 2005a, b, 2008, 2009).

In Schweden werden zur Lokalisierung von Störungszonen bei einem mehrere 10er Meter mächtigen Deckgebirge oberhalb des kristallinen Wirtsgesteins gezielt Erkundungsbohrungen niedergebracht, in denen auch bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt werden. Zur Erfassung der räumlichen Lage und der Eigenschaften der Störungszonen werden häufig geneigte Bohrungen verwendet. Anzahl, Länge und Verlauf der Bohrungen werden an die geologischen Verhältnisse angepasst. Dabei wurden z. B. in Forsmark und Oskarshamn um eine zentrale Tiefbohrung herum jeweils mehrere flachere Bohrungen angeordnet.

21.3 Komponentenbeschreibung

Bezüglich der Berücksichtigung von Erkundungsbohrungen und deren Verschluss im Rahmen des Konzeptes „mKBS-3“ wird auf das Konzept, das im Zuge der schwedischen Standortuntersuchung entwickelt wurde (SKB 2005a, b, 2007, 2010), zurückgegriffen. Die Charakterisierung des Wirtsgesteins und seiner regionalen Ausbildung basiert ggf. auf Daten von vorhandenen Bohrungen, die für andere Zwecke gestossen wurden (z. B. Rohstoffexploration, Geothermie). Es ist davon auszugehen, dass das übertägige Bohrprogramm hydrogeologische Bohrungen zur Untersuchung der hydraulischen Leitfähigkeit des Gebirges, und Tiefbohrungen zur Untersuchung von Deckgebirge und Wirtsgestein umfasst. Schachtvorbohrungen dienen ebenfalls der übertägigen Erkundung werden aber im Zuge des späteren Schachtabteufens überfahren und sind dann nicht mehr existent. Die Lage der notwendigen Tiefbohrungen wird bei der Planung des Grubengebäudes dahingehend berücksichtigt, dass ein Sicherheitsabstand eingehalten wird, der nicht durch Bohrungen oder Auffahrungen geschädigt werden darf. Die erforderliche Größe des Sicherheitsabstandes ist noch durch Prozessanalysen zu definieren.

Die hydrogeologischen Bohrungen werden voraussichtlich Durchmesser von 130–200 mm aufweisen. Die Verrohrung wird vor der Verfüllung der Bohrungen weitgehend gezogen. Die Verfüllung erfolgt nach berg- und wasserrechtlichen Anforderungen, wobei meist Zement-Bentonit-Gemische, Füllsand in Kombination mit Tonsperren und – in geklüfteten Bereichen – Kies als Füllmaterialien verwendet werden.

Die Erkundungsbohrungen, die das Einlagerungsniveau im Kristallingestein erreichen, werden voraussichtlich Durchmesser von ca. 56–120 mm aufweisen. Vor der Verfüllung werden die Standrohre gezogen und die Schutzstandrohre überbohrt.

Da die von Übertage gebohrten Tiefbohrungen potenzielle Wegsamkeiten zwischen der Einlagerungssohle und der Biosphäre darstellen können, ist Ihre Verfüllung von großer Bedeutung. Das Verfüllkonzept für die Bohrung unterhalb des Deckgebirges orientiert sich an dem Konzept von SKB (2010). Demnach werden die Bohrungsabschnitte in kompakten Gebirgsbereichen mit hoch verdichteten Bentonit-Elementen verschlossen (Jobmann & Burlaka 2021). Die Bohrlochkontur wird hier mit perforierten Kupferrohren versehen, damit das Grundwasser zutreten und den Bentonit aufsättigen kann. Im Bereich von Klüften wird ein Verschluss aus Niedrig-pH-Zement eingebracht. Dieses Material hat lediglich eine Stützfunktion für die Bohrlochkontur und angrenzende Dichtelemente und muss keine niedrige hydraulische Leitfähigkeit haben. Der oberste Teil des Bohrlochs wird mit kompaktiertem Ton, Zement (im Bereich von Klüften) sowie einem Gesteinszylinder im obersten Teil verschlossen.

Zur Beurteilung der hydraulischen Wirksamkeit eines verfüllten Bohrlochs sind neben den hydraulischen Eigenschaften des Verschlusses auch die Kontaktzone und die Auflockerungszone (ALZ) von Bedeutung (vgl. FEP „Auflockerungszone und Abschalungen“). Die hydraulische Leitfähigkeit der Kontaktzone kann – vor allem in der ersten Zeit nach der Verfüllung – um mehrere Größenordnungen über der Leitfähigkeit des umgebenden Gebirges liegen (Ericsson et al. (2009), Frieg & Blaser (2012), Mustonen et al. (2010), Olsson et al. (2009)). Beim Bohrvorgang kann es an Klüften zu Abschalungen an der Bohrlochwand kommen. Es kann nicht

vollständig ausgeschlossen werden, dass nach dem Verfüllen der Bohrungen noch Resthölräume verbleiben. Allerdings trägt das Quellen der Verschlussmaterialien auch zur vollständigen Ausfüllung dieser Bereiche bei.

Bei eventuell vorhandenen Altbohrungen ist entweder die Verfüllung nicht bekannt oder die Verfüllung, die gemäß wasserrechtlichen oder bergrechtlichen Anforderungen durchgeführt wurde, genügt häufig nicht den Anforderungen an die Langzeitsicherheit. In diesen Fällen können die Bohrungen entweder überbohrt und neu verfüllt werden oder die Bohrungspositionen werden in der Grubengebäudeplanung berücksichtigt und jeweils durch einen Sicherheitspfeiler vom Grubengebäude getrennt.

21.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

21.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

21.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die übertägigen Erkundungsbohrungen sind Teil des Erkundungsprogramms. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

21.7 Ungewissheiten

- Es ist zu prüfen, ob und wenn ja welcher Sicherheitsabstand zu eventuell verworfenen Erkundungsbohrungen eingehalten werden sollte.

21.8 Literaturquellen

- Ericsson, L O., Brinkhoff, P., Gustafson, G. & Kvartsberg, S. (2009): Hydraulic features of the Excavation Disturbed Zone. Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), R-09-45; Stockholm, Sweden.
- Frieg, B. & Blaser, P.C. (2012): Excavation Disturbed Zone Experiment (EDZ). – National Co-operative for Disposal of Radioactive waste (Nagra), Tech.Rep. 98-01; Wetingen.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallinegestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Langguth, H.-R. & Voigt, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. – 2. überarb. u. erw. Aufl.; Berlin (Springer).
- Mustonen, S., Norokallio, J., Mellanen, S., Lehtimäki, T. & Heikkinen, E. (2010): EDZ09 project and related EDZ studies in ONKALO 2008–2010. – Posiva Oy, Working Report 2010-27: 404 pp.; Eurajoki, Finland.
- Olsson, M., Markström, I., Pettersson, A. & Sträng, M. (2009): Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), R-09-39; Stockholm, Sweden.
- Posiva (2005): Olkiluoto Site Description 2004. – Posiva Oy, Report, Volume 1; Olkiluoto.
- Posiva (2012): Olkiluoto Site Description 2011. – Posiva Oy, Report 2011-02; Eurajoki.
- Schreiner, M. & Kreysing, K. (1998): Geotechnik Hydrogeologie, Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. – Band 4.; Berlin (Springer).
- SKB (2005a): Site investigation Oskarshamn – annual report 2005. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB); Stockholm.
- SKB (2005b): Site investigation Forsmark – annual report 2005. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB); Stockholm.
- SKB (2007): RD&D Programme 2007. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-07-02; Stockholm.
- 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; 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, Stockholm.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the closure. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-17; Stockholm.

22 Untertägige Erkundungsbohrungen

- NEA-Gruppe: 3.1.4 *Borehole seals*
 3.1.6 *Other engineered features*

22.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Geometrie der untertägigen Erkundungsbohrungen im Wirtsgestein sowie relevante Eigenschaften ihrer Abdichtungen und der Kontaktzone.

22.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die untertägige Standorterkundung hat das Ziel, alle Daten bereit zu stellen, die für die Durchführung der standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse und für die Planung des Endlagerbergwerkes sowie für die Optimierung des Endlagerkonzeptes und die Planung der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen erforderlich sind. Dazu werden die thermischen, mechanischen, hydraulischen und chemischen Eigenschaften des Wirtsgesteins einschließlich der Störungen und Klüfte, die Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren sowie die Auswirkungen des Endlagerbergwerkes und der Abfälle auf die geologische Barriere standortbezogen untersucht. Auf diese Weise werden die Gesteinsvolumina identifiziert, die für die Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe geeignet sind.

Ergänzend zu den Schächten und Strecken müssen zur Erfassung der geologischen Verhältnisse im Umfeld des Grubengebäudes geologische Erkundungsbohrungen erstellt werden. Neben der Erfassung der Petrographie ist die Dokumentation der Störungen und Klüfte sowie der Hydrogeologie von besonderer Bedeutung. Aufgrund des möglichen Einflusses von Alterationsprozessen auf die Barriereigenschaften der Gesteine müssen umfangreiche petrographische und geochemisch-mineralogische Untersuchungen, vor allem im Umfeld von Störungen, durchgeführt werden.

Die Bohrungen werden ausgehend von Strecken, speziellen Bohrorten oder Infrastrukturräumen gebohrt, haben Längen von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern und sind je nach Untersuchungsziel unterschiedlich geneigt (1-90 Grad). Die Standarddurchmesser liegen zwischen 52 und 146 mm. Ein Teil der Bohrungen wird gekernt und/oder geophysikalisch vermessen. Zusätzlich zu den geologischen Erkundungsbohrungen werden bei der untertägigen Erkundung zahlreiche Bohrungen für wissenschaftliche Versuche, zur Installation von Messinstrumenten, zur Streckenplanung oder zur gezielten Beprobung der Wirtsgesteinsinformation gestoßen. Durchmesser und Länge dieser Bohrungen werden den Versuchen oder der Versuchstechnik angepasst.

Zur Charakterisierung von auffahrungsnahen Störungs- und Kluftzonen werden in kristallinen Gesteinen häufig seismische Messungen in einer Bohrung bzw. tomographische Messungen zwischen Bohrungen durchgeführt. Der Abstand zwischen diesen Bohrungen variiert zwischen einem und mehreren 10er Metern.

Trotz der generell mit der Teufe abnehmenden hydraulischen Leitfähigkeit können in Kristallingesteinen in endlagerrelevanten Tiefenbereichen stark wasserführende Störungen und Klüfte vorkommen, die ein eingeschränktes Isolationspotenzial der geologischen Barriere zur Folge haben können. Bei den untertägigen Standorterkundungsarbeiten muss deshalb nachgewiesen werden, dass die Gesteine im geplanten Einlagerungsbereich nur eine geringe tektonische Beanspruchung bzw. Kluft Häufigkeit aufweisen und Grundwassermigrationspfade weitgehend fehlen.

Bei der hydrogeologischen Charakterisierung der Wirtsgesteine werden an Erkundungsbohrungen Pumpversuche, Wasserdruckversuche, Fluid-Logging, Slug-Tests, Injektionstests, Tracerversuche sowie Langzeitdiffusionsversuche durchgeführt. Zur Charakterisierung von Kluftsystemen werden die hydrogeologischen Tests häufig in Bohrlochfächern durchgeführt, die unter Umständen mehrere Kluftsysteme anschneiden und damit die Möglichkeit geben, die räumliche Vernetzung der Klüfte zu untersuchen (z. B. Liedtke et al. 1994 (Grimsel), SKB 2008 (TRUE-Experiment)). Die Auswahl der anzuwendenden Bohrlochtests richtet sich vor allem nach den hydraulischen Leitfähigkeiten der zu analysierenden Gesteinsformationen. Ergänzend zu den genannten Untersuchungen erfolgen Analysen der chemischen und isotopenge- ochemischen Zusammensetzung von Formationswässern, Kluftwässern bzw. Tiefenwässern sowie Bestimmungen der Temperatur, elektrischen Leitfähigkeit, des pH-Wertes und der Dichte der Lösungen. Anwendungsbeispiele für die untertägige hydrogeologische Erkundung von Standorten in kristallinen Gesteinen sind in Nagra (1999) und SKB (2007, 2008) dargestellt.

Im Rahmen der geomechanischen Standorterkundung werden ebenfalls Bohrungen durchgeführt, die für die Ermittlung der in situ Spannungsverhältnisse mittels Extensometer, Inklinometer und Überbohr- bzw. Hydrofrac-Methode genutzt werden (Fecker & Reick 1996, Read et al. 1998). Erfahrungen der Erkundung des finnischen Endlagerstandortes Olkiluoto (Posiva 2005) und des URL Grimsel (Pahl & Heusermann 1991) belegen das häufige Vorkommen von deutlichen geomechanischen Anisotropien in kristallinen Gesteinen, gepaart mit stark mit der Teufe oder der Nähe zu mächtigen Störungszonen variierenden Gebirgsspannungsbeträgen.

Bohrlochlöcher stellen potentielle Wegsamkeiten während der Nachverschlussphase dar. Daher ist ihr qualitätsgesicherter und dauerhafter Verschluss Teil des Verfüll- und Verschlusskonzeptes (SKB 2010). Vor dem Verschluss müssen alle Einbauten (Verrohrung, Packer etc.) entfernt werden. Ein entsprechendes Bohrlochverschlusskonzept bestehend aus Bentonit, Ton und Betonkomponenten wurde für die skandinavischen Projekte entwickelt, in der STRIPA Mine erprobt und es wird im Endlager für schwach und mittelradioaktive Abfälle in Forsmark (SFR) verwendet (Pusch & Ramquist 2007). Die Bentonit-Dichtelemente erreichen nach ihrer Aufsättigung eine hydraulische Leitfähigkeit von $2 \cdot 10^{-12}$ m/s.

22.3 Komponentenbeschreibung

Die untertägige Erkundung durch Bohrungen erfolgt im Anschluss an die übertägige Erkundung (vgl. FEP „Übertägige Erkundungsbohrungen“) ggf. aus einem Erkundungsbergwerk sowie später im Zuge der Auffahrung des Endlagerbergwerkes, wobei sich Ziele und Umfang der Erkundung ändern. Notwendige thermische, mechanische, chemische und hydraulische Daten zur Charakterisierung des Wirtsgesteins werden durch Bohrungen und den damit verbundenen Messungen gewonnen. (Bertrams et al. 2017, Jobmann et al. 2016).

Während der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers werden vor allem Bohrungen gestossen, die der Auffahrung (Streckenvorbohrungen) dienen. Diese Bohrungen werden, soweit die Bohrungsergebnisse den Erwartungen entsprechen, im Zuge der weiteren Streckenauffahrung überfahren und sind dann nicht mehr existent. Bohrungen mit ungünstigem Ergebnis werden ähnlich wie die anderen Erkundungsbohrungen qualitätsgesichert verfüllt. Bereits vorhandene Bohrlöcher aus der Erkundungsphase oder Altbohrungen werden bei der Grubengebäudeplanung berücksichtigt und, soweit sie eine Relevanz für die Langzeitsicherheit haben, mit ausreichendem Abstand umfahren. Das Kluftinventar muss in seiner Lage an den potenziellen Grenzen der Einlagerungsbereiche detailliert untersucht werden. Innerhalb der Einlagerungsbereiche werden die Eigenschaften des Gesteins vor allem durch geophysikalische Messungen und nur in Ausnahmefällen durch Erkundungsbohrungen verifiziert, wobei Sicherheitsabstände zu vorgesehenen Einlagerungsbohrlöchern einzuhalten sind.

Die Erkundungs-, Untersuchungs-, Geotechnik- und Betriebsbohrungen weisen meist Durchmesser von ca. 52 bis 146 mm auf. Sie haben Längen von wenigen Metern bis zu mehreren 100 m und sind je nach Untersuchungsziel unterschiedlich geneigt (1-90 Grad). Vor der Verfüllung werden alle technischen Komponenten (Verrohrungen, Packer etc.) so weit wie möglich entfernt.

Die qualitätsgesicherte Verfüllung der untertägigen Bohrungen ist wesentlich, da sie einerseits potenzielle Wegsamkeiten für Fluide darstellen können und andererseits die Funktion von Verschlussbauwerken beeinträchtigen können.

Das für das Modell „mKBS-3“ vorgesehene Verschlusskonzept entspricht dem skandinavischen Konzept (SKB 2010). Demnach wird das Bohrloch in wenig gestörten Gebirgsbereichen mit hoch kompaktiertem Bentonit verschlossen (Jobmann & Burlaka 2021). Die Bohrlochkontur wird mit perforierten Kupferrohren versehen, damit das Grundwasser Zutreten und den Bentonit aufsättigen kann. Die Einbau-Trockendichte des Bentonits beträgt ungefähr 1.900 kg/m^3 , der Quelldruck während der Aufsättigung ca. 0,6 MPa. Im Bereich von Klüften soll ein Element aus Niedrig-pH-Silica-Zement eingebracht werden. Der Bohransatzpunkt kann durch einen Kupferverschluss und/oder durch einen Betonpfropfen verschlossen werden. Die axiale Druckfestigkeit der Verschlüsse beträgt mehr als 30 MPa. Die Scherfestigkeit und die Verformungseigenschaften können durch die Zumischung von cm-großen Quarzit-Fragmenten zum Zement verbessert werden.

Zur Beurteilung der hydraulischen Wirksamkeit eines verfüllten Bohrlochs sind neben den hydraulischen Eigenschaften des Verschlusses auch die der Kontaktzone und der Auflockerungszone von Bedeutung (Brenner & Jedelhauser 1989). Die hydraulische Leitfähigkeit dieser Kontaktzone kann – vor allem in der ersten Zeit nach der Verfüllung um mehrere Größenordnungen über der Leitfähigkeit des umgebenden Gebirges liegen. Beim Bohrvorgang kann es durch wechselnde lithologische Eigenschaften oder an Klüften zu Abschalungen an der Bohrlochwand kommen. Dass nach dem Verfüllen – vor allem bei horizontalen Bohrungen – Resthohlräume verbleiben, kann nicht vollständig ausgeschlossen werden. Allerdings trägt das Quellen der Baustoffe auch zur vollständigen Ausfüllung dieser Bereiche bei.

22.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluidruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

22.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

22.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die untertägigen Erkundungsbohrungen sind Teil des Erkundungsprogramms. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

22.7 Ungewissheiten

- Es ist zu prüfen, ob und wenn ja welcher Sicherheitsabstand zu eventuell verworfenen Erkundungsbohrungen eingehalten werden sollte.

22.8 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Brenner, R.P. & Jedelhauser, P. (1989): Bohrlochversiegelung: Konzept und Machbarkeits-nachweis. – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), NTB 89-26:136 S.; Wettingen.
- Fecker, E. & Reick, G. (1996): Baugeologie.- Enke Verlag, Stuttgart.
- Jobmann, M., Becker, D., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Nos-eck, U., Krone, J., Weber, J.R. & Weitkamp, A. (2016): Forschungsprojekt CHRISTA. Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ: 02E11375A/B, TEC-20-2016-AB; Peine.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Liedtke, L., Götschenberg, A., Jobmann, M. & Siemering W. (1994): Felslabor Grimsel – Bohr-lochkranzversuch - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Stofftransport in geklüftetem Fels. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), NTB 94-02; Hannover.
- Nagra (1999): Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN), Grimsel test site in-vestigation phase V (1997-2002). – Wettingen, Schweiz.
- Pahl, A. & Heusermann, S. (1991): Die Bestimmung der Gebirgsspannungen im Salzgebirge unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Stoffverhaltens.- In Wittke, W. (ed.): Forschr. 7. Internat. Kongr. f. Felsmechanik, Band 3, Aachen.
- Posiva (2005): Olkiluoto Site Description 2004, Vol.1-3. – POSIVA Rep. 2005-3, Olkiluoto.
- Pusch R. & Ramqvist G, (2007): Borehole project – Final report of Phase 3. – Svensk Kärn-bränslehantering AB (SKB), R-07-58.
- Read, R.S., Chandler, N.A. & Dzik E.J. (1998). In situ strength criteria for tunnel design in highly-stressed rock mass. – Internat. J. Rock Mech. Min. Sci., 35: 261–278.

- SKB (2007): RD&D Programme 2007. Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-07-02, Stockholm.
- 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; Stockholm.
- SKB (2010): Design, production and initial state of the closure. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-17; Stockholm.

23 Wirtsgestein

NEA-Gruppe: 4.1 *Geosphere characteristics and properties*

23.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das Wirtsgestein ist der Teil eines Gesteinskörpers, in dem die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Das FEP beschreibt die Genese sowie lithologischen, mineralogischen und petrophysikalischen Eigenschaften des kristallinen Wirtsgesteins. Mineralisationen in Klüften (Kluftfüllungen) werden separat im FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“ behandelt.

23.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Unter dem Begriff „Kristallin“ wird eine ganze Bandbreite von plutonischen, vulkanischen oder metamorphen Gesteinstypen verstanden. Im Bereich der Endlagerung radioaktiver Abfälle liegt der Fokus in Deutschland derzeit auf Plutoniten und Metamorphiten (vgl. BGE 2018).

Weltweit werden verschiedene Arten von Wirtsgesteinen mit zum Teil deutlichen Unterschieden in ihren charakteristischen – insbesondere mechanischen und hydraulischen – Eigenschaften (z. B. der Festigkeit und Permeabilität) untersucht. Dabei spielen, den nationalen geologischen Gegebenheiten folgend, in einigen Ländern mangels anderer geeigneter Gesteinsarten Kristallingesteine eine wesentliche Rolle. International gehören die untersuchten Gesteine zum kanadischen sowie baltischen Schild. Außerdem werden Vorkommen in Ungarn und der Tschechischen Republik erkundet. Bereits abgeschlossene Studien liegen aus Frankreich (ANDRA 2005) und der Schweiz (Nagra 1994) vor. Untersuchungen in Felslaboratorien werden und wurden u. a. in Kanada (Whiteshell), USA (Climax), Japan (Mizunami, Kamaishi), Südkorea (KURT), Frankreich (Fanay-Augères), Schweden (Äspö, Stripa Mine), Finnland (Olkiluoto), Tschechien (Bukov), Russland (Krasnojarsk) und der Schweiz (Grimsel) durchgeführt.

Häufig bestehen plutonische Körper aus granitischen bis granodioritischen Gesteinen. Granitische Magmen entstehen durch partielle Anatexis von Gesteinen der unteren Erdkruste (Okrusch & Matthes 2014). In ihrer Zusammensetzung spiegeln Granitoide die unterschiedlichen plattentektonischen Situationen wider, in denen sie gebildet wurden. Die Ausgangsgesteine sind die geochemisch-mineralogische Grundlage für die genetische Einteilung z. B. in I-Typ (igneous) und S-Typ (sedimentary) (vgl. Pitcher 1997).

Granit ist ein grobkörniges, saures Intrusivgestein aus Quarz, Orthoklas, natriumreichem Plagioklas und Glimmer. Felsische Minerale wie Quarz und Feldspat sind mit einem Anteil von 80–100 % vertreten. Der Quarzanteil unter den felsischen Mineralen variiert zwischen 20–60 %, während der 40–80 %ige Feldspatanteil aus Plagioklas (0–65 %) und Alkalifeldspäten (35–100 %) besteht. Als Nebengemengeteile bzw. Akzessorien sind vor allem Glimmer wie Biotit und Muskovit aber auch Augit, Hornblende, Apatit, Zirkon, Magnetit, Rutil, Ilmenit und Titanit von Bedeutung. Die Größe der einzelnen Minerale kann sehr verschieden sein, wobei sie meistens mit bloßem Auge erkennbar sind. In der Petrologie werden Granite oft nach kennzeichnenden Gemengeteilen z. B. in Alkalifeldspatgranit, Augit-Hornblende-Granit, Turmalingranit, Biotitgranit oder Zweiglimmergranit unterschieden. Wie für alle Plutonite gilt auch für Granit, dass er sich durch ein richtungsloses kompaktes Mineralgefüge auszeichnet, das kaum Hohlräume enthält. Dabei kann er in großen Gesteinskomplexen wie auch in Form von Stöcken und Gängen auftreten. Vorkommen in Deutschland sind z. B. der Schwarzwald, der Odenwald, der Harz, das Fichtelgebirge, das Erzgebirge und der Bayerische Wald.

Zum nachgewiesenen Verbreitungsgebiet dieser kristallinen Gesteine gehört das Grundgebirge im südlichen und mittleren Deutschland, wo sich Teile des variszischen Kollisionsorogens befinden. Dies ist unterteilt in eine Vorzone sowie drei variszische Gebirgsbögen, die durch tiefreichende Störungszonen getrennt sind und sich auch durch ihren geologischen Aufbau voneinander abgrenzen lassen. Von Norden nach Süden sind dies die subvariszische Saumsenke, das Rhenoharzynikum, das Saxothuringikum mit der Mitteldeutschen Kristallzone (vgl. Linnemann 2008) sowie das Moldanubikum.

23.3 Komponentenbeschreibung

Da in Deutschland bisher keine Standortuntersuchungen für einen Endlagerstandort für radioaktive Abfälle in Kristallingesteinen erfolgten, müssen Festlegungen zu den geologischen Gegebenheiten im Bereich des Modells für den „mKBS-3“ getroffen werden, die auf Analogieschlüssen und Vergleichen beruhen. Es werden für generische Betrachtungen granitische Gesteine als Wirtsgestein für das Modell „mKBS-3“ angenommen, weil sie unter den Plutoniten am weitesten verbreitet sind und für sie deshalb die beste Datengrundlage zu erwarten ist.

Für das Modellgebiet werden die geologischen Verhältnisse in Anlehnung an die Gegebenheiten im Bereich des Saxothuringikums mit vielen oberflächennahen Kristallinvorkommen angenommen. Die Mächtigkeit des Wirtsgesteins ist als Teil des Grundgebirges im Liegenden nicht begrenzt. Bis in 200 m u. GOK wird ein stärker geklüfteter Bereich des Kristallingesteins angenommen, der als Deckgebirge bezeichnet wird (vgl. FEP „Deckgebirge“). Für das Modellgebiet wird ein Umfeld angenommen, in dem nur mit sehr geringen tektonischen Bewegungen gerechnet werden muss, was somit maximal einer Lage innerhalb der Erdbebenzone 1 entspricht. Großräumige Störungszonen treten im Gebiet des Modells „mKBS-3“ nicht auf und werden aufgrund der geologischen Rahmenbedingungen auch zukünftig nicht erwartet. Für das Wirtsgestein wird aber ein System von Klüften angenommen, das die hydraulische Leitfähigkeit des Gebirges im Vergleich zum ungeklüfteten Wirtsgestein erhöht (vgl. FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“). In Plutoniten treten häufig Ganggesteine auf. Dies wird im Modell in Form eines Lamprophyrgangs umgesetzt (vgl. Mrugalla et al. 2020).

Das ungeklüftete Kristallingestein besitzt die hydraulischen Eigenschaften eines Grundwassergeringleiters mit Durchlässigkeitsbeiwerten (k_f) von 10^{-15} bis 10^{-12} m/s.

Für die mineralogische Zusammensetzung des Wirtsgesteins im Modell „mKBS-3“ wird eine mittlere granitische Zusammensetzung mit 32 % Quarz, 30 % Alkalifeldspat, 26 % Plagioklas und 11 % Glimmer (9 % Biotit, 2 % Muskovit/Serizit) und ca. 1 % akzessorischer Minerale angenommen. Die ausführlichere Charakterisierung der geologischen Gesamtsituation im Modellgebiet sowie die Beschreibung des Aufbaus und der Zusammensetzung des Wirtsgesteins mit seinen lithologischen und petrophysikalischen Eigenschaften erfolgt im Modellbericht (Mrugalla et al. 2020).

23.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

23.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

23.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Das Wirtsgestein ist eine Randbedingung des Modells „mKBS-3“ und wird auch in Zukunft Bestand haben.

23.7 Ungewissheiten

- Es ist derzeit unklar, ob die Prozesse Radiolyse sowie die strahlungsinduzierte Aktivierung durch die Auflockerungszone der Einlagerungsbereiche hindurch das Wirtsgestein erreichen und falls ja welche Konsequenzen dies für das Gestein hätte.
- Für eine exakte Bewertung der Barriereigenschaften des Wirtsgesteins sowie seines Verhaltens bei Temperaturerhöhung und Deformation sind zusätzliche mineralogisch-geochemische, strukturelle und petrophysikalische Untersuchungen erforderlich. Für einen Standort wären die Ermittlung von standortbezogenen (struktur-)geologischen, lithologischen, mineralogischen, geochemischen und petrophysikalischen Daten und Parametern und daraus abzuleitende Modellberechnungen unumgänglich.
- Sollte die natürliche Radioaktivität kristalliner Gesteine zusätzlich zur Aktivität des Abfallinventars in die Betrachtungen einbezogen werden?

23.8 Literaturquellen

- ANDRA (2005): Phenomenological evolution of a geological repository. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Dossier 2005 Granite, Tome: 196 pp.; Châtenay-Malabry Cedex.
- BGE (2018): Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz - Arbeitshilfen zur Datenabfrage Mindestanforderungen. – 7 S.; Peine (Bundesgesellschaft für Endlagerung).
- Linnemann, U. (Ed.) (2008): Das Saxothuringikum - Abriss der präkambrischen und paläozoischen Geologie von Sachsen und Thüringen. – 2. Auflage: 163 S.; Dresden (Senckenberg).
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Nagra (1994): Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland - Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme. – National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra), NTB-93-01: 464 S.; Wettingen.
- Okrusch, M. & Matthes, S. (2014): Mineralogie - Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. – 6. Auflage, 507 S.; Berlin (Springer). DOI:10.1007/978-3-662-08768-8
- Pitcher, W.S. (1997): The Nature and Origin of Granite. – 2. Ed.: XVI, 387 pp.; Dordrecht (Springer). DOI:10.1007/978-94-011-5832-9

24 Störungen und Klüfte im Wirtsgestein

- NEA-Gruppe: 4.1 *Geosphere characteristics and properties*
 4.1.2 *Large-scale discontinuities*

24.1 Definition/Kurzbeschreibung

Klüfte sind makroskopisch sichtbare Trennfugen im Gestein, die keine oder nur sehr geringe Dislokationen an den Trennflächen aufweisen. Klüfte können tektonisch aber auch durch thermische Effekte wie Expansion oder Kontraktion der Gesteine entstehen. Sie sind von Störungen zu unterscheiden, die durch eine deutliche Dislokation der an eine Störungsfläche angrenzenden Gesteine gekennzeichnet sind.

In den durch Störungen und Klüfte beeinflussten Bereichen treten abhängig von der Zusammensetzung zirkulierender Fluide verschiedene Formen von Kluftmineralisation auf. Die in Klüften und Störungen auftretenden Minerale sowie hydraulische Kennwerte werden ebenfalls in diesem FEP beschrieben.

24.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Als Ursachen für die Entstehung von Klüften im kristallinen Gestein gelten z. B. tektonische Prozesse, die beim Fehlen plastischer Gesteinseigenschaften starke Auswirkungen insbesondere an Grenzflächen mit Eigenschaftsveränderungen im Gesteinsverband haben können. Wenn durch Spannungsänderungen die Festigkeit des Gesteins überschritten wird, bilden sich Klüfte. Diese werden nach dem jeweiligen Bildungsprozess in Deformationsklüfte (tektonische Beanspruchung), Entlastungsklüfte (Verringerung des lithostatischen Drucks) oder Kontraktionsklüfte (Volumenverringern bei Abkühlung) klassifiziert (Hennigsen 2002; Reuther 2012; Meschede 1994).

Deformationsklüfte entstehen während der Gebirgsbildung durch Verstellung, Hebung oder Faltung und andere gebirgsbildende Prozesse. In magmatischen Gesteinen können außerdem Kontraktionsklüfte auftreten, die durch Schrumpfungsprozesse während der Abkühlung von Schmelzen entstehen. Für Granite typisch sind weitständige, ungefähr senkrecht aufeinander stehende Kontraktionsklüfte in drei Richtungen (zwei vertikale und eine horizontale), die das Gestein quaderförmig zerlegen. Entlastungsklüfte treten in allen Festgesteinen meist hang- oder oberflächenparallel auf, wenn Material durch menschlichen Eingriff oder natürliche Prozesse abgetragen wird (Erosion). Die Entlastung erfolgt dabei meist an schon vorhandenen Deformations- oder Kontraktionsklüften, wobei sich diese Vorgänge meist nur auf die obersten 50 bis 100 m des Gesteinsverbandes beschränken (Hennigsen 2002).

Der Begriff Störung wird in der Geologie für Trennflächen verschiedener Größe verwendet, an denen in Gesteinen Bewegungen parallel zu einer Störungsfläche stattgefunden haben. Das Deformationsverhalten von Gesteinen ändert sich mit zunehmender Tiefe deutlich (spröde nach duktil) (Grotzinger & Jordan 2017). Auch der Gesteinstyp spielt eine Rolle. Magmatite und Metamorphite des kristallinen Grundgebirges neigen zu sprödem Bruchverhalten, während weichere Sedimentgesteine, in Abhängigkeit von der Deformationsgeschwindigkeit, ebenfalls duktil und mit Faltung reagieren können.

Störungen bestehen i.d.R. aus zwei architektonischen Elementen. Einem inneren Störungskern (Bewegungsfläche), der den größten Teil der Deformation aufnimmt, sowie einer breiteren gestörten Zone mit unterschiedlichen störungsassoziierten Strukturen (z. B. Mylonite, tektonische Brekzien usw.). Zu den Störungen gehören alle Arten von Verwerfungen, Brüchen

sowie Auf- und Überschiebungen. Störungen können durch die Bewegungsrichtung und den Versatzbetrag beschrieben werden, wobei die Versatzbeträge von einigen Zentimetern bis zu mehreren 100 Kilometern bei Transformstörungen an Plattengrenzen (San-Andreas-Störung) reichen können. Nach Bewegungsrichtung werden Abschiebungen (Extension), Auf- und Überschiebungen (Kompression) sowie links- (sinistrale) und rechtsseitige (dextrale) Horizontal- oder Blattverschiebungen unterschieden. Bei einer Kombination von Scherkräften mit Extensions- bzw. Kompressionsvorgängen spricht man von Schrägabschiebungen bzw. Schrägaufschiebungen.

Einzelne Störungen oder Verwerfungen kommen i.d.R. selten vor. Sie treten gewöhnlich in Paaren oder Gruppen auf, die innerhalb einer Störungszone oftmals den selben Bewegungssinn zeigen und geologische Körper in sogenannte Störungsblöcke gliedern. Gerade bei Extensionsvorgängen entwickeln sich oft parallel zur Hauptstörung weitere Verwerfungsflächen. Ein geologischer Körper kann auch durch zwei konjugierte Störungen begrenzt sein. Konjugierte Störungen bestehen aus zwei genetisch zusammengehörigen Verwerfungen mit erkennbarer Symmetriebeziehung, die bei parallelem Streichen entgegengesetzt einfallen. Kleinere Verwerfungen, die parallel zur Hauptverwerfung verlaufen und dieselbe Relativbewegung haben, werden als synthetisch bezeichnet, während kleinere, dazu konjugierte Verwerfungen, die sich entgegengesetzt verhalten, als antithetisch bezeichnet werden. Einen Überblick zum Aufbau des Untergrundes in Deutschland und der damit verbundenen tektonischen Vorgänge liefern z. B. Meschede (2015), Henningsen & Katzung (2006) und Walter (2007).

Vorhandene Klüfte und Störungen sind natürlichen Ursprungs. Die Auffahrung eines Endlagers hat als technischer Prozess Risse in Form der Auflockerungszone zur Folge (vgl. FEP „Auflockerungszone“).

In Störungen und Klüften laufen verschiedene gefügebildende Prozesse ab, die in zwei Gruppen, die der Verformungsprozesse und die der Kristallisations- und Rekristallisationsprozesse, unterschieden werden können (Heitzmann 1985). In Dehnungsklüften lagern sich meistens bereits während der Verformung (syntektonisch) wieder Kristallite an, weil Fluid aus dem umliegenden Gestein in die Hohlräume eindringt und ggf. zirkuliert (vgl. FEP „Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten“). In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des umgebenden Gesteins und der zirkulierenden Lösungen bilden sich charakteristische Mineralparagenesen. Infolge von Druckentlastung werden gelöste Substanzen z. B. in Form von Quarz, Feldspäten, Karbonaten (Calcit, Dolomit), Schichtsilikaten (Chlorit, Illit) sowie verschiedenen Erzmineralen ausgefällt (Ramdohr 1980). Verläuft dieser Prozess nicht dynamisch während der Verformung, sondern danach (posttektonisch), spricht man von einem statischen Vorgang.

Durch mechanische Beanspruchung von Festgesteinen in Form von bruchhafter oder duktiler Deformation durch Scherprozesse kommt es zur Verformung und/oder Verkleinerung von Materialpartikeln, dadurch können sich in Störungszonen unterschiedliche für das jeweilige Deformationsregime charakteristische Verformungsgefüge ausbilden. Diese werden in Kataklasite (vornehmlich richtungslos, spröd), Mylonite (eingeregelter Materialpartikel oder laminiert, duktil) sowie Pseudotachylite (dicht, glasig, spröd mit sehr hohen Bewegungsraten) eingeteilt (vgl. a. Angemar et al. 2017).

24.3 Komponentenbeschreibung

Für das generische geologische Modell „mKBS-3“ wird ein tektonisch inaktives Umfeld innerhalb der Deutschen Mittelgebirgsschwelle angenommen, in der sich ein homogen aufgebauter, zusammenhängender Kristallinkomplex/Pluton mit einer Ausdehnung von ca. 200 km² befindet. Die Lage des Modells innerhalb des Kristallinkomplexes gewährleistet einen hinreichen-

den Abstand zu größeren Verwerfungslinien. Gemäß Einlagerungskonzept sind die Bohrlöcher mit den eingelagerten Behältern so angeordnet, dass ein hinreichender - im Rahmen einer Sicherheitsbewertung zu prüfender - Abstand zu den hydraulisch wirksamen Klüften eingehalten wird.

Das Deckgebirge mit seinem oberflächennah stark verwitterten Kristallingestein, umfasst mit seiner verstärkten hydraulisch durchlässigen Klüftung einen Bereich bis in Tiefen von ca. 200 m u. GOK (siehe FEP „Deckgebirge“). Geklüftetes Kristallingestein, bei dem sich die Bergsdurchlässigkeit hauptsächlich durch die Vernetzung hydraulisch wirksamer Klüfte ergibt, liegt auch im geplanten Einlagerungsbereich vor. Es ist davon auszugehen, dass sowohl Permeabilitätsdifferenzen innerhalb eines Kluftsystems oder einer Kluftschar als auch über die Fläche einer einzelnen Kluft auftreten. Einzelne Klüfte sind oft nicht durchgehend hydraulisch leitfähig, sondern zeichnen sich durch ein stark variierendes hydraulisches Verhalten aus. Die Permeabilität des geklüfteten Wirtsgesteins liegt zwischen 10^{-20} bis 10^{-13} m^2 (Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f) ca. 10^{-13} bis 10^{-6} m/s (Mrugalla et al. 2020).

Mit der Tiefe verringern sich insbesondere die Häufigkeit horizontaler Entlastungsklüfte und die Öffnungsweiten (Apertur) innerhalb des Kluftnetzwerkes, was Auswirkungen auf die Vernetzung und somit auf die hydraulische Leitfähigkeit hat. Dies wird aufgrund einer konservativen Betrachtungsweise und zur Vereinfachung des Modells allerdings vernachlässigt. Das Kluftnetzwerk besteht aus einem System von orthogonal angeordneten überwiegend steil stehenden (subvertikalen) Klüften und einer flach einfallenden (subhorizontalen) Kluftschar. Die unverwitterte Kluftfüllung besteht zum Großteil aus Quarz, Feldspäten, Calcit und Chlorit. In geringen Mengen können z. B. auch Hämatit, Pyrit, Fluorit und Apatit vorkommen. Der Lamprophyrgang weist ein stark geklüftetes Gefüge auf. Weitere Angaben zum Kluftmodell liefert der Modellbericht (Mrugalla et al. 2020).

Möglicherweise kann es in Kaltzeiten zu erhöhter thermomechanischer Beanspruchung des Gesteins kommen (siehe FEP „Permafrost“). Klüfte können durch steigenden Fluiddruck entstehen, sofern das Minimalspannungskriterium überschritten wird. In diesem Fall infiltrieren die Fluide in die neu gebildeten Klüfte, können dort u. U. zirkulieren und ggf. auch Kluftfüllungen entwickeln, die die Kluftöffnungsweite bis zum erneuten Verschluss verringern können, wodurch im Ergebnis wieder die hydraulische Leitfähigkeit eines ungeklüfteten Gesteins erreicht werden kann. Kompressive Belastungen in kristallinen Gesteinen führen nicht zum Schließen von Klüften, können aber die Öffnungsweiten verringern.

24.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

24.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

24.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Klüfte sind im Modell enthalten und werden im Bewertungszeitraum weiterhin vorhanden sein.

24.7 Ungewissheiten

- Entwicklung und Anwendung geeigneter Methoden zur Detektierung von vorhandenen Klüften im Wirtsgestein und Quantifizierung damit verbundener Ungewissheiten.
- Eigenschaften von Klüften unter in situ Bedingungen sind nur schwer zu bestimmen.

24.8 Literaturquellen

- Angemar, T., Hese, F., Moeck, I. & Stober, I. (2017): Kriterienkatalog für die Erfassung tieferreichender Störungen und ihrer geothermischen Nutzbarkeit in Deutschland. – Z. Deut. Gesellsch. Geowiss., Bd. 168, 2: 285-300. DOI:0.1127/zdgg/2017/0084
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): Allgemeine Geologie. – 7. Auflage: 769 S.; Berlin (Springer). DOI:10.1007/978-3-662-48342-8
- Heitzmann, P. (1985): Kakirite, Kataklasite, Mylonite: - Zur Nomenklatur der Metamorphite mit Verformungsgefügen. – Ecl. geol. Helvetiae, 78, 2: 273-286. DOI:10.5169/seals-165656
- Henningsen, D. (2002): Geologie für Bauingenieure - Eine Einführung. – 3. Auflage: XII, 178 S.; Berlin, Heidelberg (Springer). DOI:10.1007/978-3-642-56159-7
- Henningsen, D. & Katzung, G. (2006): Einführung in die Geologie Deutschlands. – 7. Auflage: 234 S.; (Spektrum).
- Meschede, M. (1994): Methoden der Strukturgeologie. – 169 S.; Stuttgart (Enke).
- Meschede, M. (2015): Geologie Deutschlands - Ein prozessorientierter Ansatz. – 249 S.; Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum). DOI:10.1007/978-3-662-45298-1
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Ramdohr, P. (1980): The Ore Minerals and Their Intergrowths. – 2. Ed.: XVIII, 1192 pp.; Oxford, New York (Pergamon).
- Reuther, C.-D. (2012): Grundlagen der Tektonik - Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur. – 1. Auflage: X, 277 S.; (Springer Spektrum). DOI:10.1007/978-3-8274-2724-3
- Walter, R. (2007): Geologie von Mitteleuropa. – 7. Auflage, The Geology of Central Europe; Stuttgart (Schweizerbart).

25 Lösungen im Wirtsgestein

NEA-Gruppe:	4.1.5	<i>Geothermal characteristics and properties</i>
	4.1.6	<i>Hydraulic characteristics and properties</i>
	4.1.7	<i>Mechanical characteristics and properties</i>
	4.1.8	<i>Geochemical characteristics and properties</i>
	4.1.9	<i>Biological characteristics and properties</i>

25.1 Definition/Kurzbeschreibung

Lösungen im Wirtsgestein sind wässrige Lösungen, die sich hauptsächlich in Kluft Hohlräumen befinden und dort ggf. zirkulieren. Ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften (pH, Eh, Viskosität usw.) sind durch die Art und Menge der gelösten Stoffe bestimmt.

25.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Korngrenzen in den Gesteinen der spröden oberen kontinentalen Erdkruste sind zwar meist trocken, jedoch befinden sich in Kluft Hohlräumen (vgl. FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“) und anderen makroskopischen Öffnungen fast immer wässrige Lösungen. Zur Erklärung der unterschiedlichen Zusammensetzung von Wässern, die in kristallinen Gesteinen des Grundgebirges vorhanden sind, können generell ihre Herkunft und Bildungsbedingungen herangezogen werden. Dies sind zum einen Wässer meteorischen Ursprungs sowie junges oder fossiles Meerwasser. Zum anderen sind hydrothermale Wässer (vgl. FEP „Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten“) aus magmatischen oder metamorphen Vorgängen in der Erdkruste sowie Wässer, die durch Austauschvorgänge mit dem lokal anstehenden Gestein beeinflusst werden, von Bedeutung (Stober & Bucher 2000).

Die in der kontinentalen Kruste nachweisbaren Wässer spiegeln vielfach eine granitische Gesteinszusammensetzung wieder. Bei granitischen Gesteinen mit sehr geringer Porosität befindet sich nahezu das gesamte Grundwasser in den Kluft Hohlräumen (Lege et al. 1996). Der Granit selber ist annähernd undurchlässig und dort gebundenes Wasser ist durch adsorptive Kräfte fest gebunden (Stober 1995).

Die Lösungsraten aller typischen Minerale des granitischen Grundgebirges sind bei den vorherrschenden Temperaturen in der oberen Kruste sehr gering. In der Regel erreicht kein Hauptbestandteil des kristallinen Gesteins einen Gleichgewichtszustand mit der wässrigen Lösung. Die Zusammensetzung des Grundwassers im kristallinen Grundgebirge wird u. a. durch die Auflösung von Plagioklas und Biotit in Verbindung mit der Ausfällung von Sekundärmineralen in Form von Kluftbelägen kontrolliert (Stober & Bucher 2000). Die Hydrolyse von Feldspat und Glimmer senkt den Säuregehalt und hebt dementsprechend den pH-Wert. Weltweit haben Tiefenwässer i.d.R. einen leicht sauren bis leicht alkalischen pH-Wert. Es zeigt sich jedoch auch, dass sich die stoffliche Zusammensetzung der Wässer im Grundgebirge auch bei längerer Verweildauer und aufgrund meist ähnlicher Gesteinszusammensetzung keiner einheitlichen Zusammensetzung annähert. Dies bedeutet, dass neben den Gleichgewichtsreaktionen noch weitere Prozesse wie der Zutritt von Wässern und damit verbundene Mischungsvorgänge ablaufen müssen.

Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges ist geringer als in Sandstein-, Kies- oder Karstaquiferen. Lediglich im Bereich von Störungen, im Grenzbereich verschiedener kristalliner Gesteine, im oberflächennahen Verwitterungsbereich und in Hangschuttdecken sind größere Grundwassermengen zu erwarten. Die Konzentration der mobilen, von der Gesteinszusammensetzung unabhängigen Komponenten in den (Kluft-)Hohlräumen (v. a. Anionen) wird

von Stofftransportprozessen (Diffusion, Advektion) beeinflusst. Des Weiteren können die Lösungen durch mikrobielle Prozesse (vgl. FEP „Mikrobielle Prozesse“) beeinflusst werden.

Zur genaueren Charakterisierung von Grundgebirgswässern können die im Folgenden beschriebenen Faktoren wie die mineralische Gesteinszusammensetzung (Lithologie), die Tiefe aus der die Wässer stammen, ihr Feststoffgehalt sowie die in ihnen gelösten Gasanteile herangezogen werden (Stober 1995).

Lithologie: Die Zusammensetzung des Wassers im kristallinen Grundgebirge variiert stark in Bezug auf das Ausmaß der Mineralisation und der relativen Anteile der Hauptkomponenten (Ca, Na, Mg, K, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl). Die Wässer in tiefliegenden Graniten und granitischen Gesteinen sind im Allgemeinen NaCl-dominierte Salzlaugen, während z. B. Wässer in Gabbros CaCl_2 -dominierte Lösungen enthalten (Bucher & Stober 2010). Bei Grundwasserproben aus Bohrungen in einem Granit-Pluton (Schwarzwald, Nordschweiz) dominieren Na(K)- oder die Na(K)-Ca-Kationen, während bei den Anionen vor allem Cl^- , Cl-HCO_3^- oder Cl-SO_4^{2-} von Bedeutung sind (Stober 1995). Bei metamorphen Granit-Gneis-Wechselfolgen sind Ca-Na(K)-Kationen sowie HCO_3^- - SO_4^{2-} -Anionen vorherrschend.

Tiefe: Zur Klassifizierung der Tiefenwässer nach ihrer Gewinnungstiefe hat sich eine Einteilung in zwei Zonen von 300 bis 1.000 und von über 1.000 m u. GOK aufgrund der vorherrschenden Kat- bzw. Anionen als sinnvoll erwiesen (Stober 1995). Der Na-Anteil an den wichtigsten Kationen erhöht sich mit zunehmender Tiefe während sich der Ca-Anteil umgekehrt verhält. Ähnliches gilt auch für Magnesium und Kalium. Auch der Anteil von Hydrogenkarbonat verringert sich mit zunehmender Tiefe. Cl-Ionen können oberflächennah in unterschiedlichen Anteilen vorliegen. Hohe Cl-Anteile sind typisch für Thermalwässer. Mit der Tiefe nimmt der Cl-Anteil generell zu und erreicht in großen Tiefen Werte von über 1.000 mg/l Lösung. Savoye et al. (1998) konnten nicht nachweisen, dass die Freisetzung sekundärer Fluideinschlüsse aus primären Mineralen für die hohe Salinität in tiefen Grundwässern verantwortlich ist. Der Sulfatannteil scheint mit zunehmender Tiefe zunächst zu- und dann wieder abzunehmen und liegt in größeren Tiefen über 200 mg/l Lösung. Der Gesamtlösungsgehalt steigt meistens signifikant mit der Tiefe an. Dies kann aber durch den Verdünnungseffekt absinkender Oberflächenwässer abgeschwächt werden, die außerdem für erhöhte O_2 -Gehalte und negative Temperaturanomalien verantwortlich sein können (Röckel & Stober 2017).

Gesamtlösungsgehalt: In den oberen 200–300 m u. GOK schwankt der Gehalt von gelösten Feststoffen in der Lösung (TDS) stark. Der Wassertyp ändert sich also mit der Tiefe (Stober 1995). Für Wässer in großen Tiefen von ca. 5.000 m u. GOK werden von Bucher & Stober (2010) 10^5 bis $3 \cdot 10^5$ mg/l an gelöster Substanz (TDS) angegeben, wobei die Hauptkationen Na^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} und die Hauptanionen Cl^- , HCO_3^- und SO_4^{2-} sind. Insgesamt lässt sich feststellen, dass bei den Gehalten von Ca, Mg, K, HCO_3^- und SO_4^{2-} absolut gesehen [mg/l] keine eindeutige Abhängigkeit von der Beprobungstiefe feststellbar ist. Relativ gesehen [Äqu.-%] nimmt der Anteil jedoch ab, da die Mineralisation hauptsächlich aufgrund ansteigender Na- und Cl-Gehalte mit der Tiefe zunimmt (Gascoyne & Kamineni 1993).

Kohlensäure: Der Gehalt an Kohlensäure wird, neben lokalen Gegebenheiten (Gesamtlösungsgehalt, Partialdruck), vor allem von der Löslichkeit in Wasser bestimmt, die mit steigendem Druck zu- und mit steigender Temperatur abnimmt. Mit steigendem Überlagerungsdruck steigt die Löslichkeit trotz gleichzeitigem Temperaturanstieg aufgrund des stärkeren Einflusses des Druckes schnell an. Wässer mit einem Gehalt an freier Kohlensäure von über 1.000 mg/l werden als Sauerlinge bezeichnet. Für den Bereich und das Umfeld des Schwarzwaldes konnte festgestellt werden, dass diese Wässer sich chemisch sehr ähneln. Ab einem CO_2 -Gehalt von ca. 3.000 mg/l handelt es sich um sogenannte Ca-(Na)- HCO_3^- -(SO_4^{2-})-Wässer (Stober 1995). Der pH-Wert von CO_2 -reichem Wasser von 5,5 bis 6,5 wird gesteuert durch Gleichgewichtsreaktionen im Karbonatsystem (Stober & Bucher 2000).

Ein Erklärungsansatz für die hohe Salinität von Tiefenwässern ist, dass sich der Anteil an gelöster Substanz durch H_2O -verbrauchende Reaktionen im Klufthohlraum erhöht (Bucher & Stober 2010; Bucher & Stober 2016). Als eine weitere Möglichkeit für die Entstehung der hochsalinaren Wässer wird das Vorhandensein von altem marinem Wasser diskutiert, was anhand der Halogen-Systematik (z. B. Cl/Br -Verhältnis) nachweisbar ist (Stober & Bucher 1999). Die Verweildauer der tiefen Grundwässer in der geodynamisch inaktiven spröden oberen Erdkruste wird als hoch eingeschätzt und liegt eher im Bereich von Millionen als von tausenden von Jahren (Stober & Bucher 2000). Ein schneller Austausch mit Oberflächenwasser tritt in der Regel wegen sehr geringer hydraulischer Potentialgradienten in Verbindung mit niedrigen Permeabilitäten nicht auf. Zur Erklärung der chemischen Zusammensetzung verschiedener Typen von Tiefenwässern (Säuerlinge, Thermal- und Mineralwässer) ist vor allem die Zirkulationstiefe heranzuziehen. Diese ist wiederum stark von der vorherrschenden Geologie und den hydraulischen Eigenschaften des Gebirges abhängig. Thermalwässer spiegeln die Hydrochemie in größeren Tiefen des Grundgebirges wider, während Mineralwässer bzw. Säuerlinge in geringer Tiefe zirkulieren. Dabei sind Störungszonen und die verstärkte Verwitterung von silikatischen Gesteinen von besonderer Bedeutung. Die hohe Mineralisation der Mineralwässer steht im Zusammenhang mit den erhöhten CO_2 -Gehalten und der damit verbundenen erhöhten Wasser-Gesteins-Wechselwirkung (Stober & Bucher 1999; Stober et al. 2014).

Die Wässer enthalten auch gelöste Gase wie vor allem CO_2 sowie CH_4 und N_2 (vgl. FEP „Gase im Wirtsgestein“). Das Wasser in der granitischen und metamorphen kontinentalen Kruste enthält z. T. bis in große Tiefen Sauerstoff. Abgesehen von wenigen Ausnahmen sind CO_2 und HCO_3 die vorherrschenden Kohlenstoff- sowie SO_4 der dominierende Schwefelträger. Die Eisen- und Mangankonzentrationen sind infolgedessen relativ gering (Stober & Bucher 2000).

25.3 Komponentenbeschreibung

Für das Modell „mKBS-3“ wird eine Situation wie im variszisch geprägten hydrogeologischen Raum des südostdeutschen Grundgebirges angenommen (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie 2016). Es handelt sich um einen Festgesteinsgrundwasserleiter (Kluftgrundwasserleiter) aus granitischen Gesteinen mit einem silikatischen Gesteinschemismus und geringer bis sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit. Das Grundwasser zirkuliert vor allem im Bereich der hydraulisch wirksamen Klüfte, während weitgehend ungeklüftete Bereiche als Aquitard fungieren (vgl. FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“). Innerhalb der Klüfte des steilstehenden Lamprophyrgangs ist eine geringfügige Grundwasserführung vorhanden.

Die Grundwasserführung im Modell wird als gering eingestuft, da in der angenommenen hydrogeologischen Region (Kristalline, weniger geklüftete Gesteine) geringe Ergiebigkeiten vorliegen (BMU 2003). Der TDS-Gehalt des Grundwassers im Einlagerungsniveau liegt bei 1.100 mg/l, die Zusammensetzung des Wassers ist im Modellbericht (Mrugalla et al. 2020) dargestellt. Aufgrund des Umfeldes und der geologischen Entwicklung wird für das Modell „mKBS-3“ unterstellt, dass keine Kohlenwasserstoffe zu erwarten sind.

Die Verteilung der Wässer bestimmt Transportprozesse und ist ebenfalls wichtig für Austauschprozesse wie die Sorption. Auch die stoffliche Zusammensetzung (z. B. Konzentration der Anionen und Kationen, Eh, pH, Sauerstoffgehalt) der Lösungen im Wirtsgestein beeinflussen das chemische Verhalten der Radionuklide. Die oberflächennahen Prozesse haben aufgrund fehlender Zirkulation keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Lösungen im Wirtsgestein, so dass sich aufgrund der Klüfte eine unregelmäßige chemische Zonierung aus Oberflächenwässern im Deckgebirge sowie $\text{Na}(\text{Ca})\text{-HCO}_3$ -Wässern und $\text{Na}(\text{Ca})\text{-Cl}(\text{SO}_4)$ -Wässern in großen Tiefen ausbilden kann. Es ist davon auszugehen, dass sich die Lösungen im Wirtsgestein innerhalb der nächsten eine Million Jahre nur langsam oder garnicht verändern werden.

25.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur		Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
x	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität		Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

25.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

25.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Lösungen im Wirtsgestein sind eine Randbedingung des Endlagersystems.

25.7 Ungewissheiten

- Detektionsmöglichkeiten von Fluiden in kristallinen Formationen?
- Entwicklung der Hydrochemie bei geänderten Strömungsverhältnissen?

25.8 Literaturquellen

- Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (Ed.) (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland - Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. – Band A 163, Geologisches Jahrbuch, Reihe A: 456 S.; Hannover (Schweizerbart).
- Bucher, K. & Stober, I. (2010): Fluids in the upper continental crust. – Geofluids, 10, 1-2: 241-253. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x
- Bucher, K. & Stober, I. (2016): Large-scale chemical stratification of fluids in the crust: hydraulic and chemical data from the geothermal research site Urach, Germany. – Geofluids, 16, 5: 813-825. DOI: 10.1111/gfl.12186
- BMU (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD). – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Ed.): 239 S.; Bonn.
- Gascoyne, M. & Kamineni, D.C. (1993): The hydrogeochemistry of fractured plutonic rocks in the canadian shield. – (In: Banks, S.B. & Banks, D. (Eds.): Hydrogeology of hard rocks). 440-449; Trondheim (Geological Survey of Norway). DOI: 10.1007/s1004000050

- Lege, T., Kolditz, O. & Zielke, W. (1996): Strömungs- und Transportmodellierung. – Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 2: XV, 419 S.; Berlin (Springer). DOI: 10.1007/978-3-642-61407-1
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönnke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Röckel, L. & Stober, I. (2017): Die neue Tiefbohrung Weißenstadt im Granit des Fichtelgebirges. – Grundwasser, Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, 22: 165-173. DOI: 10.1007/s00767-017-0361-4
- Savoye, S., Aranyossy, J.-F., Beaucaire, C., Cathelineau, M., Louvat, D. & Michelot, J.-L. (1998): Fluid inclusions in granites and their relationships with present-day groundwater chemistry. – European Journal of Mineralogy, 10: 1215-1226. DOI: 10.1127/ejm/10/6/1215
- Stober, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. – 191 S.; Stuttgart (Enke).
- Stober, I. & Bucher, K. (1999): Origin of salinity of deep groundwater in crystalline rocks. – Terra Nova, 11, 4: 181-195. DOI: 10.1046/j.1365-3121.1999.00241.x
- Stober, I. & Bucher, K. (Eds.) (2000): Hydrogeology of Crystalline Rocks. – Water Science and Technology Library, 34: 275 pp.; Dordrecht, Boston, London (Kluwer).
- Stober, I., Wolfgramm, M. & Birner, J. (2014): Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland. – Zeitschrift geologischer Wissenschaften, 41/42, 5-6: 339-380.

26 Gase im Wirtsgestein

NEA-Gruppe:	4.1.5	<i>Geothermal characteristics and properties</i>
	4.1.7	<i>Mechanical characteristics and properties</i>
	4.1.8	<i>Geochemical characteristics and properties</i>
	4.1.9	<i>Biological characteristics and properties</i>

26.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die im Wirtsgestein vorkommende Gasphase und ihre Zusammensetzung.

26.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Verteilung der Gase in kristallinen Gesteinen hängt vor allem vom Vorhandensein und der Verteilung des Kluft Hohlräume ab. Dieser kann in vertikaler und horizontaler Richtung verschieden ausgeprägt sein, was in erster Linie auf die mit zunehmender Tiefe abnehmende Zahl von subhorizontalen Entlastungsklüften zurückzuführen ist. Mit der Tiefe nimmt die Häufigkeit von hydraulisch wirksamen Klüften und deren Öffnungsweite ab, wodurch sich entsprechend auch das Kluftvolumen und somit der potentielle Speicherraum für Gase verringert.

Nach dem Henry-Gesetz ist die gelöste Menge eines Gases proportional zu dessen Partialdruck. Wichtige in der tieferen Erdkruste auftretende Gase sind CH_4 , N_2 , He, und CO_2 . Hohe CO_2 -Gehalte sind vor allem aus NaCl-Tiefenwässern bekannt, während Ca-haltige Wässer des Fennoskandischen und Kanadischen Schildes sowie der Osteuropäischen Tafel kaum oder kein CO_2 enthalten (Stober 1995). Niedrige CO_2 -Gehalte sind ebenfalls von Tiefenwässern der Kontinentalen Tiefbohrung (KTB) in der Oberpfalz bekannt (Erzinger & Stober 2005). Neben standortspezifischen Gegebenheiten wie der Ca-Verfügbarkeit und der CO_2 -Nachlieferung ist vor allem die Wasserlöslichkeit für das Vorhandensein von freiem CO_2 verantwortlich. Mit steigendem Druck nimmt die Löslichkeit zu, während sie mit zunehmender Temperatur abnimmt. Da die Druckabhängigkeit überwiegt, können bereits unterhalb von 50 m Wassersäule mehrere 1.000 mg/l CO_2 in Lösung gehen.

Helium ist ein Edelgas, das keine Verbindung mit anderen Stoffen eingeht und nur atomar vorliegt. Das häufigste stabile Isotop ist das ^4He . Das seltene Isotop ^3He kommt im Erdmantel häufiger vor als in der Kruste, was zur Bestimmung der Herkunft des Stoffes mittels Isotopenanalyse genutzt werden kann ($^4\text{He}/^3\text{He}$ -Verhältnis). Bei Anwesenheit von Mantelhelium im Grundwasser lassen sich Rückschlüsse auf tiefreichende Störungen/Wasserwegsamkeiten ziehen.

Methan (CH_4) ist relativ schwer in Wasser löslich und wird im tieferen Untergrund vor allem in sedimentären Formationen und unkonventionellen Lagerstätten (Schiefergas) angetroffen. Weitere größere Vorkommen sind aus Clathraten (Einschlussverbindungen zweier Stoffe) wie Gashydraten im Meeresboden bekannt. CH_4 -Vorkommen wurden aber auch in einigen Bereichen des präkambrischen kontinentalen Grundgebirges von einigen hundert Metern bis in 3,4 km Tiefe beobachtet (Kietäväinen & Purkamo 2015). Oft wurde auch mikrobielle Aktivität in diesem Zusammenhang festgestellt (vgl. FEP „Mikrobielle Prozesse“), was insbesondere in Tiefen bis zu 1,5 km u. GOK zu erhöhten Konzentrationen von biotisch entstandenem Methan führt (Kietäväinen et al. 2017). Das Auftreten und die Erhaltung von fossiler organischer Substanz in kristallinen Gesteinen ist fraglich. Kohlenstoff liegt oft nur in Form von Karbonaten oder Graphit vor. Deshalb ist die Entstehung von Methan durch das Einwirken thermischer Prozesse auf organische Substanz auch wegen der relativ niedrigen Untergrundtemperaturen

in den kontinentalen Schilden eher unwahrscheinlich. Eine Möglichkeit für das Vorhandensein von Methan in kristallinen Gesteinen wäre das Eindringen von Kohlenwasserstoffen durch Diffusion oder Advektion aus nahegelegenen Reservoir- oder Muttergesteinen. Dies kommt relativ selten und hauptsächlich in vulkanischen Gesteinen vor (Petford & McCaffrey 2003).

Möglicherweise sind abiotische Vorgänge eine Quelle für Methanvorkommen aus geologischen Prozessen. Dies bezieht sich auf Methan, das aus anorganischen Quellen ohne biologische Aktivität entsteht. Die zugrundeliegenden Vorgänge wären in diesem Fall entweder magmatisch oder Wasser-Gesteinsreaktionen, die auch bei niedrigeren Druck- und Temperaturbedingungen ablaufen können (Etiope & Sherwood Lollar 2013; McCollom 2013). Abiotisch bei höheren Temperaturen entstandenes Methan könnte aus dem Gasstrom aus tieferen heißeren Regionen oder Fluideinschlüssen stammen. Denkbar wäre auch ein Methanzutritt aus Zersetzungsprozessen und mikrobieller Aktivität im Grubengebäude (vgl. FEP „Gase im Grubengebäude“).

Stickstoff kann in kristallinen Gesteinen der Erdkruste sowohl in gebundener Form z. B. als Ammonium (NH_4) als auch in molekularer Form (N_2) zusammen mit Edelgasen vorliegen (Möller et al. 1997). Die Gasvorkommen stehen dabei in engem Zusammenhang mit der mineralogischen Gesteinszusammensetzung. Paragneise enthalten z. B. deutlich mehr N_2 und Argon (Ar) als Amphibolite.

26.3 Komponentenbeschreibung

Das Wirtsgestein des Modells „mKBS-3“ weist eine sehr geringe Porosität auf. Außerdem ist die Klutöffnungsweite der offenen, hydraulisch wirksamen Klüfte, die eine freie Gasphase enthalten könnten, im Einlagerungsniveau durch den lithostatischen Druck verringert. Aufgrund der geologischen Gesamtsituation sind beim Modell „mKBS-3“ im Ausgangszustand zwar keine freien Gase im Wirtsgestein zu erwarten, ihr Vorhandensein im Bewertungszeitraum durch Gasproduktion im Endlager und deren Migration ist aber zumindest lokal nicht auszuschließen. Aus diesem Grund ist das Auftreten freier Gase zu prüfen.

Durch die Entleerung von mit Lösungen gefüllten Klüften und das gleichzeitige Eindringen von Gasen in diese Hohlräume im Zuge der Bewetterung des Grubengebäudes, werden keine Auswirkungen erwartet.

26.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur		Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
x	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität	x	Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
x	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

26.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

26.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Da freie Gase im Wirtsgestein zumindest lokal auftreten können, wird die Eintrittswahrscheinlichkeit als „wahrscheinlich“ eingestuft.

26.7 Ungewissheiten

- Gibt es bei der Entleerung von Klüften Auswirkungen durch nachströmendes Gas?
- Ist der Transport von Radionukliden in der Gasphase relevant?

26.8 Literaturquellen

- Erzinger, J. & Stober, I. (2005): Introduction to Special Issue: long-term fluid production in the KTB pilot hole, Germany. – *Geofluids*, 5, 1: 1-7.
DOI: 10.1111/j.1468-8123.2004.00107.x
- Etioppe, G. & Sherwood Lollar, B. (2013): Abiotic Methane on Earth. – *Reviews of Geophysics*, 51, 2: 276-299.
DOI: 10.1002/rog.20011
- Kietäväinen, R., Ahonen, L., Niinikoski, P., Nykänen, H. & Kukkonen, I.T. (2017): Abiotic and biotic controls on methane formation down to 2.5 km depth within the Precambrian Fennoscandian Shield. – *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 202: 124-145.
DOI: 10.1016/j.gca.2016.12.020
- Kietäväinen, R. & Purkamo, L. (2015): The origin, source, and cycling of methane in deep crystalline rock biosphere. – *Frontiers in Microbiology*, 6, (725).
DOI: 10.3389/fmicb.2015.00725
- McCullom, T.M. (2013): Laboratory Simulations of Abiotic Hydrocarbon Formation in Earth's Deep Subsurface. – *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75, 1: 467-494.
DOI: 10.2138/rmg.2013.75.15
- Möller, P., Weise, S.M., Althaus, E., Bach, W., Behr, H.J., Borchardt, R., Bräuer, K., Drescher, J., Erzinger, J., Faber, E., Hansen, B.T., Horn, E.E., Huenges, E., Kämpf, H., Kessels, W., Kirsten, T., Landwehr, D., Lodemann, M., Machon, L., Pekdeger, A., Pielow, H.-U., Reutel, C., Simon, K., Walther, J., Weinlich, F.H. & Zimmer, M. (1997): Paleofluids and Recent fluids in the upper continental crust: Results from the German Continental Deep Drilling Program (KTB). – *Journal of Geophysical Research*, 102, B8: 18233-18254. DOI: 10.1029/96jb02899
- Petford, N. & McCaffrey, K.J.W. (Eds.) (2003): *Hydrocarbons in Crystalline Rocks*. – 214, Special Publication; London (Geological Society).
DOI: 10.1144/GSL.SP.2003.214.01.14
- Stober, I. (1995): *Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges*. – 191 S.; Stuttgart (Enke).

27 Deckgebirge

NEA-Gruppe: 4.1 *Geosphere Characteristics and properties*
 5.1.1 *Topography and morphology*

27.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die strukturgeologischen, lithologischen und petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine im Hangenden des Wirtsgesteins.

Die im Deckgebirge auftretenden Störungen und Klüfte und die geohydraulischen Eigenschaften und Grundwasserverhältnisse werden in separaten FEP beschrieben („Störungen und Klüfte im Deckgebirge“ bzw. „Lösungen im Deckgebirge“).

27.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Viele Kristallinvorkommen in Deutschland wurden als Teil des varizischen Kollisionsorogens durch tektonische Vorgänge sowie durch Verwitterung und Abtragung häufig bis auf das Niveau der darin eingedrungenen Plutone freigelegt, so dass diese heute einen Teil der Landoberfläche bilden. Dabei wird das kristalline Festgestein von Verwitterungsbildungen überlagert, die hinsichtlich ihrer Mächtigkeit und Zusammensetzung sehr heterogen ausgebildet sein können. Je nach Verwitterungsintensität umfassen sie sandige, grusige oder tonige Ablagerungen. Lokal werden die kristallinen Gesteine von permokarbonischen, kreidezeitlichen sowie känozoischen Ablagerungen überdeckt.

Aus der fortschreitenden Verwitterung des kristallinen Ausgangsgesteins, die einige Meter bis 10er Meter tief reichen kann, ergibt sich eine generelle Abfolge eines Verwitterungsbereichs. In der Literatur erfolgt jedoch keine einheitliche Benennung, Beschreibung und Zusammenfassung der darin vorkommenden Teilbereiche, da die Übergänge dazwischen in der Regel nicht scharf begrenzt sind. Auch müssen nicht alle Komponenten enthalten sein. Eine mögliche Einteilung des Verwitterungsbereichs über dem Ausgangsgestein, wie sie in ähnlicher Form in vielen Veröffentlichungen (Unesco 1984, Acworth 1987, Taylor & Eggleton 2001, Dewandel et al. 2006, Anderson et al. 2007, Singhal & Gupta 2010) beschrieben ist, ist in folgende vier Teilbereiche:

- Bodenbildungen, Schutt und Sediment: Umfasst sowohl umgelagertes als auch in situ verwittertes Material. Das Gesteinsgefüge des Ausgangsgesteins ist zerstört, maximale Mächtigkeit wenige Meter.
- In situ zersetztes und vergrustes Gestein: Verlust der mineralischen Bindung, ähnlich Lockergestein. Anhäufung toniger Sekundärminerale, verwitterungsstabile Minerale sind teilweise erhalten. In den oberen Bereichen kann die Struktur des Ausgangsgesteins durch mineralogische Prozesse und einer damit verbundenen Volumenreduktion zerstört sein. Aufgrund seiner tonigen bis sandigen Zusammensetzung kann dieser Bereich eine hohe Porosität erreichen, die Permeabilität ist eher gering; einige 10er Meter mächtig.
- Verwittertes und geklüftetes Gestein: Das Gestein ist im Mineralverband entfestigt, aber noch im Gesteinsverband. Im Extremfall liegen mürbe Gesteinsmassen aus sand- bis kieskorngroßen Gesteinskomponenten bzw. Gesteinsgrus vor. Darin eingebettete Kluftkörper liegen ohne festen Verbund übereinander, Zunahme der Anzahl der Kluftkörper zum Liegenden. Die ursprüngliche Gesteinsstruktur ist erkennbar, geringe bis keine Volumenänderung durch Verwitterungsprozesse. Porosität und Permeabilität jeweils im mittleren Bereich, wird nach unten häufig durch den Grundwasserspiegel begrenzt (Dachroth 2017), Mächtigkeit mehrere Meter bis 10er Meter.

- Geklüftetes Gestein: Die Festigkeit des Gebirges ist erniedrigt. Klüfte sind als offene oder verfüllte Klüfte ausgebildet, Verwitterungsbildungen auf den Kluftflächen. In den ersten Metern im Hangenden dichtes subhorizontales Kluftnetz, mit der Tiefe nimmt die Dichte der subhorizontalen und der subvertikalen Klüfte ab. Geringe Porosität, aber mittlere bis hohe Permeabilität in Klüften, Mächtigkeit mehrere Meter bis 10er Meter.
- Ausgangsgestein: Massiger Fels im festen Verbund.

Die Verwitterungsintensität und -geschwindigkeit wird im Wesentlichen von den Eigenschaften des Ausgangsgesteins, dem Klima, der Bodenbedeckung und der Dauer chemischer Einwirkungen, z. B. durch reaktive Gase, beeinflusst. Je nach Klima und Gesteinseigenschaften können physikalische oder chemische Prozesse überwiegen, die sich gegenseitig unterstützen und verstärken können. Die Beschreibung der chemischen und mechanischen Prozesse befinden sich in den FEP „Erosion“ und „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“.

Beide Verwitterungsprozesse setzen an der Gesteinsoberfläche an und wirken insbesondere an Schwächezonen. Bei granitischen Gesteinen ist dies das vorzugsweise horizontal und vertikal ausgebildete Kluftsystem (vgl. FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“). Die Zersetzung des Gesteins geht randlich von den Klüften aus und setzt sich nach innen in Form konzentrischer Schalen auf einen wenig bis unverwitterten Kern fort. Anhaltende physikalische und chemische Verwitterung lässt das Gestein zunehmend zu einem kiesigen bis sandigen Material vergrusen und die Anzahl sowie die Größe der unverwitterten Gesteinsblöcke nehmen unter fortschreitender Rundung ihrer Kanten ab. Wenn die Verwitterung nicht bis zur Bildung isolierter, im Verwitterungsgrus „schwebend“ eingebetteter Gesteinsblöcke fortgeschritten ist, kann es zur Bildung von Wollsackfelsen kommen, wie sie z. B. im Harz oder im Fichtelgebirge aufgeschlossen sind.

Residual-Kaoline, wie sie als Lagerstätte z. B. in der Oberpfalz (Hirschau-Schnaittenbach), in Sachsen-Anhalt (Halle), in Sachsen (Kemmlitz und Meißen) sowie in Tschechien (Pilsen und Karlsbad) (Okrusch & Matthes 2014) vorkommen, entstehen insbesondere in humiden Klimazonen mit reichlich Niederschlägen, Humusbildung und Anwesenheit organischer Säuren aus feldspatreichen Ausgangsgesteinen.

Die die Verwitterungsschicht überlagernden Böden sind ebenfalls Verwitterungsprodukte des granitischen Gesteins. Als weitere Ausgangsmaterialien kommen organische Substanzen aus der Biosphäre in Form von Organismen, die das Bodensubstrat besiedeln, sowie meist anorganischer Staub aus der Atmosphäre hinzu (Grotzinger & Jordan 2017). Die Umwandlung von Gestein in Böden ist sehr komplex und wird durch eine Vielzahl an Prozessen gesteuert und beeinflusst. Eine Zusammenfassung der Vorgänge geben z. B. Taylor & Eggleton (2001). In den granitischen Bereichen der Mittelgebirge entstehen aus dem quarz- und feldspatreichen Substrat meist geringmächtige Verwitterungsböden mit unterschiedlichen Bodenhorizonten, die sehr geringe Gehalte an Kalium, Calcium und Magnesium aufweisen und daher sauer und nährstoffarm sind. Durch Tonhorizonte, die sich bei der chemischen Verwitterung der granitischen Sande gebildet haben, kommt es in den Senken zur Wasserstauung, was die Anlage von Mooren begünstigt.

27.3 Komponentenbeschreibung

Das Modellgebiet „mKBS-3“ befindet sich in einer Mittelgebirgslandschaft, für die eine Höhenlage von 300 bis 400 m ü. NN angenommen wird. Das Deckgebirge, welches das granitische Wirtsgestein überlagert, besteht aus Bodenbildungen und zum Teil stark verwitterten Relikten des kristallinen Wirtsgesteins. Diese werden aufgrund ihrer vom Wirtsgestein abweichenden hydraulischen Eigenschaften als Teil des Deckgebirges behandelt. Das Deckgebirge gliedert sich vom Hangendem zum Liegenden wie folgt:

1. wenige Dezimeter mächtige Verwitterungsdecke bestehend aus Boden, Schutt und Sediment. Das ursprüngliche Gesteinsgefüge ist zerstört, feinkörnige Tonminerale wurden durch Oberflächen- und Versickerungswasser zum Großteil ausgewaschen, Quarz ist aufgrund seiner ausgeprägten chemischen und mechanischen Verwitterungsresistenz der wichtigste Verwitterungsrückstand des Granits, in den oberen Bereichen mit Anteilen an zersetzter bzw. in Zersetzung befindlicher organischer Substanz (Boden),
2. stark alterierter Granit, der jedoch die meisten strukturellen Eigenschaften des Ausgangsgesteins aufweist. Die verwitterungsresistenten Minerale wie Quarz sind noch vorhanden, verwitterungsanfälliger Minerale wie Feldspäte und Glimmer wurden chemisch abgebaut. Das Aluminium der Feldspäte und Glimmer gelangte überwiegend in Tonminerale (Kaolinit), die als Verwitterungsneubildung entstanden, so dass das Gesteinsgefüge erhalten blieb. Natrium, Kalium und Calcium wurden weitgehend als Ionen in Lösung abgeführt. Bereichsweise hat Eisen in Form von FeOOH aus mafischen Mineralen das Gestein rostig braun gefärbt, Mächtigkeit wenige Meter,
3. sandiger Granitgrus, in dem vereinzelt Gesteinsblöcke aus kaum verwittertem Granit eingebettet sind. Zum Liegenden werden diese Blöcke häufiger und größer und die Rundung ihrer Kanten nimmt ab. Nach unten wird die Felsverwitterungszone durch den Grundwasserspiegel begrenzt. Mächtigkeit: mehrere 10er Meter,
4. geklüfteter Granit im Felsverband. Die Verwitterung ist nur in schmalen Bereichen um offene Klüfte zu beobachten.

Eine gegenüber dem Wirtsgestein (vgl. FEP „Wirtsgestein“) erhöhte hydraulische Leitfähigkeit wird im Modell „mKBS-3“ bis in eine Tiefe von 200 m u. GOK angenommen, wobei die Zahl der Wasserwegsamkeiten mit der Tiefe abnimmt. Durchschnittliche hydraulische Leitfähigkeiten von verwittertem Granit liegen in der Größenordnung um 10^{-7} m/s bis 10^{-5} m/s (Morris & Johnson 1967 zitiert in Taylor & Eggleton 2001, Dewandel et al. 2006), sind aber stark vom Vorhandensein vernetzter Klüfte bestimmt. Auswertungen von Pumpversuchen im ostbayerischen Grundgebirge von Zeithöfler et al. (2015) zeigten eine kontinuierliche Abnahme der Leitfähigkeiten in einer Spanne der k_f -Werte zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ und $5 \cdot 10^{-4}$ m/s bis in eine Teufe von ca. 100 m u. GOK. In Tiefenbereichen ab 100 m liegt der Wertebereich zwischen $3 \cdot 10^{-7}$ und $1 \cdot 10^{-5}$ m/s ohne erkennbaren Trend zu geringeren k_f -Werten in der Teufe, was jedoch auf die geringe Anzahl von Datenpunkten zurückzuführen ist.

Auswertungen von Appel & Habler (2002), die auf Daten internationaler Veröffentlichungen beruhen, ergaben für den Tiefenbereich bis 300 m u. GOK für intakten Granit hydraulische Leitfähigkeiten mit k_f -Werten von durchschnittlich $6 \cdot 10^{-11}$ m/s bzw. für gestörten Granit von $4 \cdot 10^{-7}$ m/s, wobei auch hier eine große Varianz der Messwerte zu beobachten ist.

Die lithologischen, mineralogischen und petrophysikalischen Eigenschaften des Deckgebirges basieren auf denen des plutonischen Wirtsgesteins (vgl. FEP „Wirtsgestein“). Die weitere Charakterisierung der geologischen Gesamtsituation im Modellgebiet sowie die Beschreibung des Aufbaus und der Zusammensetzung des Deckgebirges und des Wirtsgesteins erfolgt im Modellbericht (Mrugalla et al. 2020).

27.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

27.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

27.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Das Deckgebirge ist Teil des Gebirges am Endlagerstandort und wird auch in Zukunft als Randbedingung Bestand haben.

27.7 Ungewissheiten

Keine.

27.8 Literaturquellen

- Acworth, R.I. (1987): The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. – Quarterly Journal of Engineering Geology, 20: 265-272.
- Anderson, S.P., Blanckenburg, F.v. & White, A.F. (2007): Physical and Chemical Controls on the Critical Zone. – Elements 3: 315-319.
- 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. – XII, 206 S.; Hannover.
- Dachroth, W.R. (2017): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. – 4. neu bearbeitete und aktualisierte Aufl., Berlin (Springer Spektrum).
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C. & Krishnamurthy, N.S. (2006): A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. – Journal of Hydrology, 330, 1: 260-284.
- Grotzinger, J.P. & Jordan, T. (2017): Allgemeine Geologie. – 7. Aufl.; Berlin (Springer).

- Morris, D.A. & Johnson, A.I. (1967): Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60. – Report, Water Supply Paper.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönnke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Okrusch, M. & Matthes, S. (2014): Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. – 9. Aufl. – Berlin (Springer)
- Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P. (2010): Applied Hydrogeology of Fractured Rocks: Second Edition. – Dordrecht (Springer).
- Taylor, G. & Eggleton, R.A. (2001). Regolith Geology and Geomorphology. – Chichester (Wiley).
- Unesco (1984): Ground water in hard rocks. Project 8.6 of the International Hydrological Programme. – Studies and Reports in Hydrogeology No. 33: 228; Paris (United Nations).
- Zeitlhöfler, M., Wagner, B. & Spörlein, T. (2015): Strukturgeologie und Grundwasserführung im ostbayerischen Grundgebirge. – Geologica Bavarica 112; Augsburg

28 Störungen und Klüfte im Deckgebirge

NEA-Gruppe: 4.1 *Geosphere Characteristics and properties*
4.1.2 *Large-scale discontinuities*

28.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter einer Störung wird eine Trennfuge im Gebirge verstanden, an der ein Versatz der beiden angrenzenden Gesteinspakete auftritt. Versatzbeträge entlang von Störungen können im Bereich von Zentimetern bis Kilometern liegen. Klüfte hingegen sind nur wenig geöffnete Gesteinsfugen, an denen keine wesentlichen Bewegungen stattgefunden haben. Dieses FEP beschreibt auch Kluftmineralisationen, die in Störungen und Klüften häufig enthalten sind, nicht aber die Fluide, durch die sie entstehen.

28.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Störungen sind alle Arten von Trennflächen, an denen Bewegungen stattgefunden haben. Sie werden durch die Bewegungsrichtung und den Versatzbetrag charakterisiert und sind die Folge von Kompression bzw. Extension (Ab- bzw. Auf- und Überschiebung), Scherung (Horizontalverschiebungen) oder einer Kombination von Scherung und Extension bzw. Kompression (Schrägabschiebung) (Grotzinger & Jordan 2017). Klüfte sind das Ergebnis von Spannungen, deren Ursache tektonischer (Deformationsklüfte) oder atektonischer (Entlastungs- und Kontraktionsklüfte) Natur sein können. Die Bildungsprozesse von Störungen und Klüften in kristallinen Gesteinen werden im FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“ beschrieben.

Die Orientierung von Kontraktionsklüften wird von der internen Struktur und der Form des Plutons beeinflusst (Reuther 2012). Für Granit typisch sind weitständige, ungefähr senkrecht aufeinander stehende Kontraktionsklüfte in drei Richtungen (zwei vertikale und eine horizontale), die das Gestein quaderförmig zerlegen. Entlastungsklüfte treten meist subparallel zur Erdoberfläche auf. Der Abstand zwischen den Entlastungsklüften beträgt nahe der Erdoberfläche wenige Zentimeter und nimmt mit der Tiefe rasch auf Kluftabstände im Meter-Bereich zu (Reuther 2012; Dachroth 2017), wobei sich diese Merkmale meist nur auf die oberen 50 bis 100 m des Gesteinsverbandes beschränken.

Als weitere Ursache für die Entstehung des dichten subhorizontalen Kluftnetzwerkes nahe der Erdoberfläche werden Verwitterungsvorgänge diskutiert, die eine Volumenzunahme von bestimmten Mineralen, z. B. durch Hydratisierung von Biotit, verursachen und damit die Entstehung von subhorizontalen Klüften begünstigen (Lachassagne et al. 2011, Dewandel et al. 2006). In den oberflächennahen Bereichen der Kristallingesteine greift die chemische und physikalische Verwitterung an offenen Klüften an und erweitert diese fortschreitend (vgl. FEP „Deckgebirge“). Diese Klüfte sind weitgehend mit vergrusten Granitbruchstücken verfüllt. Im grundwasserführenden Bereich ist die Mehrzahl der Klüfte offen und bestimmt die Grundwasserströmung. Durch das Gefrieren des Wassers in den Klüften kann es in Kaltzeiten zu einer erhöhten thermomechanischen Beanspruchung des Gesteins kommen (vgl. FEP „Permafrost“), wodurch oberflächennahe Klüfte bei entsprechend geringerem Auflastdruck weiter geöffnet werden können (Posiva 2012).

Neben offenen Klüften treten im Granit durch Kluftmineralisationen mehr oder weniger vollständig verschlossene Klüfte auf. Kluftminerale entstehen aus Alterationsprozessen von Wasser mit Kalifeldspat, Na-reichem Plagioklas (Albit), Quarz und in geringem Maße mit Biotit und verschiedenen Akzessorien (Bucher & Stober 2010). Die Prozesse, die zur Kluftmineralisation führen, werden im FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“ diskutiert.

28.3 Komponentenbeschreibung

Das Deckgebirge im Modell „mKBS-3“ besteht aus Verwitterungsrückständen sowie aus aufgelockerten, hydraulisch wirksamen Bereichen des granitischen Plutons und reicht bis in eine Tiefe von 200 m u. GOK (vgl. FEP „Deckgebirge“). Der homogene Aufbau des Plutons und seine Lage in einer tektonisch inaktiven Zone im deutschen Mittelgebirgsraum spiegeln sich auch im Aufbau des Deckgebirges wider.

In den oberen 10er Metern des von Verwitterungsvorgängen stark veränderten Deckgebirges sind die Klüfte nur noch relikthaft erkennbar. Ab der Felsauflockerungszone, in der der Granit im Felsverband ansteht, treten die annähernd senkrecht aufeinander stehenden Klufrichtungen deutlich zum Vorschein. Vereinfachend wird das Deckgebirge nicht unterteilt, sondern mit einem durchgehenden Kluftsystem mit einer höheren hydraulischen Leitfähigkeit als im Wirtsgestein angenommen; nähere Erläuterungen zum Kluftsystem des Deckgebirges können dem Modellbericht (Mrugalla et al. 2020) entnommen werden.

Die im natürlichen System vorhandene Abnahme des Durchtrennungsgrads des granitischen Gesteins mit der Tiefe wird im Modell innerhalb des Deckgebirges nicht umgesetzt. Ab 200 m Tiefe beginnt im Modell „mKBS-3“ das Wirtsgestein, sein Kluftsystem ist im FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“ beschrieben. Ein Gang aus Lamprophyr verläuft im Modell „mKBS-3“ parallel zur steil stehenden, subvertikalen Klüftung und wird im FEP „Wirtsgestein“ betrachtet. Er streicht im Deckgebirge aus und wird dort jedoch nicht gesondert betrachtet.

Die steil stehenden Klüfte im Deckgebirge sind in der Regel frei von Mineralisationen, vereinzelt sind sie mit Quarz gefüllt. Der Verwitterung ausgesetzte Kluftflächen sind teilweise verglimmert, Kluftfüllungen bestehen aus Tonmineralen, Quarz, Calcit und Feldspäten. In geringen Mengen können z. B. auch Hämatit, Pyrit, Fluorit und Apatit vorkommen.

Unter Permafrostbedingungen können oberflächennahe Klüfte durch Gefrierprozesse und den damit verbundenen mechanischen Spannungsänderungen geöffnet werden (Frostsprengung). Generell wird der Grundwasserfluss in der verwitterten und in der geklüfteten Abfolge des Deckgebirges unter Permafrostbedingungen eingeschränkt (vgl. FEP „Permafrost“).

28.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur	x	Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	x	Deformationsvermögen
	Diffusionskoeffizient	x	Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
x	Permeabilität	x	Löslichkeit
x	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
	Fluiddruck	x	Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

28.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

28.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Klüfte im Deckgebirge sind eine Randbedingung des Endlagersystems.

28.7 Ungewissheiten

- Zum Vorhandensein, Raumlage, hydraulische Leitfähigkeit und Vernetzung von Klüften muss auf empirisch gestützte Annahmen zurückgegriffen werden.

28.8 Literaturquellen

- Bucher, K. & Stober, I. (2010): Fluids in the upper continental crust. – *Geofluids*, 10, 1-2: 241-253.
- Dachroth, W.R. (2017): *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*. – 4. neu bearbeitete u. aktualisierte Auflage; Berlin (Springer Spektrum).
- Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C. & Krishnamurthy, N.S. (2006): A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. – *Journal of Hydrology*, 330, 1: 260-284.
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): *Allgemeine Geologie*. – 7. Auflage: 769 S.; Berlin (Springer). DOI: 10.1007/978-3-662-48342-8
- Lachassagne, P., Wyns, R. & Dewandel, B. (2011): The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. – *Terra Nova*, 23, 3: 145-161.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): *CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“*, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Posiva (2012): *Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes*. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Reuther, C.-D. (2012): *Grundlagen der Tektonik: Kräften und Spannungen der Erde auf der Spur*. – Berlin (Springer Spektrum).

29 Lösungen im Deckgebirge

- NEA-Gruppe: 4.1.6 *Hydraulic characteristics and properties*
 4.1.8 *Geochemical characteristics and properties*
 4.1.9 *Biological characteristics and properties*
 5.1.4 *Near-surface aquifers and water-bearing features*

29.1 Definition/Kurzbeschreibung

Lösungen im Deckgebirge sind wässrige Lösungen, die sich aus dem Grundwasser und Fluideinschlüssen im Gestein zusammensetzen. Ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften (pH, Eh, Viskosität usw.) sind durch die Art und Menge der gelösten Stoffe bestimmt.

29.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die stark geklüfteten oberflächennahen Kristallingesteine der Mittelgebirge sind Kluftgrundwasserleiter mit geringer, lokal größerer Grundwasserführung. Die Wasserbewegung und Speicherung beschränkt sich auf die durchflusswirksamen Trennflächen. Dabei handelt es sich vorwiegend um Dehnungsklüfte, deren Anteil am Gesteinshohlraum mit der Tiefe abnimmt (vgl. FEP „Störungen und Klüfte im Deckgebirge“). Kluftgrundwasserleiter zeigen häufig schwankende Grundwasserspiegel, da sie meist schnell auf Niederschlagsereignisse oder deren Ausbleiben reagieren.

Im Verwitterungsbereich sind die Kristallingesteine auch als Porengrundwasserleiter ausgebildet (BMU 2003) bzw. als Kluft-/Porengrundwasserleiter mit unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeit (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie 2016). Die Wasserbewegung und Speicherung findet überwiegend im durchflusswirksamen Hohlraumgefüge der Lockergesteine statt, die vorwiegend aus einem Korngrößengemisch aus eher grobkörnigem, sandigem Granitgrus bestehen. Der Verwitterungsbereich (vgl. FEP „Deckgebirge“) wird nach unten häufig durch den Grundwasserspiegel begrenzt (Dachroth 2017).

Da ergiebige Grundwasservorkommen an offene Trennflächen gebunden sind und aufgrund der wechselnden Kluftsituation ist die Grundwasserführung im Kristallingestein meist nur von lokaler, bei einigen wenigen Vorkommen auch von regionaler Bedeutung (Ad-Hoc-AG Hydrogeologie 2016). Ergiebige Grundwasservorkommen im stark alterierten und verwitterten Granit sind z. B. aus der Radonquelle von Weißenstadt im Fichtelgebirge bekannt (Röckel & Stober 2017). Entsprechend hohe hydraulische Leitfähigkeiten sind auch aus oberflächennahen, zu Granitgrus verwitterten Kristallingestein im Schwarzwald bekannt (Stober 1995).

In den oberflächennahen Verwitterungsbereichen trägt die höhere Fließgeschwindigkeit und entsprechend kürzere Verweilzeit des Grundwassers und damit die geringere Intensität der Lösungsprozesse im Speichergestein zu einer verbreiteten Heterogenität dieser Wässer bei (BMU 2003). Der Chemismus wird durch den Lösungsgehalt des Niederschlags und durch Prozesse in der Bodenzone kontrolliert (vgl. White et al. 2005, Taylor & Eggleton 2001). Zu letzteren zählen der chemische Abbau von Mineralen und Gesteinen sowie Zersetzung von organischem Material und die Tätigkeit der Mikroorganismen. Diese Lösungen sind an CO_2 bzw. HCO_3^- angereichert und enthalten verschiedene organische Säuren (Huminsäuren) (Okrusch & Matthes 2014). Meist reagieren Lösungen des Verwitterungsbodens sauer mit einem pH-Wert bis 3 (Okrusch & Matthes 2014).

Im Festgestein wird die geogene Beschaffenheit des Grundwassers wesentlich vom Mineralbestand der wasserleitenden Gesteine geprägt. Lokal oder gebietsweise wird der Wasserchemismus von weiteren Faktoren wie dem Austausch mit Wässern anderer hydrogeologischer

Einheiten beeinflusst. Insgesamt sind die Lösungsraten der gesteinsbildenden Minerale im Granit eher gering (vgl. FEP „Lösungen im Wirtsgestein“). Durch Lösungsprozesse von Feldspäten, Quarz und untergeordnet Biotit sowie verschiedenen Akzessorien entstehen sekundäre Kluftminerale in Form von Tonmineralen (Chlorit), Zeolithen, Karbonaten, Sulfaten, Oxiden und untergeordnet auch Sulfiden (Bucher & Stober 2010).

Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers in granitischen Gesteinen ändert sich mit der Tiefe. Oberflächennah dominieren Wässer vom Typ Ca-Na-HCO_3 (Bucher & Stober 2010). Mit zunehmender Tiefe nimmt der Anteil an Alkalien und Sulfaten zu und die Grundwässer wandeln sich schrittweise zum Typ $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ um (Bucher & Stober 2010; vgl. FEP „Lösungen im Wirtsgestein“).

Der Gehalt gelöster Feststoffe in der Lösung (TDS) unterliegt in den oberflächennahen, geklüfteten kristallinen Gesteinen einer großen Variation. Im Hydrologischen Atlas von Deutschland (BMU 2003) werden charakteristische Werte von 100 bis 400 mg/l genannt, Singhal & Gupta (2010) nennen vergleichbare Werte von 100 bis 500 mg/l. In Grundwasserproben aus dem Schwarzwald, die in Teufen zwischen 27 und 120 m u. GOK genommen wurden, schwankt dieser Wert zwischen 120 und über 10.000 mg/l (Bucher & Stober 2010).

Wässrige Lösungen können auch in den gefrorenen Aggregatzustand übergehen und dann als feste Phase vorliegen. In Kaltzeiten kann darüber hinaus der Eintrag von Süßwässern stark beeinträchtigt sein (vgl. FEP „Permafrost“). Modellierungen für den Standort Forsmark, an dem in den obersten 200 m hauptsächlich stark geklüfteter Granit ansteht, zeigen, dass unter Permafrostbedingungen der Grundwasserfluss und die Neubildung in einer geklüfteten Kristallinformation insgesamt eingeschränkt sind (Bosson et al. 2013). Kommt es unter Permafrostbedingungen zu einem vollständigen Erliegen des Grundwasserflusses, z. B. wenn in den tieferen Bereichen stagnierende Verhältnisse vorliegen, kann sich die Konzentration an gelösten Stoffen erhöhen. Umgekehrt können Wässer mit hohen TDS-Gehalten die Ausprägung des Permafrosts beeinflussen, indem es zwar zu einer Temperaturerniedrigung, aber nicht zum Gefrieren des Wassers kommt. In diesem Fall können sich Cryopegs oder hydrochemische Taliki ausbilden. Darüber hinaus weisen hochmineralisierte Wässer auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf und können dadurch die Tiefenwirkung des Permafrosts herabsetzen.

29.3 Komponentenbeschreibung

Im Modell „mKBS-3“ wird im Deckgebirge ein Kluftgrundwassergeringleiter mit engräumigen Einzugsgebiet angenommen. Ein oberflächennaher Verwitterungs- und Vergrusungsbereich mit höheren hydraulischen Leitfähigkeiten wird nicht gesondert ausgewiesen.

Die hydraulischen Leitfähigkeiten im Deckgebirge werden als gering bis äußerst gering angesetzt ($k_f < 10^{-5}$ m/s) (Mrugalla et al. 2020). Dementsprechend ist eine geringe bis mäßige Grundwasserführung im Deckgebirge zu erwarten. Die enthaltene Lösungsmenge in diesem Bereich ist jedoch großen Schwankungen unterworfen, da auch der Grundwasserspiegel stark schwankt.

Der Süßwassereintrag erfolgt über Niederschlagswasser, das in den verwitterten und aufgelockerten oberen Boden- und Gesteinsschichten gut versickern kann. Der TDS-Gehalt in den Wässern des Deckgebirges beträgt etwa 300 mg/l. Dabei wechselt der Wassertyp nach dem gelösten chemischen Stoffbestand vom Typ Ca-Na-HCO_3 im Deckgebirge zum Typ $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ im Wirtsgestein.

Im Modell „mKBS-3“ liegen rezent keine hochmineralisierten Wässer vor und werden auch für die Zukunft nicht erwartet, so dass die Bildung von chemischen Taliki zumindest für die nächste Kaltzeit vernachlässigbar sind.

Die Prozesse, die hauptsächlich den wechselseitigen Stoffaustausch bewirken, werden in den FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“ sowie in den verschiedenen FEP zu Zersetzungs- und mikrobiellen Prozessen beschrieben. Alle genannten Prozesse können aber auch durch die Zusammensetzung der Wässer beeinflusst werden.

29.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur		Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
x	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität		Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

29.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

29.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Lösungen im Deckgebirge sind eine Randbedingung des Endlagersystems.

29.7 Ungewissheiten

Keine.

29.8 Literaturquellen

Ad-Hoc-AG Hydrogeologie (Ed.) (2016): Regionale Hydrogeologie von Deutschland - Die Grundwasserleiter: Verbreitung, Gesteine, Lagerungsverhältnisse, Schutz und Bedeutung. – Band A 163, Geologisches Jahrbuch, Reihe A: 456 S.; Hannover (Schweizerbart).

Bosson, E., Selroos, J.-O., Stigsson, M., Gustafsson, L.-G. & Destouni, G. (2013): Exchange and pathways of deep and shallow groundwater in different climate and permafrost conditions using the Forsmark site, Sweden, as an example catchment. Hydrogeology Journal, Vol. 21, 1: 225-237. DOI: 10.1007/s10040-012-0906-7

- Bucher, K. & Stober, I. (2010): Fluids in the upper continental crust. – *Geofluids*, 10, 1-2: 241-253, (Blackwell Publishing Ltd). DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x
- BMU (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD). – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Ed.): 239 S.; Bonn.
- Dachroth, W.R. (2017): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. – 4., neu bearbeitete u. aktualisierte Auflage; Berlin (Springer Spektrum).
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönnke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Okrusch, M. & Matthes, S. (2014): Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. – Springer Spektrum, 9. Aufl.; Berlin (Springer Spektrum).
- Röckel, L. & Stober, I. (2017): Die neue Tiefbohrung Weißenstadt im Granit des Fichtelgebirges. – *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 22, 165-173. DOI: 10.1007/s00767-017-0361-4
- Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P. (2010): Applied hydrogeology of fractured rocks. – 2nd Edition; Dordrecht (Springer).
- Stober, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. – Stuttgart (Enke).
- Taylor, G. & Eggleton, R.A. (2001). *Regolith Geology and Geomorphology*. – Chichester (Wiley).
- White, A.F., Schulz, M.S., Vivit, D.V., Blum, A.E., Stonestrom, D.A. & Harden, J.W. (2005): Chemical weathering rates of a soil chronosequence on granitic alluvium: III. Hydrochemical evolution and contemporary solute fluxes and rates. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, 8: 1975-1996. DOI: 10.1016/j.gca.2004.10.003.

30 Gase im Deckgebirge

NEA-Gruppe:	4.1.5	<i>Geothermal characteristics and properties</i>
	4.1.7	<i>Mechanical characteristics and properties</i>
	4.1.8	<i>Geochemical characteristics and properties</i>
	4.1.9	<i>Biological characteristics and properties</i>

30.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die im Deckgebirge vorkommende Menge und Zusammensetzung an freien Gasen.

30.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Verteilung der Gase im Deckgebirge hängt vor allem vom Vorhandensein und der Verteilung des Kluft- und des Porenraums sowie der Tiefenlage des Grundwasserspiegels ab. Die Verteilung der Hohlräume variiert insbesondere in vertikaler und horizontaler Ausrichtung, was auf Verwitterungsvorgänge sowie auf das Kluftsystem zurückzuführen ist. Der Porenraum, die Klufthäufigkeit und die -öffnungsweite und damit auch der potentielle Speicherraum für Gase nehmen mit zunehmender Tiefe ab (vgl. FEP „Deckgebirge“). Da der Grundwasserspiegel in Kluftgrundwasserleitern als Reaktion auf Niederschlagsereignisse oder deren Ausbleiben häufig schwankt (vgl. FEP „Lösungen im Deckgebirge“ und „Strömungsvorgänge in der Geosphäre“), variiert auch das für Gase zur Verfügung stehende Hohlraumvolumen.

Die Konzentration eines Gases in der Flüssigkeit ist proportional zu dessen Partialdruck in der Gasphase (Henry'sches Gesetz). Der Proportionalitätsfaktor (Henry-Koeffizient) ist temperaturabhängig, so dass sich die Löslichkeit der meisten Gase in Wasser mit zunehmender Temperatur verringert. Im Gegenzug nimmt die Löslichkeit mit steigendem Druck zu. Da die Löslichkeit der Gase vom Druck bei der Gaslösung abhängt, kann die Löslichkeitsgrenze unter Umständen auch wieder überschritten werden und die gelösten Gase zurück in den gasförmigen Zustand überführt werden, falls das Grundwasser in geringere Tiefen mit einem geringeren hydrostatischen Druck transportiert wird. Weiterhin ist die Löslichkeit von Gasen auch von der Konzentration anderer Stoffe in der flüssigen Phase abhängig, durch gelöste Salze wird die Löslichkeit von Gasen beispielsweise herabgesetzt.

Die im kristallinen Festgestein auftretenden freien Gase (vgl. FEP „Gase im Wirtsgestein“) beeinflussen den Transport und Chemismus des Grundwassers. Gelöste Gase werden in der flüssigen Phase transportiert, nicht gelöste steigen über den Zweiphasenfluss durch das Aquifersystem auf und gelangen letztendlich in die Atmosphäre.

30.3 Komponentenbeschreibung

Oberhalb des Grundwasserspiegels sind Poren- und Kluft Hohlräume im Deckgebirge mit den natürlichen Bestandteilen der Luft (Stickstoff N₂, Sauerstoff O₂, Argon Ar, Kohlenstoffdioxid CO₂ und andere Gase in Spuren) gefüllt. Weiteres freies Gas ist in Form von Bodengasen in der vadosen Zone des Deckgebirges vorhanden. Die Bodengase stehen in Verbindung mit der Erdatmosphäre oder sind in den Poren- und Kluft Hohlräumen eingeschlossen. Durch versickerndes Regenwasser dringen aus der Luft mitgeführtes CO₂ und andere Gase (z. B. NO₂ und SO₂) in das Deckgebirge ein. Durch Aktivitäten in der Bodenzone kann der CO₂-Gehalt gegenüber der Atmosphäre bis auf den hundertfachen Wert (Grotzinger & Jordan 2017) ansteigen.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass aus dem Grubengebäude Gase in das Deckgebirge migrieren. Bei diesen Gasen handelt es sich vorwiegend um nicht radioaktive Gase wie komprimierte Luft oder Wasserstoff, Kohlendioxid und Methan, die bei Korrosions- oder Degradationsprozessen entstehen. Die nichtaktiven Gase können als Transportmedium für radioaktive Gase fungieren. Aufgrund der stofflichen Zusammensetzung des granitischen Deckgebirges und Wirtsgesteins können auch die Gase im Deckgebirge zu Beginn der Nachverschlussphase eine natürliche Radioaktivität (Radon) aufweisen.

Gasbildende und -verbrauchende Prozesse im Deckgebirge laufen z. B. bei der Korrosion von Metallen, die über Erkundungsbohrungen ins Deckgebirge eingebracht wurden ab (FEP „Metallkorrosion“). Durch chemische mikrobielle Prozesse oder Phasenübergänge können sich weitere Veränderungen der Gasmenge ergeben (z. B. Methan in Kohlendioxid, vgl. FEP „Mikrobielle Prozesse“). Zusätzlich kann die Gasmenge durch Zu- bzw. Abstrom von Gasen (siehe FEP „Strömungsvorgänge in der Geosphäre“) und die Lösung sowie das Ausgasen von Gasen (siehe FEP „Lösen und Ausgasen“) in der flüssigen Phase entsprechend dem Henry-Gesetz verändert werden.

30.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur		Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
x	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität	x	Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
x	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

30.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

30.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Gase im Deckgebirge stellen eine Randbedingung des Endlagersystems dar.

30.7 Ungewissheiten

Keine.

30.8 Literaturquellen

Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): Allgemeine Geologie. – 7. Auflage: 769 S.; Berlin (Springer).
DOI:10.1007/978-3-662-48342-8

31 Oberflächengewässer

NEA-Gruppe: 5.1.5 *Terrestrial surface water bodies*

31.1 Definition/Kurzbeschreibung

Oberflächengewässer sind auf der Erdoberfläche frei fließende oder stehende Gewässer, z. B. Flüsse oder Seen.

31.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Oberirdische Gewässer werden in Binnengewässer (Flüsse und Seen auf dem Festland) sowie Meere unterteilt. Vorkommen und Form der Oberflächengewässer sind mit den lokalen morphologischen, hydrologischen und klimatischen Gegebenheiten eng verknüpft. Sie sind Teil des globalen Wasserkreislaufes der Erde und bilden häufig mit den oberflächennahen Aquiferen ein gemeinsames hydraulisches Regime.

Oberflächengewässer verändern sich abhängig von den klimatischen Verhältnissen und vor allem abhängig vom Niederschlag. In Kaltzeiten mit geringen Niederschlagsmengen, zumeist als Schnee, können kleinere Fließgewässer trockenfallen. Ebenso kann schon eine geringfügige Umgestaltung der Topographie die Lage und Form der Oberflächengewässer verändern.

31.3 Komponentenbeschreibung

Für das Modell „mKBS-3“ wird angenommen, dass das Kristallingestein oberflächennah verwittert und durch Klüfte aufgelockert ansteht, wie dies in Deutschland z. B. in Mittelgebirgsbereichen der Fall ist. Da das Deckgebirge des Modells aus so einer Verwitterungszone besteht (vgl. FEP „Deckgebirge“) kann davon ausgegangen werden, dass das Niederschlagswasser gut versickern kann und sich im meist vorhanden deutlichen Geländere Relief eher Bäche und kleine Flussläufe bis wenige Meter Breite ausbilden. In der Einteilung der Fließgewässertypen nach Pottgiesser & Sommerhäuser (2008) gehören sie zum Typ 9 „Silikatische, fein- bis grobmaterialreiche Mittelgebirgsflüsse“ und zum Typ 5 „Grobmaterialreiche, silikatische Mittelgebirgsbäche“. Kennzeichnend für diese Fließgewässer sind eher gestreckte, gewundene oder (schwach) mäandrierende Gewässerläufe. Es handelt sich oft um Silikatwasser mit einem pH-Wert von 6,5–8,0, einer Gesamthärte von 1–10 °dH und einer elektrischen Leitfähigkeit von 50–350 µS/cm.

Nach Pottgiesser & Sommerhäuser (2008) zeigen diese Gewässer im Jahresverlauf große Abflussschwankungen und stark ausgeprägte Extremabflüsse der Einzelereignisse.

Im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre ist in den zu erwartenden Kaltzeiten damit zu rechnen, dass bei abnehmenden Niederschlagsmengen vor allem die Bäche trockenfallen. Auch eine geringfügige Umgestaltung der Morphologie kann dazu führen, dass die Bäche und kleinen Flussläufe nicht lagestabil bleiben. Insgesamt stellen sie einen Oberflächenabfluss von Niederschlagswässern dar und greifen so kaum in Prozesse des Untergrundes ein.

31.4 Eigenschaften im Überblick

Thermische		Mechanische	
x	Wärmeleitfähigkeit	x	Dichte
x	Spezifische Wärmekapazität	x	Volumen
x	Temperatur		Festigkeit
x	Thermischer Ausdehnungskoeffizient		Deformationsvermögen
x	Diffusionskoeffizient		Effektive Spannung
Hydraulische		Chemische/Mineralogische/Biologische	
	Permeabilität		Löslichkeit
	Porosität	x	Stoffliche Zusammensetzung
	Kompressibilität	x	Radioaktivität
x	Fluiddruck		Oberflächenbeschaffenheit und -gestalt
x	Viskosität	x	Mikrobenpopulation

31.5 Zeitliche Beschränkung

Keine.

31.6 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die im Modell „mKBS-3“ vorhandenen Oberflächengewässer können durch klimatische oder morphologische Einflüsse grundlegend verändert werden. Grundsätzlich werden Oberflächengewässer jedoch weiterhin bestehen.

31.7 Ungewissheiten

Keine.

31.8 Literaturquellen

Pottgiesser, T. & Sommerhäuser, M. (2008): Beschreibung und Bewertung der deutschen Fließgewässertypen - Steckbriefe und Anhang. – Umweltbundesamt, Bund/ Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Begleittext: 139 S..

Prozess FEP

32 Vertikale Bewegungen der Lithosphäre

NEA-Gruppe: 1.2.1 *Tectonic movement*
 4.2.3 *Mechanical processes [geosphere]*

32.1 Definition/Kurzbeschreibung

Vertikale Bewegungen der Lithosphäre (Hebung und Senkung) zählen zur Epirogenese. Epirogene Bewegungen sind langsame, großflächige und sich über lange Zeiträume erstreckende Hebungen und Senkungen größerer Lithosphärenanteile, deren Gesteinsgefüge dabei erhalten bleibt (Poll & Rosenfeld 1968).

32.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Vertikale Bewegungen stehen im Gegensatz zu den störungsfokussierten (orogenen) Bewegungen. Bei epirogenetischen Bewegungen werden die Gesteine der oberen Lithosphäre nicht durch spannungsabbauende Tektonik gestört. Die laterale Ausdehnung von epirogenetisch verursachten Hebungen oder Senkungen der Lithosphäre beträgt zwischen einigen zehn bis zu mehreren tausend Kilometern. Ein typisches Beispiel für derartige Prozesse ist die Entwicklung der Zentraleuropäischen Subsidenzzone (Ludwig 2001a).

Senkungen der Lithosphäre haben i. d. R. marine Transgressionen und die Ablagerung von Sedimenten in den sich bildenden Meeresbecken zur Folge. Die Mächtigkeit der Sedimente ist u. a. von der Absenkungsgeschwindigkeit der Lithosphäre abhängig. Hebungen der Lithosphäre bezeichnen eine über lange geologische Zeiträume andauernde, weitspannige Aufwärtsbewegung, die i. d. R. mit marinen Regressionen verbunden ist.

Vertikale Lithosphärenbewegungen werden durch geodätische Messungen ermittelt, die jedoch aufgrund der geringen Bewegungsgeschwindigkeit von Höhenpunkten, der kurzen Messintervalle, dem nichtlinearen Bewegungsverlauf und der Überlagerung durch andere Bewegungskomponenten a priori fehlerbehaftet sind (Ellenberg 1993). So können beispielsweise echte tektonische Bewegungen durch Absenkung infolge Prozessen wie Subrosion oder Bergbauaktivitäten überlagert oder verstärkt werden. Geodätische Messungen können so von den Trendanalysen der epirogenen Lithosphärenbewegung abweichende vertikale Bewegungsmuster aufweisen.

Ursache der geodynamischen Prozesse Mitteleuropas ist die Hebung des Alpen-Karpaten-Orogens, die Eintiefung der Nordsee-Senke und der Mitteleuropäischen Senkungszone sowie der Entwicklung des jungen Ostbaltischen Riftsystems. Im Neogeodynamica Baltica Projekt (Garetsky et al. 2001) wurden anhand der Verstellung von marinen tertiären Sedimenten die Hebungs- oder Senkungsbeträge seit Beginn des Rupelium im Oligozän (vor ca. 34 Millionen Jahren) ermittelt. Für den Bereich südlich der Zentraleuropäischen Subsidenzzone bis zu den Mittelgebirgen wird, soweit mit Daten belegt, eine seit dem Oligozän anhaltende Hebung ausgewiesen (Ludwig 2001c). Die variszisch geprägten Mittelgebirge selbst zählen zur Zentraleuropäischen Hebungszone, die in einem flachen Boden das Alpen-Karpaten-Orogen umgibt und die eine signifikante Reaktivierung seit dem Oligozän erfahren hat. Die langen Zeiträume der Hebung und Erosion tragen zum heutigen Erscheinungsbild der Mittelgebirgsflächen bei und sind durch die starke Hebung einzelner Lithosphärenblöcke und Massive wie dem Thürin-

ger Wald, dem Harz oder dem Erzgebirge charakterisiert (Ludwig 2001c). Als mobilste Bruchscholle wurde das Erzgebirge entlang des Erzgebirgsabbruchs seit dem Oligozän um fast 1.000 m gehoben (Pälchen & Walter 2008). Der Harz wurde seit dem Oligozän um 200 m gehoben (Feldmann 2002). Auch im Thüringer Wald gibt es durch präglaziale Zersatzgrobsschotter Hinweise die auf eine verstärkte Hebung im Pliozän, die sich bis ins Pleistozän fortsetzt, (vgl. Seidel 2003; Ziegenhardt 1968).

Auf die starken Vertikalbewegungen der Lithosphäre vom Pliozän bis ins frühe Mittelpleistozän, die von einer intensiven Bruchtektonik begleitet wurden, folgte seit dem späten Holstein eine tektonisch eher inaktive Phase. Die rezenten horizontalen Vertikalbewegungen im Bereich der westeuropäischen Tafel zeigen aufgrund der lückenhaften Datenlage ein differenziertes Bild mit geringen Vertikalbewegungen, die im Bereich von ± 0 mm/a liegen oder eine geringe Senkungstendenz zeigen (z. B. im Bereich des Eger-Grabens) (Ludwig 2001b). Die Bewegungstrends vorausgegangener neotektonischer, vielfach auch präneotektonischer Strukturentwicklungen werden dabei in geringem Maße fortgesetzt (Ludwig 2001a). In einzelnen Bereichen wie dem Erzgebirge konnte mittels in situ Spannungsmessungen und Relativbewegungen an Störungen gezeigt werden, dass sich das Gebiet durch die NWN-SES gerichtete Kompression auch heute noch geringfügig in Hebung befindet (Bankwitz et al. 1995). Die seismische Aktivität steht in Verbindung mit dem SE streichenden Bruchsystem der Elbe und der Absenkung des Egergrabens (Ohře-graben) (siehe FEP „Grabenbildung“). Auch in Thüringen sind geringfügige rezente Bewegungen an Bruchstörungen bekannt, an dem die Relativbewegungen der an sie angrenzenden Bereiche nachgewiesen werden konnte (Seidel 2003).

Isostatische Hebungen, die nach dem Abtauen mächtiger Inlandeismassen als Ausgleichsbewegungen der Lithosphäre ablaufen und denen entsprechende Absenkungen durch die Eisauflast vorangegangen sind, werden im FEP „Isostatische Bewegungen der Lithosphäre“ diskutiert.

32.3 Prozessbeschreibung

Die rezenten vertikalen Bewegungsraten aus Ludwig (2001b) zeigen für die Region der Mittelgebirge nur geringfügige Vertikalbewegungen. Rezente vertikale Lithosphärenbewegungen sind z. B. auch flächendeckend für Thüringen untersucht worden (Ellenberg 1993). Dabei sind für die flächenhaft wirksamen (Epirogenese) Bewegungsraten unter 1 mm/a ermittelt worden, die statistisch nicht signifikant sind. Es zeichnen sich Anomalien unterschiedlicher Hebung und Senkung ab, die in etwa dem Verteilungsmuster der Bouger-Anomalien entsprechen (Seidel 2003). Durch das geringe Ausmaß sind keine Auswirkungen zu erwarten und können somit für den Modelltyp „mKBS-3“ ebenfalls vernachlässigt werden. Hebungen von über 1 mm/a Jahr über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre sind aufgrund der Rahmenbedingungen nach § 22 II Nr. 1 (StandAG 2017): Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ ausgeschlossen. Durch das mäßige Relief der Mittelgebirgsregionen und der rezenten tektonisch inaktiven Phase ist somit auch die direkt von Hebungen beeinflusste Erosion gering ausgeprägt (siehe FEP „Erosion“).

32.4 Zeitliche Beschränkung

Keine, da der Prozess innerhalb von einer Million Jahre dauerhaft wirkt.

32.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Vertikale Bewegungen der Lithosphäre werden auch innerhalb der nächsten eine Million Jahre ablaufen. Durch die langsamen, großflächigen und sich über lange Zeiträume erstreckenden Vertikalbewegungen ergeben sich aber keine relativen Auswirkungen auf die Geosphäre und das Grubengebäude.

32.6 Ungewissheiten

- Entwicklung von Methoden der Ableitung rezenter vertikaler Lithosphärenbewegungen.

32.7 Literaturquellen

- Bankwitz, P., Bankwitz, E., Franzke, H.J., Rauche, H. & Dannapfel, M. (1995): In situ-Spannungsmessungen in Thüringen und Sachsen. – Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Vol. 2: 77–94.
- Ellenberg, J. (1993): Rezente vertikale Erdkrustenbewegungen in Thüringen. (In: Mäusbacher, R. & Sedlacek, P. (Eds.): Freistaat Thüringen: Beiträge zur Landesforschung und Landesentwicklung). – Institut für Geographie der FSU Jena: 7-22; Jena (Selbstverlag).
- Feldmann, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär. – Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: X + 149 S.
- Garetsky, R.G., Aizberg, R.Y., Karabanov, A.K., Kockel, F., Ludwig, A.O., Lykke-Andersen, H., Ostaficzuk, S., Palijenko, V.P., Sim, L.S., Sliupa, A. & Stackebrandt, W. (2001): The neogeodynamic state of the Baltic Sea depression and adjacent areas – some conclusions from the IGCP-Project 346: Neogeodynamica Baltica. Der neogeodynamische Zustand der Ostseesenke und benachbarter Gebiete – einige Schlussfolgerungen aus dem IGCP-Projekt 346: Neogeodynamica Baltica. – Brandenburgische Geowiss. Beitr., Vol. 8: 43-47; Kleinmachnow.
- Ludwig, A.O. (2001a): Recent position of surfaces of Holsteinian interglacial marine and limnic sediments, and of Saalian glacial river terraces (Explanatory notes to map 3). (In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (Eds.): Neo-geodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). – Brandenburgische Geowiss. Beitr., Vol. 8: 21-25; Kleinmachnow.
- Ludwig, A.O. (2001b): Recent vertical movements (map 4). (In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (Eds.): Neo-geodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). – Brandenburgische Geowiss. Beitr., Vol. 8: 27-31; Kleinmachnow.
- Ludwig, A.O. (2001c): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). (In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (Eds.): Neo-geodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346). – Brandenburgische Geowiss. Beitr., Vol. 8: 5-12; Kleinmachnow.
- Pälchen, W. & Walter, H. (2008): Geologie von Sachsen - Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. – Stuttgart (Schweizerbart).
- Poll, K. & Rosenfeld, U. (1968): Epirogenese. (In: Murawski, H. (Ed.): Dt. Handwörterbuch der Tektonik). – Loseblattsammlung, 8. Lfg.; Hannover.
- Seidel, G. (Ed.) (2003): Geologie von Thüringen. – 2 ed.: X, 601 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- 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. Deutscher Bundestag.
- Ziegenhardt, W. (1968): Art und Ausmaß altpleisozäner Bewegungsvorgänge im nördlichen Vorland des Thüringer Waldes zwischen Ohra und Ilm. – Geologie, 17, 10: 1154–1177.

33 Orogenese

NEA-Gruppe:	1.2.2	<i>Orogeny</i>
	4.2.3	<i>Mechanical processes [geosphere]</i>

33.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Orogenese wird die Gesamtheit aller Prozesse verstanden, die zur Bildung eines Gebirges (Orogen) beitragen.

33.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Orogene entstehen, wenn Lithosphärenplatten, angetrieben durch Konvektionsströme im Erdmantel, zusammenstoßen und dabei übereinander gleiten und/oder eine der Platten unter die andere subduziert wird (s. a. Bahlburg & Breitzkreuz 2017; Frisch & Meschede 2007). Orogenesen laufen über lange Zeiträume (10 Ma und mehr) kontinuierlich ab. Das Produkt einer Orogenese ist ein Orogen, eine meist langgestreckte Zone in der Lithosphäre, die durch eine gebirgsbildende Entwicklung gekennzeichnet ist. Ein Gebirge im topografischen Sinne entsteht meist spät im Verlauf einer Orogenese. Aktive Orogene sind durch große Falten- und Überschiebungszonen gekennzeichnet. Beispielsweise ist die Kollisionszone zwischen den Lithosphärenplatten India und Eurasia eine aktive Orogenese, der Himalaya ist die topografische Entsprechung an der Oberfläche (Bahlburg & Breitzkreuz 2017). In Mitteleuropa sind Gesteine der kaledonischen, variszischen und alpidischen Orogenese vorhanden. Insgesamt liegen in Europa Orogene vor, die von Nord nach Süd immer jünger werden. Die silur- und devonzeitlichen Gesteine der kaledonischen Orogenese sind im tiefen Untergrund Norddeutschlands nachweisbar. Südlich davon schließen sich die Gesteine des variszischen Gebirges an, die z. T. an der Oberfläche sichtbar sind (z. B. Harz und Rheinisches Schiefergebirge). Zeitlich wird die variszische Orogenese dem ausgehenden Paläozoikum zugeordnet. Die alpidische Orogenese fand in der jüngsten Erdgeschichte Europas statt und resultierte aus dem Zusammenstoß der europäischen und afrikanischen Lithosphärenplatte. Sie umfasst in etwa den Zeitraum der letzten 100 Millionen Jahre, wobei es zur stärksten Hebung der Alpen im Miozän vor etwa 20 bis 5 Millionen Jahren kam (Champagnac et al. 2009). Wie die heutigen Bewegungen in den West- und Zentralalpen und in der Tauernregion mit Hebungsraten von mehr als 1 mm/a zeigen, ist die alpidische Orogenese noch nicht vollständig abgeschlossen (Pfiffner 2009). Ihr Ausmaß ist verglichen mit der aktiven Phase im Miozän aber deutlich zurückgegangen.

Die Mittelgebirge sind das Resultat von tektonischen Prozessen im Mesozoikum bis Känozoikum, welche auf die Nordatlantikköpfung einerseits und die Afrika-Eurasia-Konvergenz andererseits zurückzuführen sind. Im Zuge dieser Bewegungen wurden Bereiche des älteren variszischen Orogens durch Abtragung freigelegt. Die variszische Orogenese wurde durch die Kollision von Gondwana (Landmasse aus allen heutigen Südkontinenten einschließlich Indien) und Laurussia (bestehend aus Europa, Teilen Nordamerikas sowie Grönland) verursacht. Es entstand eine breite Kollisionszone, welche im Wesentlichen das Gebiet des heutigen Mittel- und Westeuropa (Varisziden) und das Gebiet der Appalachen im östlichen Nordamerika umfasste (Bahlburg & Breitzkreuz 2017). Die Varisziden werden vom Nordwesten nach Südosten in eine Vorzone und drei variszische Gebirgsbögen unterteilt, welche sich in ihrem geologischen Aufbau deutlich unterscheiden und durch tiefreichende Störungszonen voneinander getrennt sind. Von Norden nach Süden sind dies die subvariszische Saumsenke, das Rhenoharzynikum, das Saxothuringikum mit der Mitteldeutschen Kristallinzone sowie das Moldanubikum.

33.3 Prozessbeschreibung

Die Bildung des variszischen Hochgebirges endete im Oberkarbon vor etwa 300 Millionen Jahren und war bereits im Perm zur sogenannten permischen Rumpffläche erodiert und wurde anschließend von Sedimenten des Mesozoikums überdeckt. Im Zuge der moderaten Hebung in der Oberkreide bis zum Känozoikum stiegen die Mittelgebirge wieder auf und wurden durch Denudation zu ihrer heutigen Oberflächengestalt geformt. Für das weitere Umfeld und das Modell „mKBS-3“ wird diese Entwicklung ebenfalls angenommen.

Die augenblicklichen, für die Region der Mittelgebirge maßgeblichen, Spannungszustände weisen keine Werte auf, die auf eine beginnende Entwicklung eines Orogens hindeuten. Dieses und die unterstellte Lage des Modells „mKBS-3“ fernab von Plattengrenzen machen eine Orogenese in diesem Bereich innerhalb der nächsten Million Jahre unwahrscheinlich.

33.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

33.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☐ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☒ unwahrscheinlich

Im Bereich des Modells „mKBS-3“ wird innerhalb der nächsten Million Jahre keine erneute Orogenese auftreten.

33.6 Ungewissheiten

Keine.

33.7 Literaturquellen

- Bahlburg, H. & Breitzkreuz, C. (2017): Grundlagen der Geologie. – 5. Aufl.: 434 S.; (Springer).
 Champagnac, J.-D., Schlunegger, F., Norton, K., von Blanckenburg, F., Abbühl, L.M. & Schwab, M. (2009): Erosion-driven uplift of the modern Central Alps. – Tectonophysics, 474, 1-2: 236-249. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.02.024
 Frisch, W. & Meschede, M. (2007): Plattentektonik. Kontinentverschiebung und Gebirgsbildung. – 2. Auflage; Darmstadt (Primus).
 Pfiffner, O.A. (2009): Geologie der Alpen. – 359 S.; Bern (Haupt Verlag).

34 Isostatische Bewegungen der Lithosphäre

NEA-Gruppe:	1.2.3	<i>Deformation (elastic, plastic, or brittle)</i>
	1.3.5	<i>Glacial and ice-sheet effects</i>
	4.2.3	<i>Mechanical processes [geosphere]</i>

34.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP „Isostatische Bewegung der Lithosphäre“ bezieht sich auf Verformungen der Lithosphäre, die nicht plattentektonisch bedingt sind, sondern im Zusammenhang mit isostatischen Ausgleichsbewegungen als Folge von Vergletscherungen stehen.

34.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das FEP „Isostatische Bewegung der Lithosphäre“ bezieht sich auf isostatische Ausgleichsbewegungen, die durch die Auflast von Gletschern entstehen. Je größer das Volumen und damit die Masse des aufliegenden Gletschers sind, desto größer ist die Auswirkung auf die kontinentale Kruste. Großräumige Inlandvereisungen können ein bedeutsames Absinken der kontinentalen Kruste verursachen. Nach dem Abschmelzen des Gletschers sorgen isostatische Ausgleichsbewegungen für einen Aufstieg der zuvor abgesenkten kontinentalen Kruste. Die isostatischen Ausgleichsbewegungen der letzten Kaltzeit (Weichsel) sind weit fortgeschritten, aber heute noch nicht abgeschlossen und in Nord- sowie Mitteleuropa messbar (Ekman 1996; Johansson et al. 2002). Das Maximum der durch den Rückgang der weichselzeitlichen Inlandvereisung verursachten viskoelastischen Hebung befindet sich im nördlichen Bereich des Bottnischen Meerbusens zwischen Schweden und Finnland (Peltier 1998). Sehr geringe Hebungsraten lassen sich auch noch an der deutschen Ostseeküste nachweisen (Richter et al. 2006). Die Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises wird im skandinavischen Raum, im Bereich der Eisscheide, für die Weichsel-Kaltzeit mit etwa 2.000 bis 3.000 m angegeben (Aseev 1968; Siegert & Dowdeswell 2004). Auflastbedingt kam es dabei zu einer isostatischen Bewegung der Lithosphäre mit Absenkungen im hundert Meter Bereich in Skandinavien. Der Wiederaufstieg der kontinentalen Kruste könnte entsprechend um diese Deformationsbeträge erfolgen. Im Vorland einer Inlandvereisung findet dagegen zunächst eine geringe Aufwärts- und danach eine Absenkbewegung statt z. B. (Ahlbom et al. 1991).

Generell führen isostatische Hebungen der Lithosphäre auch zu einer Hebung der Erdoberfläche. Dies erhöht die Erosionsbasis, was eine Reduzierung der Gebirgsmächtigkeit fördern kann. Die Verlagerungen der Ostseeküste nach Ende der Weichsel-Kaltzeit stellen ein Beispiel für solche Veränderungen dar, die sich u. a. auf isostatische Ausgleichsbewegungen zurückführen lassen (Tikkanen & Oksanen 2002). Eine Senkung der Lithosphäre hat eine Senkung der Erdoberfläche zur Folge. Dadurch kann es abhängig von der Lage des Gebietes zur Überflutung des Geländes und zur Ablagerung von neuen Sedimenten über dem bestehenden Deckgebirge kommen.

Glazial induzierte Ausgleichsbewegungen können, abhängig vom Spannungsfeld des Untergrundes, Spannungsänderungen bewirken, welche die Reaktivierung von Störungen und Erdbeben in der Lithosphäre auslösen (z. B. Arvidsson 1996; Stewart et al. 2000; Wu & Johnston 2000; Bungum et al. 2010; Lang et al. 2014). In Brandes et al. (2014), Brandes et al. (2012) und Grollmund & Zoback (2001) wird eine mögliche Fernwirkung von glazial induzierten Ausgleichsbewegungen diskutiert (s. a. FEP „Erdbeben“).

34.3 Prozessbeschreibung

Für die Region der Mittelgebirge in Deutschland ist innerhalb der nächsten eine Million Jahre keine langanhaltende und sehr mächtige Eisbedeckung wahrscheinlich. Von den höheren Mittelgebirgen waren nur der Harz, der Schwarzwald und der Bayerische Wald von Vergletscherungen betroffen. Das Modell „mKBS-3“ ist durch Höhenlagen zwischen 300 und 400 m ü. NN gekennzeichnet und liegt somit unter der für eine Vergletscherung der Mittelgebirge notwendigen Höhenlage. Auch während der Elster- Saale- und Weichsel-Kaltzeit erreichte der aus dem Norden kommende Gletschervorstoß in seiner maximalen Ausdehnung nicht das Modell „mKBS-3“. Daher werden durch Eisauflast bedingte isostatische Ausgleichsbewegungen für das Modell ausgeschlossen.

34.4 Zeitliche Beschränkung

Die durch Gletscher ausgelösten isostatischen Ausgleichsbewegungen verlaufen kurzfristiger als z. B. endogene epirogenetische Bewegungen der Lithosphäre.

34.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [X] unwahrscheinlich

Aufgrund der fehlenden Eisbedeckung im Bewertungszeitraum wird für das Modell „mKBS-3“ eine durch Eisauflast bedingte isostatische Bewegung der Lithosphäre ausgeschlossen.

34.6 Ungewissheiten

- Wie weit und mit welcher Intensität reicht die Fernwirkung von glazial induzierten Ausgleichsbewegungen?

34.7 Literaturquellen

- Ahlbom, K., Äikäs, T., Ericsson, L.O. (1991): SKB/TVO Ice Age Scenario. – Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, YJT- 91-19, 27 pages; Helsinki.
- Arvidsson, R. (1996): Fennoscandian earthquakes: whole crustal rupturing related to postglacial rebound. – *Science*, 274, 5288: 744-746.
- Aseev, A.A. (1968): Dynamik und geomorphologische Wirkung der europäischen Eisschilde. – *Petermanns Geogr. Mitteilungen*, Vol. 112: 112-115.
- Brandes, C., Steffen, H., Bönnemann, C., Plenefisch, T., Gestermann, N. & Winsemann, J. (2014): Aktive Tektonik in Norddeutschland: glazial-isostatische Ausgleichsbewegungen und/oder Folgen der Erdöl/Erdgas-Förderung? – *Erdöl Erdgas Kohle*, Jg. 130, Heft 4: 138-143.
- Brandes, C., Winsemann, J., Roskosch, J., Meinsen, J., Tanner, D.C., Frechen, M., Steffen, H. & Wu, P. (2012): Activity along the Osning Thrust in Central Europe during the Lateglacial: ice-sheet and lithosphere interactions. – *Quaternary Science Reviews*, 38, 49-62.
- Bungum, H., Olesen, O., Pascal, C., Gibbons, S., Lindholm, C. & Vestøl, O. (2010): To what extent is the present seismicity of Norway driven by post-glacial rebound? – *Journal of the Geological Society*, 167, 2: 373-384.
- Ekman, M. (1996): A consistent map of the postglacial uplift of Fennoscandia. – *Terra Nova*, 8: 158-165.

- Grollmund, B. & Zoback, M.D. (2001): Did deglaciation trigger intraplate seismicity in the New Madrid seismic zone? – *Geology*, 29, 2: 175-178.
- Johansson, J.M., Davis, J.L., Scherneck, H.G., Milne, G.A., Vermeer, M., Mitrovica, J.X., Bennet, R.A., Jonsson, B., Elgered, G., Elósegui, P., Koivula, H., Poutanen, M., Rönnäng, B.O. & Shapiro, I.I. (2002): Continuous GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandia 1. Geodetic results. – *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, B8: ETG-3.
- Lang, J., Hampel, A., Brandes, C. & Winsemann, J. (2014): Response of salt structures to ice-sheet loading: implications for ice-marginal and subglacial processes. – *Quaternary Science Rev.*, 101: 217-233. DOI: 10.1016/j.quascirev.2014.07.022
- Peltier, W.R. (1998): Postglacial variations in the level of the sea: Implications for climate dynamics and solid earth geophysics. – *Reviews of Geophysics*, 36, 603-689.
- Richter, A., Dietrich, R., Wendt, J. (2006): Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee. - *Die Küste*, 72, 33-59.
- Siegert, M.J. & Dowdeswell, J.A. (2004): Numerical reconstructions of the Eurasian Ice Sheet and climate during the Late Weichselian. – *Quaternary Science Reviews*, 23, 11–13: 1273-1283. DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.010
- Stewart, I.S., Sauber, J. & Rose, J. (2000): Glacio-seismotectonics: ice sheets, crustal deformation and seismicity. – *Quaternary Science Reviews*, Vol. 19, 14-15: 1367-1562. DOI: 10.1016/S0277-3791(00)00094-9
- Tikkanen, M. & Oksanen, J. (2002): Late Weichselian and Holocene shore displacement history of the Baltic Sea in Finland. – *Fennia-International Journal of Geography*, 180, 1-2: 9-20.
- Wu, P. & Johnston, P. (2000): Can deglaciation trigger earthquakes in N. America? – *Geophysical Research Letters*, 27, 9: 1323-1326.

35 Grabenbildung

- NEA-Gruppe: 1.2.3 *Deformation (elastic, plastic or brittle)*
 4.2.3 *Mechanical processes [geosphere]*

35.1 Definition/Kurzbeschreibung

Grabenbildung (Taphrogenese, Rifting) ist ein von tektonischen, magmatischen und sedimentären Phänomenen begleiteter Prozess der Entwicklung von tektonischen Gräben und Riftzonen. Ursachen liegen in konvektiven Strömungen im Erdmantel.

35.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Aus dem Erdmantel aufsteigendes Magma bewirkt aufgrund der sich ändernden Druck- und Temperaturbedingungen innerhalb der darüber liegenden kontinentalen Kruste Dehnungsvorgänge, die eine Verminderung der Lithosphärenmächtigkeit zur Folge haben. Dabei entstehen meist langgestreckte Störungssysteme und es bilden sich Gräben oder Grabenzonen. Das Einsinken der zentralen Grabenteile bei gleichzeitiger Heraushebung der Grabenrandbereiche (Schultern) wird durch die Sedimentation mächtiger grob- und feinklastischer Abtragungsprodukte, aber auch von Evaporiten, begleitet. Tiefreichende Störungen ermöglichen das Eindringen von Magma in die obere Kruste und dadurch ggf. vulkanische Aktivität. Extreme Grabenbildung führt im weiteren Verlauf zur Aufspaltung der kontinentalen Krustenplatten, zum Aufstieg basischen und ultrabasischen Materials aus dem Erdmantel und in diesem Zusammenhang zur Entstehung neuer ozeanischer Kruste und damit – bei anhaltendem Rifting – zur Bildung neuen Ozeanbodens. Merkmale aktiver, tektonischer Grabenstrukturen sind hohe Seismizität, aufsteigendes Mantelmaterial, hoher Wärmefluss, alkalischer Magmatismus sowie eine negative Bouguer-Schwereanomalie.

Im Känozoikum entstanden in West- und Mitteleuropa tektonische Graben- und Störungssysteme mit unterschiedlichen Streichrichtungen. Die Lage einzelner Gräben kann laut Ziegler (1992) mit der spannungsinduzierten Reaktivierung von herzynischen Störungssystemen in Verbindung gebracht werden. Diese Strukturen wurden von Ziegler (1992) unter dem Begriff des Europäischen Känozoischen Grabensystems (EKG) zusammengefasst. Die Absenkung der europäischen Gräben begann vielfach bereits während des Eozäns. Das EKG entstand etwa zeitgleich mit den jungen Faltengebirgen der Alpen und Pyrenäen und befindet sich in deren Vorland. Dies lässt einen genetischen Zusammenhang vermuten, wobei sich die jeweils zugrundeliegenden tektonischen Vorgänge (Kompression und Dehnung) aber stark unterscheiden. Ein entscheidender Prozess bei der Entstehung dieser Strukturen ist die Dehnung der Lithosphäre senkrecht zur Längsachse der Gräben. Mit dem oft kilometertiefen Absinken der Grabenmitte setzten umfangreiche Sedimentationsvorgänge ein, durch die abgetragenes Material aus der Umgebung in die Gräben umgelagert wird.

In Südwestdeutschland entwickelte sich als ein wichtiger Vertreter der Oberrheingraben. Er ist eine aktive breite Grabenzone, dessen Einsenkung schon vor etwa 45 Millionen Jahren im Mitteleozän begann. Er brach zunächst als Dehnungsbruch ein und entwickelte sich seit dem Miozän als Teil einer transkontinentalen Scherzone zu einer kompliziert gebauten Grabenstruktur weiter. Zwischen den bis etwa 1.000 m ü. NN aufragenden Gebirgen Schwarzwald und Vogesen sowie Odenwald und Pfälzer Wald ist die Grundgebirgsoberfläche im Oberrheingraben bis zu 4.000 m u. NN eingesunken. Die Sprunghöhe an einzelnen Randstörungen kann nach Geyer & Gwinner (2011) z. T. über 2.000 m betragen. Weitere Teile dieses Grabensystems sind der Niederrheingraben, die hessische Senke, der Egergraben in Tschechien sowie der Bresse- und Limagnegraben in Frankreich.

Mit dem Oberrheingraben entwickelten sich überwiegend rheinisch (NNE-SSW) streichende Strukturen wie die Rheingraben-Hauptverwerfung sowie der ebenfalls rheinisch streichende Lauchertgraben. Die herzynische Streichrichtung (WNW-ESE) ist z. B. für den Freiburg-Bonn-dorf-Hegau-Bodensee-Graben und den Hohenzollerngraben prägend. Die dritte Streichrichtung ist die schwäbische (jurassische) Richtung (WSW-ENE), wie sie die Strukturen des Schwäbischen Lineaments nördlich des Albtraufs bei Tübingen und die Neckar-Jagst-Furche aufweisen (Villinger 2011; Wetzels & Franzke 2003). Neuere Untersuchungen auf der Schwäbischen Alb und nördlich davon haben sechs verschiedene Richtungsgruppen für die Störungen identifiziert, von denen aber die herzynische und schwäbische Streichrichtung dominieren (Schwarz 2012).

Der Egergraben (Ohře-graben) liegt im nördlichen Bereich der Böhmisches Masse und trennt das Erzgebirge vom südlich gelegenen Kerngebiet des Rumpfgebirges. Es handelt sich um eine hauptsächlich im Oligozän entstandene NE-SW streichende Dehnungsstruktur, die vom mit 65° einfallenden Erzgebirgsabbruch und der entgegengesetzt einfallenden Böhmisches Mittelgebirgsstörung begrenzt wird (Pälchen & Walter 2008). Während der Hauptphase des durch die Grabenbildung begünstigten Vulkanismus im Oberen Oligozän entstanden Schichtvulkane im tschechischen Duppauer Gebirge sowie Schlotfüllungen, Dome und Gänge im Böhmisches Mittelgebirge. Das Egergrabengebiet ist schon seit dem Beginn des Tertiärs mit Senkungs-zonen im zentralen Egergraben in Böhmen, in der Oberpfalz und im Fichtelgebirge als eine Rift-/Grabenzone aktiv (Meschede 2015). Die Grabenfüllung besteht überwiegend aus känozoischen Sedimenten und aus an Eruptionszentren abgelagerten Vulkaniten. Diese liegen z. T. auch direkt auf den Sedimenten der Nordböhmisches Kreidesenke auf. Im Verlauf des SW-NE Streichens lassen sich mehrere Zonen mit vulkanischer Aktivität auch jenseits der Lausitzer Überschiebung bis in die Oberlausitz verfolgen (Sebastian 2013). Der Egergraben gliedert sich von SW nach NE in das Becken von Cheb und Sokolov (Kohleflöze), das Duppauer Gebirge (känozoischer Vulkanismus), das Nordböhmisches Becken (Kohleflöze) und das Böhmisches Mittelgebirge (känozoischer Vulkanismus).

35.3 Prozessbeschreibung

Im Bereich und regionalen Umfeld des generischen Endlagerstandortmodells „mKBS-3“ werden gegenwärtig weder Grabenbrüche noch einsetzende Grabenbildung, was mit erhöhter Seismizität und evtl. Vulkanismus verbunden wäre, angenommen (vgl. a. FEP „Erdbeben“ und „Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten“). Zu größeren Störungszonen im regionalen Umfeld wird ein ausreichender Abstand (vgl. Anlage 3 zu § 24 Abs. 3 StandAG (2017)) vorausgesetzt. Damit ist eine zukünftige Grabenbildung durch tektonische Bewegungen im Gebiet des Modells und in seinem regionalen Umfeld unwahrscheinlich.

Dementsprechend ist die angenommene Seismizität auch im regionalen Umfeld des Modellgebietes sehr gering. Für das Endlagerstandortmodell selbst wird eine Lage in der Erdbebenzone 0 oder 1 angenommen (vgl. (Grünthal et al. 1998); FEP „Erdbeben“). Für die Zukunft wird erwartet, dass sich endogen verursachte Gebirgsspannungen durch Bewegungen in den existierenden geologischen Schwäche-zonen in der weiteren Umgebung abbauen.

35.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

35.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Eine Grabenbildung findet im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre im Bereich des Endlagerstandortmodells „mKBS-3“ nicht statt. Es liegen keine Hinweise auf eine überregionale Grabenzonenbildung vor.

35.6 Ungewissheiten

Keine.

35.7 Literaturquellen

- Geyer, O.F. & Gwinner, M.P. (2011): Geologie von Baden-Württemberg. – 5. Aufl., Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (Eds.): 627 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. & Lenhardt, W. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz. – Bautechnik, 75, 10: 753-767. DOI: 10.1002/bate.199805380
- Meschede, M. (2015): Geologie Deutschlands - Ein prozessorientierter Ansatz. – Berlin, Heidelberg (Springer). DOI: 10.1007/978-3-662-45298-1
- Pälchen, W. & Walter, H. (2008): Geologie von Sachsen - Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. – Stuttgart (Schweizerbart).
- Schwarz, H.-U. (2012): Das Schwäbisch-Fränkische Bruchmuster. – ZDGG, Band 163, 4: 411-446. DOI: 10.1127/1860-1804/2012/0163-0411
- Sebastian, U. (2013): Die Geologie des Erzgebirges. Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum). DOI: 10.1007/978-3-8274-2977-3
- 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. Deutscher Bundestag.
- Villinger, E. (2011): Geol. Übersichts- und Schulkarte Baden-Württemberg 1 : 1.000.000. – LGRB Regierungspräsidium Freiburg - Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Erläuterungen, 13. Aufl.: 374 S.; Freiburg i. Br.
- Wetzel, H.-U. & Franzke, H.-J. (2003): Lassen sich über die Fernerkundung erweiterte Kenntnisse zur seismogenen Zone Bodensee-Stuttgart (9°-Ost) gewinnen? (Auf dem Weg zu operationellen Prozessketten in Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation: Vorträge 23). Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Bochum. – 12: 340-347; (Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation).
- Ziegler, P.A. (1992): European Cenozoic rift system. – Tectonophysics, 208, 1-3: 91-111. DOI: 10.1016/0040-1951(92)90338-7

36 Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten

NEA-Gruppe: 1.2.5 *Magmatic and volcanic activity*
 1.2.7 *Hydrothermal activity*

36.1 Definition/Kurzbeschreibung

Magmatismus ist ein zusammenfassender Begriff für Prozesse, die zur Bildung von Magmen führen, ihre Bewegung verursachen und die Kristallisation aus der Gesteinsschmelze steuern.

Hydrothermale Aktivität ist die Zirkulation von hochtemperierten wässrigen Lösungen im Gebirge, die dort zu charakteristischen Veränderungen oder Neubildungen von Mineralen führen. Ursache für die Zirkulation ist eine lokal oder regional erhöhte Gebirgstemperatur gegenüber der Umgebung, z. B. in Gebieten mit aktivem Magmatismus oder aktiver Tektonik.

36.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Magmatismus kommt im Zusammenhang mit gebirgsbildenden Prozessen, entlang von Plattengrenzen der Lithosphäre und im Bereich von Rift- oder tief reichenden Störungszonen vor (vgl. Coffin & Whittaker 2014). Mit der Gesteinsschmelze steigen auch Gase und Dämpfe auf. Der Aufstieg der Magmen erfolgt entweder bis zur Erdoberfläche oder er endet innerhalb der Lithosphäre aufgrund unzureichender Transportenergie sowie strukturgeologischer Gegebenheiten. Auf dieser Basis wird zwischen Extrusiva (Vulkanismus) und Intrusiva (Plutonismus) unterschieden.

Im Zusammenhang mit den plattentektonischen Ereignissen des Känozoikums (Grabenbildung, Alpenfaltung, Öffnung des Atlantik) kam es in Deutschland vor etwas mehr als 10.000 Jahren in der Eifel zu den bisher letzten Vulkanausbrüchen (z. B. Laacher-See-Vulkan vor ca. 13.000 Jahren und Ulmener Maar vor ca. 11.000 Jahren). Jüngere Magmatite aus dem Quartär sind dort vor allem in der West- und Osteifel anzutreffen, während der Vulkanismus in der Hocheifel bereits im frühen bis mittleren Miozän zum Erliegen kam (vgl. Schmincke (2014)).

Die Hauptphase des känozoischen Vulkanismus im Bereich des Egergrabens (vgl. FEP „Grabenbildung“) lag im Zeitraum des oligozänen Riffings, jedoch wurden auch jüngere Ereignisse mit vulkanischer Aktivität nachgewiesen. Beispiele sind der Kammerbühl bei Franzensbad (720.000 Jahre) oder der Eisenbühl bzw. ein Maar (ca. 300.000 Jahre) in der Nähe der bayrisch-tschechischen Grenze. Weitere auf Vulkanismus zurückzuführende Erscheinungen im Umfeld des Egergrabens in Tschechien sind auch die Vorkommen heißer Quellen in Karlsbad, Franzensbad und Marienbad sowie die Sauerbrunnen und Mofetten im Sooser Moor. Auf deutschem Gebiet befinden sich Relikte des oligozänen Vulkanismus am Scheibenberg (21,5 Millionen Jahre) und am Hirtstein (24 Millionen Jahre) im oberen Erzgebirge, am Hohen Parkstein in der Nähe von Weiden in der Oberpfalz (24 Millionen Jahre), am Rauhen Kulm in der Nähe von Bayreuth (21 Millionen Jahre), am Großen Teichelberg südöstlich von Marktrechwitz (24 Millionen Jahre) sowie am Hirschentanz zwischen Konnersreuth und Pechbrunn (26 Millionen Jahre). Außerdem sind weitere 15 bis 20 kleine Vorkommen bekannt.

Ein hydrothermales Fluid kann als heiße (~ 50 bis > 500 °C) wässrige Lösung definiert werden, die Stoffe enthält, die ausgefällt werden, wenn sich die Eigenschaften der Lösung mit der Zeit und veränderter Umgebung verändern (Pirajno 2009). Wichtige Parameter im Zusammenhang mit hydrothermalen Lösungen sind Temperatur, Druck und Dichte. Hydrothermale Lösungen können als Restlösungen bei der Kristallisation magmatischer (bevorzugt granitischer)

Schmelzen freigesetzt werden und sind auch als Fluideinschlüsse von der Größe eines Wassermoleküls bis zu einigen Millimetern in Kristallen nachweisbar. Außerdem werden bei der Absenkung von Sedimentkomplexen (Versenkungsmetamorphose) bzw. bei der Regional- und Dislokations-Metamorphose von Gesteinen z. T. große Mengen von wässrigen Lösungen freigesetzt (Entwässerung), die sich bei Vorhandensein entsprechender Migrationsbahnen (Störungszonen) innerhalb der Lithosphäre fortbewegen.

Auf tief reichenden Störungen zirkulierende Wässer werden ausgehend von einer Wärmequelle im Erdmantel („hot spot“) oder einer Magmenkammer in der tieferen Erdkruste erwärmt. Dieses Wasser kann bei einem ausreichenden hydraulischen Gradienten und Vorhandensein von Kluftgrundwasserleitern über weite Distanzen zu einer Quelle migrieren, aus der es zu Tage treten kann. Aufgrund von Wärmeanomalien kann es auch konvektiv innerhalb der Erdkruste zur Zirkulation von hydrothermalen Lösungen kommen.

Hydrothermale Aktivität kann entlang der Migrationsbahnen den Stoffbestand und die Eigenschaften von Gesteinen und somit auch die von Wirtsgesteinen signifikant ändern (Alteration der Gesteine bis zu partiellen Lösungsprozessen), für heiße Quellen und Geysire verantwortlich sein sowie die Bildung von schichtgebundenen und gangförmigen Minerallagerstätten verursachen (z. B. Grotzinger & Jordan (2017)). Die geologischen Verhältnisse und die Charakteristik der Wärmeanomalie prägen die Formen der hydrothermalen Aktivität. Hydrothermal beeinflusste Sedimente sind i. d. R. an tektonisch aktive Becken oder an Mittelozeanische Rückensysteme gebunden. Die hydrothermalen Lösungen können dabei unterschiedlichen Ursprungs sein (Martin & Eiblmaier 2005):

- Es handelt sich um magmatisches (juveniles) Wasser, welches als Restlösungen bei der Kristallisation magmatischer Schmelzen freigesetzt wurde.
- Bei der Versenkung sedimentärer Schichten oder bei der Gesteinsmetamorphose von Gesteinen können z. T. große Mengen wässriger Lösungen freigesetzt (Entwässerung) werden.
- Aufgrund veränderter Temperaturbedingungen können fossile Wässer aus dem Sedimentgestein freigesetzt werden.
- Quellen hydrothermalen Lösungen können aber auch Grundwässer (meteorisches Wasser) bzw. Meerwasser sein.

Hydrothermale Aktivität kann unter der Voraussetzung einer Wärmequelle im Untergrund und hinreichender Transportwege (Störungen und Klüfte großer Ausdehnung) über lange Zeiträume wirksam sein.

36.3 Prozessbeschreibung

Für die Zukunft von einer Million Jahre ist für das Modell „mKBS-3“ aufgrund der Rahmenbedingungen (§ 22 II Nr. 5 StandAG (2017): Ausschlusskriterium „Vulkanische Aktivität“) nicht mit magmatischen Vorgängen und den damit verbundenen hydrothermalen Prozessen zu rechnen.

36.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

36.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [X] unwahrscheinlich

Die wesentliche Voraussetzung für das Auftreten von hydrothermalen Lösungen ist ein aktiver Magmatismus, der für das Modell „mKBS-3“ nicht zu erwarten ist. Daher ist auch nicht mit dem Ablaufen von hydrothermalen Prozessen innerhalb der nächsten einen Million Jahre zu rechnen.

36.6 Ungewissheiten

Keine.

36.7 Literaturquellen

- Coffin, M.F. & Whittaker, J.M. (2014): Intraplate Magmatism. – (In: Harff, J., Meschede, M., Petersen, S. & Thiede, J. (Eds.): Encyclopedia of Marine Geosciences). 1-12; Dordrecht (Springer). DOI:10.1007/978-94-007-6644-0_19-1
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): Allgemeine Geologie. – 7. Auflage: 769 S.; Berlin (Springer). DOI:10.1007/978-3-662-48342-8
- Martin, C. & Eiblmaier, M. (2005): Lexikon der Geowissenschaften. – LVIII, 2782 S.; Heidelberg (Springer Spektrum).
- Pirajno, F. (2009): Hydrothermal Processes and Mineral Systems. – 1: XLI, 1250 pp.; (Springer). DOI:10.1007/978-1-4020-8613-7
- Schmincke, H.-U. (2014): Vulkane der Eifel - Aufbau, Entstehung und heutige Bedeutung. – 2; Berlin, Heidelberg (Springer Spektrum). DOI:10.1007/978-3-8274-2985-8
- 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. Deutscher Bundestag.

37 Erdbeben

NEA-Gruppe: 1.2.4 *Seismicity*
4.2.3 *Mechanical processes [geosphere]*

37.1 Definition/Kurzbeschreibung

Wird die Scherfestigkeit der Gesteine im Untergrund z. B. durch großräumige tektonische Bewegungen überschritten, kann dies zu einem Erdbeben führen. Dabei entladen sich die aufgestauten Spannungen in ruckartigen Bewegungen des Gesteins mit bleibenden Verschiebungen. Die freigesetzte Spannungsenergie wird bei dem Bruch des Gebirges in Form seismischer Wellen in das umgebende Gestein abgegeben. Neben natürlich verursachten Erdbeben können auch anthropogen ausgelöste vorkommen.

37.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Natürliche Auslöser von Erdbeben können vor allem tektonische Prozesse, vulkanische Aktivität oder der Einsturz natürlicher untertägiger Hohlräume sein. Des Weiteren können sie im Zuge einer Überfahrung bzw. des Rückzugs einer Inlandvereisung ausgelöst werden. Ein tektonisches Beben entsteht, wenn in der Lithosphäre Spannungen auftreten, die höher sind als die Scherfestigkeit des Gebirges. Tektonische Beben kommen insbesondere an den Rändern der Lithosphärenplatten vor, da dort aufgrund plattentektonischer Vorgänge besonders hohe Gebirgsspannungen auftreten können; sie können jedoch auch innerhalb der Platten auftreten. Überschreiten die Spannungen im Untergrund die Scherfestigkeit des Gebirges, entsteht ein Bruch und die beiden Bruchflächen werden gegeneinander versetzt.

Glazigene Ausgleichsbewegungen können, abhängig vom bereits herrschenden Spannungsfeld des Untergrundes, Spannungsänderungen bewirken, welche Erdbeben in der Erdkruste auslösen (z. B. Arvidsson 1996, Stewart et al. 2000, Wu & Johnston 2000, Bungum et al. 2010).

Vom Menschen hervorgerufene Erdbeben können beim Einsturz anthropogen geschaffener untertägiger Hohlräume entstehen oder infolge von anderen anthropogenen Aktivitäten, durch die der Spannungszustand im Untergrund verändert wird. Der Einsturz eines untertägigen Hohlraums wird dabei als Gebirgsschlag oder Bergschlag bezeichnet. Solche Spannungsänderungen können durch Quellvorgänge im Untergrund entstehen, z. B. wenn eine Anhydritschicht angebohrt wird und diese dadurch in Kontakt mit Wasser kommt. Sie können auch durch Veränderungen des hydraulischen Porendruckes im Untergrund, beispielsweise infolge der Förderung aus einer Kohlenwasserstoff-Lagerstätte oder infolge des Befüllens einer Talsperre entstehen. Anthropogen verursachte Erdbeben werden auch als induzierte Beben bezeichnet.

In Deutschland konzentrieren sich Bereiche erhöhter natürlicher seismischer Aktivität auf den Rheingraben (vgl. FEP „Grabenbildung“), den Alpenrand, die Schwäbische Alb (Zollernalb) sowie auf einen Bereich im Westen Sachsens und Osten Thüringens, der bis nach Tschechien und Bayern hineinreicht. Eine diffuse Seismizität tritt darüber hinaus auch außerhalb der genannten Bereiche in allen Teilen Deutschlands auf (Grünthal et al. 2018).

Die bei einem Erdbeben nach dem Bruch des Gebirges und dem Versetzen der Bruchflächen freigesetzte Energie wird in Form seismischer Wellen in das umgebende Gestein abgegeben. An der Erdoberfläche verursachen die seismischen Wellen Bewegungen, deren Ausmaß von der Stärke des Erdbebens und vom Abstand zum Ort des Bruches in der Lithosphäre, dem

Hypozentrum, sowie von den Eigenschaften der Gesteinsschichten zwischen dem Hypozentrum und dem betrachteten Einwirkort an der Erdoberfläche abhängt. Die Auswirkungen der Bodenbewegung an der Erdoberfläche können durch Intensitätswerte auf unterschiedlichen Intensitätsskalen angegeben werden. Eine gebräuchliche Skala ist die Europäische Makroseismische Skala (EMS-Skala), die von Grünthal (1998) auf Grundlage der MSK-Skala (Medwedew-Sponheuer-Karnik) entwickelt wurde. Intensitätsskalen beruhen auf der Wahrnehmbarkeit von Erdbeben für Menschen sowie auf ggf. verursachten Schäden und werden maßgeblich von den bei einem Erdbeben an der Erdoberfläche auftretenden Bodenbeschleunigungen bzw. -geschwindigkeiten beeinflusst (Grünthal 1998). Die Auswirkungen nehmen in der Regel mit der Entfernung zum Epizentrum – das ist die senkrechte Projektion des Hypozentrums auf die Erdoberfläche – ab. Neben möglichen Schäden an Bauwerken durch Erschütterungen können Erdbeben auch Setzungen und Verflüssigungen in unverfestigten Sedimenten auslösen.

Die Auswirkungen, die ein Erdbeben auf ein Bauwerk haben kann, sind maßgeblich von dessen Beschaffenheit abhängig. Bei Hochbauten können die Bodenbewegungen, wenn sie mit einer Frequenz nahe einer Eigenfrequenz des Bauwerks auftreten, innerhalb des Bauwerks verstärkt werden und zu entsprechend großen Schwingbewegungen führen. Untertägige Bauwerke hingegen können durch die Einspannung im Gebirgsverband gar nicht oder nur an besonderen Lokationen schwingen, beispielsweise im Bereich von Pfeilern oder Schweben zwischen unverfüllten Abbauen. Daher sind sie weniger anfällig für Schäden durch Erdbeben. Ursächlich für die geringe Schadensanfälligkeit ist neben der Einspannung die Tatsache, dass die Amplituden der Bodenbewegungen bei einem Erdbeben mit der Teufe abnehmen. In einer Studie der SKB untersuchen Bäckblom & Munier (2002) den Einfluss von Erdbeben auf Endlager. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Schäden an unterirdischen Einrichtungen zur Tiefe hin abnehmen und erst bei Bodenbeschleunigungen von über 2 m/s^2 zu erwarten sind.

Schäden durch Erdbeben sind vor allem in der Konturzone von offenen Grubenbauen und dem Ausbau der Strecken vor ihrer Verfüllung zu erwarten. Auch in der frühen Nachverschlussphase, wenn die Auflockerungszone noch nicht durch die Verfüllung gestützt wird, kann sich ein Erdbeben auf die Eigenschaften der Auflockerungszone auswirken. Aber auch im Versatz und in den technischen Einrichtungen ändern sich durch ein Erdbeben die effektiven Spannungen, so dass es zu Rissbildungen in den Bauwerken kommen kann. Insbesondere durch ein Erdbeben in der frühen Nachverschlussphase kann es zu Rissbildungen in den Baustoffen sowie zu Ablösungen der Baustoffe von der Kontur kommen.

Zwischen der Stärke von Erdbeben und der Häufigkeit ihres Auftretens besteht ein empirisch ermittelter Zusammenhang, der durch das Gutenberg-Richter-Gesetz (Gutenberg & Richter 1954) beschrieben wird. Daher lässt sich für jede hinsichtlich ihrer Seismizität einheitliche Region die zukünftige Häufigkeit von Erdbeben einer bestimmten Stärke aus der Häufigkeit des Auftretens von Erdbeben in der Vergangenheit ableiten. Um die Erdbebengefährdung für einen bestimmten Standort zu beschreiben kann auf der Grundlage historischer Erdbebenkataloge, z. B. für Deutschland (Leydecker 2011), nach definierten Verfahren (z. B. KTA 2201 2011) ein Bemessungserdbeben abgeleitet werden, für dessen dynamische Lasten ein Bauwerk am Standort auszulegen ist. Das Bemessungserdbeben ist das Erdbeben mit der für den Standort – nach wissenschaftlichen Erkenntnissen – größten anzunehmenden Intensität (KTA 2201 1990).

37.3 Prozessbeschreibung

Aufgrund der Rahmenbedingungen in § 22 StandAG (2017): Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“ befindet sich das Modell „mkBS-3“ in einer Zone, in der die örtliche seismische Gefährdung nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01 nicht größer ist als in der Erdbebenzone 1. Die

Grenzen der Erdbebenzonen entsprechen Intensitätsgrenzen nach der EMS-Skala (Grünthal 1998) und jeder Zone ist ein Referenzwert der maximalen Bodenbeschleunigung zugeordnet. Mit Erdbebenzone 1 wird ein Gebiet charakterisiert, in dem die Intensitäten 6,5 bis $< 7,0$ nach der EMS-Skala zu erwarten sind und der maximale Bodenbeschleunigungswert $0,8 \text{ m/s}^2$ erreicht. Dieser Wert ist deutlich geringer als die Beschleunigung (2 m/s^2) für die nach Bäckblom & Munier (2002) Schäden an untertägigen Bauwerken auftreten können.

Intensität und Bodenbewegungen am Endlagerstandort sind die maßgeblichen Einflussfaktoren für die Beschreibung des Bemessungserdbebens. Die Stärke des Bemessungserdbebens muss basierend auf der KTA 2201 (2011) mit einem deterministischen und mit einem probabilistischen Ansatz ermittelt werden. Dabei ist gemäß KTA 2201 (2011) die Umgebung des Standortes bis mindestens 200 km Entfernung zu berücksichtigen. Es ist die minimale Intensität 6 anzunehmen. Für das Bemessungserdbeben wird probabilistisch eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-5} pro Jahr ermittelt.

Erdbeben könnten im Gebirge zur Reaktivierung von Störungen führen. Da die Bildung neuer Brüche dabei fast ausschließlich auf die unmittelbare Umgebung der reaktivierten Störungen beschränkt ist und die Gesteinsdeformation mit der Distanz zur Störung rasch abnimmt (Bäckblom & Munier 2002), sind im Modellgebiet aufgrund seines hinreichend großen Abstandes zu Störungszonen keine derartigen Auswirkungen zu erwarten. Darüber hinaus könnten Änderungen von Kluftöffnungsweiten, erhöhte oder verminderte Wasserzuflüsse und erdbebeninduzierte Porenwasser- und/oder Fluidmigration auftreten. Die Entstehung neuer Störungs- und Kluftsysteme oder eine deutliche Veränderung der hydraulischen Eigenschaften von am Endlagerstandort vorhandenen Klüften sind im Bewertungszeitraum nicht zu erwarten.

Alle sicherheitsrelevanten Endlagerbauwerke, wie z. B. die Strecken- und Schacht- und Bohrlochverschlüsse, werden auf Grundlage der ermittelten Intensität des Bemessungserdbebens ausgelegt, so dass ein Erdbeben mit der Stärke des Bemessungserdbebens die Integrität der Barrieren nicht in relevanter Weise beeinträchtigen wird.

Vulkanische Beben kommen in der weiteren Umgebung des Modellbereichs nicht vor (vgl. FEP „Magmatismus und hydrothermale Aktivität“). Anthropogen verursachte Erdbeben, z. B. durch einen möglichen Gebirgsschlag im Grubengebäude verursachte Erschütterungswirkungen, werden in der Nachverschlussphase wegen fehlender Hohlräume nicht erwartet und sind zudem durch das Bemessungserdbeben abgedeckt.

37.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

37.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Erdbeben sind für den langen Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre am Modellstandort oder in seiner Umgebung wahrscheinlich.

37.6 Ungewissheiten

- Für einen nicht-generischen Standort wären die Ermittlung von standortbezogenen Daten und Modellberechnungen zu den Auswirkungen seismischer Prozesse auf ein Endlager durchzuführen. Für die Integritätsprüfung wären auch Auswirkungen auf den Betonausbau und die ALZ zu prüfen.

37.7 Literaturquellen

- Arvidsson, R. (1996): Fennoscandian earthquakes: whole crustal rupturing related to postglacial rebound. – *Science*, 274 (5288), 744-746.
- Bäckblom, G. & Munier, R. (2002): Effects of Earthquakes on the Deep Repository for Spent Fuel in Sweden, Based on Case Studies and Preliminary Model Results. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-02-24: 110 pp.; Stockholm, Sweden.
- Bungum, H., Olesen, O., Pascal, C., Gibbons, S., Lindholm, C., & Vestøl, O. (2010): To what extent is the present seismicity of Norway driven by post-glacial rebound? – *Journal of the Geological Society*, 167(2), 373-384.
- Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F. & Bindi, D. (2018): The probabilistic seismic hazard assessment of Germany - version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. – *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, 10: 4339-4395. DOI: 10.1007/s10518-018-0315-y
- Grünthal, G. (ed.) (1998): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). – *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie : 99 S. ; Luxemburg.
- Gutenberg, B. & Richter, C.F. (1954): *Seismicity of the earth and associated phenomena*. – Princeton University: 295 S.; Princeton (New Jersey).
- KTA 2201 (1990): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil I: Grundsätze; Fassung 6/90. – Kerntechnischer Ausschuss (KTA). 4 S.
- KTA 2201 (2011): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil I: Grundsätze; Fassung 2011-11. – Kerntechnischer Ausschuss (KTA). 8 S.
- Leydecker, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 2008. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Geologisches Jahrbuch E 56: 198 S.; Hannover.
- 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.
- Stewart, I.S., Sauber, J. & Rose, J. (2000): Glacio-seismotectonics: ice sheets, crustal deformation and seismicity. – *Quaternary Science Reviews*, Vol. 19, 14-15: 1367-1562. DOI: 10.1016/S0277-3791(00)00094-9
- Wu, P. & Johnston, P. (2000): Can deglaciation trigger earthquakes in N. America? – *Geophysical Research Letters*, 27(9), 1323-1326.

38 Gesteinsmetamorphose

NEA-Gruppe: 1.2.6 *Metamorphism*

38.1 Definition/Kurzbeschreibung

Gesteinsmetamorphose ist die Umwandlung von Gefüge und mineralogisch-geochemischer Zusammensetzung eines Gesteins unter geänderten physikalisch-chemischen Bedingungen im Erdinneren unter Beibehaltung des festen Zustandes. Die wichtigsten Faktoren sind in diesem Zusammenhang Druck und Temperatur.

38.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Oberflächennahe diagenetische Prozesse in Sedimenten (vgl. FEP „Diagenese“) fallen nicht unter den Begriff Gesteinsmetamorphose und gehen ohne scharfe Grenze mit steigenden Temperaturen und Drücken in die Metamorphose über. Die Zunahme von Temperaturen und meist auch Drücken kann Folge unterschiedlicher geologischer Ereignisse sein. Die meisten Metamorphite entstehen im Zuge von tektonischen Prozessen, die große Volumina der Erdkruste betreffen (Regionalmetamorphose). Zur Regionalmetamorphose gehören orogene Metamorphose, Versenkungsmetamorphose und Ozeanbodenmetamorphose. Die Kontaktmetamorphose erfolgt dagegen kleinräumig im Nebengestein eines magmatischen Intrusivkörpers. Die kataklastische Metamorphose ist an tektonische Störungszonen gebunden. Hydrothermalmetamorphose durch heiße H₂O-reiche Fluide tritt lokal in vulkanisch aktiven Gebieten auf (vgl. FEP „Magmatismus und hydrothermale Aktivitäten“). Die Metamorphose durch Impakteinwirkung extraterrestrischer Materials (Stoßwellen- oder Impakt-Metamorphose) kann als Ausnahme angesehen werden. Je nach Gesteinszusammensetzung erfolgen erste metamorphe Mineralneubildungen schon ab 150°C. Nur kataklastische Metamorphose, die an Störungszonen gebunden ist, kann als Sonderfall bereits bei Temperaturen deutlich unter 150°C stattfinden (Vinx 2015), da hier die mechanische Beanspruchung durch gerichteten Druck die entscheidende Rolle spielt.

Mit steigender Temperatur wird der metamorphe Bereich von der magmatischen Gesteinsbildung dadurch abgegrenzt, dass sich je nach Gesteinszusammensetzung und Anwesenheit von Wasser Teilschmelzen bilden (Anatexis). Solange die entstehenden Gesteine (z. B. Migmatite) mit einem Schmelzanteil von max. 20–30 Vol.-% überwiegend fest bleiben (Okrusch & Matthes 2014), werden sie zu den Metamorphiten gerechnet. Die Temperatur, bei der die teilweise Aufschmelzung beginnt, hängt in erster Linie vom Druck, von der chemischen Gesteinszusammensetzung und von den enthaltenen Fluiden ab. In der Erdkruste variiert die obere Temperaturgrenze der Metamorphose in einem weiten Bereich zwischen etwa 630°C und 1.100°C (Okrusch & Matthes 2014). Das thermische Ende der Metamorphose und der Übergang zu magmatischen Prozessen wird bei einer granitischen Zusammensetzung z. B. bei 0,6 GPa Druck und Anwesenheit von Wasser bei Temperaturen um 640°C erreicht (Okrusch & Matthes 2014, Bucher & Grapes 2011, Vinx 2015).

Der Druckbereich der Metamorphose reicht von oberflächennahen Bedingungen bis zu Drücken von mehr als 3 GPa, wie sie im oberen Erdmantel herrschen. Druckveränderungen ergeben sich durch Versenkungs- und Hebungsprozesse, wobei neben der sedimentären Überlagerung von Gesteinsschichten und der Abtragung durch Erosion tektonische Vorgänge wie Überschiebungen oder großräumige Verfaltungen eine wichtige Rolle spielen.

Die Minerale der Ausgangsgesteine reagieren auf die sich ändernden Bedingungen, in dem sie neue, thermodynamisch stabile Mineralgenesen bilden. Häufig kommt es dabei auch zu

Gefügeumwandlungen, wie z. B. Einregelungen und orientiertes Wachstum neuer Minerale oder Entstehung von Schieferungen. In vielen Fällen läuft die Um- und Neubildung von Mineralen unter Beteiligung einer sich auf den Korngrenzen befindlichen fluiden Phase ab. Es kann dabei zur Freisetzung von Kristallwasser kommen und zu allochemischen Prozessen, bei denen Elemente zwischen dem Gestein und seiner Umgebung ausgetauscht werden. Neben der Veränderung der Mineralogie und des Gesteinsgefüges würde die Metamorphose das Endlagersystem durch Änderung der chemischen Zusammensetzung und Temperatur des Grundwassers sowie durch geänderte Grundwasserströmungen und Transportwege beeinflussen.

38.3 Prozessbeschreibung

Aufgrund der im StandAG (2017) in § 22 genannten Ausschlusskriterien „großräumige Vertikalbewegungen“, „aktive Störungszonen“, „seismische Aktivität“ und „vulkanische Aktivität“, die für alle Endlagerstandorte gelten befindet sich das Modell „mKBS-3“ in einer tektonisch stabilen ruhigen Lage.

Metamorphe Prozesse infolge starker Absenkung oder Orogenese werden in den nächsten 1 Million Jahren nicht auftreten (vgl. FEP „Vertikale Bewegungen der Lithosphäre“ und „Orogenese“). Kataklastische Metamorphose als Folge der Reaktivierung von Störungen, z. B. in Folge von seismischer Aktivität oder von Gletschereinwirkungen kann ebenso ausgeschlossen werden (vgl. FEP „Erdbeben“, „Permafrost“ und „Inland- und Vorlandvereisung“). Auch metamorphe Prozesse infolge der Aufheizung durch vulkanische Aktivität, kann wegen der nicht erwarteten Einwirkung ausgeschlossen werden. Die Temperaturen, die im Endlager aufgrund von radioaktivem Zerfall entstehen (vgl. FEP „Endlagerinduzierter Wärmestrom“), reichen nicht aus um Metamorphose am granitischen Wirtsgestein zu verursachen.

38.4 Zeitliche Beschränkung

keine

38.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☐ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☒ unwahrscheinlich

In der Zukunft von einer Million Jahre treten im Bereich des Modells „mKBS-3“ keine Prozesse auf, die die nötigen p/T-Erhöhungen bewirken würden, um eine Metamorphose der anstehenden Gesteine auszulösen.

38.6 Ungewissheiten

Keine.

38.7 Literaturquellen

- Bucher K. & Grapes R. (2011): Petrogenesis of Metamorphic Rocks. – 8. Edition: 428 pp.; Berlin (Springer).
- Okrusch M. & Matthes S. (2014): Mineralogie. – 9. Aufl.: 728 S.; Berlin (Springer)
- 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. Deutscher Bundestag.
- Vinx, R. (2015): Gesteinsbestimmung im Gelände. – 4. Aufl.: 479 S.; Berlin (Springer).

39 Diagenese

NEA-Gruppe: 1.2.9 *Diagenesis*

39.1 Definition/Kurzbeschreibung

Diagenese ist die Umbildung lockerer Sedimente zu festen Sedimentgesteinen in Folge von Druck- und Temperaturanstieg. Die Diagenese setzt ohne scharfe Grenzen bereits während der Ablagerung ein und geht ebenso ohne scharfe Abgrenzung mit steigenden Temperaturen und Drücken in die Metamorphose (vgl. FEP „Gesteinsmetamorphose“) über.

39.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Alle wichtigen Prozesse der Diagenese gehen vom Porenraum des betreffenden Sediments aus (Okrusch & Matthes 2014). Neben mechanischen Vorgängen, insbesondere der Kompaktion und der damit verbundenen Verringerung der Porosität und des Wassergehalts, finden chemische Reaktionen zwischen den Porenlösungen und den mineralischen Bestandteilen statt. Mit der Auflösung instabiler Komponenten bzw. der Alteration von Mineralen sowie der Ausfällung authigener Minerale kommt es zur Entstehung von Mineralvergesellschaftungen, die sich nicht primär durch Sedimentation bilden können, wie z. B. Sericit oder Chlorit. Die mineralogischen und chemischen Veränderungen während der Diagenese werden im FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“ beschrieben.

Damit Diagenese ablaufen kann, müssen Druck und Temperatur über längere Zeiträume wirken (Bahlburg & Breitzkreuz 2017). Darüber hinaus wird der Verlauf und die Intensität diagenetischer Prozesse entscheidend vom Sedimenttyp beeinflusst. Dementsprechend sind deutliche Unterschiede zwischen Tonen, Sanden, Evaporiten und Karbonaten festzustellen.

39.3 Prozessbeschreibung

Die stärker verwitterten Bereiche des Deckgebirges im Modell „mKBS-3“ liegen als Lockergestein vor (vgl. FEP „Deckgebirge“). Da am Modellstandort für die Zukunft von einer Million Jahre keine starken Absenkungen erwartet werden, werden druck- und temperaturbedingte diagenetische Veränderungen, wenn überhaupt, nur sehr langsam ablaufen. Eine eventuelle Kompaktion der Lockersedimente hätte, abgesehen von einer geringfügigen Verringerung des Porenraums, voraussichtlich keinen relevanten Einfluss auf das Endlagersystem und auf die Ausbreitung von Radionukliden.

39.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

39.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Diagenese wird im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre in den sandig-grusigen Sedimenten des Deckgebirges in Form von Kompaktion stattfinden. Sie ist damit als "wahrscheinlich" einzustufen. Chemische Veränderungen im Rahmen der Diagenese werden im FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“ beschrieben.

39.6 Ungewissheiten

Keine.

39.7 Literaturquellen

Bahlburg, H. & Breitzkreuz, C. (2017): Grundlagen der Geologie. – 5. Aufl.: 434 S.; Berlin (Springer)
Okrusch M. & Matthes S. (2014): Mineralogie. – 9. Aufl.: 728 S.; Berlin (Springer)

40 Erosion

NEA-Gruppe: 1.2.8 *Regional erosion and sedimentation*
 5.1.13 *Erosion and deposition*

40.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP Erosion beinhaltet alle zur flächen- und linienhaften Abtragung der Erdoberfläche beitragenden Vorgänge, die Boden- und Gesteinsmaterial aus ihrem Verband lockern, lösen und verlagern (inklusive physikalischer Verwitterung und Massenbewegungen). Der Anteil der chemischen Verwitterung wird im FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“ beschrieben.

40.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Erosion ist ein Oberbegriff für Vorgänge des Abtransportes von Feststoffen durch Hangrutschungen, fluviale, glaziale und marine Erosion oder Winderosion (Lexikon der Geowissenschaften 2000). Bevor Gesteinsmaterial transportiert werden kann, muss es in der Regel durch chemische und physikalische Verwitterungsprozesse verfügbar gemacht werden. In den oberflächennahen Bereichen kristalliner Gesteine greift die physikalische Verwitterung an offenen Klüften an und erweitert diese fortschreitend, während die chemische Verwitterung Minerale umwandelt oder auflöst. Die Verwitterungsintensität und -geschwindigkeit wird im Wesentlichen von den Eigenschaften des Ausgangsgesteins, dem Klima, der Bodenbedeckung und der Dauer chemischer Einwirkungen, z. B. durch reaktive Gase, beeinflusst. Je nach Klima und Gesteinseigenschaften können physikalische oder chemische Prozesse überwiegen, die sich gegenseitig unterstützen und verstärken können. Die Zersetzung des Gesteins geht randlich von den Klüften aus und setzt sich nach innen in Form konzentrischer Schalen auf einen wenig bis unverwitterten Kern fort. Anhaltende physikalische und chemische Verwitterung lässt das Gestein zunehmend zu einem kiesigen bis sandigen Material vergrusen und die Anzahl sowie die Größe der unverwitterten Gesteinsblöcke nehmen unter fortschreitender Rundung ihrer Kanten ab. Wenn die Verwitterung nicht bis zur Bildung isolierter, im Verwitterungsgrus „schwebend“ eingebetteter Gesteinsblöcke fortgeschritten ist, kann es zur Bildung von sog. Wollsackfelsen kommen, wie sie z. B. im Harz oder im Fichtelgebirge aufgeschlossen sind.

Die Korngrößen des umgelagerten Materials variieren je nach Transportmedium: von Millimeter großen Partikeln, die mit dem Wind verfrachtet werden bis einige Meter große Blöcke, die durch Gletscher transportiert werden können. Die in dem Transportmedium mitgeführten Partikel vergrößern die Erosionswirkung (z. B. Strudeltöpfe) und können feste Gesteine abschleifen (z. B. Gletscherschliff).

Die fluviale Erosion besitzt durch das fließende Wasser eine in den Untergrund einschneidende Wirkung, die von der Turbulenz des Wassers, der Sedimentfracht, der Widerstandsfähigkeit des anstehenden Gesteins, dem Klima und der Morphologie abhängig ist. Laminar fließendes Wasser kann nur fein- bis mittelkörnige Komponenten transportieren, davon aber große Mengen und über weite Entfernungen, während turbulent fließendes Wasser auch Blöcke über kurze Entfernungen transportieren kann. Mit glazialer Erosion werden die Abtragungsprozesse durch Gebirgsgletscher und Inlandsvereisung benannt. Unterschieden werden mehrere Einzelprozesse. Exaration ist das Abtragen von Lockermaterial und anstehendem Festgestein im Bereich der Gletscherstirn. Die im Eis eingeschlossenen Gesteinstrümmer erzeugen an der Gletscherbasis eine Schliff-, Schramm- und Kratzwirkung, die als Detersion bezeichnet wird. Anstehendes Gestein, das am Eis festfriert, kann bei der Bewegung des Eises herausgebrochen werden (Detraktion). Unter dem Eis können sich glaziale Rinnen bilden,

deren Bildung kann eine hohe Erosionswirkung in Lockersedimenten aufweisen (vgl. FEP „Glaziale Rinnenbildung“). Die erodierende Wirkung von Eismassen ist um ein vielfaches höher als die von Wasser und Wind (Grotzinger & Jordan 2007). Eine Sonderform der Erosion ist die Bioerosion, bei der lebende Organismen eine zerstörende Einwirkung auf Gesteine im aquatischen Milieu aufweisen.

Die Erosion kann lokal forciert (linienhafte Erosion) oder großflächig (flächenhafte Erosion) wirken. Linienhafte Erosion beschreibt eine Vertiefung der Erdoberfläche durch abfließendes Wasser (fluviale Erosion) oder durch Gebirgsgletscher (glaziale Erosion). Die Denudation kombiniert die flächenhafte Abtragung mit der Wirkung der chemischen Verwitterung. Denudation und Erosion nivellieren bestehende morphologische Erhebungen über lange geologische Zeiträume (Bahlburg & Breitzkreuz 2017). Während einer Orogenese, bei der durch Hebungen und Störungen ein ausgeprägtes Relief entsteht wird die Erosion lokal intensiviert.

Ein Überblick zur Ermittlung von Erosionsraten ist z. B. in Zepp (2008) gegeben, demnach wird die zu erwartende Erosionsrate durch verschiedene Prozesse beeinflusst, die sich teilweise auch überlagern. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind:

- das Geländere Relief (Steilheit, Hangneigung, Hanglängen),
- die Erosionsresistenz der Gesteine (Lockergesteine sind leichter zu erodieren als Festgesteine),
- Klimatische Einflüsse (v. a. Höhe, Verteilung und Intensität von Niederschlägen),
- die Erosionsbasis (Meeresspiegel) und
- die Vegetation.

Bereits im 19. Jahrhundert wurde mit dem Davis-Zyklus (Davis 1899) ein Modell entwickelt, das die Abhängigkeit der Erosion vom vorliegenden Geländere Relief aufzeigt, welches wiederum vom regional stattgefundenen Hebungsbetrag abhängt. Bereits in diesem Modell, das die plattentektonischen Vorgänge noch nicht berücksichtigt und daher von Zeiträumen ausgeht, die heute keine Gültigkeit mehr haben, wird klar, dass die Erosion mit flacher werdendem Geländere Relief stark zurückgeht. Eine quantitative Modellvorstellung, die auch Prozessüberlagerungen, wie den isostatischen Ausgleich berücksichtigt, entwickelten z. B. Strahler & Strahler (1992). Sie konnten zeigen, dass nach einer Hebung, bzw. Orogenese, die Erosionsraten mit einer Halbwertszeit von 15 Millionen Jahren exponentiell abnehmen. Bei der Verwendung von Erosionsraten, die über eine solche Modellbetrachtung ermittelt wurden, ist zu beachten, dass die Berücksichtigung des isostatischen Ausgleichs dazu führt, dass letztlich die Lageveränderung der Geländeoberfläche bewertet wird. Diese Rate kann daher nicht direkt zur Abschätzung der Verringerung der Gebirgsmächtigkeit über einem Endlager verwendet werden.

Eine weitere in Zepp (2008) vorgestellte Methode zur Erfassung der Größenordnung von hauptsächlich fluvialen Erosionsraten, ist die Ermittlung der Sedimentfracht von Flüssen. Berücksichtigt werden dabei sowohl Feststoff- als auch Lösungsausträge. Bezogen auf die Größe des Einzugsgebietes kann so auf den Abtrag rückgeschlossen werden. Bei diesen Abschätzungen werden meist sehr große Einzugsgebiete, wie z. B. das der Donau, bewertet, weshalb eine direkte Übertragung der Ergebnisse zur Bewertung von lokalen Verhältnissen eines Standortes nicht erfolgen sollte. Lokal können die Gegebenheiten des Standortes zu abweichenden Ergebnissen führen.

Beide Methoden haben gemein, dass sie von einem humiden Klima mit Oberflächenabfluss ausgehen. Im zu betrachtenden Zeitraum von einer Million Jahre in die Zukunft werden in Deutschland jedoch mehrere Kaltzeiten erwartet, in denen diese Raten nicht gelten. Fällt Niederschlag hauptsächlich als Schnee, kann der fluviale Abfluss an der Oberfläche, insbesondere bei kleineren Fließgewässern, auf null zurückgehen, was die Erosion ebenfalls verlangsamt. Unter solchen Bedingungen überwiegt meist die aeolische Erosion, da außerdem die

Vegetation zurückgeht und die Geosphäre unbedeckt an der Oberfläche ansteht. Unter Eisbedeckung wird die Erosion durch den Gletscher zu abweichenden Raten führen. Der Abtrag wird beim Abtauen des Gletschers durch die Ablagerung, der im Eis gebundenen Sedimentmassen zumindest erheblich verringert (vgl. FEP „Inland- oder Vorlandvereisung“).

In Dannhaus et al. (2018) wurde für unterschiedliche Kristallingesteine (u. a. Granit) eine Methode zur Ermittlung der Erosionsraten getestet, die auf dem $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ Verhältnis in Flusssedimenten beruht. Hintergrund der Arbeit ist die Erfassung von Stoffeinträgen ins Meerwasser, die u. a. einen Einfluss auf die Klimaentwicklung haben können. Erste Ergebnisse zeigen, dass diese Methode durchaus zur Ermittlung von Erosionsraten herangezogen werden kann. Der Einfluss, den die Kristallkorngröße des Ausgangsgesteins auf die Ergebnisse hat, muss jedoch noch spezifiziert werden, bevor die Methode belastbar genutzt werden kann. Das Beispiel zeigt jedoch, dass neben den klassischen Methoden auch neue, z. T. in einem anderen Kontext entwickelte Methoden, gesteinspezifisch auch in Endlagerprojekten von Interesse sein können.

In der Literatur finden sich beispielhaft Angaben für Erosionsraten, die in unterschiedlichen Regionen erhoben wurden. Hohe Denudationsraten von 1–10 mm/a kommen in niederschlagsreichen und/oder tektonisch sehr aktiven Gebirgen wie in Neuseeland, Taiwan oder im Himalaya vor (Koppes & Montgomery 2009). Da Mittelgebirge oft aus alten Rumpfgebirgen oder Tafelbergländern ohne rezent aktive Tektonik bestehen, sind die Erosionsraten mit < 0,1 mm/a nur sehr gering ausgeprägt (Bahlburg & Breitzkreuz 2017). Denudationsraten in Gebieten mit mäßigem Relief liegen beispielsweise für Süddeutschland bei 0,033–0,035 mm/a (Einsele & Hinderer 1997). Generell verringern sich die Denudationsraten bei zunehmendem Reliefausgleich (Nagra 1985).

Die Erosion kann während Kaltzeiten durch periglaziale Prozesse wie Bodenfließen (Solifluktion), Lawinen, Winderosion (Deflation), Frostsprengung oder glaziale Prozesse wie Gletscherschurf (Exaration) und Schmelzwässer verstärkt werden, wodurch auch der Verlauf vorhandener Flüsse verändert werden kann. Der flächenhafte Abtrag ist in den vegetationslosen Abschnitten einer Kaltzeit durch Winderosion erhöht. Mit den kaltzeitlichen Vorgängen können für die Mächtigkeitsbilanz der Schichten im Ergebnis gleichbleibende Werte verbunden sein: das erodierte Material wird an einem spezifischen Ort rasch durch neue Sedimente (vgl. FEP „Sedimentation“) ersetzt (Auffüllung von Rinnen, Tälern und Hohlformen, Bildung von Sanderflächen und Moränen).

Die Erosion wirkt oberhalb eines Niveaus (Erosionsbasis) welches bei großen Flusssystemen wie z. B. der Donau oder dem Rhein, mit dem Meeresspiegel gleichgesetzt wird. Wird die absolute Erosionsbasis der Oberflächengewässer aufgrund einer Regression und Verlagerung der Küstenlinie abgesenkt (FEP „Transgression oder Regression“), kann sich die Erosion verstärken (rückschreitende Erosion). Für die jeweiligen Zuflüsse bildet die Lage der Mündung in den jeweils größeren Fluss die regionale Erosionsbasis. Daher würde eine Regression der Küstenlinie die Zuflüsse in den Mittelgebirgen nicht direkt betreffen, da die Erosionsleistung von der regionalen Erosionsbasis abhängig ist.

Für die Bewertung der Erosion an potentiellen Endlagerstandorten für eine Million Jahre ist zu berücksichtigen, dass sich vor allem die klimatischen Bedingungen in dieser Zeit mehrfach ändern, so dass eine Rate, die für humid, gemäßigtes Klima erhoben wurde nicht auf die gesamte Zeit übertragen werden kann.

40.3 Prozessbeschreibung

Der Modelltyp „mKBS-3“ weist ein mäßiges Relief mit Geländehöhen von 300 bis 400 m ü. NN auf und entspricht damit den geomorphologischen Gegebenheiten der Mittelgebirgsregionen. Die variszisch geprägten Rumpfflächen sind als Folge von langanhaltender Hebung und Erosion entstanden und unterliegen rezent einer tektonisch eher inaktiven Phase (Frischbutter et al. 2001; Ludwig 2001). Insgesamt ist die Erosion der oberflächennahen verwitterten Bereiche des granitischen Wirtsgesteins wegen des moderaten Reliefs z. B. verglichen mit dem Alpen-Karpaten-Orogen derzeit nur gering ausgeprägt.

Die flächenhafte Erosion ist bei den gegebenen klimatischen und topografischen Verhältnissen im Modellgebiet nur gering ausgeprägt (vgl. a. die Ausführungen aus Zepp (2008) in Allg. Informationen und Beispiele). Denudationsraten für den Modelltyp „mKBS-3“ liegen deutlich unter 0,1 mm/a. Während Kaltzeiten kann es zu verstärkten periglazial bedingten Erosionsvorgängen wie Frost-Tau-Wechsel oder Solifluktion kommen, die zeitlich und lokal begrenzt sind. Vegetationsfreie Flächen begünstigen die Erosion, da Winderosion oder Solifluktion dort stärker greifen können.

Die lineare Abtragung durch fluviatile Prozesse ist indirekt von vertikalen Hebungen der Geländeoberfläche abhängig, z. B. durch die Änderung der Erosionsbasis. Rezente Bewegungsraten zeigen für die Region der Mittelgebirge nur geringfügige Vertikalbewegungen, folglich kann deren Einfluss auf die linienhafte Erosion im Bewertungszeitraum auch nur gering ausgeprägt sein. Der Bereich des Modells „mKBS-3“ ist aufgrund seines Reliefs von Wassererosion betroffen. Allerdings ist durch die maximal nur wenigen Meter breiten Bäche und Flussläufe (vgl. a. FEP „Oberflächengewässer“) keine große Erosionsleistung und Einwirkung auf den Untergrund zu erwarten. Eine linienhafte Erosion durch glaziale Rinnen ist für den Modelltyp „mKBS-3“ auszuschließen, da das Modellgebiet während der nächsten eine Million Jahre von keiner Vergletscherung betroffen sein wird (vgl. FEP „Inland- oder Vorlandvereisung“). Eine erhöhte Erosionsleistung durch Gletscherschurf oder Schmelzwässer kommt daher ebenfalls nicht in Betracht.

40.4 Zeitliche Beschränkung

Keine. Der Prozess wirkt permanent.

40.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Erosion ist ein permanent ablaufender Prozess, der auch innerhalb der nächsten eine Million Jahre ablaufen wird.

40.6 Ungewissheiten

- Ungewiss ist zu welchem Zeitpunkt welche klimaabhängige Erosionsart einwirkt, da das Klima dafür nicht exakt genug vorhergesagt werden kann. Erosionsraten sind daher lokal nur ungenau festlegbar.

40.7 Literaturquellen

- Bahlburg, H. & Breitzkreuz, C. (2017): Grundlagen der Geologie. – 5. Aufl.: 434 S.; Berlin (Springer).
- Dannhaus, N., Wittmann, H., Krám, P., Christl, M. & von Blanckenburg, F. (2018): Catchment-wide weathering and erosion rates of mafic, ultramafic, and granitic rock from cosmogenic meteoric $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ratios. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 222: 618-641. DOI: 10.1016/j.gca.2017.11.005
- Davis, W.M. (1899): The geographical cycle. – *Geogr. Journal*, 14: 481-504.
- Einsele, G. & Hinderer, M. (1997): Terrestrial sediment yield and the lifetimes of reservoirs, lakes, and larger basins. – *Geol Rundsch*, 8: 288-310.
- Frischbutter, A. & Schwab, G. (2001): Recent vertical movements (Map No. 4). Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346. – *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 8, 1: 27-31.
- Grotzinger, J. & Jordan, T. (2017): Press/Siever Allgemeine Geologie. – 7. Auflage: 769 S.; Berlin (Springer). DOI: 10.1007/978-3-662-48342-8
- Koppes, M.N. & Montgomery, D.R. (2009): The relative efficacy of fluvial and glacial erosion over modern to orogenic timescales. – *Nature Geoscience*, 2: 644-647.
- Lexikon der Geowissenschaften (2000): Edu-Insti. - Bd. 2: 506 S.; Berlin (Spektrum).
- Ludwig, A.O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346. – *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 8, 1: 5-12.
- Nagra (1985): Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz. – NTB 84-26: 110 S.; Wettingen, Schweiz.
- Strahler, A.H. & Strahler, A.N. (1992): Modern Physical Geography. – 638 pp.; New York (Wiley).
- Zepp, H. (2008): Geomorphologie: Grundriß Allgemeine Geographie. – 4. Aufl.: 385 S.; Stuttgart (UTB).

41 Sedimentation

NEA-Gruppe: 1.2.8 *Regional erosion and sedimentation*
 5.1.13 *Erosion and deposition*

41.1 Definition/Kurzbeschreibung

Sedimentation ist der Absatz von Feststoffpartikeln durch die Wirkung der Schwerkraft.

41.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Sedimentation setzt ein, wenn die Sinkgeschwindigkeit der Partikel größer ist als die turbulenzbedingte vertikal entgegengesetzte Komponente des transportierenden Mediums (Wasser oder Luft). Sie ist abhängig von Größe, Dichte und Form der Partikel, Strömungsgeschwindigkeit, Sättigung sowie Turbulenz (Lexikon der Geowissenschaften 2003). Nach der Entstehung kann zwischen klastischen, chemischen und biogenen Sedimenten unterschieden werden. Klastische Sedimente bestehen aus den Bruchstücken und Partikeln des Ausgangsgesteins. Chemische Sedimente sind durch Ausfällung gelöster Salze, Silikate oder Karbonate entstanden. Biogene Sedimente sind auf die Überreste von organischen Materialien wie Schalengehäuse, Knochen oder Pflanzenreste zurückzuführen.

Die wesentlichen kontinentalen Ablagerungsbereiche sind fluviatile und glaziale Bereiche sowie Seen und Wüsten. Hier herrschen sowohl Erosion und Transport (vgl. FEP „Erosion“) als auch Sedimentation vor. Unterhalb des Erosionsniveaus, welches meist dem Meeresspiegel gleichgesetzt wird, sind reine Ablagerungsbereiche in den marinen Milieus zu erwarten (Tucker 1985).

Verstärkte Absenkungstendenzen (Subsidenz) des Untergrundes in der jüngeren geologischen Vergangenheit (z. B. Nordseebecken, Niederrheinische Bucht) verursachten große Sedimentmächtigkeiten, sofern große Sedimentmengen angeliefert wurden. Größere Sedimentakkumulationen sind auch durch den Transport eines vorrückenden Inlandeises möglich, ohne dass eine verstärkte regionale Subsidenz vorliegen muss. Verflochtene Flüsse, die vor allem während Kaltzeiten auftreten, bilden mehrere Flussarme in einem Talbereich aus und führen eine weit größere Sedimentfracht mit sich als mäandrierende Flüsse, beides begünstigt die Bildung von Flussterrassen. Vor allem während Kaltzeiten kann es im trocken-kalten Hochglazial zur Akkumulation von äolischen Sedimenten (Löss) kommen, wie es z. B. am nördlichen Rand der Mittelgebirge der Fall war. Die Lössmächtigkeiten betragen in Deutschland meist nur wenige Meter. Im Kraichgau ist der Löss über 20 m mächtig und am Kaiserstuhl beträgt die Mächtigkeit bis zu 40 m.

41.3 Prozessbeschreibung

Im Bereich des Modelltyps „mKBS-3“ sind rezente vertikale Bewegungsraten nur gering ausgeprägt (FEP „Vertikale Bewegungen der Lithosphäre“). Wegen der fehlenden Absenkung sind tiefe Beckenbildungen, die zu einer großräumigen flächenhaften Sedimentakkumulation führen könnten, für den Bewertungszeitraum nicht zu erwarten und es dominieren erosive Prozesse.

Die fluviale Sedimentation hängt stark mit der zukünftigen Entwicklung der Oberflächengewässer zusammen (vgl. FEP „Oberflächengewässer“). Durch die im Modelltyp „mKBS-3“ angenommenen geomorphologischen Gegebenheiten (geringes Relief und Geländehöhen von

300–400 m ü. NN) bilden sich keine größeren Flusssysteme aus und somit findet auch zukünftig nur eine geringe Sedimentakkumulation statt. Während zukünftiger Kaltzeiten kann es zur Bildung von geringfügigen Sedimentakkumulationen kommen, da z. B. als Folge der fehlenden Vegetation feinkörniges Gesteinsmaterial durch Wind ausgeweht und als Löss in Senken wieder abgelagert werden kann.

41.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

41.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Sedimentation ist ein permanent ablaufender Prozess, der auch innerhalb der nächsten einen Million Jahre ablaufen wird.

41.6 Ungewissheiten

Keine.

41.7 Literaturquellen

Lexikon der Geowissenschaften (2003). - Martin, C. & Eiblmaier, M. (Eds.): Gesamtausgabe in 5 Bänden + 1 Registerband; (Spektrum Akademischer Verlag).
Tucker, M.E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. – 262 S.; Stuttgart (Enke).

42 Klimatisch bedingter Wärmestrom

NEA-Gruppe:	1.3.1	<i>Global climate change</i>
	1.3.2	<i>Regional and local climate change</i>
	4.2.1	<i>Thermal processes [geosphere]</i>

42.1 Definition/Kurzbeschreibung

Im FEP „Klimatisch bedingter Wärmestrom“ werden die Einwirkungen der global wirksamen externen Temperaturänderungen auf den Untergrund beschrieben.

42.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Als Ursachen für eine globale Klimaänderung kommen terrestrische und extraterrestrische Faktoren (z. B. Bloom 2010) oder menschliche Aktivitäten (s. a. IPCC 2007, IPCC 2014) in Frage. Derzeit werden die nachfolgenden Faktoren als Auslöser diskutiert:

- Änderung der primären Sonneneinstrahlung,
- Änderung der Erdbahnparameter,
- Drift von Kontinenten mit Veränderung der großen Meeresströmungen,
- Gebirgsbildung/Orogenese,
- Vulkanismus,
- Änderung der Zusammensetzung der Atmosphäre,
- Größe und Verteilung der Land-, Wasser- und Eisoberfläche,
- Gesteinszusammensetzung und Verwitterung (CO₂-Bindung),
- Änderung der Vegetation und
- Anthropogene Beeinflussung.

Die primäre Sonneneinstrahlung ist in der Aufzählung der bei weitem wichtigste Parameter. Es wird jedoch von einer Koppelung der verschiedenen Faktoren und einer Verstärkung der Effekte durch Rückkoppelung, v. a. über die Albedo als Ursache für globale klimatische Änderungen, ausgegangen. Geringe Änderungen der Sonneneinstrahlung können drastische Klimawechsel erzeugen. Bereits kurzperiodische Strahlungsänderungen durch den Sonnenfleckenzyklus (z. B. Maunder Minimum (= Kleine Eiszeit im 17. und 18. Jahrhundert) werden als klimawirksam eingeschätzt. Neben den Sonnenflecken werden auch andere Einflüsse auf die Menge der auf der Erde eintreffenden primären Sonnenstrahlung kontrovers diskutiert. Scherer & Fichtner (2007) verweisen in diesem Zusammenhang auf den Einfluss von lokalen Änderungen in der interstellaren Materie, die mit Änderungen der kosmischen Strahlung einhergeht. In welchem Maß die geänderte kosmische Strahlung das Klima beeinflusst, ist jedoch noch ungeklärt (z. B. Ehlers 1994: 5; Bloom 2010).

Die über Jahrtausende verlaufende Drift von Kontinenten in Polbereiche – z. B. die heutige Lage der Antarktis – scheint ein wesentlicher Faktor für die Entstehung von Eiszeitaltern zu sein. Auch die Entstehung von durch Kontinente abgeschlossenen Meeresbereichen in Polnähe – wie der heutige Bereich der Arktis – ist ebenso wie das Herausheben von Erdkrustenteilen in große Höhen durch Gebirgsbildung, z. B. Himalaya, förderlich für die Akkumulation von Schnee und Eis.

Für die Steuerung der Zyklizität innerhalb der Eiszeitalter, der wiederkehrende Wechsel von Kalt- und Warmzeiten, werden heute allgemein die Erdbahnparameter verantwortlich gemacht. Die Exzentrizität der Erdbahn geht mit Perioden von 413.000 und ca. 100.000 Jahren, die Schiefe der Ekliptik mit einer Periode von 41.000 Jahren und die Präzession der Erdachse

mit Perioden von ca. 22.000 Jahren in diese Zyklizität ein (Milankovitsch-Theorie: Milankovitsch 1998; vgl. Smithsonian et al. 2008: 175ff.; Ludwig 2007; Zachos et al. 2001). Weil die Perioden mit ca. 100.000 und 41.000 Jahren auch im Kaltzeit-Warmzeit-Zyklus dominieren, wird ein enger Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Erdbahnparameter und der Dauer von Kaltzeiten angenommen.

Die Dauer der Kaltzeit-Warmzeit-Zyklen von etwa 100.000 Jahren besteht seit dem Mittelpleistozän (ca. 800.000 Jahre). Davor herrschten im Unterpleistozän kürzere Zyklen von ca. 22.000/41.000 Jahre vor (vgl. a. Abe-Ouchi 2013). Der Beginn einer Kaltzeit ist aber nicht mit dem sofortigen Erreichen tiefster Temperaturen gleichzusetzen. Das Maximum der Abkühlung tritt, wie am Beispiel der Weichsel-Kaltzeit ersichtlich, erst mit einer gewissen Verzögerung am Ende auf, wobei es im Verlaufe der Kaltzeit insbesondere während der frühen Phase zu einem Kalt-Warm-Wechsel von Stadialen und Interstadialen kommt (z. B. Behre & Lade 1986), die eine Dauer von ca. 10.000 Jahren umfassen können. Anhand der Sauerstoffisotopen-Kurve des GRIP-Eiskerns (GRIP = Greenland Ice Core Program), die einen Wechsel im globalen Eisvolumen reflektiert, ist ersichtlich, dass diese Phasen von Klimaschwankungen in unterschiedlicher Intensität modifiziert sind. Die Dansgaard-Oeschger-Zyklen im Zeitrahmen eines Millenniums z. B. beruhen auf kurzfristigen Temperaturerhöhungen von 5 bis 15°C innerhalb weniger Zehnerjahre (Boulton et al. 2001: 68ff.; Fig. A1-1).

Zum Höhepunkt der Weichsel-Kaltzeit (20.000 bis 18.000 Jahre BP) lagen die Januar-Mitteltemperaturen in Mitteleuropa um ca. -30°C, im Juli bei etwa +8°C und im Jahresmittel bei ca. -12°C (Lowe & Walker 1997: Fig. 3.17), wobei regional Abweichungen von den Werten möglich waren. Delisle et al. (2007) zeigen Kurven für die Jahresmitteltemperaturen auf Basis von Modellberechnungen, die etwa -8°C für diesen Zeitabschnitt erreichen.

Die extrem kalten Stadiale der Kaltzeiten waren ausgesprochen trockene Zeitabschnitte. In der Weichsel-Kaltzeit fielen in Mitteleuropa ca. 500 mm Niederschlag weniger als heute (Lexikon der Geowissenschaften 2003). Die kaltzeitlichen Interstadiale zeichnen sich durch höhere Temperaturen und gemäßigte klimatische Verhältnisse aus.

In den Kaltzeiten lag das Zentrum der Vereisungen, die Norddeutschland erreichten in Skandinavien. Ein weiterer größerer Gletscher bildete sich in Europa auch in den Alpen, dieser reichte in Süddeutschland bis in den Voralpenbereich. Kleinere Vergletscherungen wiesen auch die Mittelgebirge, wie z. B. der Harz, das Erzgebirge oder der Schwarzwald auf (s. a. FEP „Inland- oder Vorlandvereisung“).

42.3 Prozessbeschreibung

Für das Modell „mKBS-3“ wird die klimatostratigraphische Gliederung Mitteleuropas mit den Kaltzeiten Elster, Saale und Weichsel Norddeutschlands verwendet (Deutsche Stratigraphische Kommission, STD 2016). Oberflächennahe Kristalline Gebiete liegen in Deutschland häufig außerhalb der ehemaligen Ausbreitungen der großen Gletscher aus Skandinavien oder den Alpen. Deshalb wird für das Modell angenommen, dass es im Verlauf der nächsten einen Million Jahre ebenfalls nicht von ausgedehnten Gletschern überdeckt wird. Die atmosphärische Temperaturentwicklung wirkt somit während des gesamten Bewertungszeitraumes direkt auf den Untergrund ein, ohne dass eine mächtige Isolationsschicht in Form von Gletschereis existiert. In einigen Mittelgebirgen traten, wie zuvor genannt, im Quartär zwar Vergletscherungen auf, diese wiesen jedoch keine große Ausdehnung auf und Prozesse wie z. B. eine tiefgreifende glaziale Rinnenbildung konnten nicht nachgewiesen werden.

Aktuell dauert die Warmzeitphase, die nach dem Ende der Weichsel-Kaltzeit vor ca. 11.700 Jahren begann (Deutsche Stratigraphische Kommission, STD 2016), weiterhin an. In Deutschland herrscht derzeit weitverbreitet ein warmgemäßigtes Klima, das im östlichen Bereich und

in den Höhenlagen der Mittelgebirge auch in ein boreales Klima übergeht. Für das Modell „mKBS-3“ wird aufgrund der Höhenlage im Bereich von ca. 300–400 m ü. NN ein Klima angenommen, das nach der Köppen-Geiger-Klassifikation der Klasse Dfb (Peel et al. 2007) entspricht. Dabei handelt es sich um ein kontinentales winterfeucht-kaltes Klima mit warmen Sommern.

In der Zukunft muss innerhalb des Zeitraumes von einer Million Jahre 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 geringer sein (vgl. Shackleton et al. 1990). Diese Temperaturänderungen werden an den Untergrund weitergegeben. Entsprechend der thermischen Eigenschaften der Gesteine und der lokal wirkenden Wärmestromdichte aus dem Erdinneren kann die Abkühlung unterschiedlich tief vordringen (vgl. a. FEP „Permafrost“).

42.4 Zeitliche Beschränkung

Der Prozess wirkt permanent.

42.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Globale klimatische Änderungen laufen permanent ab. Dadurch wird auch laufend die Temperatur, die als Rahmenbedingung des Wärmestroms im Untergrund an der Erdoberfläche herrscht verändert.

42.6 Ungewissheiten

- Die Prognose des zukünftigen Klimas beinhaltet zahlreiche Ungewissheiten in Bezug auf den genauen zeitlichen Verlauf und die Intensität der zu erwartenden Kalt- und Warmzeiten. Bisher wird der Verlauf des zukünftigen Klimas in Szenarien als Klimabild vorgegeben. Auf diese Weise können auch unterschiedliche Verläufe verwendet werden.

42.7 Literaturquellen

- Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kawamura, K., Raymo, M.E., Okuno, J.i., Takahashi, K. & Blatter, H. (2013): Insolation-driven 100,000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume. – *Nature*, Vol. 500: 190-194. DOI:10.1038/nature12374
- Behre, K.-E. & Lade, U. (1986): Eine Folge von Eem und 4 Weichsel-Interstadialen in Oerel/Niedersachsen und ihr Vegetationsverlauf. – *E&G Quaternary Science Journal*, 36: 11-36.
- Bloom, A.J. (2010): Chapt. 3: Causes of climate. (In: Bloom, A.J. (Ed.): *Global Climate Change: Convergence of Disciplines*). – Vol. 1: 45-74; Sunderland, MA/USA (Sinauer Associates).
- Boulton, G.S., Kautsky, U., Morén, L. & Wallroth, T. (2001): Impact of long-term climate change on a deep geological repository for spent nuclear fuel. – *Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) Technical Report, TR- 99-05: 117 pp.*; Stockholm.

- Delisle, G., Grassmann, S., Cramer, B., Messner, J. & Winsemann, J. (2007): Estimating episodic permafrost development in northern Germany during the Pleistocene. (In: Hambrey, M.J., Christoffersen, P., Glasser, N.F. & Hubbard, B. (Eds.): *Glacial Sedimentary Processes and Products*). 39, International Association of Sedimentologists (IAS), Special Publication: 109-119; Oxford (Blackwell). DOI: 10.1002/9781444304435.ch8
- Deutsche Stratigraphische Kommission, (Menning, M. & Hendrich, A., [Hrsg.]), (2016): *Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016)*. – 2. Auflage; Potsdam.
- Ehlers, J. (1994): *Allgemeine und historische Quartärgeologie*. – 1. Aufl.: 358 S.; Stuttgart (Enke).
- IPCC (2007): *Klimaänderung 2007: Synthesebericht*. – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Ein Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC): 145 S.; Berlin.
- IPCC (2014): *Klimaänderung 2014: Synthesebericht*. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): 145 S.; Genf.
- Lexikon der Geowissenschaften (2003): *Lexikon der Geowissenschaften*. – Martin, C. & Eiblmaier, M. (Eds.): 2840 S.; Heidelberg (Spektrum).
- Lowe, J.J. & Walker, M.J.C. (2015): *Reconstructing Quaternary Environments*. – 3rd Edition: 568 pp.; London (Routledge).
- Ludwig, K.-H. (2007): *Eine kurze Geschichte des Klimas - Von der Entstehung der Erde bis heute*. – 2. Aufl.: 216 S.; München (C.H. Beck).
- Milankovitsch, M. (1998): *Canon of Insolation and the Ice-Age Problem*. – (reprint 1st ed.): 634 pp.; Belgrad (Zavod za udzbenike i nastavna sredstva).
- 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
- Scherer, K. & Fichtner, H. (2007): Das Klima aus dem All. – *Physik Journal*, Vol. 6, Nr. 3: 59-63.
- Shackleton, 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
- Smithson, P., Addison, K. & Atkinson, K. (2008): *Fundamentals of the Physical Environment*. Fourth Ed.: 776 p.; (Taylor & Francis). DOI:10.1111/j.1745-5871.2008.00569.x
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E. & Billups, K. (2001): Trends, Rhythms and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. – *Science*, Vol. 292, No. 5517: 686-693. DOI:10.1126/science.1059412

43 Terrestrischer Wärmestrom

NEA-Gruppe: 4.2.1 *Thermal processes [geosphere]*

43.1 Definition/Kurzbeschreibung

Der terrestrische Wärmestrom bezeichnet den zur Erdoberfläche gerichteten Wärmetransport aus dem Erdinneren. Angetrieben wird der Wärmestrom durch das Temperaturgefälle vom Erdkern zur Erdoberfläche. Der Wärmetransport erfolgt zum einen über Wärmeleitung (Konduktion) innerhalb des Gesteins und zum anderen über Konvektion durch aufsteigende Thermalwässer. Aus dem Wärmestrom ergibt sich der geothermische Gradient, der die Temperaturzunahme mit zunehmender Tiefe darstellt.

43.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Ein stetiger natürlicher Wärmestrom vom Erdinneren zur Erdoberfläche wird durch den Temperaturgradienten, der sich aus dem Temperaturunterschied zwischen dem im rund 5.000–7.000°C heißen Erdkern gegenüber der durchschnittlich 15°C kühlen Erdoberfläche ergibt, verursacht. Ein Teil der Temperatur im Erdinneren ist auf die Restwärme aus der Zeit der Erdentstehung vor 4,7 Mrd. Jahren (Akkretionswärme) zurückzuführen. Der Hauptteil der geothermischen Wärme wird durch die Freisetzung von Energie beim radioaktiven Zerfall von natürlichen radioaktiven Elementen wie Uran-, Thorium- und Kaliumisotopen im Erdmantel und der Erdkruste hervorgerufen (Clauser 2006). Der Temperaturgradient ergibt sich aus dem terrestrischen Wärmestrom und der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine. Mit zunehmender Tiefe steigt die Temperatur entsprechend dem terrestrischen Wärmestrom aus der Tiefe und dem daraus resultierenden geothermischen Gradienten an. In Mitteleuropa nimmt die Temperatur um etwa 3 K pro 100 Meter Tiefe zu.

Die terrestrische Wärmestromdichte beträgt in Mitteleuropa etwa 60 bis 80 mW/m² (Walter 2007). Für Deutschland wurde eine durchschnittliche Wärmestromdichte von 65 mW/m² ermittelt (Stober et al. 2010). Die Temperaturverteilung im Untergrund ist nicht einheitlich und es gibt in Deutschland Gebiete, in denen der Temperaturgradient vom Durchschnittswert wesentlich abweicht. In Norddeutschland liegt die Wärmestromdichte mit 60 mW/m² im unteren Bereich (Walter 2007). In manchen Bereichen des Oberrheingraben, im Gebiet von Bad Urach oder im Eger-Graben ist der Temperaturgradient gegenüber dem Durchschnitt erhöht (Stober et al. 2010). Die Temperaturanomalien können auf aufsteigendes heißes Thermalwasser oder wie im Gebiet des Eger-Graben auf eine Restwärme aus der Zeit der tertiären vulkanischen Aktivität zurückzuführen sein. Ebenfalls kann die Inhomogenität der Wärmeleitfähigkeit von unterschiedlichen Gesteinen zu einer Verzerrung der Wärmestromdichte führen. Typisch sind z. B. Wärmestromdichteanomalien über Salzstöcken.

In den obersten Metern der Erdkruste wird die Temperatur des Untergrundes durch das Klima beeinflusst. Die Temperaturänderungen an der Erdoberfläche pflanzen sich durch Wärmeleitung in das Erdinnere fort. Die daraus resultierenden Einflüsse auf das Endlagerstandortmodell werden im FEP „Klimatisch bedingter Wärmestrom“ beschrieben. Verlässliche Werte für die Wärmestromdichte können nur ermittelt werden, wenn die klimatischen Effekte berücksichtigt werden. Bei der Interpretation der Wärmestromdichte sind weiterhin topographische Effekte und der Einfluss von Lithosphärenhebung (verbunden mit Erosion) und -senkung (verbunden mit Sedimentation) zu berücksichtigen (Lotz 2004). Im Endlager und seiner Umgebung finden neben dem radioaktiven Zerfall Prozesse mit exothermen Reaktionen statt, die zu einer Temperaturerhöhung im System führen. Diese Prozesse werden im FEP „Endlagerinduzierter Wärmestrom“ beschrieben.

43.3 Prozessbeschreibung

Beim Modelltyp „mKBS-3“ wird angenommen, dass das Kristallingestein oberflächennah ansteht, wie dies in Deutschland u. a. in Mittelgebirgsbereichen der Fall ist. Da in diesen Gebieten keine wesentlichen Temperaturanomalien zu erwarten sind, wird die für Deutschland durchschnittliche Wärmestromdichte von etwa 65 mW/m^2 angenommen. Zonen mit Temperaturanomalien durch aufsteigende Thermalwässer in Störungszonen oder Gebiete mit vulkanischer Aktivität werden durch die zugrundeliegenden Rahmenbedingungen (§ 22 II Nr. 2 und Nr. 5 StandAG (2017): Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen“ und „Vulkanische Aktivität“) nicht für den Modelltyp „mKBS-3“ in Betracht gezogen. Trotzdem liegen in Deutschland regional unterschiedliche Temperatur-Tiefenprofile vor, die bedingt sind durch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der jeweils anzutreffenden Gesteine. Je nach Standort bzw. regionalen Temperatur-Tiefenprofil liegen entsprechend unterschiedliche Ausgangstemperaturen im Einlagerungsniveau vor. Diese Ausgangstemperatur ist eine wesentliche Einflussgröße, da auf ihr basierend die Auslegung der Einlagerungsbereiche erfolgt. Die Auslegung kann dementsprechend regional deutlich unterschiedlich ausfallen.

43.4 Zeitliche Beschränkung

Der Prozess wirkt permanent.

43.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Der natürliche Wärmestrom vom Erdinneren zur Erdoberfläche läuft permanent ab und bestimmt den lokalen geothermischen Gradient.

43.6 Ungewissheiten

- Entwicklung einer verlässlichen Methode zur Bestimmung der wahren Gebirgstemperatur und des thermalen Ausgangszustandes des Grubengebäudes, da dies ein wichtiger Faktor für die Bereitstellung einer Referenzdatenbasis für THMC-Modellberechnungen zur Bewertung der Langzeitsicherheit ist.
- Berechnete Wärmestromdichten beinhalten die Ungewissheiten der lokal einwirkenden Prozesse (z. B. bei Permafrost oder Grundwasserströmung).
- In situ Messungen zum Temperaturprofil untertage können durch andere lokal wirkende Prozesse überlagert werden (z. B. Grundwasserströmung).
- Genauigkeit bei der Bestimmung der Wärmestromdichte zur Ermittlung des thermischen Gradienten (in Bohrungen):
 - kontinuierliche Temperaturmessungen ergänzt durch Kernproben: Genauigkeit $\pm 5 \%$
 - kontinuierliche Temperaturmessungen ergänzt durch Bohrklein (statt Kernproben): Genauigkeit $\pm 10\text{--}15 \%$
 - Temperaturmessungen an der Sohle einzelner Bohrungen: Genauigkeit $\pm 40\text{--}50 \%$

43.7 Literaturquellen

- Clauser, C. (2006): The Earth's thermal regime. – (In: Heinloth, K. [ed.]: Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Group VIII: Advanced Materials and Technologies, Vol. 3: Energy Technologies, Subvol. C: Renewable Energy); Berlin Heidelberg (Springer).
- Lotz (2004): Neubewertung des rezenten Wärmestroms im Nordostdeutschen Becken. – Diss., Freie Universität Berlin, Institut für Geologische Wissenschaften: 203 S.; Berlin.
- 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. Deutscher Bundestag.
- Stober, I., Fritzer T., Obst, K. & Schulz, R. (2010): Tiefe Geothermie – Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU); Berlin.
- Walter, R. (2007): Geologie von Mitteleuropa. – 7. Auflage: 511 S.; Stuttgart (Schweizerbart).

44 Permafrost

NEA-Gruppe: 1.3.4 *Periglacial effects*

44.1 Definition/Kurzbeschreibung

Permafrost ist eine kaltzeitliche Entwicklung, die durch Temperaturen im Untergrund von unter 0°C für mindestens zwei Jahren gekennzeichnet ist. Abhängig von der Tiefenlage, den Druckverhältnissen und der Salinität ist der Untergrund dabei gefroren oder enthält Wasser in flüssiger Form, welches die gleichen tiefen Temperaturen aufweist.

44.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Tiefe, die der Permafrost im Untergrund erreicht, ist abhängig von den atmosphärischen und oberflächlich einwirkenden Randbedingungen sowie den Eigenschaften des Untergrundes. Die klimatischen Randbedingungen bestimmen die Dauer der Kältephasen und die mittleren Jahresbodentemperaturen, die lokal von Oberflächengewässern, Art der Vegetation oder Schneebedeckung (Isolationswirkung) beeinflusst werden kann. Die Eigenschaften des Untergrundes werden durch die Lithologie, Porosität, Grundwasserchemismus und den terrestrischen Wärmefluss bestimmt.

Vereinfacht werden im Hinblick auf die räumliche Ausbreitung drei Typen von Permafrost unterschieden:

- kontinuierlicher Permafrost (> 90 % Permafrost Ausbreitung),
- diskontinuierlicher Permafrost (90 bis 50 % Ausbreitung),
- sporadischer Permafrost (< 50 % Ausbreitung).

Gebiete mit kontinuierlichem Permafrost liegen gegenwärtig z. B. in Sibirien, Grönland, Kanada und Alaska. Der Breitengrad 60° N gibt in etwa die Ausbreitungsgrenze auf der Nordhalbkugel wieder. Einen weiteren Einfluss hat die Topographie, generell sinkt die Lufttemperatur mit der Höhe und so kann Permafrost auch in Gebirgsregionen wie den Alpen auftreten. Kontinuierlicher Permafrost kann bis zu 1500 m tief in den Boden reichen (z. B. Frolov (2003)). Unter großen Seen oder Flüssen können aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser und dadurch bedingten mittleren Jahrestemperaturen von < 0°C aufgetaute Bereiche entstehen (Talík; Pl. Talík). Die großen Mächtigkeiten von Permafrost in Jakutien wurden im Verlauf mehrerer Kaltzeiten aufgebaut. Grundvoraussetzung dafür sind die fehlende Vereisung und Isolationswirkung durch Schnee oder Vegetation. In angrenzenden und weiter südlich liegenden Gebieten ist der Permafrost diskontinuierlich ausgebildet. Sobald der Anteil des ungefrorenen Bodens überwiegt, handelt es sich um sporadischen Permafrost.

Aufgrund von jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen bildet sich über dem permanent gefrorenen Boden in den warmen Monaten eine Auftauschicht, die mehrere Meter mächtig sein kann. Bestimmende Faktoren sind hier ebenfalls die Höhenlage und die geografische Breite.

Kontinuierlicher Permafrost kann sich im Laufe von Kaltzeiten aus sporadischem und diskontinuierlichem Permafrost bilden. Wird Permafrostboden von einem Inlandgletscher überfahren, führt dies infolge des terrestrischen Wärmestroms aus dem Erdinnern und der isolierenden Wirkung des Gletschereises zu einem allmählichen Auftauen des Permafrostbodens unter dem Eis. Ein Abbau während Interstadialzeiten zu diskontinuierlichem und sporadischem Permafrost ist ebenfalls möglich (French 2008). Während des Pleistozäns kam es in ganz

Deutschland wiederholt zur Bildung von Permafrost. Die Verbreitung von Permafrost in der nördlichen Hemisphäre während des letzten glazialen Maximums ist z. B. in Lindgren et al. (2016) dargestellt.

Durch geomorphologische Prozesse im Permafrost können die Topographie und oberen Bodenbereiche modifiziert werden. Während Solifluktion das langsame, großflächige, hangabwärts gerichtete Fließen von lockerem Gesteinsmaterial in der Auftauzone des Permafrostbodens beschreibt, ist Kryoturbation eine Durchmischung des oberflächennahen Untergrundes durch Gefrieren und Wiederauftauen. Typische Frostbodenerscheinungen in Permafrostgebieten sind Eiskeile, vertikale und vorwiegend mit Eis gefüllte keilförmige Spalten. Diese entstehen aufgrund einer Kontraktion des Bodens durch den Gefrierprozess. Eiskeile haben Breiten von bis zu 3 m und erreichen typischerweise Tiefen zwischen 1 und 10 m, wobei auch größere Tiefen bekannt sind. Pingos sind isoliert stehende, rundliche Hügel in Gebieten mit Permafrost, die durch eine im Boden befindliche Eislinse entstehen. Pingos können Höhen von über 10 m und Durchmesser von mehr als 100 m erreichen.

Die ehemalige maximale Permafrosttiefe kann aber über geologische Befunde nicht exakt nachgewiesen werden. Numerische Simulationen sind das am besten geeignetste Werkzeug, um Permafrosttiefen abschätzen zu können. Govaerts et al. (2016) verglichen die Ergebnisse von verschiedenen Modellierungen der Permafrosttiefe für NW-Europa während des letzten glazialen Maximums bzw. eines zukünftigen Analogons. Die aus den verschiedenen Studien berechnete Eindringtiefe von Permafrost liegt in einem Bereich von 100 m bis etwas über 300 m Tiefe (vgl. a. Grassmann et al. (2010); Delisle et al. (2007)).

Permafrost kann sich ebenfalls auf die Langzeitstabilität der Geosphäre und die Komponenten im Endlagersystem auswirken. Durch die Änderung der thermischen, hydraulischen und chemischen Bedingungen bei Gefrierprozessen kann die Barrierewirkung von Komponenten, die Bentonit oder Zement enthalten, beeinflusst werden (SKB 2014). Insbesondere dann wenn das Wasser gefriert und somit an Volumen zunimmt kann auch die mechanische Stabilität von Endlagerkomponenten beeinträchtigt werden. Außerdem kann es zu Erweiterungen der Risse in der Auflockerungszone kommen, bzw. wird das Schließen von Rissen in diesem Bereich verzögert. Permafrost kann die Grundwasserströmung beeinflussen, so dass sich lokale oder regionale Grundwasserfließpfade ändern. Kontinuierlicher Permafrost ist in der Regel wasserundurchlässig und stellt eine Barriere für den Grundwasserfluss dar. Der Grundwasserfluss findet dann nur in der sommerlichen Auftauschicht an der Erdoberfläche oder unterhalb des Permafrostes statt, wenn dort ein hydraulischer Gradient vorhanden ist. Die Grundwasseraustrittsgebiete sind bei kontinuierlichem Permafrost äußerst begrenzt und auf offene Taliki beschränkt.

Offene Taliki bilden sich unterhalb von Seen oder Fließgewässern aus. Bei entsprechend großem Radius der Gewässer können sich so auch bei großer Permafrosttiefe offene Taliki bilden (SKB 2006). Bosson et al. (2013) berechnen die Permafrosttiefe und Bildung von offenen Taliki am Standort Forsmark. Je tiefer der Permafrost reicht, desto weniger offene Taliki bleiben bestehen. Modellierungen von Delisle et al. (2003) zeigen, dass sich während der Weichsel-Kaltzeit offene Taliki unter Flüssen bilden können, die breiter als 50 m sind. Bei entsprechenden hydraulischen Bedingungen können diese als potentielle Fließpfade für Radionuklide fungieren, speziell wenn sie mit hydraulisch aktiven Kluftzonen im Kristallingestein verbunden sind, die in tiefere ungefrorene Bereiche reichen (Posiva 2012).

Daneben existieren Grundwasseraustrittsstellen, an denen das wärmere Wasser des Untergrundes die Möglichkeit besitzt, über hydrothermal bedingte Taliki an die Oberfläche zu gelangen. Weiterhin können sich durch das Gefrieren die im Grundwasser enthaltenen Mineralien in bestimmten Zonen des Permafrostes in salinaren Linsen (Cryoeps) anreichern um bei entsprechenden hydraulischen Voraussetzungen als hochsalinare Wässer in Form von Salzwas-

serquellen zu Tage zu treten (chemische Taliki; vgl. Gascoyne (2000)). Oberhalb von Salzstrukturen kommt es häufig zu einer erhöhten Mineralisierung der Untergrundwässer. Durch die höhere Dichte der salinaren Wässer sind dichtegesteuerte Strömungsprozesse möglich. Brack- bzw. Salzwässer zeigen im Gegensatz zu Süßwässern einen niedrigeren Gefrierpunkt (kleiner als 0 °C). Dementsprechend führt eine erhöhte Mineralisierung der sich im Untergrund befindlichen Lösungen dazu, dass diese nicht gefrieren auch wenn sie Teil des Permafrosts sind (siehe Definition Permafrost).

In geklüftetem Kristallingestein kann es durch das Gefrieren von Porenwasser in Klüften zu höheren mechanischen Spannungen kommen, wodurch oberflächennahe Klüfte bei entsprechend geringerem Auflastdruck geöffnet werden können (Posiva 2012). Signifikant verändert Permafrost auch den Grundwasserfluss in einem Kluftgrundwasserleiter. Modellierungen für den Standort Forsmark zeigen, dass unter Permafrostbedingungen der Grundwasserfluss und die -neubildung in einer geklüfteten Kristallinformation insgesamt eingeschränkt sind (Bosson et al. 2013). Die Gesteinseinheiten in Forsmark bestehen hauptsächlich aus Granit, der im oberen Bereich von ~ 200 m stark geklüftet ist.

Durch die Entwicklung und das Tauen von Permafrost kann die Entstehung und Destabilisierung von Gashydraten beeinflusst werden. Die am häufigsten vorkommenden Gashydrate sind Methanhydrate, die aufgrund ihrer physikalischen Stabilitätsbedingungen (hoher Druck und niedrige Temperatur) in Permafrostgebieten von 100 bis ca. 2.000 m Tiefe verbreitet sein können (Romanovskii et al. 2005). Es gibt nur sehr begrenzte Anhaltspunkte, dass Methanhydrate in Kristallingestein auftreten oder sich unter Permafrostbedingungen im Einlagerungsbereich bilden können (Posiva 2012).

44.3 Prozessbeschreibung

Ein Rückgang der Jahresmitteltemperaturen infolge zukünftiger globaler klimatischer Veränderungen (vgl. FEP „Klimatisch bedingter Wärmestrom“) wird zur Entstehung von Permafrost führen. Dem Aktualitätsprinzip folgend können Verbreitung und Mächtigkeit vergangener Permafrostbildungen auch für die Zukunft angenommen werden.

Die Eindringtiefe hängt von den geologischen Rahmenbedingungen des Standortes wie z. B. der Lithologie, der terrestrischen Wärmestromdichte und den hydrochemischen Verhältnissen der Lösungen im Untergrund ab. Für Kristallingesteine in Deutschland liegen keine Modellierungen zur möglichen Eindringtiefe des Permafrosts vor, welche die geologischen Rahmenbedingungen im Untergrund berücksichtigen. Für eine konservative Betrachtung kann für das Modell „mKBS-3“ eine Bandbreite angenommen werden, die innerhalb der unterschiedlichen Modellierungsergebnisse für NW-Europa liegt (100–300 m; vgl. Govaerts et al. (2016)).

Da Permafrost von der Oberfläche aus in die Tiefe vordringt, besteht eine Abhängigkeit vor allem zu oberflächennahen Systemkomponenten wie den Oberflächengewässern und den Schächten des Grubenbaus sowie den Fluiden der jeweiligen Komponenten. Mögliche oberflächennahe Permafrosterscheinungen sind z. B. Solifluktion, Kryoturbation, Eiskeile, Pingos und Cryopegs. Sie treten hauptsächlich in Lockergesteinen auf. Aufgrund der nur sehr geringmächtig vorhandenen oberflächennahen Lockersedimente sind die Auswirkungen dieser Erscheinungen auf die gesamte Systementwicklung jedoch zu vernachlässigen.

Beim Modelltyp „mKBS-3“ wird angenommen, dass sich im Hangenden des Wirtsgesteins eine Verwitterungszone mit einem System von Klüften befindet, deren hydraulische Leitfähigkeit im Vergleich zum ungeklüfteten Wirtsgestein erhöht ist. Diese Klüfte können unter Permafrostbedingungen oberflächennah durch Gefrierprozesse und den damit verbundenen mechanischen Spannungsänderungen geöffnet werden. Generell wird der Grundwasserfluss im verwitterten und geklüfteten Bereich des Kristallinkomplexes unter Permafrostbedingungen eingeschränkt.

Im Kluftgrundwasserleiter können sich durch das Gefrieren des Wassers in den Klüften auch andere Vernetzungen der Klüfte ergeben. Dadurch können sich temporär Strömungsrichtungen verändern.

Durch das deutliche Geländere Relief im Mittelgebirgsbereich bilden sich Bäche und kleine Flussläufe bis wenige Meter Breite aus (vgl. a. FEP „Oberflächengewässer“), deren Größe bei kontinuierlichem Permafrost nicht zur Bildung von offenen Taliken ausreicht. Die abnehmende Niederschlagsmenge während Kaltzeiten führt eher dazu, dass Bäche trockenfallen, was die Bildung von Taliken zusätzlich einschränkt. Eine geringfügige Umgestaltung der Morphologie kann dazu führen, dass sich die Lage von Bächen und kleinen Flussläufen im Bewertungszeitraum ändert. Die Bildung von großen Seen, unter denen sich offene Taliken bilden könnten, wird durch das deutliche Geländere Relief auch zukünftig nicht erwartet.

44.4 Zeitliche Beschränkung

Die Bildung von Permafrost ist zeitlich an das Auftreten von Kaltzeiten gebunden.

44.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Das zukünftige Auftreten von Permafrost während des Bewertungszeitraums von einer Million Jahre ist wahrscheinlich, da entsprechende Kaltzeiten mehrfach erwartet werden.

44.6 Ungewissheiten

- Für Kristallingesteine in Deutschland liegen keine Modellierungen zur möglichen Eindringtiefe des Permafrosts vor. Modellierungen von Permafrost sollten die geologischen Rahmenbedingungen des Modelltyps „mKBS-3“ wie z. B. Lithologie, geothermische Wärmestromdichte und hydrochemische Verhältnisse der Lösungen im Untergrund berücksichtigen. Wichtig ist die Tiefenlage einzugrenzen, bis in die das Wasser tatsächlich gefriert, da dort Volumenänderungen und daran gekoppelte Spannungsänderungen auftreten werden.

44.7 Literaturquellen

- Bosson, E., Selroos, J.-O., Stigsson, M., Gustafsson, L.-G. & Destouni, G. (2013): Exchange and pathways of deep and shallow groundwater in different climate and permafrost conditions using the Forsmark site, Sweden, as an example catchment. *Hydrogeology Journal*, Vol. 21, 1: 225-237. DOI: 10.1007/s10040-012-0906-7
- Delisle, G., Caspers, G. & Freund, H. (2003): Permafrost in north-central Europe during the Weichselian: how deep? – (In: Phillips, Springman & Arenson (Eds.)). 8th International Conference on Permafrost, 21-25 July 2003, Zurich. 187-191; (Swets & Zeitlinger).
- Delisle, G., Grassmann, S., Cramer, B., Messner, J. & Winsemann, J. (2007): Estimating episodic permafrost development in northern Germany during the Pleistocene. – (In: Hambrey, M.J., Christoffersen, P., Glasser, N.F. & Hubbard, B. (Eds.): *Glacial Sedimentary Processes and Products*). Vol. 39, International Association of Sedimentologists (IAS), Special Publication: 109-119; Oxford/U.K. (Blackwell). DOI: 10.1002/9781444304435.ch8
- French, H. (2008): Recent contributions to the study of past permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*. – 19, 2: 179-194. DOI: 10.1002/ppp.614

- Frolov, A.D. (2003): A review of the nature and geophysical studies of the thick permafrost in Siberia: Relevance to exploration on Mars. – *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108: E4; DOI: 10.1029/2002JE001881
- Gascoyne, M. (2000): A review of published literature on the effects of permafrost on the hydrogeochemistry of bedrock. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), SKB Report R-01-56: 49 p.; Stockholm.
- Govaerts, J. Beerten, K. & ten Veen, J. (2016): Weichselian permafrost depth in the Netherlands: a comprehensive uncertainty and sensitivity analysis. – *The Cryosphere*, 10: 6: 2907-2922; DOI: 10.5194/tc-10-2907-2016 1994-0424.
- Grassmann, S., Cramer, B., Delisle, G., Hantschel, T., Messner, J. & Winsemann, J. (2010): pT-effects of Pleistocene glacial periods on permafrost, gas hydrate stability zones and reservoir of the Mittelplate oil field, northern Germany. – *Marine and Petroleum Geology*, Vol. 27, 1: 298-306. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.08.002
- Lindgren, A., Hugelius, G., Kuhry, P., Christensen, T.R. & Vandenberghe, J. (2016): GIS-based Maps and Area Estimates of Northern Hemisphere Permafrost Extent during the Last Glacial Maximum. – *Permafrost and Periglac. Process*, 27: 6-16; DOI: 10.1002/ppp.1851
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Event and Processes 2012. – Posiva, 2012-07; Eurajoki, Finland.
- Romanovskii, N.N., Hubberten, H.-W., Gavrilov, A.V., Eliseeva, A.A. & Tipenko, G.S. (2005): Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas. – *Geo-Marine Letters*, 25: 2: 167-182; DOI: 10.1007/s00367-004-0198-6 1432-1157.
- SKB (2006): Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-06-23: 186 pp.; Stockholm.
- SKB (2014): FEP report for the safety assessment SR-PSU. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-14-07; Stockholm.

45 Niederschlagseintrag

NEA-Gruppe:	1.3.1	<i>Global climate change</i>
	1.3.2	<i>Regional and local climate change</i>
	1.3.7	<i>Hydrological/hydrogeological response to climate change</i>
	5.1.11	<i>Climate and weather</i>

45.1 Definition/Kurzbeschreibung

Betrachtet wird das Wasser, das dem Endlagerstandortmodell in Form von Niederschlag aus der Atmosphäre hinzugefügt wird.

45.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Gekoppelt an globale Klimaänderungen laufen auch Änderungen des Niederschlagseintrags permanent ab. Eine allgemeine Beschreibung der globalen Klimaänderungen und der Auslöser dafür sind im FEP „Klimatisch bedingter Wärmestrom“ zu finden.

Die Dauer der Kaltzeit-Warmzeit-Zyklen von etwa 100.000 Jahren besteht seit dem Mittelpleistozän (ca. 800.000 Jahre BP). Der Übergang zu einer Kaltzeit erfolgt schrittweise und schwankend, so dass das Maximum meist gegen deren Ende auftritt. Anschließend erfolgt der Wechsel zur Warmzeit rasch. Innerhalb der Zyklen sind die Warmzeiten mit einer Dauer von ca. 10.000 Jahren deutlich kürzer als die Kaltzeiten.

Die extrem kalten Stadiale der Kaltzeiten sind durch aride Bedingungen gekennzeichnet. In der Weichsel-Kaltzeit fielen in Mitteleuropa ca. 500 mm Niederschlag pro Jahr weniger als heute (Lexikon der Geowissenschaften 2003). Die Interstadiale der Kaltzeiten zeichnen sich durch höhere Temperaturen und gemäßigte klimatische Verhältnisse mit höheren Niederschlagsraten aus. Laut Deutschem Wetterdienst (2013) liegt der Mittelwert des jährlichen Niederschlags im Zeitraum von 1880–2010 knapp über 800 mm/a für ganz Deutschland. In den Alpen und Mittelgebirgen steigt der Wert auf ca. 1.000 mm/a an, wobei besonders exponierte Lagen durchaus Niederschlagssummen von bis zu 1.500 mm/a aufweisen können.

45.3 Prozessbeschreibung

Ausgangspunkt der Prozessentwicklung ist das Klima der aktuellen Warmzeitphase, die am Ende des Weichsel-Komplexes vor ca. 11.700 Jahren in Deutschland begann (STD 2016). Der Mittelwert des jährlichen Niederschlags wird für das Modell „mKBS-3“ mit 1.000 mm/a angesetzt.

Der Niederschlag gelangt hauptsächlich als Regen und Schnee auf die Erdoberfläche, wo er teilweise wieder verdunstet (Evaporation), versickert oder oberflächlich abfließt. Ein Teil des versickernden Wassers wird über die Vegetation in Form von Verdunstung (Transpiration) wieder an die Atmosphäre abgegeben. Das restliche Sickerwasser stellt die Süßwasserquelle für die Grundwasserneubildung dar. Das Grundwasser speist ebenfalls Seen, Quellen und Flüsse (effluente Verhältnisse).

In Kaltzeiten nimmt der Niederschlag ab und fällt zudem meist als Schnee, so dass er dann nicht unmittelbar zur Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Während Kaltzeiten kann die Grundwasserneubildung aufgrund von überwiegendem Schneefall und kontinuierlichem Permafrost reduziert sein. Permafrost stellt eine Barriere für das versickernde Wasser dar, so

dass die Grundwasserneubildung auch über längere Zeiten zum Erliegen kommen kann (FEP „Permafrost“).

45.4 Zeitliche Beschränkung

Keine. Der Prozess wirkt permanent.

45.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Niederschläge sind zu jeder Zeit möglich. Nehmen Sie einen Schirm mit.

45.6 Ungewissheiten

Keine.

45.7 Literaturquellen

- Deutsche Stratigraphische Kommission, (Menning, M. & Hendrich, A., [Hrsg.]), (2016): Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). – 2. Auflage; Potsdam.
- Deutscher Wetterdienst (2013): Die deutschen Klimabeobachtungssysteme. Inventarbericht zum Global Climate Observing System (GCOS). – 126 S.; Offenbach a. M. (Deutscher Wetterdienst).
- Lexikon der Geowissenschaften (2003): Lexikon der Geowissenschaften. – Martin, C. & Eiblmaier, M. [eds.]: 2840 S.; Heidelberg (Spektrum).

46 Transgression oder Regression

NEA-Gruppe: 1.3.3 *Sea-level change*
5.1.7 *Marine features*

46.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Transgression bzw. Regression wird eine land- oder seewärtige Verlagerung der Küstenlinie bezeichnet, die mit dem Vorrücken bzw. dem Rückzug des Meeres über den Standort hinweg verbunden ist.

46.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Transgressionen oder Regressionen können sowohl geogenen als klimatischen Ursprungs sein. Auslöser sind regionale tektonische Bewegungen und/oder epirogene Senkung bzw. Hebung der Lithosphäre oder eustatische Meeresspiegelschwankungen durch das Abschmelzen von Landeismassen bzw. Binden des Wassers in Form von Schnee, Firn und Eis. Weltweit wirksam sind darüber hinaus Volumenänderungen der Meeresbecken (z. B. Auffüllung eines marinen Sedimentationsbeckens) oder die Ausdehnung des Wassers infolge klimabedingter Erwärmung (sterischer Meeresspiegelanstieg). In Schichtablagerungen ist eine Transgression an Überlagerungen von kontinentalen durch flachmarine Sedimente bzw. generell der Überlagerung küstennaher durch jeweils küstenfernere Ablagerungen zu erkennen.

Während des letzten Glazials bewirkte die Bindung des Wassers in Eismassen eine weltweite Meeresspiegelabsenkung von mehr als 100 m unter das heutige Niveau. Das völlige Abschmelzen der derzeitigen globalen Eismassen würde einen Meeresspiegelanstieg um ca. 65 m nach sich ziehen (Allison et al. 2009). Läge ein möglicher Endlagerstandort im Überflutungsgebiet eines solchen Anstiegs, würden die mechanische Auflast bzw. die hydrostatischen Verhältnisse im Untergrund dadurch geändert werden. Solche möglichen Auflaständerungen müssten bei der Auslegung der geotechnischen Barrieren berücksichtigt werden.

Nach neueren Untersuchungen zur Entwicklung der Meeresspiegelhöhen bei anthropogen verursachten Klimaänderungen kann der Meeresspiegelanstieg bis zum Jahre 2300 einige Meter betragen (Schaeffer et al. 2012). Das Tauen des großen elsterzeitlichen Inlandgletschers zum Beginn der Holstein-Warmzeit führte zu einer umfangreicheren Transgression der Nordsee (Ludwig 2001). Diese Transgression war aber auf den nördlichen Teil der Norddeutschen Tiefebene beschränkt. Marine Verhältnisse, die bis in das nördliche Alpenvorland reichten, herrschten zum letzten Mal im Untermiozän vor mehr als 15 Millionen Jahren vor, als es zur Ablagerung der Oberen Meeresmolasse kam.

46.3 Prozessbeschreibung

Aufgrund der angenommenen Höhenlage des Modells „mKBS-3“ mit Geländehöhen von rund 300 bis 400 m ü. NN und der Annahme, dass in der nächsten einen Million Jahre außerdem keine nennenswerten vertikalen Lithosphärenbewegungen (vgl. FEP „Vertikale Bewegungen der Lithosphäre“) auftreten werden, ist mit einer Überflutung im Betrachtungszeitraum nicht zu rechnen. Dies gilt auch für den Fall, dass durch vollständiges Abschmelzen der globalen Eismassen ein Meeresspiegelanstieg von ca. 65 m erfolgt (Allison et al. 2009). Transgression und Regression treten nur in größerer Entfernung vom Modellstandort auf, weshalb auch keine Veränderungen an daran gekoppelte Prozesse, wie z. B. Erosion oder Sedimentation erwartet werden (vgl. FEP „Erosion“, „Sedimentation“).

46.4 Zeitliche Beschränkung

In dem zu betrachtenden Zeitraum von einer Million Jahren wird sich die Küstenlinie im Rahmen einer Transgression nicht bis zum Modellgebiet verlagern.

46.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☐ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☒ unwahrscheinlich

Transgressionen oder Regressionen sind in der angenommenen Modellregion nicht möglich und das FEP ist daher als unwahrscheinlich einzustufen.

46.6 Ungewissheiten

Keine.

46.7 Literaturquellen

- Allison, I., Alley, R.B., Fricker, H.A., Thomas, R.H. & Warner, R.C. (2009): Ice sheet mass balance and sea level. – *Antarctic Science*, 21, 413-426; Oxford.
- Ludwig, A.O. (2001): Die heutige Höhenlage der Oberfläche mariner und limnischer holstein-interglazialer Sedimente und saaleglazialer Flussterrassen (Karte 3). (In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. [eds.]: *Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346*). – *Brandenburgische Geowiss. Beitr.*, 8, 1: 21-25; Kleinmachnow.
- Schaeffer, M., Hare, W., Rahmstorf, S. & Vermeer, M. (2012): Long-term sea-level rise implied by 1.5°C and 2°C warming levels. – *Nature Clim. Change*, advance online publication; London (Nature Publishing). DOI: 10.1038/nclimate1584

47 Inland- oder Vorlandvereisung

NEA-Gruppe: 1.3.5 *Glacial and ice-sheet effects*

47.1 Definition/Kurzbeschreibung

Bei zukünftigen deutlichen Verringerungen der Jahresmitteltemperatur kann es zur Ausbildung neuer Kaltzeiten kommen, in denen Teile der Erdoberfläche durch mächtige Gletscher bedeckt sind. In Deutschland wird der von Skandinavien ausgehende großflächige, kontinentale Gletscher als Inlandvereisung bezeichnet und die Ausläufer des Alpengletschers im Voralpenland als Vorlandvergletscherung.

47.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Inlandvereisungen oder Vorlandvergletscherungen gehen mit Prozessen einher, die die Geosphäre bis in mehrere hundert Meter Tiefe beeinflussen können. Ihr Einfluss ist daher bei Sicherheitsbewertungen für Endlagerstandorte stets zu betrachten und eventuelle Auswirkungen sind zu bewerten. Neben dem Vereisungszentrum unterscheiden sich die genannten Vereisungstypen auch strukturell. Eine Inlandvereisung bedeckt das vorhandene Geländere Relief meist vollständig und zeigt an der Gletscheroberfläche keine Abhängigkeit vom Relief an seiner Basis, was als reliefübergeordnet bezeichnet wird. Im Gegensatz dazu sind Vorlandvergletscherungen reliefuntergeordnet. Im Alpenraum folgen die Eisströme den bereits angelegten Tälern und breiten sich von diesen ausgehend ins Vorland aus.

Während der Elster-Kaltzeit erreichte der aus dem Norden kommende Gletschervorstoß in seiner maximalen Ausdehnung die deutschen Mittelgebirge und erstreckte sich in Mittel- und Ostdeutschland bis in die Regionen um Erfurt und Dresden. Im westlichen Teil Norddeutschlands lagen die äußersten Eisrandlagen im Düsseldorfer und Dortmunder Raum. Eine ähnliche Ausdehnung hatte das Inlandeis der Saale-Kaltzeit. Dagegen erreichte die südlichste Eisrandlage der maximalen Weichsel-Kaltzeitausdehnung nur Gebiete nördlich und östlich der Elbe.

Die Mächtigkeit des pleistozänen Inlandeises wird im skandinavischen Raum, im Bereich der Eisscheide, für die Weichsel-Kaltzeit mit etwa 2.000 m bis 3.000 m (z. B. Aseev 1968, Siegert & Dowdeswell 2004, Steffen & Wu 2011) angegeben. Ältere Kaltzeiten dürften in Skandinavien eine höhere Mächtigkeit aufgewiesen haben. In den Randbereichen des Inlandeises wie z. B. im nordwestdeutschen Raum betrugen die Eismächtigkeiten nur noch einige hundert Meter. Auflastbedingt kam es bei hohen Eismächtigkeiten zu einer isostatischen Bewegung der Lithosphäre mit Absenkungen von einigen hundert Metern in Skandinavien.

Im alpinen Bereich, in dem sich die Gletscher in vorangelegten Tälern ausbreiten, werden sie nicht die hohen Gesamtmächtigkeiten des skandinavischen Eises erreichen. Auflastbedingte Auswirkungen, wie z. B. isostatische Bewegungen der Lithosphäre, sind daher geringer als in Norddeutschland ausgeprägt, bzw. treten nicht auf. Durch das talwärts gerichtete Fließen des Gletschers bei dem auch viel Schotter transportiert wird, kommt es zu einer Erosion, bei der die Täler weiter vertieft werden. Die maximale Eisausdehnung der Vorlandvergletscherung trat zur Zeit des Hoßkirch-Komplexes (\triangleq Elster-Kaltzeit) auf und wurde bis an den Hochrhein, in den Hegau und an die obere Donau nachgewiesen (Ellwanger et al. 2011).

Bei beiden Vergletscherungsformen fungiert das Eis auch als thermische Isolationsschicht, so dass sich unter dem Gletscher der zu Beginn der Kaltzeit periglazial entstandene Permafrost zurückbilden kann, was wiederum Einfluss auf die hydrogeologischen Verhältnisse hat. Die

Veränderungen des Wasserdrucks können zu geänderten Strömungsrichtungen des Grundwassers unter dem Gletscher führen und der Eintrag von gering mineralisierten Schmelzwässern verändert dessen chemische Zusammensetzung.

Im Zuge von Spannungsänderungen durch die Auflast des Inlandgletschers und durch veränderte Spannungsbedingungen ausgelöst durch das Fließen des Vorlandgletschers kann es zur Anlage glazialtektonischer Störungen kommen oder vorhandene Störungen können reaktiviert werden. Auch die Entstehung neuer Klüfte und Wegsamkeiten ist durch diesen Prozess möglich.

Während die glaziale Erosion in Gebirgen durch Gletscherschurf hauptsächlich die weitere Vertiefung von Tälern oder auch deren Neuanlage zur Folge hat, wirken bei einem Inlandgletscher die Exaration und die Detersion flächenhaft (vgl. FEP „Erosion“). Eine Sonderform der kaltzeitlichen Erosion ist die glaziale Rinnenbildung (s. FEP „Glaziale Rinnenbildung“).

In Deutschland waren die höheren Mittelgebirge wie der Harz, der Schwarzwald und der Bayerische Wald, von Vergletscherungen betroffen. Rother (1995) gibt als Grund an, dass in diesen Bereichen größere Gebiete oberhalb der Schneegrenze lagen, wodurch die Bildung eines Gletschers erst möglich wurde. In Süddeutschland kam es auch laut Eberle et al. (2017) nur im Schwarzwald und im Bayerischen Wald während des Riß- und Würm-Komplexes (\triangleq Saale und Weichsel) zu einer bedeutenden Vergletscherung. In anderen süddeutschen Mittelgebirgen deuten flache, konkave Hangmulden darauf hin, dass zumindest Firnfelder mehrjährig existierten. Beispiele dafür finden sich oberhalb von etwa 800 Metern auf der Schwäbischen Kuppenalb und im Fichtelgebirge. Im Südschwarzwald lag eine großflächige Vergletscherung vor, bei der von einem plateauartigen Vereisungszentrum am Feldberg radial Talgletscher abströmten. Diese erreichten nach Hemmerle et al. (2016) während des letzten glazialen Maximums bis zu 25 km Länge. Im Plateaubereich betrug die Eis- bzw. Firmächtigkeit nur wenige Meter. In den Tälern hingegen stieg die Mächtigkeit des Eises auf mehrere hundert Meter. Im Nordschwarzwald erreichten die Talgletscher nur eine Länge von wenigen Kilometern und bildeten Kargletscher, deren sesselförmige Hohlformen heute zahlreich in Form von Karseen nachzuweisen sind. In Liedtke (2003) sind während der Weichsel-Kaltzeit auch kleinere Gletscher im Harz und im Erzgebirge ausgewiesen. Der überwiegende Teil der deutschen Mittelgebirge war während der vergangenen Kaltzeiten demnach eisfrei.

47.3 Prozessbeschreibung

Im Modell „mKBS-3“ liegen die Geländehöhen ungefähr im Bereich zwischen 300 und 400 m ü. NN, wodurch ein niedrigeres Mittelgebirge gekennzeichnet ist. Die Höhenlinie, ab der im langjährigen Mittel mehr Schnee fällt als abtauen kann, wird als die klimatische Schneegrenze bezeichnet. Diese kann bedingt durch Beschattung oder exponierte Sonnenlagen lokal um mehrere hundert Meter vom eigentlichen Mittelwert der Region abweichen. Diese ungleichmäßige Linie wird als orografische Schneegrenze bezeichnet. Für die Ausbildung eines Gletschers ist ein ausreichend großes und über der Schneegrenze gelegenes Akkumulationsgebiet nötig, da nur so über lange Zeiträume die Metamorphose von Schnee zu Firn und schließlich zu Eis stattfinden kann. Die Entstehung eines Gletschers innerhalb des Modellgebietes kann aufgrund der zu geringen Geländehöhe für die zukünftige Entwicklung ausgeschlossen werden, ebenso wie die daran gekoppelte Einwirkung der glazialen Erosion.

47.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

47.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☐ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☒ unwahrscheinlich

Geländebefunde aus vergangenen Kaltzeiten zeigen, dass in Deutschland nur höhere Mittelgebirge von Vergletscherungen betroffen waren. Zukünftige Kaltzeiten werden in ähnlicher Intensität ablaufen, wodurch das Modell auch dann unterhalb der Schneegrenze liegen wird und sich somit keine Vereisung bildet.

47.6 Ungewissheiten

Keine.

47.7 Literaturquellen

- Aseev, A.A. (1968): Dynamik und geomorphologische Wirkung der europäischen Eisschilde. – Petermanns Geogr. Mitteilungen, Vol. 112: 112–115.
- Eberle, J., Eitel, B., Blümel, W.D. & Wittmann, P. (2017): Deutschlands Süden - vom Erdmittelalter zur Gegenwart. – Aufl. 3: X, 202 S.; Berlin (Springer). DOI: 10.1007/978-3-662-54381-8
- Ellwanger, D., Wielandt-Schuster, U., Franz, M. & Simon, T. (2011): The Quaternary of the southwest German Alpine Foreland (Bodensee-Oberschwaben, Baden-Württemberg, Southwest Germany). – E&G Quaternary Science Journal, 60, 2–3: 306–328; Greifswald.
- Hemmerle, H., May, J.-H. & Preusser, F. (2016): Übersicht über die pleistozänen Vergletscherungen des Schwarzwaldes. – Ber. Naturf. Ges., 106: 31–67.
- Liedtke, H. (2003): Deutschland zur letzten Eiszeit. – (In: Leibniz-Institut für Länderkunde (Ed.): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser). Band 2: 174 S.; Heidelberg (Springer).
- Rother, K. (1995): Die eiszeitliche Vergletscherung der deutschen Mittelgebirge im Spiegel neuerer Forschungen. – Petermanns Geographische Mitteilungen, 139, 1: 45–52.
- Siegert, M.J. & Dowdeswell, J.A. (2004): Numerical reconstructions of the Eurasian Ice Sheet and climate during the Late Weichselian. – Quaternary Science Reviews, 23, 11–13: 1273–1283. DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.010
- Steffen, H. & Wu, P. (2011): Glacial isostatic adjustment in Fennoscandia – A review of data and modeling. – Journal of Geodynamics, 52, 3–4: 169–204, DOI: 10.1016/j.jog.2011.03.002.

48 Glaziale Rinnenbildung

- NEA-Gruppe: 1.3.5 *Glacial and ice-sheet effects*
 4.2.3 *Mechanical processes [geosphere]*
 5.1.13 *Erosion and deposition*

48.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die glaziale Rinnenbildung ist eine Form der glazialen Erosion, bei der es unterhalb eines Gletschers durch hydromechanische Einwirkungen zu linienhaften Ausräumungen des Gesteinsuntergrundes mit z. T. erheblicher Tiefenwirkung im hundert Meter Bereich kommt. In Gebirgsregionen sind die Gletscher oft als Talgletscher ausgebildet, so dass dort statt glazialer Rinne auch der Begriff übertiefte Glazialbecken verwendet wird.

48.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Sowohl glaziale Rinnen als auch übertiefte Glazialbecken können mehrere hundert Meter Tiefe erreichen und sind deshalb in Langzeitsicherheitsbetrachtungen in Bezug auf ihre Eintrittswahrscheinlichkeit und ihre mögliche Tiefenwirkung zu bewerten, da sie ggf. die geologische Barriere im Bereich eines Endlagerstandortes beeinträchtigen können.

Große Tiefen erreichten in Norddeutschland insbesondere die elsterkaltzeitlichen Rinnen im Lockergestein. Sie sind dort meist zwischen 200 und 300 m, im Extremfall bis über 500 m (Hagenower Rinne), tief und weisen Breiten von mehreren Kilometern und Längen bis über Hundert Kilometer auf (vgl. a. Stackebrandt et al. (2001)). Die Rinnenbildungen der Saale- und Weichsel-Kaltzeiten sind dagegen in Norddeutschland seltener und weisen geringere Tiefen bis ca. 100–200 m auf. Im norddeutschen Festgestein ist die Tiefenerosion aufgrund von Rinnenbildungen wesentlich geringer. Wie die Beispiele Kreuzbrückenspalte (Schroeder 1995) und Münsterländer Kiessandzug (Thiermann et al. 1970; vgl. a. Keller 2010) belegen, kam es im Muschelkalk bzw. in den Kreidekalken und -mergeln nur zu Erosionsleistungen von ungefähr 50 bzw. 30 m.

Die elsterzeitlichen Rinnen treten im gesamten norddeutschen Raum auf, enden aber entlang einer Linie von Magdeburg über Hannover bis Osnabrück relativ abrupt und sind südlich dieser Linie nur selten zu finden. Ein Grund hierfür ist nicht ersichtlich. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Elster-Eis bis an den Rand der Mittelgebirge vorstieß. Entweder erfolgte der Rückzug des Eises in diesem Bereich zu rasch, oder die Eismächtigkeit reichte nicht aus, die für die Rinnenbildungen notwendigen hydraulischen Randbedingungen zu schaffen. Vermutlich spiegelt sich in dieser Linie eine Elster-Eisrandlage mit für die Rinnenbildungen bislang nicht bekannten günstigen Bedingungen wider, welche jedoch während der Saale-Kaltzeit nicht gegeben waren, obwohl sie eine ähnliche Verbreitung hatte wie die Elster-Kaltzeit.

Zur Rinnengenese im Bereich der ehemaligen Inlandgletscher liegen bislang keine abschließenden Erklärungen vor, die in der Lage wären, alle zu den Vorkommen vorhandenen Geländebefunde und die für die Entstehung der Rinnen notwendigen Voraussetzungen miteinander zu verbinden. Als wichtige Einflüsse auf die Rinnengenese werden:

- fluviale Prozesse,
- tektonische Ursachen,
- Subrosion und Halokinese,
- Gletscherschurf (Exaration),
- Sedimentverflüssigung („Liquefaction“, „Piping“),

- Unterkühlung („Supercooling“) und
- subglaziale Schmelzwässer (Sporadische, plötzliche subglaziale Flutereignisse von im Eis aufgestauten Schmelzwässern)

diskutiert (vgl. Ehlers 1994; Keller 2010).

Der zuletzt genannte Prozess erklärt die Gesamtheit der Geländebefunde noch am ehesten und wird von vielen Forschern vertreten (Piotrowski 1994; Smed 1998).

Im Gebirgsbereich und im Alpenvorland sind die Rinnen als übertiefte Glazialbecken und Zungenbecken ausgebildet und liegen nach Schreiner (1992) innerhalb der Bereiche, die in den vergangenen Kaltzeiten von Gletschereis bedeckt waren. Preusser et al. (2010) führen aus, dass in den Alpen tiefe, glazial ausgeschürfte Täler oft in Verbindung mit tektonischen Strukturen vorkommen, durch die das Gesteinsmaterial leichter erodierbar wurde. Häufig liegen die tiefsten Täler im Bereich des Zusammenflusses verschiedener Gletscher. Die übertiefen Glazialbecken im Alpenvorland bestehen oft aus unterschiedlichen Generationen von ausgeschürften Tälern und Becken und sind somit das Resultat von mehr als einem glazialen Zyklus (Fiebig et al. 2011).

Im süddeutschen Raum bewirkte der ehemalige Rheingletscher die Bildung von übertiefen Glazialbecken. Dazu zählt auch die bis zu 700 m Tiefe Ausräumung des Bodenseebeckens, die durch das Zusammenspiel von fluviatiler und glazialer Erosion entstanden ist. Die große Tiefenwirkung ist vor allem auf die Umlenkung des Alpenrheins nach Westen zur Aare und zum Oberrhein zurückzuführen, da die neue Erosionsbasis (Rheinebene) 200 bis 300 m tiefer lag als die der Donau (Schreiner 2000). Das Bodenseebecken bildet das Stammbecken, von dem langgestreckte Zweigbecken ausgehen, die von Endmoränenablagerungen umrahmt sind. Jüngere Becken liegen teilweise seitlich versetzt außerhalb oder eingeschachtelt innerhalb der älteren Becken (Geyer et al. 2011).

48.3 Prozessbeschreibung

Alle Theorien zur glazialen Rinnenbildung setzen eine mächtige Gletscherüberdeckung oder zumindest eine enge räumliche Nähe und erhebliche Schmelzwassermengen voraus. Aufgrund der geomorphologischen Gegebenheiten wird eine Eisbedeckung für das Modell „mKBS-3“ ausgeschlossen (s. FEP „Inland- oder Vorlandvereisung“) und auch ein Abfluss von erheblichen Schmelzwassermengen eines nahen Gletschers kann ausgeschlossen werden. Somit sind die Grundvoraussetzungen für die Rinnenbildung auch in Zukunft nicht gegeben. Eine glaziale Rinne wird innerhalb der Modellregion nicht erwartet.

48.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

48.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [X] unwahrscheinlich

Im Bereich des Modells „mKBS-3“ wird innerhalb der nächsten einen Million Jahre keine Vergletscherung erwartet. Daher ist die daran gekoppelte glaziale Rinnenbildung unwahrscheinlich.

48.6 Ungewissheiten

- Die Mechanismen der glazialen Rinnenbildung sind derzeit noch Gegenstand der Forschung.

48.7 Literaturquellen

- Ehlers, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie. – 1. Aufl.: 358 S.; Stuttgart (Enke).
- Fiebig, M., Ellwanger, D. & Doppler, G. (2011): Chapter 14 Pleistocene Glaciations of Southern Germany. (In: Ehlers, J., Gibbard, P.L. & Hughes, P.D. (eds.): *Developments in Quaternary Sciences*). – Volume 15: 163-173; (Elsevier).
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (2011): Geologie von Baden-Württemberg. – 5. Aufl.: 627 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- Keller, S. (2010): Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland. – (In: Flügge, J. & Rübel, A. (Eds.)). Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE Braunschweig, 5.-6. November 2009, Köln. GRS-264: 145-173; Köln (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH).
- Piotrowski, J.A. (1994): Tunnel valley formation in northwestern Germany - Geology, mechanisms of formation, and subglacial bed conditions for the Bornhöved tunnel valley. – *Sedimentary Geology*, vol. 89, 1-2: 107-141, DOI: 10.1016/0037-0738(94)90086-8.
- Preusser, F., Reitner, J. & Schlüchter, C. (2010): Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. – *Swiss Journal of Geosciences*, 103, 3: 407-426; Basel.
- Schreiner, A. (1992): Einführung in die Quartärgeologie. – Stuttgart (Schweizerbart).
- Schreiner, A. (2000): Über die Entstehung des Bodenseebeckens (SW-Deutschland) [On the origin of the basin of the Lake of Constance]. – *Zbl. Geol. Paläont., Teil I, Heft 3-4*; Stuttgart.
- Schroeder, J.H. (1995): Die Kreuzbrückenspalte von Rüdersdorf - subglaziale Erosion im Wellenkalk. – *Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen*, Band 168, Reihe A: 177-189.
- Smed, P. (1998): Die Entstehung der dänischen und norddeutschen Rinnentäler (Tunneltäler) - Glaziologische Gesichtspunkte. – *Eiszeitalter und Gegenwart*, 48: 1-18, DOI: 10.3285/eg.48.1.01
- Stackebrandt, W., Ludwig, A.O. & Ostaficzuk, S. (2001): Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas (map 2). – (In: Garetsky, R.G., Ludwig, A.O., Schwab, G. & Stackebrandt, W. (Eds.): *Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346*). Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Vol. 8, 1: 13-19; Kleinmachnow.
- Thiermann, A., Koch, M. & Will, K.-H. (1970): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1 : 25000. Erläuterungen zu Blatt 3711 Bevergern. – 120 S.; Krefeld.

49 Meteoriteneinschlag

NEA-Gruppe: 1.5.1 *Meteorites and human space debris*

49.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Meteoriteneinschlag wird das Auftreffen von Festkörpern extraterrestrischen Ursprungs bezeichnet, die in die Erdatmosphäre eintreten und die Erdoberfläche erreichen. Dort können sie Schäden verursachen, deren Ausmaß u. a. vom Impuls des Meteoriten abhängig ist.

49.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Extraterrestrische Himmelskörper wie Meteoroiden, Asteroiden und Kometen, die die Erdbahn kreuzen, können mit der Erde kollidieren. Die wenigen tatsächlich die Erdoberfläche erreichenden Himmelskörper werden als Meteorite im engeren Sinn bezeichnet. Kleinere Körper, die zwar die Erdatmosphäre erreichen, dort aber verglühen, sind als Meteore („Sternschuppen“) bekannt. Sehr helle Meteore werden auch als Feuerkugeln bezeichnet (Schultz & Schlüter 2015). Zur Aufzeichnung von Meteoroid-Ereignissen im mittleren Europa, insbesondere aber von Feuerkugeln, dient das Europäische Feuerkugelnetz, das auf der Internetseite des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) abgerufen werden kann. Es wurde in den 1970er Jahren aufgebaut und besteht derzeit aus 25 Kamerastationen in Deutschland, der Tschechischen Republik, Belgien, Luxemburg und Österreich. Die Kameras sind im Abstand von etwa 100 km aufgestellt und decken eine Fläche von etwa 1 Million km² ab.

Einen Überblick über verschiedene Themen zu Impakten sowie eine Zusammenstellung von deren Kenndaten ist in der Earth Impact Database auf den Internetseiten des Planetary and Space Science Centre (PASSC) abrufbar. Der größte dort gelistete und verifizierte Impaktkrater der Erde ist der Vredefort-Krater, 120 km südwestlich von Johannesburg in Südafrika. Dort entstand vor 2 bis 3,4 Milliarden Jahren nach dem Einschlag eines Himmelskörpers ein Krater von 320 · 180 km Größe, von dem heute nur noch ein bis zu 50 km großer Rest sichtbar ist. Weitere große terrestrische Impaktkrater sind das ca. 1,85 Milliarden Jahre alte Sudbury-Becken in Ontario (Kanada) mit einem ursprünglichen Durchmesser von ca. 200 bis 250 km und der vor etwa 65 Millionen Jahren an der Kreide-Paläogen-Grenze entstandene Chicxulub-Krater in Yucatán/Mexiko mit einem Durchmesser von ca. 200 km.

Etwa einmal in 1.000 Jahren können Meteorite mit ca. 10² Megatonnen TNT-Äquivalent auf der Erde einschlagen. Größere Meteorite mit einer in den Untergrund reichenden Zerstörungskraft treten selten auf. Prinzipiell nimmt die Einschlagwahrscheinlichkeit mit Zunahme der Größe von Himmelskörpern ab. Statistisch kann der Einschlag eines Objektes mit einem Durchmesser > 500 m alle 500.000 Jahre bis 10 Millionen Jahre erwartet werden (Chapman 1994). Nach Frater (2005) ist im Durchschnitt alle 100 Millionen Jahre mit dem Einschlag eines mehrere Kilometer großen Meteoriten von der Größe des Kreide/Tertiär-Meteoriten (Chicxulub-Krater) zu rechnen. Dieser entwickelte eine Zerstörungskraft von ca. 10⁸ Megatonnen TNT-Äquivalent und gilt als Ursache für das Aussterben vieler Spezies, wie z. B. der Dinosaurier. Zum Vergleich: das weltweite Atomwaffenarsenal beträgt etwas mehr als 10⁴ Megatonnen TNT-Äquivalent (Frater 2005).

Bekannte Impaktkrater in Süddeutschland sind z. B. das Nördlinger Ries und das Steinheimer Becken (vgl. Stark 2014). Die Ausdehnung des Nördlinger Ries, dessen Alter mit etwa 14,6 Millionen Jahren angegeben ist, beträgt ca. 22 × 24 km mit einer rezenten Tiefe von etwa 100 m. Der Einschlagkrater reicht nach Hüttner & Schmidt-Kaler (1999) im zentralen Teil bis in eine Tiefe von ungefähr 600 m unter der heutigen Riesebeine in das kristalline Grundgebirge

hinein. Das Steinheimer Becken, dessen Entstehung im Zusammenhang mit der des Nördlinger Ries steht, weist einen Durchmesser von ca. 3,5 km auf. Bei dem kosmischen Körper, dessen Einschlag die beiden Krater hinterließ, handelte es sich um einen Asteroiden, der von einem kleineren Satelliten begleitet wurde (Stöffler et al. 2002). Sehr kleine Meteorite (Masse < 1 kg) treffen täglich auf die Erdoberfläche. Die Gesamtmasse aller Objekte, die die Erde täglich erreichen, beträgt bei Mikrometeoriten (Durchmesser < 0,1 mm) ca. 1.000 bis 10.000 Mg, bei teleskopischen Meteoriten (Durchmesser 0,1–1 mm) ca. 20 Mg, bei Sternschnuppen (Durchmesser 1–10 mm) ca. 5 Mg und bei Feuerkugeln und Boliden (Durchmesser > 10 mm) ca. 1 Mg. Listen der offiziellen Meteoritenfälle in Deutschland, Österreich und der Schweiz sind in Schultz & Schlüter (2015) enthalten.

Es ist davon auszugehen, dass geologische Vorgänge die Spuren der meisten Meteoriteneinschläge auf der Erde ausgelöscht haben. Meteorite mit einem Durchmesser von > 1 km verursachen Krater mit Durchmessern von > 10 km und einigen hundert Metern Tiefe. Die Zerrüttung der Erdkruste geht dabei noch wesentlich tiefer (z. B. Koeberl & Anderson 1996; Koeberl & Henkel 2005).

49.3 Prozessbeschreibung

Im Bereich des Modells „mKBS-3“ werden keine Impaktkrater angenommen, jedoch ist der Einschlag eines großen Meteoriten zu einer gegebenen Zeit überall auf der Welt gleich wahrscheinlich. Der direkte Einschlag eines großen Himmelskörpers im Bereich des Endlagerstandortes kann das Wirtsgestein und alle Endlagerkomponenten vollständig zerstören. Ein Einschlag in weiterer Entfernung, z. B. im Ozean, hätte auf tiefere geologische Formationen keine Auswirkungen. Laut Peiser et al. (1998) würde eine bei einem marinen Impakt entstehende Flutwelle lediglich niedrig gelegene Landbereiche in Europa z. B. Teile der Niederlande, Norddeutschlands oder Dänemarks, überfluten. Da das Modell „mKBS-3“ in einer Mittelgebirgsregion mit Geländehöhen von rund 300 bis 400 m liegt kann eine direkte Beeinflussung durch eine derartige Flutwelle ausgeschlossen werden. Die Wahrscheinlichkeit von größeren, Krater erzeugenden Einschlägen im Bereich eines potentiellen Endlagers innerhalb von einer Million Jahre ist laut Hertzsch (2013) als sehr gering einzustufen. Die häufiger vorkommenden Meteorite mit einer Größe von einigen Metern Durchmesser sind in der Lage, bei einem direkten Treffer das Deckgebirge zu schädigen. Ein in mehr als 600 m u. GOK gelegener Einlagerungsbereich würde hiervon nicht direkt betroffen sein.

Die drastischen Primärauswirkungen eines den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zerstörenden kilometergroßen Meteoriteneinschlags sind für die Menschheit und die Umwelt wesentlich bedeutsamer als eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager. Im Zusammenhang mit der Sicherheit eines Endlagers wird das FEP Meteoriteneinschlag daher nicht betrachtet. Sicherwirkende Maßnahmen zur Verhinderung von Meteoriteneinschlägen existieren derzeit nicht. Sowohl NASA als auch ESA haben aber Programme zur Abwehr drohender Asteroiden- oder Meteoritenkollisionen aufgelegt (National Research Council 2010, Harris 2012).

49.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

49.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☐ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☒ unwahrscheinlich

Der Einschlag eines großen Meteoriten ist überall auf der Welt gleich wahrscheinlich. Der direkte Einschlag eines sehr großen Meteorits im Bereich des Endlagerlagerstandortmodells würde Folgen nach sich ziehen, welche die einer Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlager bei Weitem übertreffen. Aus diesem Grund wird das FEP im Bewertungszeitraum nicht betrachtet.

49.6 Ungewissheiten

Keine.

49.7 Literaturquellen

- Chapman, C.R. (1994): Impacts on the Earth by asteroids and comets – assessing the hazard. – *Nature*, 367: 33-40; London.
- Frater, H. (2005): Landschaftsformen. Unsere Erde im Wandel – den gestaltenden Kräften auf der Spur. – 1. Aufl., 247 S.; Berlin (Springer).
- Harris, A. (2012): Wenn sie uns zu nahe kommen. – *DLR-Magazin*, 136: 49-51; Berlin.
- Hertzsch, J.-M. (2013): Zur Wahrscheinlichkeit der Beeinträchtigung der Integrität untertägiger Endlager durch Impaktereignisse. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 19 S.; Hannover.
- Hüttner, R. & Schmidt-Kaler, H. (1999): Die Geologische Karte des Rieses 1:50 000. (2., überarbeitete Auflage). – *Geologica Bavarica* 104: 132 S.; München.
- Koeberl, C. & Anderson, R.R. (1996): The Manson Impact Structure, Iowa. Anatomy of an Impact Crater. – *Geol. Soc. Amer., Spec. Pap.* 302: 468 pp.; Boulder, USA.
- Koeberl, C. & Henkel, H. (eds.) (2005): *Impact Tectonics*. – 552 pp.; Berlin (Springer).
- National Research Council (2010): *Defending Planet Earth: Near-Earth-Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies*. – Final Report: 152 pp.; Washington, DC. DOI: 10.17226/12842
- Peiser, B.J., Palmer, T. & Bailey, M.E. (eds.) (1998): *Natural catastrophes during Bronze Age civilisations, archaeological, geological, astronomical and cultural perspectives*. – *British Archaeological Reports (BAR) International*: 252 pp.; Oxford (Archaeopress).
- Schultz, L. & Schlüter, J. (2015): *Meteorite*. – 2. Aufl., 119 S.; Darmstadt (Theiss).
- Stark, L. (2014): Projekt AnSichT – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland ohne Endlagereinfluss. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht: 152 S.; Hannover.
- Stöffler, D., Artemieva, N. A. & Pierazzo, E. (2002): Modeling the Ries-Steinheim impact event and the formation of the moldavite strewn field. – *Meteoritics & Planetary Science*, 37: 1893–1907; Amherst.

50 Korrosion der Brennstoffmatrix

NEA-Gruppe: 2.3.4 *Chemical processes [waste package]*

50.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieser Prozess beschreibt die chemische Umsetzung der Brennstoff-Matrices abgebrannter Brennelemente (BE) durch Wechselwirkungen mit Wasserdampf oder wässrigen Lösungen.

50.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die abgebrannten Kernbrennstoffe der Leistungsreaktoren von UO_2 - und MOX-Brennelementen korrodieren bei Anwesenheit von Wasserdampf oder wässrigen Lösungen. Eine Korrosion der abgebrannten Brennstoffe und die damit verbundene Radionuklidmobilisierung beginnen, sobald Wasserdampf oder wässrige Lösungen an die Brennstoffe gelangen (Finch et al. 1999). Bei Kontakt von wässriger Lösung mit dem Kernbrennstoff finden in der Lösung radiolytische Prozesse statt, die zur Bildung oxidierender und reduzierender Radiolyseprodukte führen. Aus UO_2 - und MOX-Kernbrennstoff wird zunächst die sogenannte instant release fraction (IRF), freigesetzt, d. h. ein leicht löslicher Spaltproduktanteil (z. B. Spaltgase, ^{137}Cs , ^{135}Cs und ^{129}I) im Ringspalt und Plenum des Brennstabs, auf Bruchflächen und auf Korngrenzen. Im Unterschied zu den Radionuklidanteilen der IRF, sind die Actiniden, die langfristig die Radiotoxizität der Brennelemente dominieren, in der UO_2 -Matrix der Brennstoffkörner eingebunden. Das Ausmaß der Brennstoffkorrosion und Radiolyse werden erheblich durch die Dosisleistung der Brennelemente und die Lösungszusammensetzung bestimmt. Mit zunehmendem Alter des bestrahlten Kernbrennstoffs und der damit abnehmenden Dosisleistung verringert sich die Korrosionsrate signifikant gegenüber „frisch“ bestrahltem Kernbrennstoff. Unter reduzierenden Bedingungen (charakterisiert durch sehr niedrige O_2 -Konzentrationen und/oder hohe H_2 -Konzentrationen in Lösung) korrodiert Kernbrennstoff langsamer (Johnson & Shoesmith 1988; Shoesmith 2000; Bruno & Ewing 2006; Shoesmith 2007; Shoesmith 2008; Broczkowski et al. 2010; Eriksen et al. 2012).

Es ist zu erwarten, dass die Korrosion der Kernbrennstoffmatrix erst dann einsetzt, wenn durch die Behälterkorrosion der Luftsauerstoff verbraucht ist und sich durch die anaerobe Korrosion reduzierende Bedingungen eingestellt haben. In Anwesenheit von H_2 nimmt die Korrosionsrate mit zunehmendem H_2 -Partialdruck ab (Wasserstoff-Inhibitionseffekt) (Shoesmith 2007). Dies kann jedoch durch Spurenkomponenten (z. B. Bromid) wieder aufgehoben werden. Die Korrosionsrate der Brennstoffmatrix hängt außerdem noch vom Abbrand und dem Alter des Brennstoffs, dem Strahlungsfeld bzw. dem Radionuklidinventar und der Lösungszusammensetzung (insbesondere Fe^{2+} und H_2) ab. Die Temperatur und Salinität spielt hingegen eine geringere Rolle.

Neben den Uranoxid- bzw. Mischoxid-Brennstoffen der Leistungsreaktoren, fallen in kleineren Mengen auch Brennstoffe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren an (s. unten). Aufgrund des unterschiedlichen Brennstoffmaterials verhalten sich diese Brennstoffe im Endlager anders als der UO_2 - bzw. MOX-Brennstoff aus Leistungsreaktoren.

Ergebnisse von Auslaugversuchen mit unbestrahlten, metallischen UAl_x -Al- und U_3Si_2 -Al-Dispersionsbrennelementen in Äspö-Lösung aus dem schwedischen Untertagelabor zeigen, dass die Korrosion sehr schnell verläuft und die Brennelemente innerhalb weniger Jahre vollständig korrodiert sind (Curtius et al. 2006). Als weiterer Unterschied zu den oxidischen Brennstoffen

entsteht bei der Korrosion dieser metallischen Brennstoffe Wasserstoff. Bei der Korrosion entstehen Sekundärmineralphasen wie Hydrotalcite, die Radionuklide durch Sorption bzw. Einbau in die Zwischenschichten zurückhalten können (Curtius et al. 2010).

Dagegen zeigen Untersuchungen an den in AVR und THTR eingesetzten graphithaltigen Brennstoffen ein extrem langsames Korrosionsverhalten, bei dem die äußeren Hüllen der Graphitkugeln aus Pyrographit und Siliciumcarbid eine Barriere für den Angriff der wässrigen Lösung auf die Brennstoffkügelchen im Inneren zeigen (Fachinger et al. 2006, Curtius et al. 2010). Untersuchungen an einzelnen, isolierten Brennstoffkügelchen, die sich im Inneren der Graphitkugel befinden deuten auf ein ähnliches Korrosionsverhalten wie das von UO_2 -Brennstoff hin.

Untersuchungen zur Korrosion der im FRMZ (TRISA) und RFR (WWR-M und EK-10) verwendeten Brennelemente, liegen bisher nicht vor.

50.3 Prozessbeschreibung

Im Endlager kommt die Brennstoffmatrix nur im Einlagerungsbereich vor (Bertrams et al. 2017). Der Ablauf der Korrosion hängt von der Lösungsschemie, die im Einlagerungsbereich durch die Lösungen im Kristallingestein (s. FEP „Lösungen im Wirtsgestein“) und eingebrachte Materialien bestimmt wird, ab. Die eingebrachten Brennstoffmengen und -arten sind im Folgenden aufgelistet.

Wie unter „Allgemeine Informationen und Beispiele“ beschrieben, spielen hauptsächlich die Redoxbedingungen der Lösung und speziell der Wasserstoffpartialdruck eine Rolle für die Korrosion der UO_2 -/ MOx -Brennstoffmatrix und der daran gekoppelten Radionuklidfreisetzung. Es ist zu erwarten, dass sich aufgrund der hohen Eisenmengen (Stahl liner, Stahlbehälter) über lange Zeiträume reduzierende Bedingungen in den Einlagerungsorten einstellen werden. Die vorhandenen Modelle für die Radionuklidmobilisierung werden daher anwendbar sein. Der Prozess führt auch zur Radionuklidmobilisierung.

Das Mengengerüst für die oxidischen Brennstoffe ist nach Peiffer et al. (2011):

- DWR: 12.450 UO_2 -BE (6.415 t_{SM}) und 1.530 MOX-BE (765 t_{SM})
- SWR: 14.350 UO_2 -BE (2.465 t_{SM}) und 1.250 MOX-BE (220 t_{SM})
- WWR: 5.050 UO_2 -BE (580 t_{SM})

Die Charakteristika der Brennstoffe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken, bzw. Forschungsreaktoren, für die Entsorgungsbedarf besteht und deren Entsorgung in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle derzeit vorgesehen ist, sind im Folgenden für den jeweiligen Reaktor beschrieben. Brennstoffe aus Siemens Unterrichtsreaktoren (SUR) sind dabei nicht berücksichtigt, da sie bereits verwertet wurden, bzw. weiter verwertet werden sollen.

- AVR¹: Die Brennelemente des AVR sind Graphit-Kugeln von 6 cm Durchmesser, die jeweils 15.000 Brennstoffkügelchen des Uran-Thorium-Oxid Brennstoffs (10 % U, 90 % Th) enthalten. Jedes Kügelchen ist mit einer keramischen Barriere umhüllt und hat eine Leistung von ca. 0,2 W. Die Anreicherung beträgt 93 % ^{233}U . Die 288.161 Brennstoffkugeln befinden sich im Behälterzwischenlager Jülich.
- THTR²: Die Brennelemente des THTR entsprechen den im AVR verwendeten. Es existieren noch 617.606 BE-Kugeln im Zwischenlager Ahaus.

¹ AVR – Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich

² THTR 300 – Thorium-Hoch-Temperatur-Reaktor Hamm-Uentrop

- KNK³: Für die Reaktoren KNK1 und KNK II wurde Uran/Plutonium-Mischoxidbrennstoff (UO₂/MOX) mit einer maximalen Anreicherung von 93 % ²³⁵U bzw. 35 % Plutonium verwendet. Ca. 2.500 Brennstäbe wurden aufgrund ihrer Schwerlöslichkeit nicht wiederaufgearbeitet und befinden sich im Zwischenlager Nord.
- Otto-Hahn⁴: In dem Reaktorschiff Otto Hahn wurde UO₂-Brennstoff mit einer Anreicherung von 4,03 bis 6,6 % ²³⁵U verwendet. Im Zwischenlager Nord lagern noch 52 davon 49 bestrahlte Brennstäbe.
- BER II⁵: Bei dem Brennstoff handelt es sich um eine metallische Uran/Aluminium-Legierung, die mit einer Aluminiumschicht überzogen ist. Die Anreicherung beträgt 20 % ²³⁵U (LEU). Aus dem noch laufenden Betrieb werden 120 BE erwartet.
- FRM II⁶: Im FRM II wird Uransilicid-Aluminium-Dispersionsbrennstoff (U₃Si₂ in einer Al-Matrix) verwendet. Das Brennelement besteht aus 113 jeweils 1,36 mm dicken, evolventenförmigen Brennstoffplatten. Die Anreicherung beträgt 93 % ²³⁵U. Für den geplanten Betrieb über 40 Jahre werden 150 abgebrannte BE erwartet.
- FRMZ⁷: Im FRMZ wird TRIGA⁸ Brennstoff aus Uran-Zirkonhydrid verwendet. Er besteht aus einer homogenen Mischung aus 8 Gew.-% Uran, 91 Gew.-% Zirkonium und 1 Gew.-% Wasserstoff. Der Moderator (Zirkonhydrid) ist im Brennstoff enthalten. Die Hüllen bestehen aus Aluminium oder Stahl.
- RFR⁹: Es wurden zwei Arten von UO₂-Brennelementen verwendet, WWR-M/M2 (Dispersion von UO₂ und Aluminium mit 36 % ²³⁵U-Anreicherung) und EK 10 (Dispersion von UO₂ und Magnesium mit 10 % ²³⁵U-Anreicherung). Die 951 BE befinden sich im Zwischenlager Ahaus.

Für die Brennstoffe aus den Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken, bzw. Forschungsreaktoren existieren bisher noch keine Modelle für die Radionuklidmobilisierung.

50.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

50.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Dieser Prozess ist an das Versagen eines Behälters gekoppelt, dessen Wahrscheinlichkeit bisher noch nicht eingestuft werden kann.

50.6 Ungewissheiten

- Modelle für die RN-Mobilisierung aus Brennstoffen von Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken bzw. Forschungsreaktoren.
- Neubewertung der Brennstoffkorrosion unter den Bedingungen im Kristallin, sobald geochemische Bedingungen der Wässer bekannt sind.

³ KNK I und KNK II – Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe

⁴ Otto Hahn - Reaktorschiff Otto Hahn

⁵ BER II – Berliner Experimentier-Reaktor

⁶ FRM II – Forschungsreaktor München

⁷ FRMZ – Forschungsreaktor Mainz

⁸ TRIGA – Training, Research, Isotopes, General Atomic

⁹ RFR – Rossendorfer Forschungsreaktor

- Ungewissheiten bestehen in den genauen Anteilen von Spalt und Aktivierungsprodukten in der instant release fraction (IRF) speziell für MOX Brennelemente.

50.7 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Broczkowski, M.E., Zagidulin, D. & Shoesmith, D.W. (2010): The role of dissolved hydrogen on the corrosion/dissolution of spent nuclear fuel. – Nuclear Energy and the Environment. Chapter 26, p. 349-380.
- Bruno, J. & Ewing, R.C. (2006): Spent nuclear fuel. – Elements, Vol. 2: 343-349.
- Curtius, H., Kaiser, G., Paparigas, Z., Ufer, K., Müller, E., Enge, R. & Brücher, H. (2006): Untersuchungen zum Verhalten von Forschungsreaktor-Brennelementen in den Wirtsge-steinsinformationswässern möglicher Endlager. – Abschlussbericht, Berichte des For-schungszentrum Jülich 4237.
- Curtius, H., Kaiser, A., Paparigas, Z., Hansen, B., Neumann, A., Klinkenberg, M., Müller, E., Brücher, H. & Bosbach, D. (2010): Wechselwirkung mobilisierter Radionuklide mit se-kundären Phasen in endlagerrelevanten Formationswässern. – Berichte des For-schungszentrum Jülich 4333.
- Eriksen, T.E., Shoesmith, D.W. & Jonsson, M. (2012): Radiation induced dissolution of UO₂ based nuclear fuel – A critical review of predictive modelling approaches. – Journal of Nuclear Materials, Vol. 420, 409-423; (Elsevier).
- Fachinger, J., den Exter, M., Grambow, B., Holgersson, S., Landesman, C., Titov, M. & Po-druhzina, T. (2006): Behaviour of spent HTR fuel elements in aquatic phases of reposi-tory host rock formations. – Nuclear Engineering and Design 236, 543–554.
- Finch, R.J., Buck, E.C., Finn, P.A. & Bates, J.K. (1999): Oxidative corrosion of spent UO₂ fuel in vapor and dripping groundwater at 90 °C. – MRS Proceedings, 556, 431 doi:10.1557/PROC-556-431.
- Johnson, L. & Shoesmith, D.W. (1988): Spent Fuel. – (In: Lutze, W. & Ewing, R. [eds.], Radi-oactive Waste Forms for the Future); Amsterdam (Elsevier).
- Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A. & Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst, Basis Ausstieg aus der Kernenergienut-zung (Juli 2011). – Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben, Arbeitspaket 3. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS), GRS-278; Köln.
- Shoesmith, D.W. (2000): Fuel corrosion processes under waste disposal conditions. – Journal of Nuclear Materials 282, 1-31.
- Shoesmith, D.W. (2007): Used Fuel and Uranium Dioxide Dissolution Studies – A Review. – Nuclear Waste Management Organization, Report NWMO TR-2007-03; Toronto, Can-ada.
- Shoesmith, D.W. (2008): The Role of Dissolved Hydrogen on the Corrosion/Dissolution of Spent Nuclear Fuel. – Nuclear Waste Management Organization, Report NWMO TR-2008-19; Toronto, Canada.

51 Alteration der Glasmatrix

NEA-Gruppe: 2.3.4 *Chemical processes [waste package]*

51.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieser Prozess beschreibt die chemische und radiolytische Zersetzung und Umwandlung der Borosilikatglasmatrix der CSD-V- und CSD-B-Kokillen durch Wechselwirkungen mit Wasserdampf, Lösungen und Strahlung.

51.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Alteration von Glas behandelt die Auflösung oder Umwandlung der strukturellen Glasmatrix. Eine Alteration der Glasmatrix und die damit verbundene Radionuklidmobilisierung beginnen, sobald Wasserdampf oder wässrige Lösungen an die Glasmatrix gelangen (Neeway et al. 2012). Bei der Alteration von Glas treten unterschiedliche Prozesse sowohl parallel als auch konsekutiv auf. Zunächst erfolgt die Benetzung der Oberflächen und Diffusionsprozesse von Wasser in die Matrix bzw. von leichtlöslichen Elementen (z. B. Li, Na) aus der Matrix in die Lösung (Ionenaustausch). In bestimmte Kanäle, die im CSD-V- und CSD-B-Glas durch den hohen Gehalt an Netzwerk-Modifizier Elementen (insbesondere Spaltprodukte) gebildet werden, können z. B. Mg Ionen in die Glasmatrix eindringen. SiO₂ reichert sich an der Oberfläche des Glases an und bildet mit den Komponenten der anstehenden Lösung neue feste Phasen mit tonartigen Eigenschaften (Gelschicht). Innerhalb der Gelschicht können schwerlösliche Radionuklidphasen ausfallen sowie Sorptionsprozesse auftreten. Die Alteration von Glas ist maßgeblich von hydrochemischen Verhältnissen sowie der Temperatur abhängig. Es wurde erfolgreich ein Modell zur Beschreibung der Alteration von Glas entwickelt (z. B. Grambow 1997, 2006).

Die Reaktion zwischen Borosilikatgläsern mit wässrigen Lösungen wird im Allgemeinen als Kombination zweier scheinbar unabhängiger Prozesse angesehen: die anfängliche, als Ionenaustauschprozess beschreibbare, diffusionskontrollierte Freisetzung von Alkaliionen aus der Glasmatrix und die Auflösung der Glasmatrix selbst. Wegen des hohen Gehalts an schwerlöslichen Metallionen wird alteriertes HAW-Glas nicht wie die Alkalisilikatgläser vollständig aufgelöst, sondern der alterierte Teil des Glases wandelt sich in sekundäre Mineralphasen um, die den Raum ausfüllen, an dem sich vorher die Glasphase befand. Durch Reaktionen des gelösten Silikats mit Lösungsbestandteilen bilden sich Alterationsschichten auf der Glasoberfläche aus, welche tonartige Mineralphasen enthalten. In NaCl-Lösungen können dabei die pH-Werte um mehrere Einheiten zunehmen.

Die Alteration der Glasmatrix führt zu einer Zunahme der Siliziumkonzentration in der Lösung. Nach Erreichen der Sättigungskonzentration für Silizium fällt die Alterationsrate deutlich ab. Die anfängliche Rate der Glasalteration bis zum Erreichen der Siliziumsättigung ist vor allem von der Lösungszusammensetzung, der Kinetik der simultan ablaufenden Ausfällungsprozesse, dem pH-Wert und der Temperatur abhängig. Die Dauer bis zum Erreichen der Si-Sättigung hängt auch von der Lösungsmenge und der Größe der Glasoberfläche ab. Die tatsächliche Glasoberfläche wird beeinflusst durch ihr Alter und durch mechanische Vorbelastungen wie Stoß oder Druck.

Für die Glasprodukte liegt ein hoher Wissensstand hinsichtlich ihres Verhaltens unter Bestrahlung vor (Weber et al. 1997). Als Ergebnis zeigen mögliche Strahlenschäden in einer Glasmatrix wenig Relevanz bei der Bewertung der Freisetzung von Radionukliden. Ermittelte Alterationsraten sind nahezu unabhängig vom Anteil radioaktiver Stoffe.

51.3 Prozessbeschreibung

Im Endlager kommt Glas in CSD-V- und CSD-B-Kokillen vor (Bertrams et al. 2017). Der Ablauf der Alteration hängt von der Lösungsschemie, die im Einlagerungsbereich durch die Porenwässer im Kristallingestein (s. FEP „Lösungen im Wirtsgestein“) und eingebrachte Materialien (Bertrams et al. 2017) bestimmt wird, ab.

Es wird davon ausgegangen, dass die Kupferbehälter 1 Million Jahre halten und damit einen Wasserzutritt zur Abfallmatrix verhindern. Der Prozess findet also nur dann statt, wenn ein Behälter defekt ist und zu einem früheren Zeitpunkt ausfällt. Der Prozess führt auch zur Radionuklidmobilisierung. Die Ausfällung von Sekundärphasen bei der Glaskorrosion kann auch zu einer Rückhaltung der Radionuklide beitragen.

51.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

51.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Dieser Prozess ist an das Versagen eines Behälters gekoppelt, dessen Wahrscheinlichkeit bisher noch nicht eingestuft werden kann. Deshalb wird der Prozess als wahrscheinlich eingestuft.

51.6 Ungewissheiten

- Die Zusammensetzung der Lösung beeinflusst den Verlauf der Glaskorrosion, speziell die Bildung von Sekundärprodukten und die Änderung des pH-Werts.

51.7 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (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, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Grambow, B. (1997): Vorläufiger Quellterm Glas - Beschreibung der kinetischen Barrierenwirkung von HAW-Glas im integrierten Nahfeldmodell. – Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe: FZK-INE 015/97; Karlsruhe.
- Grambow, B. (2006): Nuclear waste glass - how durable? – Elements 2, 357-364.
- Neeway, J., Abdelouas, A., Grambow, B., Schumacher, S., Martin, Ch., Kogawa, M., Utsunomiya, S., Gin, S. & Frugier, P. (2012): Vapor hydration of SON68 glass from 90°C to 200°C: A kinetic study and corrosion products investigation. – Journal of Non-Crystalline Solids 358, 2894-2905.
- Weber, W.J., Ewing, R.C., Angell, C.A., Arnold, G.W., Cormack, A.N., Delaye, J.M., Griscom, D.L., Hobbs, L.W., Navrotsky, A., Price, D.L., Stoneham, A.M. & Weinberg, M.C. (1997): Radiation effects in glasses used for immobilization of high-level waste and plutonium deposition. – Journal of Materials Research 12(8): 1946-1978.

52 Korrosion von Baustoffen mit Zementphasen

NEA-Gruppe: 3.2.4 *Chemical processes [repository]*

52.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieser Prozess beschreibt die Korrosion (chemische Umwandlung) von Baustoffen mit Zementphasen durch Lösungen oder Wasserdampf.

52.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Prinzipiell werden zwei Arten von Zementen zur Verwendung in geotechnischen Materialien in Endlagern für radioaktive Abfälle in kristallinen Gesteinen diskutiert (Posiva 2012):

- Standard Portland Zement und
- Niedrig-pH-Zement, bei dem Kalk durch Silikatstaub ersetzt wird.

Als zementbasierte Baustoffe kommen vorwiegend Betone zur Anwendung, z. B. als Beton- ausbau zwecks Stabilisierung im Grubengebäude und in Widerlagern von Streckenverschlüssen. Betone bestehen im Wesentlichen aus Zement als Bindemittel, Wasser (Anmachwasser) und Gesteinskörnung als Zuschlagstoff. Beim Abbinden der Zemente reagieren diese unter der Bildung von CSH- (Calcium-Silikat-Hydrat) Phasen, die die Festigkeitseigenschaften des Betons charakterisieren sowie weiteren Phasen wie z. B. Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Zementbasierte Baustoffe weisen eine offene Porenstruktur auf. Die Porosität und die Größe der Poren hängen von der Herstellung des Zementes (besonders dem Mengenverhältnis von Anmachwasser zu Zement) ab.

Unter der Korrosion von Baustoffen mit Zementphasen werden eine Reihe von chemischen Wechselwirkungen mit anstehenden Lösungen und deren Bestandteilen zusammengefasst, die zur Veränderung der chemischen, hydraulischen und mechanischen Eigenschaften der zementbasierten Baustoffe führen. Für die Korrosion der Zementphasen (CSH) sind Chloride, Karbonat- und Sulfat-Korrosion, Säureangriff sowie Ionenaustauschprozesse von wesentlicher Bedeutung (BNFL 2002; Glasser et al. 2008).

Die Korrosion zementbasierter Baustoffe hängt maßgeblich von deren chemischen und hydraulischen Eigenschaften sowie von der Zusammensetzung der anstehenden Lösung ab. Qualitativ hochwertige Betone weisen eine geringe Porosität und Permeabilität auf, weshalb der Stofftransport in diesen geringpermeablen Baustoffen vorwiegend diffusiv erfolgt (Posiva 2012).

Das maximale Korrosionsausmaß auf ein zementbasiertes Bauwerk hängt dabei von dem Verhältnis der Masse des Baustoffes zur Masse der wechselwirkenden Lösung und deren Korrosionspotential (chemische Zusammensetzung) für den betrachteten Baustoff ab (BNFL 2002, Hagemann & Meyer 2003).

Im Kontakt zu Lösungen finden Wechselwirkungsprozesse zwischen Lösung und Baustoff statt. In salinaren Lösungen können gelöste Ionen (Mg^{2+} , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}) in den Baustoff diffundieren und es kommt zur Bildung von Korrosionsprodukten (s. FEP „Korrosionsprodukte aus Betonkorrosion“). Generell wird man im Kontakt zu natürlichen Lösungen eine Diffusion von OH-Anionen aus dem Baustoff in die anstehende Lösung beobachten, wodurch der pH in wenigen Tagen bis auf Werte von pH 13 ansteigen kann. Lediglich im Falle eines sehr großen

Lösungsvolumens oder Abtransports der Lösung kann langfristig der Portlandit komplett aufgelöst und der pH-Wert im zementbasierten Baustoff reduziert werden. Fällt der pH-Wert unterhalb des Stabilitätsbereichs der CSH-Phasen, werden auch diese aufgelöst bzw. umgewandelt und der Baustoff verliert seine Festigkeit.

Zur Korrosion von Niedrig-pH-Zement-Materialien gibt es weniger Daten (Posiva 2012). Studien zeigen, dass sie generell ähnliche technische Eigenschaften wie die konventionellen Zementmaterialien haben (Martino 2005, Montori et al. 2008, Holt 2008). Der in Niedrig-pH-Zementen verwendete Silikatstaub führt zu einer weniger porösen und permeablen Matrix und verbessert damit die Haltbarkeit. Dies liegt insbesondere an der Eigenschaft von Silikat, Feuchtigkeit aufzunehmen und geringfügig zu schwellen. Unter trockenen Bedingungen kann Niedrig-pH-Beton allerdings schrumpfen und unter Abgabe von Feuchtigkeit Risse bilden (Holt 2008). Die Entwicklung des pH-Werts bei Korrosion unter Endlagerbedingungen wurde u. a. von Vuorinen et al. (2005), Arenius et al. (2008) und Heikola (2008) untersucht. Die Studien zeigen, dass sich pH-Werte kleiner als 11 einstellen, wobei der Silikatgehalt des Zements den pH beeinflusst (z. B. Calvo et al. 2010).

Die entstandene alkalische Lösung kann sich im Endlager ausbreiten und z. B. mit Tonmaterialien aus Verfüll- und Verschlussmaßnahmen und Mineralen des Kristallingesteins wechselwirken (s. FEP „Alteration von Bentonit“ und FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“).

Zementphasen weisen eine unterschiedlich hohe Sorptionsfähigkeit für Radionuklide auf, die in der Literatur gut dokumentiert ist (BNFL 2002; Evans 2008). Jedoch bleibt der Einfluss der Karbonat-Korrosion auf die Sorptionseigenschaften der Zementphasen noch offen (Evans 2008).

Generell wird die Korrosion von zementbasierten Baustoffen durch die folgenden Faktoren beeinflusst:

- Die Zusammensetzung des zementbasierten Baustoffes, insbesondere die Verwendung von Niedrig-pH-Zementen, hat Auswirkungen auf die Korrosionsrate und den sich einstellenden pH-Wert.
- Die Grundwasserzusammensetzung ist relevant für die Korrosionsmechanismen und deren Raten.
- Der Grundwasserfluss bestimmt die Konzentration der Ionen, die bei der Korrosion gebildet werden und darüber die Diffusion von Komponenten aus dem Zementmaterial.
- Die Temperatur beeinflusst die Korrosionsrate.

52.3 Prozessbeschreibung

Im Endlager ist die Verwendung von Baustoffen mit Zementphasen in verschiedenen Bereichen mit unterschiedlicher Funktion geplant (Bertrams et al. 2017):

- Für die Standsicherheit der aufgefahrenen Hohlräume ist Spritzbeton als Strecken- und Schachtausbau in Widerlagern der Verschlussbauwerke vorgesehen.
- Für Verschlüsse in geklüfteten Bereichen sollen Betonwiderlager zur Fixierung des Bentonit-Dichtelements verwendet werden.
- Als Referenzkonzept zur Abdichtung von Erkundungsbohrungen ist eine serielle Anordnung von Tiefbohr- und Quellzementen, Schwerspat und hochverdichteten Tonpellets vorgesehen.
- Als Abschlusswiderlager an den Enden der Einlagerungsstrecken soll Niedrig-pH-Beton verwendet werden.

Es ist geplant, in den Einlagerungsstrecken keinen Beton zu verwenden.

Der Ablauf der Korrosion hängt von der Rezeptur der zementhaltigen Baustoffe ab, die in Widerlager und Ausbau unterschiedlich sein kann, und von der Lösungsschemie, die sich in einzelnen Bereichen des Endlagers unterscheiden kann.

52.4 Zeitliche Beschränkung

Keine. Eine Zementkorrosion beginnt sofort mit dem Vorhandensein von Lösungen.

52.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Da zementbasierte Baustoffe als Strukturelemente in Grubenräumen und in Strecken- und Schachtverschlüssen eingesetzt werden und diese mit Lösungen in Kontakt kommen werden, ist dieses FEP wahrscheinlich.

52.6 Ungewissheiten

- Es ist noch nicht abschließend geklärt, welche Art von Zementen für welche geotechnischen Bauwerke verwendet wird, speziell, ob auch Niedrig-pH-Zemente eingesetzt werden. Eine konkrete Bewertung der Auswirkungen der Betonkorrosion unter den Bedingungen des "mKBS-3" Konzepts sollte nach Festlegung der Baustoffe und der Zusammensetzung des Referenzwassers erfolgen.
- Der Einfluss der Karbonat-Korrosion auf die Sorptionseigenschaften der Zementphasen ist noch offen.
- Ungewissheiten bestehen in der Geschwindigkeit der Korrosion, die insbesondere durch Variationen in der Porosität/Permeabilität des Zementbaukörpers und der lokalen Zusammensetzung der Lösung bewirkt werden.

52.7 Literaturquellen

- Arenius, M., Hansen, J., Juhola, P., Karttunen, P., Koskinen, K., Lehtinen, A., Lyytinen, T., Mattila, J., Partamies, S., Pitkänen, P., Raivio, P., Sievänen, U., Vuorinen, U. & Vuorio, M. (2008): R20 Summary Report: The groundwater inflow management in ONKALO - the future strategy. – Posiva Oy. Working Report 2008-44: p. 234; Olkiluoto, Finland
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- BNFL (2002): A literature review on the behavior of buried contaminated concrete over time and relevance to plutonium, americium and uranium contamination at the Rocky Flats Environmental Technology Site. – BNFL Inc., Report to Rocky Mountain Remediation Services; Englewood, Colorado.
- Calvo, J.L., Hidalgo, A., Alonso, C. & Fernández Luco, L. (2010): Development of low-pH cementitious materials for HLRW repositories: Resistance against ground waters aggression. – Cement and Concrete Research. Vol. 40, no. 8, p. 1290-1297.

- Evans, N.D.M. (2008): Binding mechanisms of radionuclides to cement. – *Cement and Concrete Research* 38, 543-553.
- Glasser, F.P., Marchand, J. & Samson, E. (2008): Durability of concrete – Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. – *Cement and Concrete Research* 38, 226-246.
- Hagemann, S. & Meyer, Th. (2003): Endlager Morsleben – Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Korrosion von Salzbeton durch salinare Lösungen, GRS-A-3184, GRS-Bericht für das BfS, PSP-Element 9M 212 200 11, 114 S.
- Heikola, T. (2008): Dynamic leach testing of low- and medium-pH injection grouts to be used in deep repositories. Cementitious materials in deep geological repositories. – Posiva Oy, Working Report 2008-92: 146 pp.; Eurajoki, Finland
- Holt, E. 2008. Durability of low-pH injection grout. –Posiva Oy, Working Report 2007-57: 79 pp.; Olkiluoto, Finland.
- Martino, J.B. (2005): Durability issues for concrete in a deep geologic repository. – Canadian Nuclear Society's Waste Management, Decommissioning and Environmental Restoration for Canada's Nuclear Activities: Current Practices and Future Needs Conference, 2005 May 8-11; Ottawa, Canada.
- Montori, J., Soler, J.M. & Saaltink, M.W. (2008): Reactive transport modeling of the effect of hyperalkaline solutions along a fracture at the ONKALO site. – Posiva Oy, Working Report 2008-14: 105 pp.; Eurajoki, Finland.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Performance Assessment 2012. – Posiva Oy, Report, 2012-04; Eurajoki.
- Vuorinen, U., Lehtikainen, J., Imoto, H., Yamamoto, T. & Cruz, A.M. (2005): Injection grout for deep repositories, Subproject 1: low-pH cementitious grout for larger fractures, leach testing of grout mixes and evaluation of the long-term safety. – Posiva Oy. Working Report 2004-46: 101 p.; Olkiluoto, Finland.

53 Metallkorrosion

NEA-Gruppe:	2.3.4	<i>Chemical processes [waste package]</i>
	3.3.4	<i>Chemical processes [repository]</i>

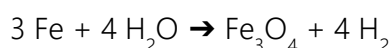
53.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die (elektro-)chemische Reaktion von Metallen mit den Stoffen der Umgebung wird als Metallkorrosion bezeichnet. Die hier betrachteten Prozesse beziehen sich auf Reaktionen in Gegenwart von wässrigen Lösungen oder Wasserdampf.

53.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Umfang und Geschwindigkeit der Korrosion sind im Wesentlichen von den Eigenschaften des Metalls (aktiv korrodierend z. B. unlegierter Stahl oder passiv schichtbildend wie Edelstähle), der Verfügbarkeit von Sauerstoff, der Temperatur, der Lösungszusammensetzung und den verfügbaren Lösungsmengen abhängig. Verfügbare Lösungsmengen in einem Endlager sind die Restfeuchte im Behälter, die Versatz- und Gebirgsfeuchte im Nahfeld bzw. aus dem Wirtsgestein zutretende Lösungen.

Der im verschlossenen Endlager vorhandene Luftsauerstoff wird schnell durch aerobe Bakterien und aerobe Korrosionsreaktionen an Behältermaterialien und sonstigen eisenhaltigen Bergwerkseinrichtungen verbraucht. Danach finden nur noch anaerobe Korrosionsprozesse bei Anwesenheit von Wasser unter Verbrauch von Wasser statt (Puigdomenech et al. 2001). Die bei der anaeroben Metallkorrosion entstehende Gasphase besteht überwiegend aus H_2 , wodurch reduzierende Bedingungen stabilisiert werden. Für die anaerobe Korrosion von Stahl kann man folgende Reaktion formulieren, wenn man davon ausgeht, dass Magnetit als Reaktionsprodukt gebildet wird, d.h. aus 3 mol Eisen bilden sich 4 Mol Wasserstoff:



Die Korrosionsreaktion kann durch hohe H_2 -Drücke zum Erliegen kommen (Wasserstoff-Inhibitionseffekt), jedoch ist dafür ein H_2 -Partialdruck von 14 MPa notwendig, wenn die Korrosionsreaktion zur Bildung von Eisen(II)hydroxid ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) führt und von 80 MPa, wenn Magnetit (Fe_3O_4) gebildet wird (Platts et al. 1994).

In der Technik werden folgende Arten der Korrosion anhand ihres Auftretens oder ihrer Ausprägung unterschieden:

- Kontaktkorrosion,
- Lochfraßkorrosion,
- Muldenkorrosion,
- Flächenkorrosion,
- Spannungsrisskorrosion,
- Spaltkorrosion,
- Interkristalline Korrosion,
- Unterwanderungskorrosion.

Relevant für die Korrosionsprozesse im Endlager sind insbesondere flächenhafte Korrosion und Lochfraß. Beide Korrosionsarten wurden für die geplanten Endlagermaterialien untersucht und Korrosionsraten für verschiedene geochemische Bedingungen abgeleitet (European

Commission 2004; Smailos 1993; Smailos & Koester 1992; Smailos et al. 1999; Smailos et al. 2003; King 2008; Landolt et al. 2009). Neben Stählen korrodieren auch andere, im Endlager verbleibende metallische Werkstoffe (Al-, Cu-, Ni- und andere Legierungen). Die Korrosion von CSD-C-Abfällen und Behältern mit Strukturteilen aus der BE-Konditionierung (Zircaloy) führt direkt zu einer Radionuklidmobilisierung.

In zahlreichen Experimenten wurde gezeigt, dass die aktive Korrosion der unlegierten Stähle flächenhaft und mit weitgehend konstanter Rate verläuft (Smailos 1993; Smailos & Koester 1992; Smailos et al. 1999, 2003; King 2008; Landolt et al. 2009). Jedoch wurde bei Karbonat-Konzentrationen von 0,1 mol/l und Chlorid-Konzentrationen von 0,05 mol/l und in Kontakt mit Ton eine Passivierung der Oberfläche eines unlegierten Stahls durch Korrosionsprodukte und anschließende starke Lochfraßkorrosion beobachtet (Romaine et al. 2013). Niedrigere Karbonat- und Chlorid-Konzentrationen verursachten in der letzten Studie keine Lochfraßkorrosion.

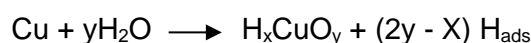
Die Rauheit der Metalloberfläche spielt bei der Metallkorrosion ebenfalls eine Rolle: Elektropolieren kann z. B. die Resistenz gegenüber der flächenhaften Korrosion eines legierten Stahls um 60 bis 85 % erhöhen (Lee & Lai 2003).

Korrosion von Kupfer

In reinem Wasser ist Kupfer thermodynamisch stabil während es in natürlichen Wässern mit Raten korrodieren wird, die im Wesentlichen durch die Zusammensetzung des Wassers und die Redoxbedingungen bestimmt werden. Die wichtigsten Parameter sind dabei die Verfügbarkeit von Sauerstoff, Chlorid- und Sulfidionen. Zudem können Verunreinigungen im Metall und mechanische Spannungen Einfluss auf die Korrosion haben (Posiva 2012).

Unter aeroben Bedingungen kann die Korrosion von Kupfer flächenhaft oder lokal verlaufen. Während der flächenhaften Korrosion bildet sich auf der Kupferoberfläche eine Oxidschicht, in die auch Karbonate, Sulfate und Hydroxide eingebaut werden können. Die Korrosionsrate wird durch die Verfügbarkeit von O₂ und ggf. Cu(II), das durch Oxidation von Cu(I) gebildet wird, begrenzt. Durch die Oxidschicht wird die Kupferoberfläche passiviert und die weitere Korrosion verhindert. Falls Wasser bzw. Feuchtigkeit nur lokal auf den Behälter trifft oder im Fall der Streckenlagerung ungleichmäßiges Quellen des Bentonits auftritt, bzw. die Kupferoberfläche lokal geschädigt ist, ist eine lokale Korrosion möglich. Studien zur Lochfraßkorrosion zeigen, dass ein Oxidationsmittel, entweder O₂ oder Cu(II), vorhanden sein muss, damit Lochfraß während einer lokalen Korrosion fortschreitet (Saario et al. 2004). Das bedeutet, dass Lochfraßkorrosion, wenn überhaupt, nur in der Anfangsphase, solange Sauerstoff noch nicht verbraucht ist, stattfinden kann. Das Vorhandensein von Chlorid wirkt sich eher auf die flächenhafte Korrosion aus. Unter hochsalinaren Bedingungen tritt lokale Korrosion nur bei sehr niedrigen pH-Werten (pH < 4) auf, die im Endlager nicht erwartet werden (Posiva 2012).

Die anaerobe Korrosion von Kupfer verläuft extrem langsam. Entsprechend sind über den Bewertungszeitraum im Vergleich zur Korrosion von eisenhaltigen Materialien viel geringere Mengen an Korrosionsprodukten und an Wasserstoffgas zu erwarten. Unter anaeroben Bedingungen beeinflusst die Zusammensetzung der Lösung die Art der Korrosionsprodukte entscheidend und insbesondere Sulfid ist eine gegenüber Kupfer korrosiv wirkende Spezies. Untersuchungen in deionisiertem Wasser mit sauerstofffreiem Kupfer unter reduzierenden Bedingungen deuten darauf hin, dass sich eine bisher unbekannte Kupferhydroxidverbindung nach folgendem Mechanismus bilden kann (Szakálos et al. 2007):



Die Ergebnisse sind bisher allerdings nicht reproduziert worden und werden in der Literatur kritisch diskutiert, siehe z. B. (King 2010). Auf jeden Fall findet Kupferkorrosion bei Anwesenheit von Sulfid statt. Die Oberfläche wird nach folgender Teilreaktion unter Bildung von Cu₂S aktiviert und korrodiert (Macdonald & Sharifi-Asl 2011):



Entscheidend für die Korrosionsrate ist die Sulfidkonzentration im Wasser und der Transport von Sulfid durch die geotechnischen Barrieren, Bentonit im Fall der Castorbehälter in den Strecken, bzw. Bohrlochliner und geringpermeabler Granit im Fall der Kokillen in den Bohrlöchern. Der Transport im Bentonit wie auch im ungestörten Granit ist durch Diffusion begrenzt. Rechnungen von Kremer (2017) ergeben unter Berücksichtigung einer Sulfidkonzentration von 1 mmol/l im Grundwasser und einem Diffusionsprozess von Sulfid durch den Bentonit-Buffer um den Behälter für das kanadische Konzept Korrosionsraten von 0,026 nm/a.

Korrosion von eisenhaltigen Materialien

Zahlreiche Experimente haben gezeigt, dass nicht-legierte Stähle unter aeroben und anaeroben Bedingungen flächenhaft mit einer konstanten Rate korrodieren (Smailos 1993, Smailos & Koester 1992, Smailos et al. 1999, 2003, King 2008; Landolt et al. 2009).

Bei passivierten Edelstählen, insbesondere in einer Chlorid-haltigen Lösung, treten an Fehlstellen der aus Oxiden bestehenden Passivschicht häufig punktförmige Korrosionsprozesse (Lochfraß) auf. An diesen Fehlstellen wird der Sauerstoff aus der Oxidschicht durch Chlorid-Ionen verdrängt. Durch weitere Anlagerung von Cl-Ionen entsteht ein Bereich auf der Oberfläche des Metalls, der nicht mehr durch eine Oxidschicht geschützt ist. Diese Stelle bietet nun einen Angriffspunkt für Korrosion. Unter den zu erwartenden anaeroben Bedingungen im Endlager ist kaum Sauerstoff verfügbar, der zur Re-Passivierung beitragen könnte. Aufgrund von Diffusionsprozessen im Loch bildet sich ein Konzentrationselement aus: Das Loch bildet die Anode, die restliche Oberfläche die Kathode. Da die Korrosionsgeschwindigkeit durch das Flächenverhältnis von Kathode zu Anode bestimmt wird, schreitet die Reaktion mit großer Geschwindigkeit im Loch voran. Im Loch entstehen durch Hydrolyse Protonen, die die Lösung im Loch ansäuern. Durch den erniedrigten pH-Wert erhöhen sich das freie Korrosionspotential und damit die Korrosionsgeschwindigkeit im Loch.

Die Rauheit der Metalloberfläche spielt bei der Metallkorrosion ebenfalls eine Rolle: Elektropolieren kann z. B. die Resistenz gegenüber der flächenhaften Korrosion eines legierten Stahls um 60 bis 85 % erhöhen (Lee & Lai 2003).

Korrosionsprodukte (insbesondere Eisenoxide /-hydroxide) stellen gute Sorbentien für zahlreiche Kationen dar und können zur Radionuklidrückhaltung im Nahbereich beitragen.

Korrosion von Zircaloy-Hüllrohren und Brennelementstrukturteilen

Die metallischen Strukturen in den Brennelementen sind aus korrosionsresistenten Materialien, wie Edelstahl oder Zirkon- und Nickellegierungen. Die Brennstabhüllen bestehen aus einer Zirkon-Legierung (Zircaloy), die auch kleinere Mengen an Cr oder Nb enthalten. Die meisten Hüllrohre werden ihre mechanische Integrität über eine lange Zeit erhalten und Wasser von dem abgebrannten Brennstoff fernhalten.

Die Korrosion von Hüllrohren beginnt schon bei sehr hohen Temperaturen im Reaktor. Das Zircaloy wird dabei mit einer dünnen Schicht aus ZrO_2 passiviert. Im Endlager wird der Korrosionsprozess erst weitergehen, wenn die Behälter defekt sind und Wasser Zutritt. Durch die Korrosion des Behälters wird Wasserstoff gebildet, was auch zur Versprödung der Zircaloy-Hüllen führen kann.

Aufgrund der hohen Korrosionsresistenz, der ZrO_2 -Passivierung und der reduzierenden Bedingungen im Endlager wird die Korrosionsrate der Hüllrohre sehr niedrig sein. Unter Endlagerbedingungen wurden Korrosionsraten von 5 nm/a abgeschätzt (konservativ 20 nm/a), wobei auch Raten < 1 nm/a möglich sind (Shoesmith & Zagidulin 2010).

Die Korrosionsraten der Komponenten aus Edelstahl- und Nickel basierten Legierungen sind etwas höher als die für Zircaloy. Aus Studien unter anoxischen Bedingungen ergeben sich mittlere Korrosionsraten von 0,15 µm/a (SKB 2010).

Einfluss von Mikroben

Generell können auch mikrobielle Prozesse (s. FEP „Mikrobielle Prozesse“) den Metallkorrosionsprozess beeinflussen. So kann die Aktivität von Sulfat-reduzierenden Mikroben zum Einbau von extrazellulären Polymeren in Korrosionsschichten führen und dadurch z. B. die passivierende Wirkung der Korrosionsschicht in Edelstählen verringern (s. a. FEP „Korrosionsprodukte aus Metallkorrosion“). Ebenso kann die Aktivität von Mikroben auch die Passivierung von Kupferoberflächen reduzieren und deren Heterogenität und Rauheit erhöhen (Vargas et al. 2014).

53.3 Prozessbeschreibung

Im Endlager kommen Metalle in Behältern, in Abfällen sowie in technischen Einrichtungen, wie z. B. Bohrlochlinern vor (Bertrams et al. 2017). Für eine genauere Auflistung der Materialein siehe FEP „Korrosionsprodukte aus Metallkorrosion“. Der Ablauf der Korrosion hängt von der stofflichen Zusammensetzung der Bauteile, die von Kupfer über Edelstahl bis zum unlegierten Stahl und Gusseisen variieren kann, und von der Lösungsschemie ab.

Zu einer Korrosion der eisenhaltigen Behältermaterialien kann es erst kommen, wenn Defekte in der Kupferschicht vorhanden sind, durch die Wasser eindringen kann. Wenn schließlich auch die Stahlbehälter defekt sind und Lösung eindringt, wird in den CSD-C-Abfällen die Korrosion der metallischen Abfallbestandteile (Hüllrohre und Brennelementstrukturteile) einsetzen. Dabei werden auch Radionuklide freigesetzt. Wie oben beschrieben werden bei der anaeroben Korrosion generell Gase gebildet.

53.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

Die aerobe Korrosion verläuft in der Regel sehr schnell, so dass nach wenigen Jahren O₂ quantitativ verbraucht und die aerobe Korrosion abgeschlossen ist. Anaerobe Korrosion hat keine zeitliche Beschränkung, solange die Edukte der Korrosionsreaktionen nicht aufgebraucht werden

53.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Korrosion der im Endlager enthaltenen Metalle setzt zwangsläufig mit dem Zutritt von Lösungen bzw. Vorhandensein von Restfeuchte im Grubengebäude ein.

53.6 Ungewissheiten

- Konkrete Korrosionsraten für Kupfer unter den Bedingungen des „mKBS-3“ Konzepts, speziell für die BSK-Cu, bei denen kein Buffer verwendet wird.
- Für die Korrosionsrate spielt neben der Art des Metalls die Lösungszusammensetzung und die Temperatur eine wichtige Rolle. Insbesondere aus Ungewissheiten in der Entwicklung der Lösung, z. B. des pH-Werts ergeben sich Ungewissheiten hinsichtlich der Korrosionsraten.

53.7 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallinegestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- European Commission (2004): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project). – European Commission, Nuclear Science and Technology, Final Report: EUR 20621 EN: 155-161.
- Kremer, E.P. (2017): Durability of the Canadian Used Fuel Container. – Corrosion Engineering, Science and Technology 52, 173–177.
- King, F. (2008): Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay. – Nagra, Technical Report 08-12.
- King, F. (2010): Critical review of the literature on the corrosion of copper by water. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). Technical Report TR-10-69. 51 p; Stockholm.
- Landolt, D., Davenport, A., Payer, J. & Shoesmith, D. (2009): A review of materials and corrosion issues regarding canisters for disposal of spent fuel and high-level waste in Opalinus Clay. – Nagra, Technical Report 02-05.
- Lee, S.-J. & Lai, J.-J. (2003): The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel. – Journal of Materials Processing Technology 140: 206–210.
- Macdonald, D.D. & Sharifi-Asl, S. (2011): Is copper immune to corrosion when in contact with water and aqueous solutions? – Swedish Radiation Safety Authority (SSM), Research 2011:09. 247 p.; Stockholm. ISSN: 2000-0456
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Platts, N., Blackwood, D.J. & Naish, C.C. (1994): Anaerobic oxidation of carbon steel in granitic groundwaters: A review of the relevant literature. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Report TR-94-01; Stockholm.
- Puigdomenech, I., Ambrosi, J.-P., Eisenlohr, L., Lartigue, J.-E., Banwart, S.A., Bateman, K., Milodowski, A.E., West, J.M., Griffault, L., Gustafsson, E., Hama, K., Yoshida, H., Kotelnikova, S., Pedersen, K., Michaud, V., Trotignon, L., Rivas Perez, J. & Tullborg, E.-L. (2001): O₂ depletion in granitic media. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Report TR-01-05; Stockholm.
- Romaine, A., Sabot, R., Jeannin, M., Necib, S. & Refait, Ph. (2013): Electrochemical synthesis and characterization of corrosion products on carbon steel under argillite layers in carbonated media at 80 °C. – Electrochimica Acta 114: 152–158.
- Saario, T., Betova, I., Heinonen, J., Kinnunen, P. & Lilja, C. (2004): Effect of the degree of compaction of bentonite on the general corrosion rate of copper. In: Prediction of long term corrosion behaviour in nuclear waste systems. Proceedings of the 2nd International Workshop, Nice September 2004, Eurocorr 2004.

- SKB (2010): Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), Technical Report TR-10-46: 143 p.; Stockholm. ISSN 1404-0344.
- Smailos, E. & Koester, R. (1992): Corrosion of HLW packaging materials in disposal relevant salt brines. Proceedings of the 3rd International Conference on High Level Radioactive Waste Management. – Volume 2: 1676-1680; Las Vegas, Nevada.
- Smailos, E. (1993): Corrosion of high-level waste packaging materials in disposal relevant brines. – Nuclear Technology 104: 343-350.
- Smailos, E., Martinez-Esparza, A., Kursten, B., Marx, G. & Azkarate, I. (1999): Corrosion evaluation of metallic materials for long-lived HLW/spent fuel disposal containers. – Wissenschaftliche Berichte, Final report: FZKA-6285, 1996-1998.
- Smailos, E., Cuñado, M.Á., Azkarate, I., Kursten, B. & Marx, G. (2003): Long-Term Performance of Candidate Materials for HLW/Spent Fuel Disposal Containers. – Wissenschaftliche Berichte: FZKA-6809.
- Shoesmith, D. & Zagidulin, D. (2010): The corrosion of zirconium under deep geological repository conditions. Canadian Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Technical Report TR-2010-19. 40 p.
- Szakálos, P., Hultquist, G. & Wikmark, G. (2007): Corrosion of copper by water. Electrochemical and Solid-State Letters. – Vol. 10, no. 11, p. C63–C67. ISSN 10990062.
- Vargas, I. T., Alsina, M. A., Pavissich, J. P., Jeria, G. A., Pastén, P. A., Walczak, M., & Pizarro, G. E. (2014): Multi-technique approach to assess the effects of microbial biofilms involved in copper plumbing corrosion. – Bioelectrochemistry 97, 15-22.

54 Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme

NEA-Gruppe: 2.3.4 *Chemical processes [waste package]*
 3.3.4 *Chemical processes [repository]*

54.1 Definition/Kurzbeschreibung

Durch das Eindringen von Wasserstoff in das Gefüge von Metallen wird eine Änderung ihrer mechanischen Eigenschaften verursacht.

54.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Das Phänomen spielt bei der Beurteilung der Festigkeitseigenschaften von Metallen bzw. Legierungen eine Rolle. Stähle sind besonders von Wasserstoffversprödung betroffen. In chemischen Prozessen (z. B. Metallkorrosion) gebildeter atomarer Wasserstoff dringt in das Gefüge von metallischen Werkstoffen ein, wo er sich an Gitterstörstellen wieder zu molekularem Wasserstoff verbindet und dort verbleibt. Dabei kann der Wasserstoff schon während des Herstellungsprozesses aufgenommen werden oder später von außen in die Metallstruktur eindringen.

Durch die Einlagerung des Wasserstoffs in das Metallgitter wird dieses geweitet. Das führt zu inneren Spannungen und zu einer Versprödung des Metalls. Auch wenn der Wasserstoff wieder aus dem Metall ausgetreten ist, ist der Fehler im Gitter vorhanden und sorgt so für eine dauerhafte Schwächung der Struktur. Eine detailliertere Beschreibung der ablaufenden Prozesse findet sich z. B. bei Kaesche (1990) oder bei Louthan et al. (1972).

Der Einfluss der Wasserstoffaufnahme auf das mechanische Verhalten von Metallen ist ein gut untersuchtes Phänomen, z. B. Barthelmy (2011). Die Untersuchungen beziehen sich aber hauptsächlich auf Bedingungen, die beim Bau von Pipelines oder im Fahrzeugbau herrschen. Der Einfluss von Wasserstoff auf die Integrität der metallischen Behältermaterialien unter Endlagerbedingungen wurde bisher kaum untersucht. Farmer et al. (1991) führen die Versprödung durch Wasserstoff als einen der Prozesse auf, die bei der Beurteilung der Funktionsdauer von Endlagerbehältern zu berücksichtigen sind. Für unlegierte Stähle und Gusseisen wurden Untersuchungen für Endlagerbedingungen in Granit durchgeführt (Heitz & Zur Megede 1982).

Generell ist Kupfer wenig anfällig gegenüber Wasserstoffversprödung (Barnoush 2007). Nur in sauerstoffhaltigen Kupfersorten kann beim Kontakt mit wasserstoffhaltigen Gasen unter hohen Temperaturen der Wasserstoff in die Kupferoberfläche eindringen und mit dem darin vorhandenen Cu_2O zu Cu und H_2O reagieren. Der entstehende Wasserdampf kann das Gefüge sprengen und dadurch zur Rissbildung führen. Da in der Endlagerung hochreines, sauerstofffreies Kupfer zum Einsatz kommen soll ist dieser Prozess nicht zu erwarten. Informationen zur Aufnahme von Wasserstoff in Kupfer und mögliche Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Kupfers wurden in Sandström (2014) zusammengestellt. Auch bei Ablauf der Korrosion, unter der das Eindringen von Wasserstoff bevorzugt stattfinden kann, die aber in Kupfer sehr langsam erfolgt, wird Wasserstoff nur einige zehn μm in die Kupferoberfläche eindringen.

54.3 Prozessbeschreibung

Die Versprödung metallischer Werkstoffe ist für die in den Endlagerbehältern und Bohrlochlinern verwendeten Materialien von Bedeutung. Bei den metallischen Komponenten der Abfallmatrices (Hüllrohre, Strukturteile) kann die Versprödung der Materialien Einfluss auf die Mobilisierung von Radionukliden aus diesen Abfällen haben (Chan 1996).

Eine Versprödung der Behälter durch Wasserstoffaufnahme verändert die Festigkeit des Metalls. Ob die in einem Endlager auftretenden Spannungen ausreichen, um zu einem Ausfall dieser Komponenten zu führen, wurde bisher nicht untersucht. Für die Behälter muss durch die Auslegung sichergestellt werden, dass der in den Sicherheitsanforderungen geforderte Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren gewährleistet sind (EndlSiAnfV 2020).

Die folgenden metallischen Werkstoffe werden zur Herstellung der Behälter und Deckel bzw. der Bohrlochliner verwendet (Bertrams et al. 2017, Stark et al. 2014, Wolf et al. 2012):

1. Die Sekundärbehälterkörper, Primär- und Sekundärdeckel der BSK-Cu bestehen aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3, Werkstoff 1.6210). Behälter und Sekundärdeckel haben eine 5 cm dicken Kupferummantelung.
2. Die Primärbehälter (CSD-V, CSD-B und CSD-C) bestehen aus Edelstahl (Werkstoff 1.4833).
3. In den BSK-Cu verwendete Brennelement-Büchsen bestehen aus Edelstahl (Werkstoff 1.4541).
4. Von der Wasserstoffversprödung können auch das Zircaloy der Hüllrohre der abgebrannten Kernbrennstoffe und die Strukturteile der Brennelemente (Werkstoffe 1.451, 1.4568, 1.4571, Inc 717, Inc X-750) betroffen sein.

Die Metallkorrosion und die mikrobiellen Prozesse stellen Prozesse dar, bei denen Wasserstoff entsteht, der sich in die Struktur der Metalle einlagern kann. Eine Versprödung der Behältermaterialien durch Wasserstoff ist daher zu betrachten. Die austenitischen Edelstähle und insbesondere für die Behälter vorgesehene sauerstofffreies Kupfer sind dabei, aufgrund der extrem geringen Diffusion von Wasserstoff in diesen Materialien unter den erwarteten Bedingungen im Endlager weniger anfällig für eine Wasserstoffversprödung als die anderen verwendeten Behältermaterialien (Paatsch 1988, Barnoush 2007).

54.4 Zeitliche Beschränkung

Der Prozess läuft solange es im Endlagersystem Metalle und Wasserstoff gibt.

54.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Bei der Korrosion der Metalle (s. FEP „Metallkorrosion“) wird Wasserstoff produziert, der zu einer Versprödung der metallischen Komponenten führen kann.

54.6 Ungewissheiten

- Wie groß ist die Veränderung der Festigkeit der Materialien und welche Auswirkungen hat sie unter der Randbedingung einer Behälterlebensdauer von 1 Million Jahren?

54.7 Literaturquellen

- Barnoush, A. (2007): Hydrogen embrittlement, revisited by in situ electrochemical nanoindentation. – Dissertation, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften der Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- Barthelmy, H. (2011): Effects of pressure and purity on the hydrogen embrittlement of steels. – International Journal of Hydrogen Energy 36: 2750-2758.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallgestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Chan, K.S. (1996): A micromechanical model for predicting hydride embrittlement in nuclear fuel cladding material. – Journal of Nuclear Materials 227: 220-236.
- EndlSiAnfV (2020). Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, 06.10.2020, Berlin.
- Farmer, J.C., Gdowski, G.E., McRight, R.D. & Ahluwalia, H.S. (1991): Corrosion models for performance assessment radioactive-waste containers. – Nuclear Engineering and Design 129: 57-88.
- Heitz, E. & Zur Megede, D. (1982): Korrosionsverhalten von unlegiertem Stahl, Stahlguss und Gusseisen als Endlagerbehälterwerkstoff in wasserführendem Granitgestein. – Nagra, NTB 82-08; Wettingen, Schweiz.
- Kaesche, H. (1990): Die Korrosion der Metalle: Physikalisch-chemische Prinzipien und aktuelle Probleme. – 3. Auflage; Berlin (Springer).
- Louthan, M.R., Caskey, G.R., Donovan, J.A. & Rawl, D.E. (1972): Hydrogen Embrittlement of Metals. – Materials Science and Engineering 10: 357-368.
- Paatsch, W. (1988): Vermeidung der Wasserstoffversprödung vergüteter Stähle bei galvanotechnischen Prozessen durch thermische Legierungsbildung. – Materials and corrosion 39: 167-172.
- Sandström, R. (2014): The role of hydrogen in copper. – Memo 2014-01-27 containing documentation to be used in the response to issues brought up by SSM. <http://www.skb.se/wp-content/uploads/2015/05/1420051-PM-The-role-of-hydrogen-in-copper.pdf> Access date: 02.08.2018.
- Stark, L., Gerardi, J., Jahn, S., Jobmann, M., Keller, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mru-galla, S., Reinhold, K. & Rübel, A. (2014): ANSICHT FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD - Dokumentation - (Anlage zum Bericht). – DBE Technology GmbH, TEC-22-2014-AP Technischer Bericht; Peine.
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mru-galla, S., Popp, T., Rübel, A. & Weber, J.R. (2012): FEP-Katalog für die VSG - Dokumentation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 7, GRS-283, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG); Köln.

55 Metallversprödung durch Strahlung

NEA-Gruppe: 2.3.6 *Radiological processes [waste package]*

55.1 Definition/Kurzbeschreibung

Durch ionisierende Strahlung werden Materialgefüge beeinträchtigt, so dass es in der Folge zu einer Versprödung der Metalle kommen kann.

55.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Metallversprödungen entstehen durch Änderungen der chemischen Bindung zwischen den Atomen eines Stoffes, durch Verlagerung der Atome durch Kernstöße im Atomverband oder durch Kernreaktionen mit Umwandlungen. Der Umfang der Schädigung des Materials ist von der Intensität und der Strahlungsart abhängig (Vogt & Schultz 2004). Die Intensität der Strahlung wird vor allem von den kurzlebigen Radionukliden bestimmt.

55.3 Prozessbeschreibung

Bei der Bewertung einer Metallversprödung durch Strahlung im Nahfeld eines Endlagers sind hauptsächlich die Metalle der Behälter, der Abfallmatrices und geotechnischer Einrichtungen wie Bohrlochliner zu betrachten (Bertrams et al. 2017, Stark et al. 2014, Wolf et al. 2012).

1. Sekundärbehälterkörper, Primär- und Sekundärdeckel der BSK-Cu bestehen aus Feinkornbaustahl (15MnNi6.3, Werkstoff 1.6210). Behälter und Sekundärdeckel haben eine 5 cm dicke Kupferummantelung.
2. Die Primärbehälter (CSD-V, CSD-B und CSD-C) bestehen aus Edelstahl (Werkstoff 1.4833).
3. In den BSK-Cu verwendete Brennelement-Büchsen bestehen aus Edelstahl (Werkstoff 1.4541).
4. Von der Materialversprödung durch Strahlung können auch das Zircaloy der Hüllrohre der abgebrannten Kernbrennstoffe und die Strukturteile der Brennelemente (Werkstoffe 1.451, 1.4568, 1.4571, Inc 717, Inc X-750) betroffen sein.

Für die Metalle der Behälter und der Abfallmatrices ist im wesentlichen Gamma-Strahlung zu betrachten, da Alpha- und Beta-Strahlung durch die Abfallmatrix zu einem Großteil abgeschirmt werden. Die Versprödung durch Strahlungseffekte spielt eine untergeordnete Rolle, da in deren Umgebung elektrochemische Effekte (siehe FEP „Metallkorrosion“) und die Versprödung durch Wasserstoff (siehe FEP „Metallversprödung durch Wasserstoffaufnahme“) dominieren. Strahlungseffekte auf die Glasmatrix der Abfälle werden im FEP „Alteration der Glasmatrix“ behandelt.

55.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

Allerdings nimmt die Intensität der Gamma-Strahlung aufgrund des Zerfalls der kurzlebigen Radionuklide innerhalb von tausend Jahren um Größenordnungen ab.

55.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Die Metalle der Endlagerbehälter befinden sich in nur einem geringen Abstand zur Strahlungsquelle der Abfälle. Ein geringer Effekt der Strahlung auf die Behälter ist dadurch zu erwarten.

55.6 Ungewissheiten

- Wie groß ist die Veränderung der Festigkeit der Materialien und welche Auswirkungen hat sie unter der Randbedingung einer Behälterlebensdauer von 1 Million Jahren?

55.7 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Stark, L., Gerardi, J., Jahn, S., Jobmann, M., Keller, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mru-galla, S., Reinhold, K. & Rübel, A. (2014): ANSICHT FEP-Katalog für das Endlager-standortmodell NORD - Dokumentation - (Anlage zum Bericht). – DBE Technology GmbH, TEC-22-2014-AP Technischer Bericht; Peine.
- Vogt, H.-G. & Schultz, H. (2004): Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. – 3. Auflage: 585 S., 158 Abb., 56 Tab., 76 Diagr.; München (Hanser).
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mru-galla, S., Popp, T., Rübel, A. & Weber, J.R. (2012): FEP-Katalog für die VSG - Doku-mentation. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 7, GRS-283, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG); Köln.

56 Alteration von Bentonit

NEA-Gruppe: 3.2.4 *Chemical processes [repository]*

56.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Alteration von Bentonit beschreibt die mineralogischen und chemischen Veränderungen von Bentoniten im Versatzmaterial, Verschlussbauwerken und Abdichtungen der Erkundungsbohrungen und wird durch veränderte hydrochemische und thermische Umgebungsbedingungen über die Zeit beeinflusst.

56.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Im Folgenden wird angenommen, dass Bentonit aus Smektiten als Hauptbestandteil und aus Quarz, Glimmer, Kaolinit, Feldspat und Calcit als Nebenbestandteil zusammengesetzt ist (Ufer et al. 2008).

Bei Temperaturen über ca. 60°C kann die Smektit-Illit-Reaktion quellfähige Smektite in nicht-quellfähige Illite innerhalb geologischer Zeiträume umwandeln. Diese Reaktion schreitet in Bentonit-Formationen während ihrer diagenetischen Versenkungsgeschichte deutlich langsamer als in Tongesteinen voran, so dass die Smektit-reiche Phase (mit der so genannten R0-Ordnung) der Bentonite erst bei einer Temperatur von ca. 150°C verlorengelht und sich der Anteil der Smektit-Schichten in der dann entstandenen Illit/Smektit-Wechselagerung der R1- und ggf. R>1-Ordnungen auf ca. 35–50 % reduziert (Šucha 1993). Geringe Mengen (< 5 %) an neugebildetem Illit können die Permeabilität des Tongesteins soweit reduzieren, dass es für Formationsüberdruck anfällig wird (Nadeau et al. 2002).

Der Grund für die Verlangsamung der Smektit-Illit-Reaktion in Bentoniten im Vergleich zu Tongesteinen bleibt eine offene Frage. Es wird einerseits argumentiert, dass das für den Fortschritt der Reaktion notwendige Kaliumangebot in Bentoniten nicht ausreichend ist, so dass die Smektit-Illit-Reaktion durch die langsame Kaliumdiffusion von außerhalb der Formation gehemmt wird (Sródón 1999). Andererseits wird am Beispiel des Nankai-Grabens, in dem sich Bentonite und Tongesteine unter gleichen geologischen Bedingungen diagenetisch entwickelt haben, argumentiert, dass das Vorhandensein der Organik in Tongesteinen im Unterschied zu organikarmen Bentoniten der Hauptgrund für die Verlangsamung der Smektit-Illit-Reaktion in Bentoniten sein kann (Masuda et al. 2001).

Erhöhte Salinität im Zusammenspiel mit der erhöhten Temperatur wurde als ein weiterer beschleunigender Einflussfaktor auf die Smektit-Illit-Reaktion in der Untersuchung einer Bentonit-Formation in der Slowakei erkannt (Honty et al. 2004). Der Smektit-Anteil der salzhaltigen (Chlorid-Gehalt von 0,1 bis 0,16 M) Bentonite betrug lediglich 10–25 % (mit der R1- und R3-Ordnung), während der Smektit-Anteil der salzfreien (Chlorid-Gehalt von 0,015 bis 0,04 M) Bentonite mit 35–68 % (mit der R0- bzw. R1-Ordnung) deutlich höher ausfiel. Diese Unterschiede traten nur in Bentoniten auf, die während der Diagenese Temperaturen von über etwa 80°C ausgesetzt waren. Dabei zeigten die oberflächennahen Proben ähnliche Smektit-Anteile in salzhaltigen und salzfreien Bentoniten, was auf einen kombinierten Einfluss der Salinität und der Temperatur hinweist (Honty et al. 2004). Der R1→R3-Übergang mit einem Smektit-Anteil von unter 15 % der I/S-Wechselagerung findet laut Literaturangaben bei 150–190°C statt (Pollastro 1993).

Smektit-Illit- und Kaolinit-Illit-Reaktionen sind die Tonmineralreaktionen, die erhebliche Mengen an Siliciumdioxid – bis zu 30 % der Tonmineralmasse – freisetzen (Peltonen et al. 2009,

Thyberg & Jahren 2011). Im Temperaturbereich von 60–80°C präzipitiert dieses zu mikrokristallinem Quarz (Peltonen et al. 2009, Thyberg & Jahren 2011). Ab einer Temperatur von ca. 85°C wird die Bildung von verbundenen Netzwerken aus mikrokristallinem Quarz an den Kontaktflächen der Tonkörner – die Quarz-Zementation – begünstigt (Peltonen et al. 2009, Thyberg & Jahren 2011). Bis ca. 130°C überwiegen noch die Tonmineral-Tonmineral-Kornkontakte im Tongestein (Goultly et al. 2016). Ab einer Temperatur von ca. 150°C können im Tongestein horizontale, nahezu durchgehende Schichten von Quarz gebildet werden (Thyberg & Jahren 2011).

Die Reaktion von Bentoniten mit flüssigem Wasser und Wasserdampf bei Temperaturen von > 150°C kann zu einer erheblichen und irreversiblen Abnahme des Sedimentationsvolumens – eines indirekten Maßes für osmotische Quellsfähigkeit im ungespannten Zustand – führen (Couture 1985a, Oscarson & Dixon 1989, Cuevas et al. 2001, Heuser et al. 2014). Auch für einen kompaktierten Bentonit wurde eine Abnahme des Quelldruckes um 35–45 % nach Behandlung mit Wasserdampf bei 150°C beobachtet (Madsen 1998). Die innerkristalline Quellsfähigkeit der Bentonite wird dabei nicht beeinträchtigt (Couture 1985a, Couture 1985b). Als ein Mechanismus für diese Beobachtung wurde die Quarz-Zementation von Tonmineralteilchen vorgeschlagen (Wersin et al. 2007). Nach einem alternativen Mechanismus führt eine Erhitzung auf $\geq 150^\circ\text{C}$ zu einem partiellen oder vollständigen Verlust des Hydratationswassers der austauschbaren Kationen an Tonmineraloberflächen (Ouhadi et al. 2010). Dieser Verlust resultiert in einem Anstieg der Ionenkonzentration, einer entsprechenden Abnahme der Dicke der diffusen Doppelschicht an Tonmineralteilchen und der Abstoßung zwischen denen und damit zu einer Minderung der osmotischen Quellsfähigkeit.

In einem vierjährigen und einem 15-jährigen Versuch im Tournemire Tunnel wurde keine Alteration von Tonmineralen im Kontakt mit Zement festgestellt (Gaboreau et al. 2011 und 2012, Techer et al. 2012). Laborversuche mit Bentoniten und Calciumhydroxid-Lösungen bei $\text{pH} < 12$ und Temperaturen $< 90^\circ\text{C}$ bestätigten die hohe Stabilität von Tonmineralen im Kontakt mit Zementphasen (Kaufhold & Dohrmann 2011). Eine weitere Bestätigung kommt aus einer Naturanalogie-Studie der Parsata Bentonite auf Zypern, die nach 100.000 Jahren Kontakt mit alkalischen Wässern bei $\text{pH} 10\text{--}12$ nur eine geringfügige Alteration einer dünnen Bentonit-Grenzschicht aufwiesen (Alexander et al. 2012).

Ob eine nicht vernachlässigbare Korrosion von Kupfer im anoxischen Wasser zustande kommt, ist aktuell höchst umstritten (Åkermark 2013, Cleveland et al. 2014 und 2016, Hedin et al. 2018), wobei sich zunehmend die experimentell gestützte Ansicht durchsetzt, dass sie zu berücksichtigen ist (He et al. 2018). Entsprechend dem unzureichenden Stand des Wissens stellt der Einfluss dieser Korrosion auf Bentonit eine kaum erforschte Frage dar. Das Auftreten der strahlungsinduzierten Kupferkorrosion durch anoxisches Wasser scheint hingegen unumstritten zu sein (Björkbacka et al. 2017). Zwar reduziert die ionisierende Strahlung die Fähigkeit des Bentonits Cu^{2+} zu sorbieren (Norrfors et al. 2018), was teilweise einem Verlust der Al-OH Gruppen in der Tonmineralstruktur zugeschrieben wird, inwieweit aber die Kupferkorrosion Bentonit beeinflusst bleibt unklar. Für die Korrosion von Kupfer durch Sulfide, die als akzessorische Minerale in Bentoniten vorhanden sein können, wurden nach fünfmonatiger Reaktion bei 90°C unter anoxischen Bedingungen keine Neubildungen im Bentonit nachgewiesen, obwohl die Korrosionsprodukte an den Kupferpellets eine Abhängigkeit vom Bentonit-Typ zeigten (Kaufhold et al. 2017b). Der Grund für diese Abhängigkeit ist unbekannt und die Frage nach Beeinflussung der Bentonite durch sulfidinduzierte Kupferkorrosion konnte nicht abschließend beantwortet werden.

Versuche mit Eisen in Kontakt mit einem auf eine Trockendichte von 1.800 kg/m^3 kompaktierten Kunipia-Bentonit bei einem Ton/Lösung-Massenverhältnis von 2 und einer Temperatur von 80°C unter anoxischen Bedingungen haben innerhalb von zehn Jahren keine nennenswerten Mineralumwandlungen gezeigt (Ueno et al. 2011). Bei in situ Versuchen mit den auf eine Trockendichte von bis zu 2000 kg/m^3 kompaktierten Bentoniten in Kontakt mit einem beheizten

Stahlrohr wurden nach einem Jahr bei 130°C (Kaufhold et al. 2013, Sasamoto et al. 2017) und nach bis zu vier Jahren bei 130–141°C (Kaufhold et al. 2017a) unter zumindest teilweisen anoxischen Bedingungen sowie nach sieben Jahren bei 150°C unter oxidierenden Bedingungen (Svensson & Hansen 2013) ebenfalls keine nennenswerten Mineralumwandlungen festgestellt.

Geochemische Simulationen für das französische Endlagerkonzept zeigen, dass eine Wechselwirkung zwischen einem Na-Bentonit-Dichtelement und korrodierenden Stahlbehältern zu einer Umsetzung von bis zu 100 % der Montmorillonite innerhalb einer Bentonitschicht von ca. 2,5 cm nach 10.000 Jahren führen kann (Marty et al. 2010). Jedoch sagt das verwendete thermodynamische Modell voraus, dass dieser Montmorillonitabbau zumindest teilweise – bis zu ca. 50 % des ursprünglichen Montmorillonitgehalts durch neu gebildete quellfähige Saponite kompensiert wird. Außerdem bleibt die Dicke der alterierten Schicht innerhalb der nachfolgenden 90.000 Jahre aufgrund einer starken alterationsbedingten Porositätsabnahme nahezu unverändert.

56.3 Prozessbeschreibung

Der Prozess findet im Bentonit des Streckenversatzes, der Verschlussbauwerke und der Dichtungen der Erkundungsbohrungen statt.

Bentonite in Bohrlochverschlüssen und ggf. im Versatz können während des auf einige tausend Jahre begrenzten Temperaturimpulses bei Temperaturen > 150°C – bei Chlorid-Konzentrationen von > 0,1 M jedoch bereits bei 80°C – die Smektit-Illit-Reaktion eingehen, so dass quellfähige Montmorillonite zu einem von der Temperatur, Zeit und Kalium- sowie Organik-Angebot abhängenden Anteil in nicht-quellfähige Illite umgewandelt werden. Das aus dieser Reaktion stammende Siliciumdioxid kann zu einer zunehmenden Quarz-Zementation der Bentonite ab einer Temperatur von ca. 85°C führen, die die Oberflächeneigenschaften im Bentonit ab ca. 130°C dominierend (Quarz-Quarz-Kornkontakte überwiegen die Tonmineral-Tonmineral-Kornkontakte) prägt. Bei Temperaturen > 150°C kann die Wechselwirkung mit Wasser eine erhebliche Reduktion der osmotischen Quellfähigkeit des Bentonit-Mehls verursachen. Ob ein ähnlicher Effekt auch für den kompaktierten Bentonit relevant ist, bleibt zu erforschen.

Es werden sowohl Beton als auch eisen- und kupferhaltige Materialien im Endlager verbaut (Jobmann & Burlaka 2021). Die Freisetzung der alkalischen Wässer aus dem Beton und des Eisens aus der Korrosion von Metallen werden nur zu einer auf wenige cm begrenzte Alteration in angrenzenden kompaktierten Bentoniten führen. Die Korrosion von Kupfer könnte ggf. auch zu einer vergleichbaren Alteration führen, jedoch bedarf eine begründete Aussage diesbezüglich weiterer Forschung.

56.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

56.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Es werden tonmineralhaltige Materialien im Endlager verbaut. Daher ist dieser Prozess wahrscheinlich.

56.6 Ungewissheiten

- Der Grund für die Verlangsamung der Smektit-Illit-Reaktion in Bentoniten im Vergleich zu Tongesteinen sowie für den Einfluss der Organik und der erhöhten Salinität auf die Smektit-Illit-Reaktion bleibt eine offene Frage.
- Die Auswirkungen des Asphalt-Bentonit-Kontaktes in Verschlussbauwerken auf die Alteration von Bentonit sind noch zu klären.
- Der Mechanismus der beobachteten Abnahme des Sedimentationsvolumens des Bentonit-Pulvers und des Quelldruckes des kompaktierten Bentonits durch Wechselwirkung mit Wasserdampf bei Temperaturen > 150°C stellt eine offene Frage dar.
- Der Einfluss der Kupferkorrosion ggf. mit Berücksichtigung von deren Modifikation durch Strahlung und gelöstes Sulfid im anoxischen Wasser auf Bentonit ist bis jetzt kaum erforscht und es bleibt unklar, ob dieser Einfluss ähnlich wie im Fall von Eisenkorrosion vernachlässigt werden kann.

56.7 Literaturquellen

- Åkermark, T. (2013): Some scientific considerations on the article: 'Scientific basis for corrosion of copper in water and implications for canister lifetimes' published by F. King and C. Lilja. – Corrosion Engineering, Science and Technology 48, 475-476.
- Alexander, R., Milodowski, A.E., Pitty, A.F., Hardie, S.M.L., Kemp, S.J., Korkeakoski, P., Rigas, M., Rushton, J.C., Sellin, P. & Tweed, C.J. (2012): Reaction of bentonite in low-alkali cement leachates: an overview of the Cyprus Natural Analogue Project (CNAP). – Mineralogical Magazine 76, 3019-3022.
- Björkbacka, Å., Johnson, C.M., Leygraf, C., & Jonsson, M. (2017): Radiation induced corrosion of copper in humid air and argon atmospheres. – Journal of The Electrochemical Society, 164, C201-C206.
- Cleveland, C., Moghaddam, S., & Orazem, M.E. (2014): Nanometer-scale corrosion of copper in de-aerated deionized water. – Journal of The Electrochemical Society 161, C107-C114.
- Cleveland, C., Orazem, M.E., & Moghaddam, S. (2016): Response to "Comment on Nanometer-Scale Corrosion of Copper in De-Aerated Deionized Water" [J. Electrochem. Soc. 161, C107 (2014)]. – Journal of The Electrochemical Society 163, Y5-Y11.
- Couture, R.A. (1985a): Steam rapidly reduces the swelling capacity of bentonite. – Nature, 318, 50–52.
- Couture, R.A. (1985b): Rapid increases in permeability and porosity of bentonite-sand mixtures due to alteration by water vapor. (In: Jantzen, C.M., Stone, J.A., & Ewing, R.C. [des.]: Scientific Basis for Nuclear Waste Management VIII). – Materials Research Society: 515–522; Pittsburg.
- Cuevas, J., Garralón, A., Ramírez, S., Leguey, S. (2001): Hydrothermal alteration of a sapo-nitic bentonite, Mineral reactivity and evolution of surface properties. – Clay Minerals 36: 61–74.
- Gaboreau, S., Prêt, D., Tinseau, E., Claret, F., Pellegrini, D. & Stammose, D. (2011): 15 years of in situ cement–argillite interaction from Tournemire URL: Characterisation of the multi-scale spatial heterogeneities of pore space evolution. – Applied Geochemistry 26: 2159-2171.
- Gaboreau, S., Lerouge, C., Dewonck, S., Linard, Y., Bourbon, X., Fialips, C.I., Mazurier, A., Prêt, D., Borschneck, D., Montouillout, V., Gaucher, E.C. & Claret, F. (2012): In-situ interaction of cement paste and shotcrete with claystones in a deep disposal context. – American Journal of Science 312: 314-356.
- Goult, N. R., Sargent, C., Andras, P., Aplin, A. C. (2016): Compaction of diagenetically altered mudstones – Part 1, Mechanical and chemical contributions. – Marine and Petroleum Geology 77: 703–713.

- He, X., Ahn, T., & Gwo, J.P. (2018): Corrosion of Copper as a Nuclear Waste Container Material in Simulated Anoxic Granitic Groundwater. – *Corrosion* 74, 158-168.
- Hedin, A., Johansson, A.J., Lilja, C., Boman, M., Berastegui, P., Berger, R., & Ottosson, M. (2018): Corrosion of copper in pure O₂-free water? – *Corrosion Science* 137, 1-12.
- Heuser, M., Weber, C., Stanjek, H., Chen, H., Jordan, G., Schmahl, W.W. & Natzeck, C. (2014): The interaction between bentonite and water vapor. I, Examination of physical and chemical properties. – *Clays and Clay Minerals* 62: 188–202.
- Honty, M., Uhlík, P., Sucha, V., Caplovicova, M., Franců, J. & Biron, A. (2004): Smectite-to-illite alteration in salt-bearing bentonites (the East Slovak Basin). – *Clays and Clay minerals* 52: 533–551.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallinegestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Kaufhold, S. & Dohrmann, R. (2011): Stability of bentonites in salt solutions III - calcium hydroxide. – *Applied Clay Science* 51: 300-307.
- Kaufhold, S., Dohrmann, R., Sandén, T., Sellin, P. & Svensson, D. (2013): Mineralogical investigations of the first package of the alternative buffer material test, I. Alteration of bentonites. – *Clay Minerals* 48: 199–213.
- Kaufhold, S., Dohrmann, R., Götze, N. & Svensson, D. (2017a): Characterization of the second parcel of the alternative buffer material (ABM) Experiment – I mineralogical reactions. – *Clays and Clay Minerals* 65: 27–41.
- Kaufhold, S., Dohrmann, R. & Gröger-Trampe, J. (2017b): Reaction of native copper in contact with pyrite and bentonite in anaerobic water at elevated temperature. – *Corrosion Engineering, Science and Technology* 52: 349-358.
- Madsen, F.T. (1998): Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. – *Clay Minerals* 33: 109-129.
- Marty, N.C.M., Fritz, B., Clément, A. & Michau, N. (2010): Modelling the long term alteration of the engineered bentonite barrier in an underground radioactive waste repository. – *Applied Clay Science* 47: 82-90.
- Masuda, H., Peacor, D.R. & Dong, H. (2001): Transmission electron microscopy study of conversion of smectite to illite in mudstones of the Nankai Trough: contrast with coeval bentonites. – *Clays and Clay Minerals* 49: 109-118.
- Nadeau, P.H., Peacor, D.R., Yan, J. & Hillier, S. (2002): I-S precipitation in pore space as the cause of geopressuring in Mesozoic mudstones, Egersund Basin, Norwegian continental shelf. – *American Mineralogist* 87: 1580-1589.
- Norrfors, K.K., Björkbacka, Å., Kessler, A., Wold, S., & Jonsson, M. (2018): γ -radiation induced corrosion of copper in bentonite-water systems under anaerobic conditions. – *Radiation Physics and Chemistry* 144: 8-12.
- Oscarson, D.W. & Dixon, D.A. (1989): The effect of steam on montmorillonite. – *Applied Clay Science* 4: 279–292.
- Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Goodarzi, A.R. & Safari-Zanjani, M. (2010): Effect of temperature on the re-structuring of the microstructure and geo-environmental behavior of smectite. – *Applied Clay Science*, 47: 2–9.
- Peltonen, C., Marcussen, Ø., Bjørlykke, K. & Jahren, J. (2009): Clay mineral diagenesis and quartz cementation in mudstones, The effects of smectite to illite reaction on rock properties. – *Marine and Petroleum Geology* 26: 887–898.
- Pollastro, R.M. (1993): Considerations and Applications of the Illite/Smectite Geothermometer in Hydrocarbon-Bearing Rocks of Miocene to Mississippian Age. – *Clays and Clay Minerals* 41: 119–133.
- Sasamoto, H., Isogai, T., Kikuchi, H., Satoh, H. & Svensson, D. (2017): Mineralogical, physical and chemical investigation of compacted Kunigel V1 bentonite in contact with a steel heater in the ABM test package 1 experiment, Äspö laboratory, Sweden. – *Clay Minerals* 52: 127–141.
- Sródón, J. (1999): Use of clay minerals in reconstructing geological processes: recent advances and some perspectives. – *Clay Minerals* 34: 27-37.

- Šucha, V. (1993): Smectite to Illite Conversion in Bentonites and Shales of the East Slovak Basin. – *Clay Minerals* 28: 243–253.
- Svensson, P.D. & Hansen, S. (2013): Redox Chemistry in Two Iron-Bentonite Field Experiments at Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden, An XRD and Fe K-Edge XANES Study. – *Clays and Clay Minerals* 61: 566–579.
- Techer, I., Bartier, D., Boulvais, P., Tinseau, E., Suchorski, K., Cabrera, J. & Devol-Brown, I. (2012): Tracing interactions between natural argillites and hyper-alkaline fluids from engineered cement paste and concrete: chemical and isotopic monitoring of a 15-years old deep-disposal analogue. – *Applied Geochemistry* 27: 1384-1402.
- Thyberg, B. & Jahren, J. (2011): Quartz cementation in mudstones, Sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial. – *Petroleum Geoscience* 17: 53–63.
- Ueno, K., Suyama, T., Ishidera, T. & Sato, T. (2011): Ten-Year interaction of carbon steel coupon and compacted bentonites. – *Clay Science* 15: 89–102.
- Ufer, K., Stanjek, H., Roth, G., Dohrmann, R., Kleeberg, R., & Kaufhold, S. (2008): Quantitative phase analysis of bentonites by the Rietveld method. – *Clays and Clay Minerals* 56: 272–282.
- Wersin, P., Johnson, L.H. & McKinley, I.G. (2007): Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review. – *Physics and Chemistry of the Earth* 32: 780-788.

57 Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen

NEA-Gruppe: 3.2.4 *Chemical processes [repository]*
 4.2.4 *Chemical processes [geosphere]*

57.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen beschreibt die mineralogischen und chemischen Veränderungen von Mineralen, einschließlich der Veränderungen während der Diagenese, im Wirtsgestein, Klüften und Rissen, Deckgebirge, Auflockerungszone und Ausbruchsmaterial (Versatz) und wird durch veränderte hydrochemische und thermische Umgebungsbedingungen über die Zeit beeinflusst.

Die Alteration von Bentonit wird in einem eigenen FEP beschrieben.

57.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Im Folgenden werden hydrothermale Alterationsprozesse für Granit-, Diorit- und Gneis-bildende Minerale (Na, Ca)-Feldspat (Plagioklase mit Endgliedern Albit und Anorthit), (K, Na)-Feldspat (Alkalifeldspäte mit Endgliedern Orthoklas/Mikroklin und Albit), Biotit, Quarz und Amphibole (z. B. Hornblende) beschrieben.

Albitisierung von Plagioklasen und Alkalifeldspäten ist eine der häufigsten und charakteristischen hydrothermalen Alterationsreaktion der oberen Erdkruste und ist ausreichend schnell, um sogar im Labor untersucht zu werden. In granitischen Gesteinen in Simpevarp und Laxemar in Schweden wurde eine progressive Alteration von Mikroklin zu Oligoklas und dann Oligoklas zu Albit nachgewiesen (Plümpner & Putnis 2009). Da das Molarrvolumen von Oligoklas um 8 % geringer ist als das von Mikroklin, wird bei der ersten Reaktion Porosität generiert. In den so entstandenen Mikrometer-großen Poren bildet sich bei der letzten Reaktion feinkörniges Muskovit (Serizit). Die Bildung von Serizit wird als eines der häufigsten Produkte der hydrothermalen Alteration von Graniten betrachtet (Plümpner & Putnis 2009). Die Transformation von Oligoklas zu Albit fand in granitischen Gesteinen in Simpevarp und Laxemar entlang von intragranularen Mikrorissen statt und verdeutlicht die Bedeutung dieses Fluid-Infiltrationspfades für den Ablauf der Alteration. Die Albitisierung wurde durch eine Transformation von Biotit zu Chlorit und eine Zersetzung von Hornblende mit einer vermutlichen Fe-Freisetzung begleitet. Zu einem späteren Zeitpunkt führte eine Kluftebildung in den so alterierten granitischen Gesteinen zu einem Abfall vom lithostatischen zum hydrostatischen Druck, der eine Kalifeldspat-Bildung aus Serizit und Quarz sowie eine Hämatit-Präzipitation begünstigte (Plümpner & Putnis 2009).

Auf sehr ähnliche Weise infiltrierten 320–350°C heiße hydrothermale Fluide aus Klüften im Naegi-Agematsu Granit in Japan durch Mikrorisse im Gestein, was zu einer teilweisen Auflösung von Plagioklasen und einer teilweisen Transformation von Biotit zu Chlorit führte (Nishimoto & Yoshida 2010). In den dadurch entstandenen Poren wurde Biotit aufgelöst und Fe-Phyllosilikate (Chlorit, Corrensit und Smektit) präzipitierten unter reduzierenden Bedingungen. Anschließend lösten sich Kalifeldspat und Fe-Phyllosilikate auf und es erfolgte eine Präzipitation von Illit und Quarz, die zu einer weiteren Mikrorissbildung führte. Weder die Bildung von Kaolinit, die auf saure Bedingungen im hydrothermalen Fluid hinweisen würde, noch die von Calcit, die unter alkalischen Bedingungen stattfindet, wurden beobachtet. Die auf diese Weise entstandenen kompaktierten Illit verfüllten Klüfte blieben bei Temperaturen von unter 200°C seit etwa 60 Millionen Jahren stabil (Nishimoto & Yoshida 2010).

Ein Illit mit einer Symmetrie von 2M1 bildet sich in Granit in der Regel bei $> 280^{\circ}\text{C}$ aus der hydrothermalen Alteration von Feldspat und Biotit, wohingegen ein 1 Md Illit bei 60 bis 180°C aus der durch eine Scherdeformation begleiteten hydrothermalen Alteration von Kalifeldspat oder aus einer Transformation von 2M1 Illit gebildet werden kann (Niwa et al. 2016). Smekтите können sich in Granit bei einer oberflächennahen hydrothermalen Alteration unter etwa 135°C bilden, während Kaolinite bei $< 120^{\circ}\text{C}$, hohen Fluid/Gestein-Verhältnissen und für meteorische Wässer charakteristischen sauren Bedingungen gebildet werden (Niwa et al. 2016).

Anorthit, das Ca-Endglied der Plagioklase, ist bei einem Kontakt mit hydrothermalen Wässern bei Temperaturen unter 250°C instabil und kann in einer Reaktion unter Quarz-Verbrauch zu einem Ca-Zeolith Laumontit bei $150\text{--}250^{\circ}\text{C}$ und einem Ca-Zeolith Stilbit bei $< 120^{\circ}\text{C}$ alterieren, so dass eine Albitisierung der Plagioklase zustande kommt (Stober & Bucher 2015). Diese Albitisierung und Ca-Zeolith-Bildung konnte bis zu 15 Vol.-% Porosität in geklüfteten Graniten in den Alpen generieren (Stober & Bucher 2015). Die hydrothermale Albitisierung wird in der Regel durch eine teilweise Auflösung von Quarz begleitet (Kaur et al. 2012). Jedoch beschreibt die vorgenannte Studie mit Graniten in Rajasthan (Indien) ein Beispiel, bei dem sowohl die Oligoklas-Albit- als auch die etwas langsamere Mikroklin-Albit-Transformation aufgrund eines Kontaktes mit meteorischen Wässern bei $350\text{--}400^{\circ}\text{C}$ in einer Quarz-Bildung resultierte.

Die hydrothermale Transformation von Biotit zu Chlorit findet in einem breiten Temperaturbereich unter etwa 400°C statt (Yuguchi et al. 2015). Die Studie unterscheidet dabei zwischen zwei Mechanismen für Toki Granit in Japan. Bei der Transformation von Biotit zu Chlorit nach dem ersten Mechanismus reduziert sich das Feststoffvolumen um 6 bis 20 % und große Mengen an Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} und Mg^{2+} werden aus dem hydrothermalen Fluid für die Bildung des Chlorits verbraucht. Nach diesem Mechanismus wurden mehr als 85 % der Chlorite im Toki Granit gebildet. Nach dem zweiten Mechanismus reduziert sich das Feststoffvolumen um 27 bis 63 % und keine oder sehr geringe Mengen an Metallionen werden aus dem hydrothermalen Fluid verbraucht. Für die Dominanz eines der beiden Mechanismen ist nach Yuguchi et al. (2015) die Verfügbarkeit von Metallionen im hydrothermalen Fluid entscheidend. Die entstandene Porosität wird im Toki Granit durch Titanit, Ilmenite, K-Feldspat und Fluorit gefüllt. Bei Temperaturen von 350 bis 290°C wurde dort Biotit vollständig durch Chlorit ersetzt, während bei Temperaturen von 350 bis 180°C nur eine teilweise Transformation von Biotit zu Chlorit erfolgte.

Eine hydrothermale Reaktion mit meteorischen Wässern bei Fluid/Gestein-Verhältnissen von $> 0,8$ führte bei einer Abkühlung der Granite im südlichen Schwarzwald von 500°C auf 200°C (bei Drucken von 1 bis 2 kbar) zu einer Biotit-Alteration zu Chlorit im höheren Temperaturbereich und zu Muskovit im niedrigeren Temperaturbereich, während Feldspäte im gesamten Temperaturbereich alteriert wurden (Simon 1990).

Im oberen 1 km des kristallinen Gesteins in Forsmark führte die hydrothermale Alteration in Klüften zur Bildung von

- Epidot, Chlorit und Quarz bei $> 150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ im ältesten dokumentierten Alterationsereignis,
- Kalifeldspat, Albit, Prehnit, Laumontit, Calcit und Chlorit bei etwa 200°C , oxidierenden (Anwesenheit von Hämatit) sowie alkalischen Bedingungen und einer niedrigen Salinität in einem späteren Ereignis,
- Quarz und Pyrit bei 60 bis 190°C sowie Calcite bei 60 bis 100°C und einer Salinität von 15 bis 20 % und
- Tonmineralen, Calcit sowie in geringfügigen Mengen Pyrit und Goethit bei $< 50^{\circ}\text{C}$ (Sandström & Tullborg 2009).

Im Vergleich zum pH 7 erhöht sich die Lösungsrate des Quarzes beim pH von 13 um etwa zwei bis drei Größenordnungen (Berger et al. 1994). Eine Auflösung von Quarz und Feldspat

durch Wechselwirkung mit Zementwässern führt zu einer Ausfällung von Calcium-Silicat-Hydraten bzw. Calcium-Aluminium-Silicat-Hydraten, während Mg unter solchen Bedingungen meist in Mg-Chloriten mit Brucit-Zwischenschichten aufgefangen wird (Gaucher & Blanc 2006). Die Lösungsrate der Feldspäte kann durch niedrigmolekulare organische Säuren um eine bis zwei Größenordnungen auch bei hohen NaCl-Konzentrationen erhöht werden (Blake & Walter 1999).

Calcit ist mit Gehalten von 0,028 bis 18,8 g/kg Gestein und einem Mittelwert von 2,52 g/kg allgegenwärtig im granitischen Gestein und kommt in Form von isolierten xenomorphen Kristallen, Kluft- und Hohlraumfüllungen sowie serizitierten Kernen der Plagioklase vor (White et al. 2005). Calcit-Auflösungsraten sind laut letzter Arbeit um sechs Größenordnungen höher als die von Silikatmineralen. Untersuchungen für Sedimentformationen (Coudrain-Ribstein et al. 1998) zeigen, dass bei Temperaturen von bis zu 200°C die partiellen CO₂-Drucke von bis zu 130 bar durch die Zersetzung von Calcit und Dolomit in Anwesenheit von einem Mg-Al-Silikat, wie z. B. Chlorit, zusammen mit anderen Silikat- bzw. Tonmineralen (Ceriotti et al. 2017), wie Smektit, Kaolinit, Feldspat oder Quarz, entstehen können. Die Karbonat-Zersetzungsreaktion kommt laut dem aktuellen Stand des Wissens durch die Silikat-Hydrolyse zustande und resultiert in einer CO₂-Freisetzung, die weit über der aus der Organik liegt (Hutcheon et al. 1990, Hutcheon & Abercrombie 1990, Ceriotti et al. 2017). Diese Reaktion kann nur bei Temperaturen unterhalb von 50°C vernachlässigt werden, gewinnt an Bedeutung bei höheren Temperaturen und dominiert über eine mögliche Karbonat-Präzipitation ab etwa 100°C (Smith & Ehrenberg 1989, Ceriotti et al. 2017).

Pyritoxidation, die in einem Tonstein mit 1 bis 5 Gew.-% an Pyrit bis zu 1 m ins Gestein reichen kann (De Craen et al. 2008), führt zunächst zur Bildung von Eisensulfiden als Übergangsphasen und schließlich zum Endprodukt Goethit (Huggins et al. 1983). Bei einem engen Kontakt zwischen Pyrit und Calcit (insbesondere bei fehlender Wassersättigung) kann auch Gips entstehen (Huggins et al. 1983). Pyritoxidation unter sauerstofffreien Bedingungen infolge einer Wechselwirkung mit Hydroxylradikalen – Produkten der Wasserradiolyse – führt zu einer Produktion des gelösten Sulfats und des molekularen Wasserstoffs (2 Mol H₂ per Mol Sulfat) (Lefiticariu et al. 2010). Die Produktion von Sulfat korreliert dabei mit der Dosis ionisierender Strahlung.

Pyritoxidation kann z. B. bei einer Temperatur von 85°C den pH-Wert der Lösung innerhalb von 200 Tagen von ursprünglich 7,2 auf 4,5 erniedrigen, wie in einem in situ Versuch im Callovo-Oxfordian-Tonstein beobachtet (Necib et al. 2016). Da bei solchen pH-Werten die Korrosionsraten der Abfallbehälter erheblich ansteigen, wurde das französische Endlagerkonzept durch Zugabe eines alkalischen Zement-Bentonit-Mörtels zwischen den Behältern und dem Wirtsgestein modifiziert (Necib et al. 2016). Im Fall von Relevanz der thermochemischen Sulfatreduktion, kann eine aufgrund von Pyritoxidation erhöhte Sulfatkonzentration zu einer erhöhten Bildung von Hydrogensulfid führen, welches die Metallkorrosion fördert. Sulfat kann außerdem eine beschleunigte Korrosion von Materialien mit Zementphasen verursachen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Alteration von Granit, Diorit und Gneis zusätzlich zu deren bildenden Mineralen am häufigsten noch folgende Minerale entstehen können: Epidot, Muskovit/Serizit, Chlorit, Illit, Smektit, Kaolinit (saure Bedingungen), Calcit (alkalische Bedingungen), Stilbit, Laumontit, Prehnit, Titanit, Hämatit (oxidierende Bedingungen) und Pyrit (reduzierende Bedingungen). Von diesen Mineralen werden in (Nishimoto & Yoshida 2010) Calcit, Laumontit, Chlorite, Epidot und Prehnite zusammen mit Quarz als die häufigsten Kluftfüllungsminerale angegeben.

57.3 Prozessbeschreibung

Minerale werden im Wirtsgestein, Versatz, Bentonit und Schotter der Verschlussbauwerke vorhanden sein (Jobmann & Burlaka 2021). Als wahrscheinlichste alterationsbestimmende Einflussfaktoren im Endlager können vor allem die Temperatur, der pH, Eh und die Salinität der Lösung, der Sauerstoff in der Betriebsphase und in der frühen Nachverschlussphase sowie die Radiolyse betrachtet werden. Da die Granit-, Diorit- und Gneis-bildenden Minerale sowie die durch die hydrothermale Alteration gebildeten Minerale überwiegend bei Temperaturen weit über 200–300°C entstanden sind, werden sie bei Kontakt mit einer Lösung bei deutlich geringeren Temperaturen als 200°C instabil und entsprechend der für eine Reaktion verfügbaren Lösung umgewandelt. Der Umfang dieser Reaktion ist auch durch den in den Klüften vorhandenen Hohlraum begrenzt.

Calcit-Zersetzung bei erhöhten Temperaturen, wie auch im in-situ Versuch im Callovo-Oxfordian-Tonstein beobachtet (Necib et al. 2016), könnte im Kristallingestein die mit Calcit gefüllten Klüfte ggf. teilweise wieder öffnen.

Radionuklide werden immobilisiert, wenn sie in neugebildete Minerale eingebaut werden. Je nach Löslichkeit der Minerale, können die in Mineralen immobilisierten Radionuklide bei geänderten hydrochemischen Bedingungen wieder freigesetzt werden.

57.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

57.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Sonstige Minerale sind im Wirtsgestein und im Deckgebirge vorhanden und werden im Grubengebäude verbaut. Daher ist dieser Prozess wahrscheinlich.

57.6 Ungewissheiten

- Verwendung von AgCl_3 -Pulver in der Sandverfüllung zwischen dem Behälter und dem Bohrlochliner zur Immobilisierung von $^{129}\text{I}^-$ (im schwerlöslichen AgI_3) und S^- (im schwerlöslichen AgS_3).
- Si-Löslichkeit und die Reichweite der Pyritoxidation im Wirtsgestein.
- Möglichkeit der Calcit-Zersetzung und CO_2 -Freisetzung in den verschlossenen Klüften und im Calcit-haltigen Material der geotechnischen Barrieren bei erhöhten Temperaturen (> 50–100°C).

57.7 Literaturquellen

- Berger, G., Cadore, E., Schott, J. & Dove, P.M. (1994): Dissolution rate of quartz in lead and sodium electrolyte solutions between 25 and 300°C: Effect of the nature of surface complexes and reaction affinity. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58: 541-551.
- Blake, R.E. & Walter, L.M. (1999): Kinetics of feldspar and quartz dissolution at 70–80°C and near-neutral pH: Effects of organic acids and NaCl. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63: 2043–2059.
- Cerioti, G., Porta, G. M., Geloni, C., Dalla Rosa, M., & Guadagnini, A. (2017): Quantification of CO_2 generation in sedimentary basins through carbonate/clays reactions with uncertain thermodynamic parameters. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 213: 198-215.

- Coudrain-Ribstein, A., Gouze, P., & de Marsily, G. (1998): Temperature-carbon dioxide partial pressure trends in confined aquifers. – *Chemical Geology* 145: 73-89.
- De Craen, M., Van Geet, M., Honty, M., Weetjens, E. & Sillen, X. (2008): Extent of oxidation in Boom Clay as a result of excavation and ventilation of the HADES URF: experimental and modelling assessments. – *Physics and Chemistry of the Earth* 33: 350–362.
- Gaucher, E.C. & Blanc, P. (2006): Cement/clay interactions – A review: Experiments, natural analogues, and modeling. – *Waste Management* 26: 776–788.
- Huggins, F.E., Huffman, G.P. & Lin, M.C. (1983): Observations on low-temperature oxidation of minerals in bituminous coals. – *International Journal of Coal Geology* 3: 157–182.
- Hutcheon, I., Abercrombie, H. J., & Krouse, H.R. (1990): Inorganic origin of carbon dioxide during low temperature thermal recovery of bitumen, Chemical and isotopic evidence. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54: 165-171.
- Hutcheon, I., & Abercrombie, H. (1990): Carbon dioxide in clastic rocks and silicate hydrolysis. – *Geology* 18: 541-544.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallinegestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Kaur, P., Chaudhri, N., Hofmann, A. W., Raczek, I., Okrusch, M., Skora, S., & Baumgartner, L. P. (2012): Two-stage, extreme albitization of A-type granites from Rajasthan, NW India. – *Journal of Petrology* 53: 919-948.
- Lefticariu, L., Pratt, L.A., LaVerne, J.A. & Schimmelmann, A. (2010): Anoxic pyrite oxidation by water radiolysis products – A potential source of biosustaining energy. – *Earth and Planetary Science Letters* 292: 57–67.
- Necib, S., Linard, Y., Crusset, D., Michau, N., Daumas, S., Burger, E., Romaine, A., & Schlegel, M. L. (2016): Corrosion at the carbon steel-clay borehole water and gas interfaces at 85°C under anoxic and transient acidic conditions. – *Corrosion Science* 111: 242-258.
- Nishimoto, S., & Yoshida, H. (2010): Hydrothermal alteration of deep fractured granite: effects of dissolution and precipitation. – *Lithos* 115: 153-162.
- Niwa, M., Shimada, K., Tamura, H., Shibata, K., Sueoka, S., Yasue, K. I., Ishimaru, T. & Umeda, K. (2016): Thermal Constraints on Clay Growth in Fault Gouge and Their Relationship with Fault-zone Evolution and Hydrothermal Alteration: Case Study of Gouges in the Kojaku Granite, Central Japan. – *Clays and Clay Minerals* 64: 86-107.
- Plümper, O., & Putnis, A. (2009): The complex hydrothermal history of granitic rocks: multiple feldspar replacement reactions under subsolidus conditions. – *Journal of Petrology* 50: 967-987.
- Sandström, B., & Tullborg, E. L. (2009): Episodic fluid migration in the Fennoscandian Shield recorded by stable isotopes, rare earth elements and fluid inclusions in fracture minerals at Forsmark, Sweden. – *Chemical Geology* 266: 126-142.
- Simon, K. (1990): Hydrothermal alteration of Variscan granites, southern Schwarzwald, Federal Republic of Germany. – *Contributions to Mineralogy and Petrology* 105: 177-196.
- Smith, J. T., & Ehrenberg, S. N. (1989): Correlation of carbon dioxide abundance with temperature in clastic hydrocarbon reservoirs, Relationship to inorganic chemical equilibrium. – *Marine and Petroleum Geology* 6: 129-135.
- 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: 161-178.
- White, A. F., Schulz, M. S., Lowenstern, J. B., Vivit, D. V., & Bullen, T. D. (2005): The ubiquitous nature of accessory calcite in granitoid rocks: implications for weathering, solute evolution, and petrogenesis. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 1455-1471.
- Yuguchi, T., Sasao, E., Ishibashi, M., & Nishiyama, T. (2015): Hydrothermal chloritization processes from biotite in the Toki granite, Central Japan: Temporal variations of the compositions of hydrothermal fluids associated with chloritization. – *American Mineralogist* 100: 1134-1152.

58 Alteration von Organika

NEA-Gruppe:	3.2.4	<i>Chemical processes [repository]</i>
	4.2.4	<i>Chemical processes [geosphere]</i>

58.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Umwandlung der in das Endlager eingebrachten polymeren organischen Verbindungen und Kohlenwasserstoffe sowie die natürlich vorhandenen Kohlenwasserstoffe durch thermische und chemische Prozesse. Alteration von Organika durch Radiolyse und mikrobielle Prozesse wird in entsprechenden FEP behandelt.

58.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Bei der Alteration von Organika werden die Verbindungen mit langkettigen Kohlenstoffgerüsten in kurzkettige organische Verbindungen oder sogar in anorganische Kohlenstoffverbindungen umgewandelt. Dabei entstehen Gase oder lösliche Kohlenstoffverbindungen, die zum Teil als Komplexierungsmittel zum Transport von Radionukliden beitragen können. Die wichtigsten Alterationsprodukte natürlicher Organika und der meisten Kunststoffe sind Methan, Kohlendioxid und Wasserstoff (Parkes et al. 2011).

Die Alteration von Organika hängt von der Lösungszusammensetzung (pH-, Eh-Wert, organische Säuren, Sättigungsgrad der Lösung gegenüber Festphasen usw.) und der Temperatur ab. So können z. B. einige natürliche aromatische organische Säuren bereits ab 105°C aufgrund der thermischen Energiezufuhr zersetzt werden (Boles et al. 1988).

Der Alterationsprozess eines Kunststoffes ist von der Zusammensetzung des Polymers abhängig. Je nach Polymer ergeben sich verschiedene Alterationsprodukte. Es bilden sich kurzkettige organische Verbindungen (z. B. Olefine, Paraffine und Aromate), aber auch Chlorwasserstoff, Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid.

Abhängig vom jeweiligen Konzept kann in einem Endlagerbauwerk auch Bitumen verwendet werden. Die Alteration von Bitumen wird in Jobmann & Burlaka (2021) beschrieben.

58.3 Prozessbeschreibung

Im Einlagerungsbereich der hochradioaktiven Abfälle und in den technischen Barrieren wird die Verwendung organischer Stoffe weitgehend vermieden. Ausnahmen sind nach Jobmann & Burlaka (2021):

- Asphalt in Strecken-, Kluft-, Rampen- und Schachtverschlüssen sowie im Schachtausbau;
- Isolierungen von elektrischen Leitungen und Kunststoffrohre in Kabeldurchführungen und in der Drainage, organische Bestandteile von Gebirgsankern sowie Synthetiknetze zur Sicherung der Firste und der Streckenstöße;
- Polyethylen-Stäbe und -Abschirmplatten, die zur Neutronenmoderation in Abfallbehältern eingebaut werden.

Eine weitere Quelle der Organika stellt der Beton dar, der in technischen Einrichtungen (Fahrbahn- und Fundamente für technische Geräte), im Strecken- und Schachtausbau, in Widerlagern der Verschlussbauwerke sowie in den Erkundungsbohrungen eingesetzt wird (Jobmann & Burlaka 2021). In diesem Beton kann bis zu 5 Gew.-% an organischen Zusatzmitteln,

bis zu 0,1 Gew.-% des Zementanteils an organischen Stoffen der zugesetzten Mahlhilfen und bis zu 0,0035 Gew.-% an organischen Konservierungsstoffen (gegen einen mikrobiellen Abbau der Betonzusatzmittel) enthalten sein (Spanka & Thielen 1999).

Zusätzliche Mengen an Organika ergeben sich durch die Einlagerung der CSD-C, welche geringe Mengen an organischen Materialien wie z. B. diverse Kunststoffe und Zellulose enthalten (Jobmann & Lommerzheim 2014). Außerdem kann organischer Kohlenstoff im Bentonit des Versatzes und der Verschlussbauwerke vorkommen (Jobmann & Burlaka 2021). Im Wirtsgestein werden nur geringe Mengen an Kohlenwasserstoffen erwartet.

Der Ablauf der Alteration hängt von der Temperatur, der Lösungsschemie und der stofflichen Zusammensetzung der Organika, die im Bereich z. B. des Schachtausbaus und der Erkundungsbohrungen anders als im Einlagerungsbereich sein können, ab.

58.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

58.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Eine Alteration der im Endlagersystem vorhandenen Organika ist zu erwarten.

58.6 Ungewissheiten

- Auswirkungen des Asphalt-Bentonit-Kontaktes in Verschlussbauwerken auf die Alteration von Organika sind noch zu klären.
- Auswirkungen der Strukturalterung von Bitumen auf Bitumeneigenschaften und die Kinetik dieses Prozesses insbesondere unter Endlagerbedingungen (Jobmann & Burlaka 2021) bleiben eine offene Frage.

58.7 Literaturquellen

- Boles, J.S., Crerar, D.A., Grissom, G. & Key, T.C. (1988): Aqueous thermal degradation of gallic acid. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* 52: 341-344.
- Jobmann, M. & Lommerzheim, A. (2014): FuE-Projekt AnSichT: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Anhang B Inventarbericht. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Ber.-Nr. TEC-08-2014-Z: FKZ 02E11061B; Peine.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Parkes, R.J., Linnane, C.D., Webster, G., Sass, H., Weightman, A.J., Hornibrook, E.R.C. & Horsfield, B. (2011): Prokaryotes stimulate mineral H₂ formation for the deep biosphere and subsequent thermogenic activity. – *Geology* 39, No. 3: 219-222.
- Spanka, G. & Thielen, G. (1999): Freisetzung flüchtiger Substanzen aus zementgebundenen Bauprodukten. – *Beton* 49: 123-134; Düsseldorf (Bau + Technik).

59 Mikrobielle Prozesse

NEA-Gruppe:	2.3.5	<i>Biological processes [waste package]</i>
	3.2.5	<i>Biological processes [repository]</i>
	4.2.5	<i>Biological processes [geosphere]</i>

59.1 Definition/Kurzbeschreibung

Dieses FEP umfasst die Gesamtheit der durch Mikroben verursachten Prozesse im Grubengebäude, im Wirtsgestein und im Deckgebirge.

59.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die wesentlichen, für mikrobielle Prozesse relevanten Materialien sind:

- im Grubengebäude: granitisches Gestein der Auflockerungszone, der geotechnischen Barrieren und der Verfüllung; Bentonit, Beton und Bitumen der geotechnischen Barrieren und Metall der Abfallbehälter,
- im Wirtsgestein: granitisches Gestein und
- im Deckgebirge: Sand-, Ton- und Kalkstein.

In granitischen Gesteinen wurden 10^3 bis 10^7 mikrobielle Zellen pro ml Grundwasser nachgewiesen (Pedersen 1997). Die Mobilisierung des Fe(III) aus Eisen(hydr-)Oxiden zu Fe(II) in Lösungen durch eisenreduzierende Bakterien und die Reduktion des Sulfats zu Sulfid durch sulfatreduzierende Bakterien treten häufig im tiefen granitischen Untergrund auf. Außerdem sind dort methanogene Archaeen und fermentative Bacteria vertreten (Pedersen 1997).

Für granitische Gesteine wurde z. B. in Forsmark, Götemar und Laxemar in Schweden nachgewiesen, dass die dort hauptsächlich im Paläozoikum erfolgte mikrobielle Sulfatreduktion zur Bildung von Pyrit in größeren Kluftbereichen führte. Da diese Standorte ca. 400 km voneinander entfernt sind, wird in Drake et al. (2018a) vorgeschlagen, dass solche Reaktionen repräsentativ für alle geklüfteten granitischen Gesteine sind.

In einer weiteren Untersuchung der Kluftbereiche im granitischen Gestein in Forsmark wurde die im Paläozoikum stattgefundene Methanogenese im Tiefenbereich von 155–406 m nachgewiesen (Drake et al. 2018b). Sie wurde durch Asphalte aus dem zur damaligen Zeit darüber liegenden schwarzen Schiefergestein (*engl.* black shale) induziert. Als Grund für die Zufuhr der Asphalte ins tiefer liegende Kluftsystem wird ein tektonisches Ereignis, das die Temperatur im Schiefergestein erhöhte und Asphalt viskos machte, vermutet (Drake et al. 2018b). Die Wechselwirkung von methanogenen und Sulfat-reduzierenden Mikroben kann auch zur anaeroben Methanoxidierung nach Reaktion $\text{CH}_4 + \text{SO}_4^{2-} \Rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}_2\text{O}$ führen. Die Ergebnisse von Drake et al. (2018b) deuten darauf hin, dass diese Reaktion in Forsmark im Paläozoikum in Tiefenbereichen von 396–399 m und (zu einer anderen Zeit) 410–414 m ablief. Die Tiefenänderung dieser Reaktion stimmt mit den Befunden für Olkiluoto (Finnland) überein, wo diese Reaktion gegenwärtig im Tiefenbereich 300–400 m abläuft und früher in geringeren Tiefen abgelaufen ist (Drake et al. 2018b). Diese Reaktion wird als maßgeblich für die Pyrit-Bildung in Klüften der granitischen Gesteine betrachtet (Drake et al. 2018b).

In einer Studie des Äspö Diorits in Schweden wurde in einer verheilten Kluft ein fossilisierter Biofilm nachgewiesen (Heim et al. 2012). Diese Kluft wurde noch im Paläozoikum durch Calcit verschlossen, wurde aber im Oberpleistozän nach der Weichsel-Kaltzeit aufgrund der Gletscherschmelze und der damit einhergehenden Druckentlastung reaktiviert. Der Eintrag von

Schmelz- und Meerwasser resultierte in der Bildung eines 20 bis 100 µm dicken Biofilms. Eine darauffolgende Änderung der Salinität und Alkalinität der Lösung führte erneut zur Bildung von Calcit, der die Kluft wieder schloss und das Wachstum und die Existenz des Biofilms beendete (Heim et al. 2012).

Diese anaeroben Prozesse werden vermutlich durch H_2 als Energiequelle ermöglicht (Pedersen 1997). Als eine der Quellen von H_2 im tiefen Untergrund wird die radiolytische Produktion von H_2 aus Wasser betrachtet. Primordiale, natürlich vorkommende Radionuklide und ihre Zerfalls- und Spaltprodukte sind z. B. für H_2 -Konzentrationen von bis zu 1.500 mmol/l in Wässern, die in einer Tiefe von ca. 3 km im Witwatersrand Basin in Südafrika gesammelt wurden, verantwortlich (Lin et al. 2005).

Allerdings korrelieren H_2 -Konzentrationen in manchen granitischen Gesteinen in Schweden weder mit der Tiefe noch mit der Gesteinszusammensetzung noch mit der Verweildauer des Grundwassers im Untergrund, die in einigen Fällen zu kurz ist, um die beobachteten H_2 -Konzentrationen zu erklären. Die aktuelle Hypothese, die insbesondere auf Funden in Äspö und Olkiluoto basiert, lautet, dass anaerobe Pilze maßgeblich zur H_2 -Produktion in magmatischen Gesteinen beitragen (Drake & Ivarsson 2018). Anaerobe Pilze sind bis zu einer Tiefe von 1 km im Untergrund verbreitet und wurden u. a. in geklüfteten granitischen Gesteinen in Olkiluoto (in einer Tiefe von 300–800 m) und in Äspö (in einer Tiefe von 201–444 m) nachgewiesen (Drake & Ivarsson 2018). Die meisten von diesen anaeroben Pilzen sind auf der Erdoberfläche aerob. Ihr Metabolismus im anoxischen Untergrund ist unbekannt.

Pilze – insbesondere solche, die Melanin produzieren, das ihnen eine erhöhte mechanische Stabilität verleiht – können schnell Millimeter bis Zentimeter in zementbasierte Materialien eindringen (Turick & Berry 2012). Solche melaninverstärkten Pilze zeigen außerdem ein erhöhtes Wachstum in Richtung von Quellen ionisierender Strahlung, was vermutlich damit zusammenhängt, dass sie ionisierende Strahlung als Energiequelle für ihre Aktivität nutzen können (Gadd 2007; Dadachova et al. 2007).

Die durch Mikroben und Pilze produzierten niedrigmolekularen organischen Säuren können sowohl die Alteration von Granit (Frey et al. 2010, Brunner et al. 2011) als auch die Korrosion von zementhaltigen Materialien (De Windt & Devillers 2010) stark beschleunigen.

Mikroben können eine um einen Faktor von etwa 325 erhöhte H_2 Bildung induzieren, wenn durch exogene Prozesse beeinflusste Minerale bzw. Gesteine in Kontakt mit mikrobiell besiedelten Sedimentschlämmen bei Temperaturen von 40 bis 100°C mit einem Optimum bei über 70°C kommen (Parkes et al. 2011).

Bitumen kann sowohl in Asphaltseen durch anaerobe Mikroben innerhalb von im Bitumen verteilten mikroskopischen Wassereinschlüssen (Meckenstock et al. 2014, Scarlett et al. 2018) als auch in Klüften im Gneis am Kontakt zu Wasser (Parnell et al. 2017) stark abgebaut werden.

Wenn ein an Fe(II), Mn(II) und HS^- reiches Grundwasser eine sauerstoffreiche Atmosphäre z. B. in einem bewetterten Tunnel erreicht, entstehen Stoffgradienten, die für die Aktivität von Eisen-, Mangan- und Methan-oxidierenden Bakterien günstig sind (Pedersen 1997). Energie aus ihrer Aktivität wird verwendet, um CO_2 zu organischen Verbindungen zu reduzieren.

Eine Untersuchung der Bohrlochlösungen in einer Teufe von ca. 900 m im Bergwerk Henderson Mine im Henderson-Granit dokumentiert die als Nitrifikation bezeichnete Oxidation von Ammonium (NH_4^+) zu Nitrat (NO_3^-) bei hohen NH_4^+ -, NO_2^- -, und NO_3^- -Konzentrationen (von jeweils 5–112, 27–48 und 17–72 µmol/l) und geringen O_2 -Konzentrationen (von 1,25 µmol/l) (Swanner & Templeton 2011). Diese Studie wies in den Bohrlochlösungen u. A. die Bakterienart *Nitrospira* nach, die die komplette Oxidation von Ammonium zu Nitrat katalysieren.

kann und die auch an drei weiteren Standorten im tiefen Untergrund mit O_2 -Konzentrationen $<10 \mu\text{mol/l}$ nachgewiesen wurde. Dabei tritt Ammonium nicht nur als ein wichtiger Nährstoff, sondern auch als eine Energiequelle auf. Die Quelle des Ammoniums im Henderson-Granit konnte nicht sicher identifiziert werden, obwohl Granite im Durchschnitt ca. 45 ppm Ammonium enthalten können (Hall 1999). Die Stickstoffverbindungen, die bei der Streckenauffahrung im Henderson Mine durch die Verwendung von ANC-Sprengstoffen (Gemische aus dem Oxidationsmittel Ammoniumnitrat und Reduktionsmitteln wie Mineral- oder Dieselöl) eingebracht wurden, wurden als Ammonium-Quelle für die Borlochlösungen genauso wie die meteorischen Wässer verworfen (Swanner & Templeton 2011). Es wurden Anzeichen für eine mikrobielle Stickstofffixierung durch die Reduzierung von N_2 zu bioverfügbaren Verbindungen wie Ammoniak (NH_3) oder Ammonium im Henderson Mine gefunden, die Energiequelle für diese energiecostspielige Reaktion konnte allerdings ebenfalls nicht identifiziert werden. Anaerobe Nitrat-reduzierende und Denitrifizierende Bakterien, die Nitrat zu Nitrit (NO_2^-) und Ammonium bzw. N_2 reduzieren, wurden in Kluftwässern der Granite an mehreren Standorten nachgewiesen (McMahon & Parnell 2014).

Dou et al. (2018) zeigen, dass sich die anaerobe mikrobiell beeinflusste Korrosion von Metallen in zwei charakteristische Typen unterteilen lässt. Die Typ-1-Korrosion, bei der Elektronen aus dem Metall zu Mikroben transportiert werden, ist z. B. für unlegierten Stahl charakteristisch. Dieser Korrosionstyp setzt voraus, dass sich Mikroben oder deren Biofilme direkt oder sehr nah an der Metalloberfläche befinden. Die Typ-2-Korrosion, bei der Metall durch die korrosiven Produkte des mikrobiellen Metabolismus wie z. B. H_2S oxidiert wird, ist für Kupfer charakteristisch. Demnach erhöht sich der Kupfer-Korrosionsgrad mit der steigenden Konzentration von HS^- . Während die Korrosion eines unlegierten Stahls durch Sulfat-reduzierende Bakterien zu einem ausgeprägten Lochfraß führt, findet für Kupfer bei einem fehlenden Biofilm-Metall-Kontakt eine gleichmäßige Korrosion statt (Dou et al. 2018). Die Rate der gleichmäßigen Korrosion betrug in den 10-tägigen anaeroben Versuchen der letzten Studie zwischen 0,35 und 1,62 mm/a bei Lösungskonzentrationen von jeweils 0,2 und 3,6 mmol/l des mikrobiell produzierten HS^- . Bei einem Biofilm-Kupfer-Kontakt wurde auch ein Lochfraß mit einer Rate von bis zu 1,44 mm/a beobachtet (Dou et al. 2018). Diese Studie schlussfolgerte, dass eine Nährstoffverfügbarkeit für Sulfat-reduzierende Bakterien im Fall von Kupfer zu einer erheblich stärkeren Korrosion als im Fall von unlegiertem Stahl führen kann.

In einem dreimonatigen aeroben Versuch mit Sulfat-reduzierenden Bakterien (Huttunen-Saarivirta et al. 2017a) wurden innerhalb von etwa zwei Wochen ähnlich hohe Kupfer-Korrosionsraten von bis zu 0,35 mm/a gemessen, wobei in der restlichen Zeit die Korrosionsrate 0,01–0,02 mm/a betrug. In vier- bis zehnmonatigen aeroben Versuchen beobachteten Huttunen-Saarivirta et al. (2017b) eine maximale Korrosionsrate von 0,013 mm/a und eine mittlere Korrosionsrate von 0,0011–0,0065 mm/a. Es kann allerdings sein, dass in diesen beiden Studien der in der Lösung verfügbare Sauerstoff die Aktivität von anaeroben Sulfat-reduzierenden Bakterien oder die Konzentration von HS^- erniedrigte. Da Huttunen-Saarivirta et al. (2017a, 2017b) keine Angaben zur Konzentration von HS^- machen, lässt sich die tatsächliche Ursache für den Unterschied in den von ihnen und von Dou et al. (2018) beobachteten Raten der mikrobiell beeinflussten Kupfer-Korrosion nicht beurteilen.

59.3 Prozessbeschreibung

Es kann angenommen werden, dass einige wenige Wochen nach Verschluss des Endlagers der Sauerstoff im Grubengebäude durch mikrobielle Prozesse verbraucht sein wird (siehe z. B. Puigdomenech et al. 2001). Daraufhin werden mangels relevanter Quellen des Mangans im Grubengebäude vor allem Eisen(III)-reduzierende, sulfatreduzierende, methanproduzierende und fermentative Mikroben die Entwicklung der mikrobiellen Aktivität im Grubengebäude bestimmen. Darüber hinaus können Stickstoffverbindungen wie u. A. Ammonium, Nitrit und Nitrat

(z. B. aus Rückständen von Sprengstoffen) von Ammonium-oxidierenden, Nitrat-reduzierenden und denitrifizierenden Mikroorganismen als Energiequelle benutzt werden und mikrobielle Aktivität im Grubengebäude beeinflussen.

Mikrobielle Prozesse im Wirtsgestein und im Deckgebirge sind natürlich gegeben, liegen dort in hoher Variabilität vor und werden insbesondere oberflächennah stattfinden. Die Zusammensetzung und Größe der mikrobiellen Population im Wirtsgestein und im Deckgebirge und die Rate ihrer metabolischen Aktivität sind unbekannt. Es kann jedoch angenommen werden, dass infolge von Alterations- und Korrosionsprozessen im Grubengebäude sowohl Elektronendonatoren als auch Elektronenakzeptoren den im Wirtsgestein und im Deckgebirge angesiedelten Mikroben zugeführt werden. Eine vorübergehende Erhöhung der Temperatur auf die Werte von 45 – 80°C und > 80°C, bei denen die thermophilen und hyperthermophilen Mikrobenarten gedeihen, wird die Aktivität und das Wachstum der mikrobiellen Population im Wirtsgestein fördern. Solche Temperaturerhöhungen sind im Deckgebirge hingegen nicht zu erwarten.

Eine Erhöhung der Aktivität von sulfatreduzierenden Bakterien wird zu einer verstärkten Produktion von HS⁻ führen, das zu Abfallbehältern migrieren und Kupfer-, Gusseisen- sowie Stahlkorrosion verursachen kann. Des Weiteren können fermentative Mikroben die aus dem Grubengebäude und dem Deckgebirge ankommenden CO₂ und H₂ sowie die im Bitumen der Streckenverschlüsse und CSD-C-Abfällen enthaltenen organischen Verbindungen in niedrigmolekulare organische Säuren und H₂ umwandeln, die den Sulfat-reduzierenden und anderen Mikrobenarten im Grubengebäude zugeführt werden und deren Aktivität fördern können. Durch die Einbringung von exogenen Mineralen in das Grubengebäude (Jobmann & Burlaka 2021) kann eine zusätzliche H₂ Bildung mit einer Rate von bis zu 0,9 mmol H₂ pro Liter Lösung pro Jahr (Parkes et. al. 2011) nicht ausgeschlossen werden, die eine Energiequelle für viele Mikrobenarten darstellt. Biogene niedrigmolekulare organische Säuren können eine starke Beschleunigung der Korrosion von zementhaltigen Materialien im Grubengebäude und eine Alteration der Kluftminerale innerhalb des kristallinen Gesteinskomplexes verursachen. Die mikrobiellen Prozesse können somit die günstigen Barriereigenschaften von Abfallbehältern, Bentonit, Asphalt und Beton beeinträchtigen.

Die Zusammensetzung der mikrobiellen Population im Grubengebäude wird durch die Population im Wirtsgestein und ggf. im Deckgebirge bestimmt, wobei weitere Mikrobenarten auch von der Oberfläche mit exogenen Materialien oder durch die hydraulisch wirksamen Klüfte mit meteorischen Wässern eingetragen werden können. Die Größe der mikrobiellen Population im Grubengebäude wird vor allem von der Verfügbarkeit von Elektronenakzeptoren und -donatoren abhängen. Es werden im Grubengebäude nach dem Verschluss des Endlagers zahlreiche kleinere Hohlräume verbleiben – insbesondere an Kontaktflächen zwischen einzelnen Komponenten wie Abfallbehältern, Ausbauten, Verschlüsse, Versatz, Auflockerungszone usw. (Jobmann & Burlaka 2021) – die das Wachstum der Mikrobenpopulation fördern werden.

59.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

59.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Mikroben kommen in geklüfteten granitischen Gesteinen vor und können auch beim Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers ins Grubengebäude eingetragen werden, daher ist ihre Aktivität im gesamten Endlagersystem zu erwarten.

59.6 Ungewissheiten

- Metabolismus der Pilze und ihr Beitrag zur H₂-Produktion in granitischen Gesteinen stellen eine offene Frage dar.
- Es bleibt offen, ob Mikroben aus den z. B. mit Bentonit in das Grubengebäude einzubringenden exogenen Mineralen in Kontakt mit Wasser und Ausbruchsmaterial bei erhöhten Temperaturen eine beträchtliche H₂ Bildung verursachen können.
- Es ist zu prüfen, ob die durch auffahrungsbedingte Sprengungen eingebrachten Mengen an Stickstoff-Verbindungen für eine nicht vernachlässigbare Aktivität von Nitrat-reduzierenden Bakterien im Grubengebäude ausreichen würden.
- Es ist derzeit noch unklar, ob, und wenn ja, welche Faktoren das Wachstum und die Aktivität von Mikroben im Grubengebäude limitieren können.
- Die Verteilung und die Zusammensetzung der mikrobiellen Population sowie die entsprechende Intensität der mikrobiellen Aktivität über große Untersuchungsgebiete wird aufgrund der zu erwartenden räumlichen Varianz wahrscheinlich ungewiss bleiben.

59.7 Literaturquellen

- Dadachova, E., Bryan, R.A., Huang, X., Moadel, T., Schweitzer, A.D., Aisen, P., Nosanchuk, J.D. & Casadevall, A. (2007): Ionizing Radiation Changes the Electronic Properties of Melanin and Enhances the Growth of Melanized Fungi. – *PLoS ONE* 2, e457.
- De Windt, L. & Devillers, P. (2010): Modeling the degradation of Portland cement pastes by biogenic organic acids. – *Cement and Concrete Research* 40: 1165–1174.
- Dou, W., Jia, R., Jin, P., Liu, J., Chen, S. & Gu, T. (2018): Investigation of the mechanism and characteristics of copper corrosion by sulfate reducing bacteria. – *Corrosion Science* 144: 237-248.
- Drake, H., Whitehouse, M. J., Heim, C., Reiners, P. W., Tillberg, M., Hogmalm, K. J., Dopson, M., Broman, C. & Åström, M. E. (2018a): Unprecedented ³⁴S-enrichment of pyrite formed following microbial sulfate reduction in fractured crystalline rocks. – *Geobiology* 16: 556-574.
- Drake, H., Ivarsson, M., Tillberg, M., Whitehouse, M., & Kooijman, E. (2018b): Ancient microbial activity in deep hydraulically conductive fracture zones within the Forsmark target area for geological nuclear waste disposal, Sweden. – *Geosciences* 8: 211.
- Drake, H., & Ivarsson, M. (2018): The role of anaerobic fungi in fundamental biogeochemical cycles in the deep biosphere. – *Fungal Biology Reviews* 32: 20–25.
- Frey, B., Rieder, S. R., Brunner, I., Plötze, M., Koetzsch, S., Lapanje, A., Brandl, H. & Furrer, G. (2010): Weathering-associated bacteria from the Damma glacier forefield: physiological capabilities and impact on granite dissolution. – *Applied and environmental microbiology* 76: 4788-4796.
- Gadd, G.M. (2007): Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. – *Mycological research* 111: 3–49.
- Hall, A. (1999): Ammonium in granites and its petrogenetic significance. – *Earth-Science Reviews* 45: 145–165.
- Heim, C., Lausmaa, J., Sjövall, P., Toporski, J., Dieing, T., Simon, K., Hansen, B., Kronz, A., Reitner, J. & Thiel, V. (2012): Ancient microbial activity recorded in fracture fillings from granitic rocks (Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden). – *Geobiology* 10: 280-297.
- Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Bomberg, M., & Carpén, L. (2017a): EIS study on aerobic corrosion of copper in ground water: influence of micro-organisms. – *Electrochimica Acta* 240: 163-174.

- Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Bomberg, M., & Carpén, L. (2017b): Corrosion of copper in oxygen-deficient groundwater with and without deep bedrock micro-organisms: Characterisation of microbial communities and surface processes. – *Applied Surface Science* 396: 1044-1057.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Lin, L.-H., Hall, J., Lippmann-Pipke, J., Ward, J.A., Sherwood Lollar, B., DeFlaun, M., Rothmel, R., Moser, D.P., Gihring, T., Mislowack, B. & Onstott, T.C. (2005): Radiolytic H₂ in conti-nental crust: nuclear power for deep subsurface microbial communities. – *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6, Q07003: 1–13.
- McMahon, S., & Parnell, J. (2014): Weighing the deep continental biosphere. *FEMS Microbi-ology Ecology*: 113–120.
- Meckenstock, R.U., von Netzer, F., Stumpp, C., Lueders, T., Himmelberg, A. M., Hertkorn, N., Schmitt-Kopplin, P., Harir, M., Hosein, R., Haque, S. & Schulze-Makuch, D. (2014): Wa-ter droplets in oil are microhabitats for microbial life. – *Science* 345: 673–676.
- Parkes, R.J., Linnane, C.D., Webster, G., Sass, H., Weightman, A.J., Hornibrook, E.R.C. & Horsfield, B. (2011): Prokaryotes stimulate mineral H₂ formation for the deep biosphere and subsequent thermogenic activity. – *Geology* 39: 219–222.
- Parnell, J., Baba, M. & Bowden, S. (2017): Emplacement and biodegradation of oil in fractured basement: the ‘coal’ deposit in Moinian gneiss at Castle Leod, Ross-shire. – *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 107: 23–32.
- Pedersen, K. (1997): Microbial life in deep granitic rock. – *FEMS microbiology reviews* 20: 399–414.
- Puigdomenech, I., Ambrosi, J.-P., Eisenlohr, L., Lartigue, J.-E., Banwart, S.A., Bateman, K., Milodowski, A.E., West, J.M., Griffault, L., Gustafsson, E., Hama, K., Yoshida, H., Ko-telnikova, S., Pedersen, K., Michaud, V., Trotignon, L., Rivas Perez, J. & Tullborg, E.-L. (2001): O₂ depletion in granitic media. – *Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Report TR-01-05; Stockholm.*
- Scarlett, A. G., Despaigne-Diaz, A. I., Wilde, S. A., & Grice, K. (2018): An examination by GCx GC-TOFMS of organic molecules present in highly degraded oils emerging from Carib-bean terrestrial seeps of Cretaceous age. – *Geoscience Frontiers*.
- Swanner, E., & Templeton, A. (2011): Potential for nitrogen fixation and nitrification in the gran-ite-hosted subsurface at Henderson Mine, CO. – *Frontiers in microbiology* 2: 254.
- Turick, C.E. & Berry, C.J. (2012): Review of Concrete Biodeterioration in Relation to Buried Nuclear Waste. – *Savannah River National Laboratory: SRNL-STI-2012-00435; Aiken.*

60 Quellen und Schrumpfen von Bentonit

NEA-Gruppe: 3.2.3 *Mechanical processes [repository]*

60.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Quellen und Schrumpfen von Bentonit wird seine Volumenänderung durch Wasseraufnahme bzw. -abgabe bezeichnet. Dabei wird Wasser zwischen Kristallgitterebenen der Tonminerale im Bentonit eingelagert bzw. entfernt. Die Volumenänderung resultiert nur im freien Zustand eines tonhaltigen Materials, während im eingespannten Zustand der Prozess zunächst zu einer Quelldruckänderung führt. Dieser Prozess findet im Buffer, Versatzmaterial, Verschlussbauwerken und Abdichtungen der Erkundungsbohrungen statt.

60.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Ein Bentonit kann i.d.R. zu 50 bis 95 Gew.-% aus Tonmineralen bestehen. Die Aufnahme von Wasser zwischen den Strukturschichten von Tonmineralen kann nicht erfolgen, wenn der äußere Druck den erzeugten Quelldruck übersteigt. Natürlich vorkommende Tongesteinsformationen sind daher unter ihren in situ Spannungsbedingungen meist Wassergesättigt. Dies ist auch für endlagerrelevante Teufen der Fall. Die Menge an aufgenommenem Zwischenschichtwasser, also Wasser, das nicht der freien Porenlösung angehört, sondern bis zu seiner eventuellen Desorption durch geänderte äußere Bedingungen ein Bestandteil des quellfähigen Materials ist, hängt stark von der Salinität (z. B. Norrish 1954; Karnland et al. 2007), dem Sättigungsgrad der Poren (z. B. Salles et al. 2010) und der Temperatur der Porenlösung (z. B. Birgersson 2010; Huang et al. 1994) ab. In einem ungespannten Zustand führt eine Wasseraufnahme (Quellen) zu einer Dichteabnahme und ein Wasserverlust (Schrumpfen) zu einer Dichtezunahme des tonhaltigen Materials. Kann das Material sein Volumen im eingespannten Zustand jedoch nicht verändern, kehrt sich diese Tendenz um, eine Wasseraufnahme führt dann zu einer Dichtezunahme.

Schichtsilikate, die überwiegend in der Korngrößenfraktion $< 2 \mu\text{m}$ vorkommen, werden Tonminerale genannt. Als quellfähig in wässrigen Lösungen werden die Tonminerale der Smektit- und Vermikulitgruppen betrachtet (Bailey 1988). Die prominentesten Vertreter der ersten Gruppe sind Montmorillonite, Beidellite, Nontronite, Saponite und Hektorite, während der zweiten Gruppe Vermikulite angehören. Die Quellfähigkeit dieser Tonminerale beruht auf der Tatsache, dass ihre Strukturschichten infolge von Substitutionen von höherwertigen Kationen durch niederwertigere Ionen negativ geladen sind, z. B. Al^{3+} durch Mg^{2+} oder $\text{Fe}^{2+}/\text{Si}^{4+}$ durch Al^{3+} oder Fe^{3+} . Diese negative Strukturladung ist im Raum zwischen den Strukturschichten durch Kationen kompensiert, die in Anwesenheit von Wasser hydratisiert werden können, z. B. Na^+ , Ca^{2+} . Die Hydratation der Zwischenschichtkationen ist die treibende Kraft des so genannten innerkristallinen Quellens der Tonminerale (Norrish 1954; Salles et al. 2010). Durch einen sukzessiven Aufbau von bis zu drei Wasserschichten kann der Schichtzwischenraum tonmineralabhängig von etwa 0,3 nm im entwässerten Zustand auf bis zu etwa 1,25 nm ansteigen (Wilson et al. 2004). Eine Aufnahme der ersten, zweiten und dritten Wasserschicht zwischen Montmorillonit-Schichten führt zu sukzessiven Quelldruckzunahmen von jeweils 400, 110 und 27 MPa (Madsen & Müller-Vonmoos 1989). Die Ausprägung der Hydratation ist von den Zwischenschichtkationen abhängig (Norrish 1954; Salles et al. 2010).

Neben dem oben beschriebenen Quellen durch Hydratation der Zwischenschichtkationen (engl.: crystalline swelling) gibt es auch osmotisches Quellen (engl. osmotic swelling). Hierbei erzeugt ein großer Unterschied der Kationenkonzentration an der Tonmineraloberfläche und in der Porenlösung eine beträchtliche Zunahme des Schichtabstands, z. B. bei Li- und Na-

Montmorilloniten. Diese Art des Quellens ist durch einen Quelldruck von mehreren MPa gekennzeichnet und kann sogar zur vollständigen Dispersion von Tonmineralen führen, wenn mehr als drei Wasserschichten aufgebaut wurden und ein Wassergehalt von weit über 100 Gew.-% herrscht (Norrish 1954; Fink & Thomas 1964; Madsen & Müller-Vonmoos 1989, Anderson et al. 2010; Salles et al. 2010). Osmotisches Quellen tritt auf z. B. bei einer Entlastung von tonhaltigen Sedimentgesteinen beim Stollen- und Tunnelbau (Madsen & Müller-Vonmoos 1989) oder bei der Ölförderung, bei der sie Bohrlochinstabilität verursacht (Anderson et al. 2010). Im Unterschied zur Hydratation der Zwischenschichtkationen kommt osmotisches Quellen auch in kleinsten Poren zwischen Tonmineralen vor (Salles et al. 2010).

Die Ausprägung der oben beschriebenen Quellprozesse ist tonmineralabhängig. Ein Ca-Bentonit vergrößert sich beispielsweise trotz gleicher Porosität und ähnlicher Wasseraufnahme doppelt so viel wie ein Na-Bentonit (Likos & Lu 2006). Bei gleicher Gesamtporosität von z. B. etwa 0,44 wurde für einen Ca-Bentonit im Vergleich zu einem Na-Bentonit eine um etwa den Faktor von 2 höhere makroskopische Volumenänderung durch Quellen bei etwa gleichen Mengen des aufgenommenen Wassers von jeweils 19,7 und 17,0 Gew.-% beobachtet (Likos & Lu 2006). Diese Beobachtung wurde auf die in der Tonmineralogie allgemein bekannten Unterschiede in der Bildung von Tonteilchen aus einzelnen Na- und Ca-Tonmineralschichten zurückgeführt. Bei einer Saugspannung von z. B. 100 MPa besteht ein Ca-Bentonit-Teilchen durchschnittlich aus etwa 400 einzelnen Tonmineralschichten, während sich diese Zahl für Na-Bentonit-Teilchen auf etwa 20 reduziert (Likos & Lu 2006). Dadurch betragen Meso- und Makroporen zwischen Tonteilchen in Na-Bentoniten einen deutlich höheren Anteil und Zwischenschichträume einen deutlich niedrigeren Anteil zur Gesamtporosität als in Ca-Bentoniten. Dementsprechend führt das mikroskopische Quellen in einem Na-Bentonit vor Allem zum Auffüllen von Meso- und Makroporen, während es in einem Ca-Bentonit weit effektiver in makroskopische Volumenänderungen übertragen wird. Dieser Unterschied zwischen Na- und Ca-Bentoniten wird durch eine steigende Tonkompaktion vergrößert (Likos & Lu 2006).

Ein weiterer Einfluss auf die Quellfähigkeit eines tonhaltigen Materials ergibt sich aus seinem Konsolidierungszustand. Mit steigender Materialkompaktion verringert sich der Anteil von Meso- und Makroporen, sodass eine effektivere Quelldruckübertragung zustande kommen kann. So wurden für Na- und Ca-Bentonite Quelldrücke von jeweils 4 bis 7 und 25 bis 40 MPa bei Trockendichten von 1.600 und 1.900 kg/m³ gemessen (Madsen 1998). Bei einer Trockendichte von 1.570 kg/m³ wurden in einem anderen Versuch für die < 2 µm Fraktion eines Na-Bentonits für destilliertes Wasser und für 1,0 M NaCl Lösung Quelldrücke von jeweils etwa 3,5 und 2,7 MPa gemessen (Karnland et al. 2007).

Ebenso hat der Anteil quellfähiger Tonminerale einen Einfluss. Beispielsweise zeigten Zhang et al. (2010), dass Callovo-Oxfordian Tonstein mit einem Smektitanteil von 13 bis 23 Gew.-% und einer Trockendichte von 2.250 kg/m³ in gesättigtem Zustand einen Quelldruck von 12 MPa aufweist, also um 13 bis 28 MPa weniger als der bei (Madsen 1998) getestete Bentonit mit einem Montmorillonit-Anteil von 75 Gew.-%, obwohl dieser eine geringere Trockendichte von 1.900 kg/m³ hatte. Des Weiteren kann eine Zementation, beispielsweise durch freie Siliziumoxide, Kalziumkarbonate und Kalziumsulfate, zu einer deutlichen Reduzierung des Quelldrucks führen. Unter bestimmten Bedingungen kann eine solche Zementation allerdings reversibel sein (Wersin et al. 2007).

Wasser in Zwischenschichten kann ggf. bei einer Erwärmung in freies Porenwasser übergehen. Huang et al. (1994) zeigten beispielsweise, dass ein ungesättigter Montmorillonit mit zwei Wasserschichten in 80 % der Zwischenschichten bei einer Temperatur von 88°C vollständig in einen Zustand mit einer Wasserschicht überführt werden kann. Je nach Hydratationszustand des erhitzten Tons (zwei oder drei Wasserschichten) kann auf diese Weise die Hälfte bzw. ein Drittel des im Schichtzwischenraum gespeicherten Wassers freigesetzt werden. Die mit Meso- und Makroporen assoziierte Porosität wird sich dadurch erhöhen, während sich der Anteil der Zwischenschichträume zur Gesamtporosität entsprechend verringert.

60.3 Prozessbeschreibung

Der Prozess findet im Bentonit des Streckenversatzes, der Verschlussbauwerke und der Dichtungen der Erkundungsbohrungen statt.

Der Quelldruck von tonhaltigem Material kann durch Zugabe von (nicht-)quellfähigen Mineralen sowie durch den Kompaktionsgrad eingestellt werden und hängt von der gewählten Lösungszusammensetzung, der Temperatur und dem Umgebungsdruck ab. Das Quellen eines Bentonits in den Verschlusselementen ist eine Voraussetzung für deren Funktion (Jobmann & Burlaka 2021). Durch das Quellen wird die Kontaktzone des Verschlusselementes zum Gebirge abgedichtet sowie eventuelle Risse im Versatz, in Dichtelementen und in der Auflockerungszone verschlossen.

Der Versatz von quellfähigem Material trägt außerdem zur Vermeidung von Auflockerungen bei langfristig zu erwartender Konvergenz bei. Durch Ausfüllen des Porenraums des Schottergerüsts des Versatzes mit Bentonit wird nach dessen Quellen eine geringe Permeabilität in den Bohrlochüberfahrungs- und Zugangsstrecken erreicht, die zur Einhaltung des Advektionskriteriums beiträgt.

60.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

60.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Grundwasser im kristallinen Wirtsgestein und Porenwasser in den Verschlusselementen machen diesen Prozess wahrscheinlich.

60.6 Ungewissheiten

Keine.

60.7 Literaturquellen

- Anderson, R.L., Ratcliffe, I., Greenwell, H.C., Williams, P.A., Cliffe, S. & Coveney, P.V. (2010): Clay swelling - a challenge in the oilfield. – *Earth-Science Reviews* 98, 201-216.
- Bailey, S.W. [ed.] (1988): Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas). – Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, Volume 19; Washington, D.C.
- Birgersson, M. (2010): Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. – Svensk Kärnbränslehantering AB: Technical Report TR-10-40; Stockholm.
- Fink, D.H. & Thomas, G.W. (1964): X-Ray studies of crystalline swelling in montmorillonites. – *Soil Science Society of America Journal* 28, 747-750.
- Huang, W.-L., Bassett, W.A. & Wu, T.-C. (1994): Dehydration and hydration of montmorillonite at elevated temperatures and pressures monitored using synchrotron radiation. – *American Mineralogist* 79, 683-691.
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallinegestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.

- Karnland, O., Olsson, S., Nilsson, U. & Sellin, P. (2007): Experimentally determined swelling pressures and geochemical interactions of compacted Wyoming bentonite with highly alkaline solutions. – *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 275-286.
- Likos, W.J. & Lu, N. (2006): Pore-scale analysis of bulk volume change from crystalline interlayer swelling in Na⁺- and Ca²⁺-smectite. – *Clays and Clay Minerals* 54, 515-528.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos, M. (1989): The swelling behavior of clays. – *Applied Clay Science* 4, 143-156.
- Madsen, F.T. (1998): Clay mineralogical investigations related to nuclear waste disposal. – *Clay Minerals* 33, 109-129.
- Norrish, K. (1954): The swelling of montmorillonite. – *Discussions of the Faraday Society* 18, 120-134.
- Salles, F., Bildstein, O., Douillard, J.M., Jullien, M., Raynal, J. & Van Damme, H. (2010): On the cation dependence of interlamellar and interparticular water and swelling in smectite clays. – *Langmuir* 26, 5028-5037.
- Wersin, P., Johnson, L.H. & McKinley, I.G. (2007): Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review. *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 780-788.
- Wilson, J., Cuadros, J. & Cressey, G. (2004): An in situ time-resolved XRD-PSD investigation into Na-montmorillonite interlayer and particle rearrangement during dehydration. – *Clays and Clay Minerals* 52, 180-191.
- Zhang, C.-L., Wieczorek, K., Xie, M. L. (2010): Swelling experiments on mudstones. – *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2, 44-51.

61 Quellen, Schwinden und Kriechen von Beton

NEA-Gruppe: 3.2.3.1 *Material volume changes*
 3.2.4 *Chemical Processes [repository]*

61.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt nicht thermisch induzierte Volumen- oder Druckänderungen durch chemische oder physikalische Prozesse im Beton.

61.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Belastungen oder lastfreie Einwirkungen, wie z. B. Temperatur und Feuchteänderungen, rufen im Frisch- und Festbeton Form- und Volumenänderungen hervor. Diese müssen bei Entwurf, Berechnung und Konstruktion von Bauwerken und entsprechend auch bei der Betonzusammensetzung und Nachbehandlung berücksichtigt werden. Temperaturabhängige Volumenänderungen werden im FEP „Thermische Expansion oder Kontraktion“ beschrieben.

Beton wird als visko-elasto-plastischer Stoff betrachtet, da Formveränderungen durch äußere Lasten nur teilweise reversibel sind (VDZ 2015). Die Verformungen des Betons bei mechanischer Belastung bzw. bei Volumenänderungen gehen einerseits auf die Bewegung und Umlagerung von Wasser im Zementstein und damit verbundene Gleitvorgänge (Kriechen) und andererseits – bei Überschreiten von 40 % der Druckfestigkeit – zunehmend auf Mikrorisse im Zementstein und am Kontakt Matrix-Zuschlagstoff zurück. Die Zugfestigkeit des Betons kann sehr stark durch Eigen- und Gefügespannungen, z. B. infolge Austrocknens (Schrumpfen), vermindert werden. Die Volumenänderung des Betonkörpers stellt ein Maß für die Verdichtung oder Auflockerung des Gefüges dar. Bei rund 90 % der Bruchspannung findet infolge der rasch wachsenden Querdehnung ein Übergang von der Volumenverminderung zu einer Volumenvergrößerung statt. Bei diesem Lastniveau ist wegen der zunehmenden Gefügeauflockerung die Dauerstandfestigkeit bereits überschritten. Die Intensität der Kriechverformung hängt von der Belastungshöhe und -dauer, den Umweltbedingungen (Feuchtigkeit), der Betonzusammensetzung, vom Erhärtungszustand bei Belastungsbeginn sowie von den Bauteilabmessungen ab (DIN 1045-1). Der Einfluss der Betonzusammensetzung wird über die Festigkeitsklasse des Zements sowie über die mittlere Betondruckfestigkeit erfasst.

Formänderungen ohne äußere Lasteinwirkung werden durch Änderungen des Feuchtehaushalts im Beton (Schwinden/Schrumpfen und Quellen), durch volumenvergrößernde chemische Reaktionen oder durch Temperaturänderungen (vgl. FEP „Thermische Expansion oder Kontraktion“) hervorgerufen. Die Feuchtegehaltsänderung im Beton kann durch kapillaren Wassertransport oder durch Diffusion erfolgen. Beim Schrumpfen werden vier Arten unterschieden:

Das Kapillarschrumpfen entsteht durch Kapillarkräfte beim Entzug des Wassers aus dem frischen noch verarbeitbaren Beton, z. B. durch wassersaugende Gesteinskörnungen oder durch Verdunstung an der Oberfläche (Dehnungen bis zu rund 4 mm/m). Durch Kapillarschrumpfen können Risse senkrecht zur Oberfläche auftreten, die mehrere Zentimeter tief in den Beton hineinreichen.

Das chemische Schrumpfen entsteht durch die chemische Bindung des Anmachwassers in den Hydratphasen und die dadurch verursachte Volumenverminderung (Adam 2006). Die resultierende Volumenverminderung schwankt je nach Baustoff und hydrochemischen Randbedingungen zwischen 3 und 8 Vol.-%. Durch die dadurch bedingte innere Austrocknung bauen sich während der Hydratation und der zunehmenden Erhärtung bzw. Gefügeentwicklung

Spannungen im Porenraum auf, die äußere Volumenänderungen bewirken. Die äußere Verringerung des Volumens wird als autogenes Schrumpfen bezeichnet (Fontana 2007). Diese Volumenänderungen betragen bei Standardbetonen ca. 0,1 mm/m, bei hochfesten Betonen ca. 0,15 bis –0,25 mm/m (VDZ 2015). Bei hochfesten Bauteilen mit niedrigem Wasser/Zement-Wert wird dadurch die frühe Rissbildung gefördert, weil sich die Schrumpfung schon sehr früh auf den gesamten Querschnitt erstreckt.

Durch die chemische Reaktion des Kohlendioxids der Luft mit dem Calciumhydroxid im Zementstein kommt es zum Karbonatisierungsschrumpfen, das durch niedrige Umgebungsfeuchten (50 bis 70 % relative Feuchte) begünstigt wird. Durch Karbonatisierungsschrumpfen können Netzzrisse im oberflächennahen Bereich des Betons entstehen.

Während der Austrocknung des Betons durch Wasserverlust kommt es zum Trocknungsschrumpfen. Es wird durch Abgabe des chemisch nicht gebundenen Wassers aus den Kapillarporen hervorgerufen (Fontana 2007). Das Trocknungsschrumpfen hängt vor allem von der Umgebungsfeuchte, den Bauteilabmessungen und der Betonzusammensetzung ab.

Autogenes Schrumpfen und Trocknungsschrumpfen haben eine Volumenkontraktion in der Zementsteinmatrix zur Folge, die durch nichtschumpfende Zuschlagstoffe behindert wird (VDZ 2015). So weist der Zementstein allein ein Schrumpfmaß von rund 3 mm/m auf: durch quarzitären, nicht schwindenden Zuschlagstoff kann sich dieser Wert bis auf ca. 0,3 mm/m reduzieren (in Abhängigkeit von Rezeptur und Feuchtigkeit). Die Endwerte des Schrumpfens betragen für Normalbeton das ca. 1,2-fache des Trocknungsschrumpfens und für einen hochfesten Beton das ca. 3,8-fache.

Als Betonquellen bezeichnet man die durch Wasserzufuhr verursachte Volumenzunahme, die vom Verhältnis Matrix (Zement)/Zuschlagstoff beeinflusst wird. Es können sich Volumenausdehnungen des Betons von 0,1 bis 0,2 mm/m ergeben. Dies entspricht etwa 40 bis 80 % der durch die Austrocknung bedingten Volumenreduzierung.

Quellprozesse gehen auf chemisch-mineralogische Reaktionen zurück, die im ausgehärteten Beton unter Volumenzunahme ablaufen. Ursache der Volumenzunahme ist in der Regel die Bildung großvolumiger Reaktionsprodukte, wie z. B. sekundäres Ettringit (Sulfatquellen) oder Alkalikieselsäuregel (Alkalireaktion). Somit können Reaktionen zwischen Zementstein und Zuschlagstoff, wie etwa bei einer Alkalikieselsäurereaktion, oder eine Zufuhr reaktionsfähiger Stoffe von außen in den Beton, wie z. B. beim Sulfatquellen, zum Quellen führen.

Ein kontrolliertes Quellen durch die Anwendung von Quellzementen (z. B. Zugabe von Gips oder Ca- bzw. Mg-Oxid, Schäffel 2009) kann dazu genutzt werden, um das Schrumpfen (Schwinden) zu kompensieren. Das Betonquellen kann zu einer Auflockerung des Gefüges, einer Festigkeitsabnahme und Erhöhung der Permeabilität führen.

Behinderte Verformungen aufgrund des Schrumpfens können zu erheblichen Zugspannungen in den Betonkomponenten führen. Überschreiten diese die Zugfestigkeit bzw. die behinderten Zugdehnungen die Zugbruchdehnung des Betons, so treten Risse, meist als durchgehende Trennrisse (Spaltrisse), auf. Da bei hochfesten Betonen verstärkt chemisch bedingte Volumenänderungen auftreten, ist die Rissneigung bei diesen höher als beim Normalbeton. Temperatur- oder Feuchtegradienten innerhalb eines Bauteils verursachen äußere Zugspannungen sowie innere Druckspannungen und können Risse auslösen. Alle material- und konstruktionsspezifischen Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Rissen im Beton zielen daher auf eine Verringerung der lastunabhängigen Verformungen bzw. auf eine Verformungsbehinderung. Eine baustoffspezifische Maßnahme könnte z. B. die Zumischung wasserspeichernder Zuschlagstoffe (z. B. Super-Absorber-Polymere (SAP)) sein, um die Austrocknung und das damit verbundene Schrumpfen zu reduzieren (Schäffel 2009). Weiterhin

können durch die Anordnung von Dehnungsfugen Zwangsverformungen in Bauwerken begrenzt werden.

61.3 Prozessbeschreibung

Die Verwendung von Betonbaustoffen wird in erheblichem Umfang im Endlagerbergwerk vorgesehen (Bertrams et al. 2017). Von den verschiedenen Prozessen der Volumenänderungen des Betons laufen das Kapillarschrumpfen, das Trocknungsschrumpfen und das Karbonatisierungsschrumpfen im Wesentlichen während der Betriebsphase des Endlagers ab. Die resultierenden Risse können aber die Eigenschaften der Betonkomponenten während der Nachverschlussphase beeinflussen. Wichtig für die Nachverschlussphase sind das chemische Quellen, Schwinden und Kriechen des Betons durch Wechselwirkungen der Baustoffe mit zutretenden Lösungen.

Die größten Betonmengen werden aus Gründen der Betriebssicherheit für den Streckenausbau der Grubenräume sowie der Schächte bzw. Rampen erforderlich sein. Aus Gründen der mechanischen Stabilität ist die Bildung von Schrumpfungsrissen im Ausbau zu begrenzen.

Weiterhin werden in den Verschlussbauwerken (Schacht- bzw. Rampenverschlüsse sowie Streckenverschlüsse) die Bentonit-Dichtelemente durch Betonwiederlager in ihrer Position gehalten. Die Volumenänderungen der Baustoffe durch Baustoffreaktionen während der Betriebs- und frühen Nachverschlussphase sowie durch spätere Einwirkungen (Lösungszutritt) im Zuge der Entwicklung des Endlagersystems müssen bei der Auslegung der Barrieren berücksichtigt werden. Besonders komplexe Einwirkungen sind durch Lösungen mit unterschiedlichem Chemismus in den Schächten und Rampen zu erwarten.

Eine Spezifikation geeigneter Betontypen ist erst möglich, wenn die standortspezifischen Randbedingungen (insbes. die Hydrochemie) bekannt sind. Zur Gewährleistung der langzeitigen mechanischen Stabilität sind materialspezifische und konstruktive Maßnahmen zur Beschränkung der Rissbildung vorzusehen.

61.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

61.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Bei allen Betonbaustoffen kommt es durch Abbindeprozesse und externe Einwirkungen zu Volumenänderungen. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

61.6 Ungewissheiten

- Sobald die standortspezifischen Randbedingungen konkretisiert werden können, ist der Betontyp für die Barrieren sowie den Ausbau und andere technische Einrichtungen festzulegen. Zur Gewährleistung der langzeitigen mechanischen Stabilität sind materialspezifische und konstruktive Maßnahmen zur Beschränkung der Rissbildung vorzusehen.

- Bei der zu erwartenden Größe des Endlagers im kristallinen Wirtsgestein ist von einer Variation der hydrochemischen Verhältnisse auszugehen, deren Heterogenität nicht komplett erfasst werden kann.

61.7 Literaturquellen

- Adam, T. (2006): Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. – Diss. TU Darmstadt.
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- DIN 1045-1: Stahl- und Stahlbetonbau. – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, (2008).
- Fontana, P. (2007): Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen. – Disseration, TU Braunschweig.
- Schäffel, P. (2009): Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. – Diss. Bauhaus Univ. Weimar.
- VDZ (2015): Vereinigung der Deutschen Zementindustrie (VDZ), https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/KompendiumZementBeton/2-6_Formänderung.pdf

62 Konvergenz

NEA-Gruppe: 3.2.3 *Mechanical processes [repository]*
 3.2.3.2 *Creep*

62.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Konvergenz wird die Volumenverkleinerung von untertägigen Hohlräumen durch Gebirgsverformungen verstanden.

62.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die Konvergenz der Grubenraumkontur ist eine Konsequenz der Störung des Primärspannungszustandes im Gebirge durch die Auffahrung des Grubengebäudes. Auf die an der Hohlraumkontur und im angrenzenden Gebirge wirkenden Spannungen reagiert das Gestein entsprechend seinen Materialeigenschaften mit mehr oder weniger großen Verformungen, die zeitabhängig unter Ausbildung von Rissen oder volumenkonstant erfolgen können. Dieser Prozess hängt von den mechanischen Eigenschaften ab. Aufgrund der hohen Festigkeit und der geringen Plastizität kristalliner Gesteine ergeben sich bei Kristallingesteinen prinzipiell nur geringe Verformungen, wobei die Bruchverformung dominiert.

Untersuchungen in Äspö (Schweden) haben ergeben, dass Verformungen in Kristallingesteinen durch zeitabhängige Mikrorissbildungen kontrolliert werden (Damjanac & Fairhurst 2010, Glamheden & Hökmark 2010). Die Kriechraten klingen rasch ab, bis die Belastungen ca. 30 bis 60 % der Bruchspannungen überschreiten (Pusch & Hökmark 1991). Durch Extrapolation über 1 Million Jahre ergeben sich geringfügige Deformationen des Gesteins von ca. 0,1 bis 0,3 Vol.-%. Die Alteration der Gesteine ("stress corrosion") und der Klüfte ist ein Prozess, der die Gesteinsfestigkeit (z. B. durch Beeinflussung der Kluftrauigkeit) reduziert und das Entstehen von Rissen fördert (Damjanac & Fairhurst 2010). Es gibt eine Beanspruchungsgrenze für Kristallingesteine die bei ca. 40–60 % der Druckfestigkeit liegt. Bedingungen für das Gesteinskriechen sind in einem Endlager daher in den am meisten belasteten Teilen des Grubengebäudes zu finden, z. B. in den Grubengebäudeteilen, die nicht parallel zur minimalen Hauptspannung im Gebirge aufgefahen wurden sowie in den Einlagerungsbereichen (vgl. FEP „Auflockerungszone und Abschalungen“).

In geklüfteten Kristallingesteinen kommt es vor allem im Bereich von Klüften und Störungen zum Gesteinskriechen, wobei deviatorische Spannungen die Antriebsmechanismen für die Verformungen sind (Glamheden & Hökmark 2010). Dabei sind die Geometrie, die Festigkeit und die Oberflächeneigenschaften (Rauigkeit, Kluftminerale) der Klüfte sowie der Grundwasserfluss und der Fluiddruck entscheidend für die Intensität der Verformungen. Die Verformungen setzen ein, sobald 10 % (Kluft mit Kluftmineralen) bzw. 30 % (Kluft unverfüllt) der Scherfestigkeit überschritten sind.

Die maximalen an einer Störung gemessenen Verformungsraten ergaben eine Gesamtverformung von 160 mm in 1.000 Jahren. Aus anderen Messungen lassen sich Werte von 0,3 bis 20 mm in 1.000 Jahren ableiten (Glamheden & Hökmark 2010).

Modellrechnungen ergaben für ein Einlagerungsbohrloch in einem gering geklüfteten Wirtsgestein des KBS-3-Konzeptes eine radiale Konvergenz von maximal 10 mm in 1 Million Jahre. In der Zugangsstrecke zu den Einlagerungsbohrlöchern kann – je nach Qualität des Wirtsgesteins – eine Konvergenz von maximal 20 mm in ca. 10.000 Jahren auftreten (SKB 2010).

Die Scherfestigkeit der Störungen und Klüfte in Forsmark ist so hoch, dass bedeutende deviatorische Spannungen über sehr lange Zeit ertragen werden (Damjanac & Fairhurst 2010). Daher sind die Kriechverformungen hier unbedeutend im Vergleich zu Verformungen durch Laständerungen und Porendruck während der zukünftigen Entwicklung. Für die Langzeitsicherheit kann sich eine Relevanz durch die Beeinflussung der hydraulischen Eigenschaften der Klüfte/Störungen ergeben.

Entsprechende Untersuchungen in Onkalo haben die Untersuchungsergebnisse aus Äspö sowie deren Bewertung für die Langzeitsicherheit bestätigt (Eloranta et al. 1992, Posiva 2012).

62.3 Prozessbeschreibung

Randbedingungen für die im Modell „mKBS-3“ zu erwartenden Konvergenzen sind einerseits die Tiefenlage der Einlagerungssohle von ca. 600 m u. GOK sowie die petrographischen und gebirgsmechanischen Eigenschaften der geologischen Formationen, die im Bericht zum geologischen Modell beschrieben sind (Mrugalla et al. 2020).

Mit der Auffahrung der Grubenräume wird der Primärspannungszustand im Gebirge gestört und als Folge der Spannungsumlagerungen wird, nach Überschreiten von 10–30 % der Scherfestigkeit des Gebirges, eine geringfügige Bruchverformung einsetzen. Daher wird das Gebirge in der Betriebsphase, meist kurz nach der Auffahrung, durch einen Ausbau stabilisiert und während der Nachverschlussphase durch Versatz und geotechnische Barrieren (Bertrams et al. 2017). Vor dem Verschluss des Endlagers werden alle untertägigen Hohlräume mit einem Gemisch aus Bentonit und Ausbruchmaterial versetzt. Sobald der Streckenausbau korrodiert ist und der Firstspalt zwischen Versatz und Ausbau einbricht, wird durch die geringfügige Konvergenz und das Quellen der Tonminerale im Versatz dieser Hohlraum geschlossen. Dann baut sich ein Stützdruck auf, der – sobald der Gleichgewichtszustand der Spannungen erreicht ist – eine weitere Konvergenz verhindert. Im Bereich der Verschlussbauwerke wird der Ausbau – so weit wie möglich – entfernt.

Für nicht ausgebaute Teile der Zugangs- und Verbindungsstrecken bzw. nach Versagen des Streckenausbaus wird eine kumulative Konvergenz von ca. 20 mm in 10.000 Jahren unterstellt, während für die nicht ausgebauten Teile der Einlagerungsbereiche (aufgrund der geringen Klüftigkeit) nur 10 mm unterstellt werden. In geklüfteten Bereichen können Konvergenzen von ca. 160 mm in 1.000 Jahren auftreten.

Die geringen Konvergenzen haben keine relevanten Auswirkungen auf die Endlagerkomponenten. Ihre Auswirkung auf die hydraulischen Eigenschaften der Klüfte ist zu untersuchen.

62.4 Zeitliche Beschränkung

Die Konvergenz setzt mit der durch die Auffahrung von Hohlräumen bedingten Spannungsumlagerung in der Gebirgskontur ein und wird so lange andauern, bis unter den vorliegenden Gebirgsdruckbedingungen kein kompaktierbarer Hohlraum mehr vorhanden ist.

62.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Für ein mögliches Endlagerbergwerk in Kristallingesteinen sind Hohlräume aufzufahren, so dass durch die Spannungsumverteilung im Gebirge deviatorische Spannungen und Konvergenz in den Konturbereichen des Grubengebäudes auftreten werden. Damit ist das FEP wahrscheinlich.

62.6 Ungewissheiten

- Wenn die standortspezifischen Randbedingungen konkretisiert werden können, sind die Auswirkungen der Konvergenz auf die hydraulischen Eigenschaften der Klüfte und Störungen zu untersuchen.

62.7 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (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, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Damjanac, B. & Fairhurst, C. (2010): Evidence for a long-term stress threshold in crystalline rock. – *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43, pp 513–531.
- Eloranta, P., Simonen, A. & Johansson, E. (1992): Creep in crystalline rock with application to high-level nuclear waste repository. – Nuclear Waste Commission of Finnish Companies (YJT), Report YJT-92-10; Helsinki, Finland.
- Glamheden, R. & Hökmark, H. (2010): Creep in jointed rock masses. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB R-06-94; Stockholm.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mkBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Pusch, R. & Hökmark, H. (1991): Characterization of nearfield rock – A basis for comparison of repository. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-92-06, Stockholm.
- SKB (2010): Geosphere process report for the safety assessment SR site. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-48; Stockholm.

63 Endlagerinduzierter Wärmestrom

- NEA-Gruppe: 2.3.1 *Thermal processes [waste package]*
 3.2.1 *Thermal processes [repository]*
 4.2.1 *Thermal processes [geosphere]*

63.1 Definition/Kurzbeschreibung

Wärmestrom beschreibt den Energietransport, der als Folge von Temperaturunterschieden abläuft. Die Ursachen von Temperaturgradienten im Endlager und seiner Umgebung sind der Wärmeeintrag durch die eingebrachten radioaktiven Abfälle, der geothermische Temperaturgradient und die klimatisch bedingten Temperatureinwirkungen. Das vorliegende FEP fasst Phänomene zusammen, die bei der zeitlichen Entwicklung der Temperatur durch den abfall-induzierten Wärmeeintrag berücksichtigt werden müssen.

Die anderen thermischen Einflüsse werden durch die FEP „Klimatisch bedingter Wärmestrom“ und „Terrestrischer Wärmestrom“ separat behandelt.

63.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Beim radioaktiven Zerfall der eingelagerten Abfälle wird Energie freigesetzt. Eine komplette Aufstellung der jeweiligen Radionuklide und der bei ihrem Zerfall abgegebenen Energie ist in der Karlsruher Nuklidkarte angegeben (Magill et al. 2009). Die Strahlungsleistung der Abfälle geht mit der Zeit entsprechend der Abnahme ihrer Aktivität zurück. Durch Absorption wird die kinetische Energie in thermische Energie umgewandelt. Die so zugeführte Wärme erhöht die Temperatur im Endlager und wird durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und ggf. Konvektion (Wärmeströmung) in die Umgebung der Endlagerbehälter abgeführt (Lowry et al. 1980).

Im Nationalen Entsorgungsprogramm (NaPro) (BMUB 2015) sind auf Basis des Verzeichnisses radioaktiver Abfälle (BMUB 2013) der Bestand und die Prognose der radioaktiven Abfälle zusammengestellt, die für die zukünftige Endlagerung in Deutschland zu berücksichtigen sind. Die Radionuklidinventare und die bei ihrem Zerfall abgegebene Energie der Leistungsreaktor-BE, Forschungsreaktor-BE, Wiederaufarbeitungsabfälle und Konditionierungsabfälle sind in Peiffer et al. (2011) zusammengestellt.

Die thermische Entwicklung der Einlagerungsbereiche ist eine wichtige Randbedingung für die mechanischen, hydraulischen und chemischen Prozesse im Endlager. Die Ausbreitung der eingebrachten Wärme hängt von den thermischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und der Verfüll- und Verschlussmaterialien, von den natürlichen thermischen Ausgangsverhältnissen am Standort, vom Endlagerlayout und von der Wärmleistung der Behälter ab.

Zur Quantifizierung des Wärmetransportes wird prinzipiell die Wärmestromdichte q (heat flow density) benutzt, definiert als Quotient von transportierter Energie/(Fläche \times Zeit) in einer bestimmten Richtung. Für den Fall, dass die Vorgänge im Porenraum vernachlässigt werden können (in niedrig porösen Gesteinen und bei nicht zu hohen Temperaturen) erfolgt der Wärmetransport hauptsächlich durch Wärmeleitung (Konduktion). Dabei erfolgt der Wärmetransfer durch mehr oder weniger stark angeregte Schwingungen der Atome. In diesem Fall gilt das Gesetz, dass die Wärmestromdichte q proportional zum Temperaturgradienten ist, der den Wärmestrom antreibt (Fouriersches Gesetz):

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T.$$

Die hier auftretende Konstante λ ist ein Maß für das Vermögen des betreffenden Gesteins, Energie zu transportieren und wird deshalb als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet. In anisotropen Gesteinen (z. B. Gneis, Peridotit) muss streng genommen anstelle der skalaren Wärmeleitfähigkeit ein symmetrischer Tensor eingeführt werden.

Allerdings ist ein perfekter thermischer Kontakt zwischen zwei Endlagerkomponenten eine analytische Idealisierung, die irreführend sein kann (Lowry et al. 1980). Allein die unvermeidbare Rauigkeit der Bohrlochwandung würde zu einer Vielzahl von isolierten luftgefüllten Taschen und somit zu einem großen Wärmeleitungswiderstand führen (Lowry et al. 1980). Einen noch größeren Wärmeleitungswiderstand können die einbringungsbedingten luftgefüllten Kontaktzonen zwischen den Behältern und dem Buffer sowie zwischen dem Buffer und der Bohrlochwandung (s. FEP „Buffer“) erzeugen. Nur bei einer Breite der Kontaktzone von weniger als ca. 1,27 cm dominieren die Wärmeleitung und die Wärmestrahlung den Wärmetransport und die Konvektion kann vernachlässigt werden, während bei höheren Breiten die Konvektion die Wärmeleitung als dominierender Wärmetransportmechanismus ersetzt (Lowry et al. 1980). Die Berechnungen von Johnson et al. (2002) zeigen zudem, dass die Konvektion nur bei einer integralen Permeabilität einer Barriere von unter 10^{-12} m^2 vernachlässigt werden kann, während sie bereits bei einer Permeabilität von 10^{-11} m^2 den Wärmetransport dominiert. Um den Wärmetransport durch Wärmestrahlung zu fördern, wird eine Erhöhung der Strahlungsemissivität durch eine Sandstrahlreinigung der Behälteroberfläche vor der Einlagerung empfohlen (Lowry et al. 1980).

Die thermischen Eigenschaften des Wirtsgesteins wie Wärmeleitfähigkeit oder spezifische Wärmekapazität hängen von der Temperatur ab. Je nach Art der Mineralzusammensetzung verringert sich beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit mehr oder weniger stark in Abhängigkeit von der Temperatur. Die thermischen Eigenschaften der zum Teil tonigen Verfüll- und Verschlussmaterialien hängen, neben der mineralischen Zusammensetzung, auch signifikant von der Wassersättigung der Materialien ab, da Wasser eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Luft hat und damit die integrale Wärmeleitfähigkeit eines Bauwerkes erhöht.

Zur Veranschaulichung eines induzierten Wärmestroms seien als Beispiel thermische Berechnungen für Brennelement-Behälter im KBS-3-Konzept der SKB genannt, die ergeben haben, dass die maximale Temperatur im den Behälter umgebenden Bentonit-Buffer 5–15 Jahre nach der Einlagerung auftritt (Hökmark et al. 2010, SKB 2011). Zu dieser Zeit sind ca. 50 % der lokalen Temperaturzunahme auf den Endlagerbehälter zurückzuführen und 50 % auf Überlagerungseffekte mit benachbarten Endlagergebinden. Dies bedeutet, dass die lokale Wärmeleitfähigkeit des Gebirges von besonderer Bedeutung für die Maximaltemperaturen an den einzelnen Behältern sowie für die Leitfähigkeitsverteilung, die räumliche Variabilität und den Umfang der Variabilität im Umfeld ist.

Fernfelduntersuchungen haben für den Zeitpunkt 50 Jahre nach Verschluss des Endlagers noch eine recht differenzierte Temperaturverteilung mit Temperaturmaxima über 80°C ergeben, während das Temperaturfeld nach 1.000 Jahren vergrößert und weitgehend homogen bei Maximaltemperaturen um 40°C ist (Hökmark et al. 2010, SKB 2011).

Aus dem durch den Wärmeeintrag der Behälter erzeugten Wärmestrom resultieren thermomechanische Spannungen speziell im Nahfeld der Behälter. Die so erzeugten Spannungen können für die Langzeitsicherheit Konsequenzen haben, in dem z. B. vorhandene Klüfte oder auch Störungen reaktiviert oder neue Klüfte durch festigkeitsüberschreitende Spannungen erzeugt werden. Letzteres soll durch Einhaltung der Integritätskriterien vermieden werden.

63.3 Prozessbeschreibung

Der durch die Wärmeleistung der Behälter induzierte Wärmestrom wird durch die geothermischen Verhältnisse am jeweiligen Standort (vgl. FEP „Terrestrischer Wärmestrom“) beeinflusst, da je nach Ausgangstemperatur ein unterschiedlicher Temperaturgradient und somit ein unterschiedlich ausgeprägter konduktiver Wärmestrom erzeugt wird. Im kristallinen Wirtsgestein kann neben dem konduktiven Wärmestrom insbesondere in der frühen Nachverschlussphase vor der Aufsättigung des Buffers neben Wärmestrahlung ggf. auch ein konvektiver Beitrag zum Wärmestrom mit der Luft gegeben sein. Nach der Aufsättigung des Buffers kann die Wärme in hydraulisch wirksamen Kluftsystemen mit dem Wasser konvektiv transportiert werden zusätzlich zur Wärmeleitung im Gesteinskörper.

Durch den induzierten Wärmestrom wird in erster Linie der den Behälter umgebende Buffer und das Wirtsgestein beeinflusst und in geringerem Maße auch das Bohrlochwiderlager und der Versatz, vor allem in den Einlagerungsstrecken. Aufgrund der unterschiedlichen Materialien, die jeweils unterschiedliche thermische Eigenschaften aufweisen wird der Wärmestrom bzw. die Wärmeausbreitung im Bereich dieser Komponenten leichte Ungleichmäßigkeiten aufweisen. Je dichter die Komponenten zu den Behältern angeordnet sind, desto höher ist die zu erwartende Erwärmung innerhalb der Komponenten.

Im Grubengebäude sind außer dem radioaktiven Zerfall kaum Prozesse denkbar, die aufgrund des Wärmestroms zu einer signifikanten Temperaturerhöhung im Wirtsgestein führen können. Exotherme Prozesse, die im Endlagersystem ablaufen, sind z. B. die Korrosionsprozesse oder eine mögliche thermochemische Sulfatreduktion. Die Wärmeproduktion dieser Prozesse ist aber gegenüber der Wärme aus dem radioaktiven Zerfall zu vernachlässigen.

Auf Basis der geologischen Rahmenbedingungen und dem für das Modell geplante Grubengebäude wird die Temperaturentwicklung im Zuge der Integritätsanalysen modelliert und bewertet.

63.4 Zeitliche Beschränkung

Bedingt durch den radioaktiven Zerfall ist eine signifikante Energie- bzw. Wärmeproduktion zeitlich limitiert. Aus vorangegangenen Forschungsprojekten mit anderen Wirtsgesteinen ist bekannt, dass die transiente thermische Phase nach etwa 50.000 Jahren beendet ist (z. B. Maßmann 2014) und die Gebirgstemperatur dann wieder den natürlichen Zustand erreicht hat. Ein signifikanter Wärmestrom ist aus den Abfällen nach dieser Zeit nicht mehr zu erwarten. Die Dauer der transienten Phase ist für Kristallingestein als Wirtsgestein unter den Gegebenheiten im Modell „mKBS-3“ noch durch Prozessanalysen zu bestimmen.

63.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ [X] wahrscheinlich ☐ [] weniger wahrscheinlich ☐ [] unwahrscheinlich

Aufgrund der eingelagerten, hochradioaktiven Abfälle ist dieser Prozess wahrscheinlich.

63.6 Ungewissheiten

- Die tatsächliche Dauer der transienten thermischen Phase ist für Kristallingestein unter den Gegebenheiten des Modells „mKBS-3“ noch ungewiss.

- Der Beitrag der Wärmestrahlung und der Konvektion in der frühen Nachverschlussphase soll durch realistische Modelle, die keinen perfekten thermischen Kontakt zwischen Endlagerkomponenten voraussetzen, abgeschätzt werden.
- Ob, und wenn ja, in welcher Weise hydraulisch wirksame Klüfte in der Nähe der Einlagefelder signifikant zum Wärmestrom über advektiven Wärmetransport beitragen und unter welchen Bedingungen sie ggf. bei der Integritätsanalyse zu berücksichtigen sind, ist ungewiss.

63.7 Literaturquellen

- BMUB (2013): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Verzeichnis radioaktiver Abfälle, Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose.
- BMUB (2015): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). – August 2015.
- Hökmark H., Lönnqvist M. & Fälth B. (2010): THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydromechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB TR-10-23; Stockholm.
- Johnson, L. H., Niemeyer, M., Klubertanz, G., Siegel, P. & Gribi, P. (2002): Calculations of the temperature evolution of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and intermediate level waste in Opalinus Clay. – Nagra, Technical Report, NTB 01-04; Wetingen (Switzerland).
- Lowry, W. E., Davis, B. W. & Cheung, H. (1980): Effects of annular air gaps surrounding an emplaced nuclear waste canister in deep geologic storage. – Lawrence Livermore National Lab Preprint No. UCRL-84152, California University; Livermore (USA).
- Magill, J., Pfennig, G. & Galy, J. (2009): Karlsruher Nuklidkarte. – 7. Auflage 2006, revised printing.
- Maßmann, J. (2014): Endlagerstandortmodell SÜD – Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises. Projekt AnSichT - Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Ergebnisbericht; Hannover.
- Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A. & Kettler, J. (2011): Abfallspezifikation und Mengengerüst auf Basis der im Jahr 2010 beschlossenen Laufzeitverlängerung. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278; Köln.
- SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-11-01, Volume I, Main report of the SR-Site project: 276 pp.; Stockholm

64 Thermische Expansion oder Kontraktion

NEA-Gruppe:	2.3.1	<i>Thermal processes [waste package]</i>
	3.2.1	<i>Thermal processes [repository]</i>
	4.2.1	<i>Thermal processes [geosphere]</i>

64.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter thermischer Expansion oder Kontraktion wird die Volumenzunahme bzw. -abnahme von Feststoffen und Fluiden verstanden, die durch eine Veränderung ihrer Temperatur hervorgerufen wird.

64.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Verändert sich die Temperatur eines Materials, so geht dies in der Regel mit einer Volumenzunahme oder -abnahme einher. Kann sich ein Material aufgrund einer äußeren Einspannung nicht ausdehnen, so steigt in Abhängigkeit von der Kompressibilität des Materials die Spannung bzw. der Druck im Innern des Materials an. Die maßgebende Größe für die thermisch bedingte Volumenänderung ist der (volumetrische) thermische Ausdehnungskoeffizient eines Materials oder eines Bauwerkes. Messtechnisch wird häufig der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient bestimmt, der bei anisotropen Medien verschieden orientiert ist oder bei isotropen Medien mit drei (entsprechend der drei Raumrichtungen) multipliziert wird. Der thermische Ausdehnungskoeffizient eines porösen Mediums setzt sich grundsätzlich aus dem Ausdehnungskoeffizienten der Feststoffkomponente sowie dem Ausdehnungskoeffizienten des die Poren füllenden Fluides zusammen. Bei der FEP Beschreibung wird der Ausdehnungskoeffizient für Lösungen, Gase und feste Phasen in den jeweiligen Komponenten FEP separat betrachtet.

Die wesentlichen thermischen Prozesse, die in einem Endlagersystem zur Expansion oder Kontraktion des Wirtsgesteins sowie des Deckgebirges, von Fluiden und von eingebrachten Materialien (geotechnische Barrieren, Abfallgebände, Ausbauten, technische Einrichtungen) führen können, sind die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle sowie starke Klimaänderungen (vgl. FEP „Endlagerinduzierter Wärmestrom“ und „Klimatisch bedingter Wärmestrom“). Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kommt es während der frühen Nachverschlussphase zu einem Temperaturanstieg vor allem in den Einlagerungsbohrlöchern und dem umgebenden Gebirge, so dass in diesem Bereich thermische Expansions- oder Kontraktionsprozesse besonders ausgeprägt sind. Klimatische Entwicklungen, insbesondere die Abkühlung durch Kaltzeiten (vgl. Grassmann et al. 2010), beeinflussen vor allem das Deckgebirge sowie die Schächte und/oder Rampen und in geringerem Umfang das Wirtsgestein sowie die Einlagerungssohle.

Im Zuge einer Sicherheitsbewertung für Endlager in Kristallingesteinen wurde die thermische Expansion oder Kontraktion vor allem für die Nahfeldbarrieren (Behälter, Buffer) untersucht (ANDRA 2005, Hökmark et al. 2010, Nagra 1994, Pastina & Hellä 2006, SKB 2011). Da die Endlagerbehälter gegen entsprechende thermomechanische Lasten ausgelegt sind, sind für diese keine relevanten Auswirkungen zu erwarten. Bei der Bewertung der thermomechanischen Auswirkungen auf tonige Barrieren kann auch auf die Ergebnisse von Untersuchungen für Tonstandorte zurückgegriffen werden (z. B. Jobmann et al. 2007). Die Auswirkungen thermomechanischer Spannungen auf das Kristallingestein – sowohl abfallinduziert wie auch klimainduziert – haben Hökmark et al. (2010), Hudson et al. (2001, 2005), Pastina & Hellä (2006) sowie SKB (2006) untersucht.

Beim radioaktiven Zerfall der eingelagerten Abfälle wird Energie freigesetzt. Eine komplette Aufstellung der entsprechenden Radionuklide und der bei ihrem Zerfall abgegebenen Energie ist in der Karlsruher Nuklidkarte (Magill et al. 2009) angegeben. Die Strahlungsleistung der Abfälle geht mit der Zeit entsprechend der Abnahme ihrer Aktivität zurück. Durch Absorption wird die Energie in Wärme umgewandelt. Die so erzeugte thermische Energie erhöht die Temperatur im Endlager und wird primär durch Wärmeleitung in die Umgebung des Endlagers abgeführt.

Die thermische Entwicklung der Einlagerungsbereiche ist eine wichtige Randbedingung für die mechanischen, hydraulischen und chemischen Prozesse im Endlager. Aus den resultierenden thermomechanischen Spannungen ergeben sich für die Langzeitsicherheit wichtige Konsequenzen, z. B. die Reaktivierung vorhandener Störungen und Klüfte im Nah- und Fernfeld bzw. die Entstehung neuer Risse und Klüfte, die Reaktivierung von Gebirgsspannungen, sowie Kriechverformungen des Gebirges.

64.3 Prozessbeschreibung

Prinzipiell lassen sich thermische Expansions- oder Kontraktionsprozesse in Nah- und Fernfeldprozesse unterteilen. Zum einen ist aufgrund der im Nahfeld (Behälternahe) höheren Temperaturen der Prozess dort wesentlich signifikanter als im Fernfeld und zum anderen pausen sich Expansions- oder Kontraktionsprozesse im Nahfeld z. B. mechanisch bis an die Erdoberfläche durch (Hebung/Senkung). Etwas anders laufen die thermisch induzierten Volumenänderungen beim klimatisch bedingten Wärmestrom ab. Der Prozess ist nahe der Erdoberfläche intensiver ausgeprägt als in tieferen Gebirgsbereichen.

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kommt es während der frühen Nachverschlussphase zu einem signifikanten Temperaturanstieg in den Einlagerungsbohrlöchern. Die aus der thermischen Expansion resultierenden thermomechanischen Spannungen wirken auf alle nahegelegenen technischen und geotechnischen Komponenten und das angrenzende Gebirge.

Innerhalb des Buffers in den Einlagerungsbohrlöchern kommt es zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks. Dadurch werden hydraulische Druckgradienten erzeugt, die dazu führen können, dass Fluide in Richtung des geringeren Drucks migrieren. Gleichzeitig erhöht die thermische Expansion den Innendruck im Bentonitbuffer und unterstützt den Quelldruck in seiner Anpresswirkung an die Bohrlochkontur. Durch diesen erhöhten Innendruck wird aber auch die Belastung auf das über dem Buffer liegende Widerlager erhöht. Dieser Effekt muss bei der Auslegung des Widerlagers berücksichtigt werden. Auch das Widerlager selbst unterliegt noch leichten thermischen Expansions- und Kontraktionseffekten, die in die Auslegung einzubeziehen sind. Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient von kompaktiertem Bentonit liegt bei etwa $1 \cdot 10^{-5}$ bis $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ je nach Sättigungsgrad bzw. Porenfüllung. Weitere Daten zu thermischen Ausdehnungskoeffizienten können dem Modellbericht (Mrugalla et al. 2020) entnommen werden.

Im Streckenausbau der Bohrlochüberfahrungsstrecken werden durch Expansion und Kontraktion Spannungen induziert, die ggf. zu einer Rissbildung führen können. Da der Ausbau in der Nachverschlussphase keine Sicherheitsfunktion mehr erfüllt, ist dies von untergeordneter Bedeutung.

In der Auflockerungszone können die thermomechanischen Spannungen zum Aufreißen und Schließen von Rissen und im Wirtsgestein sowie im Deckgebirge zur Reaktivierung oder Neubildung von Störungen oder Klüften führen. Die thermische Expansion der in Rissen eingeschlossenen Fluide kann das Schließen der Auflockerungszone verzögern.

An der Erdoberfläche kommt es durch die thermische Expansion des gesamten Gebirges oberhalb des Endlagers möglicherweise zu Hebungen und nach der Abkühlung zu Senkungen. Nach dem Bundesberggesetz sind Schiefstellungen der Geländeoberfläche wegen der negativen Auswirkungen auf Gebäude und Grundwasser über ein bestimmtes Maß hinaus unzulässig und zu vermeiden. Spezielle Berechnungen zur Ermittlung der Hebungsbeträge oberhalb eines Endlagerstandortmodells für Kristallingesteine existieren bislang nicht.

Klimaänderungen, wie z. B. Kaltzeiten, können vor allem im Deckgebirge zur Gesteinskontraktion führen. Außerdem können Kontraktions- und Expansionseffekte auch Auswirkungen auf die Funktion der Verschlusselemente eines Schachtes oder einer Rampe haben, die noch im Einflussbereich des klimatisch induzierten Wärmestroms liegen.

64.4 Zeitliche Beschränkung

Eine zeitliche Beschränkung existiert nicht. Die Wärmeabgabe der Abfallbehälter ist zwar zeitlich auf ca. 50.000 Jahre beschränkt, aber eventuelle Klimaänderungen können den klimatisch bedingten Wärmeeintrag von der Oberfläche aus, und damit auch den thermischen Expansions-/Kontraktionsprozess, im gesamten Bewertungszeitraum verändern.

64.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Da die Einlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle vorgesehen ist und das Auftreten mehrerer Kaltzeiten im Bewertungszeitraum erwartet wird, ist das Auftreten thermisch induzierter Volumenänderungen wahrscheinlich.

64.6 Ungewissheiten

- Wärmebedingte Hebung und Senkung des Deckgebirges.

64.7 Literaturquellen

- ANDRA (2005): Safety analysis of a geological repository. – Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Dossier 2005 Granite; Tome: 221 pp.; Châtenay-Malabry Cedex.
- Grassmann, S., Cramer, B., Delisle, G., Hantschel, T., Messner, J. & Winsemann, J. (2010): pT-effects of Pleistocene glacial periods on permafrost, gas hydrate stability zones and reservoir of the Mittelplate oil field, northern Germany. – Marine and Petroleum Geology, Vol. 27, 1: 298-306. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.08.002
- Hudson, J.A., Stephansson, O., Andersson, J., Tsang, C.-F. & Jing, L. (2001): Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance. – International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 38 (1): 143–161.
- Hudson, J., Stephansson, O. & Andersson, J. (2005): Guidance on numerical modelling of thermo-hydro-mechanical coupled processes for performance assessment of radioactive waste repositories. – International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 42 (5–6): 850–870.

- Hökmark H., Lönnqvist M. & Fälth B. (2010): THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydromechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB TR-10-23; Stockholm.
- Jobmann, M., Polster, M. & Schonebeck, M. (2007): Investigation on thermal expansion effects in clay formations. – DBE TECHNOLOGY GmbH, Final Report; Peine.
- Magill, J., Pfennig, G. & Galy, J. (2009): Karlsruher Nuklidkarte. – 7. Auflage 2006, revised printing.
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Nagra (1994): Kristallin-I. Safety Assessment Report. – Nagra, Technical Report, 93-22; Wettingen.
- Pastina, B. & Hellä, P. (2007): Expected evolution of a spent fuel repository at Olkiluoto. – Posiva: Report 2006-05, Olkiluoto.
- SKB (2006): Geosphere process report for the safety assessment SR-Can. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-06-19; Stockholm.
- SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-11-01, Volume I, Main report of the SR-Site project: 276 pp.; Stockholm.

65 Phasenübergänge

NEA-Gruppe:	2.3.1	<i>Thermal processes [waste package]</i>
	3.2.1	<i>Thermal processes [repository]</i>

65.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Übergang zwischen festen und flüssigen, sowie flüssigen und gasförmigen Aggregatzuständen und umgekehrt. In welcher Phase sich ein Stoff befindet ist von seiner chemischen Zusammensetzung, sowie Druck und Temperatur anhängig.

65.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In Abhängigkeit von Temperatur und Druck ändert sich der Aggregatzustand der Materialien (z. B. Wasser, Salz, Kohlenwasserstoffe). Der Phasenübergang von fest nach flüssig wird als Schmelzen und von flüssig nach gasförmig als Verdampfen bezeichnet. Umgekehrt wird der Übergang von gasförmig zu flüssig als Kondensation und von flüssig zu fest als Erstarren oder bei Wasser als Gefrieren bezeichnet.

Im Endlagersystem betrifft der Phasenübergang von flüssig zu gasförmig (und umgekehrt) vor allem Wasser. Der Übergang von flüssig zu fest (und umgekehrt) betrifft ausschließlich Wasser, das in Folge von klimatisch bedingten Temperaturänderungen gefrieren oder schmelzen kann. Alle anderen in das Endlager eingebrachten Stoffe oder Bestandteile des Wirtsgesteins und Deckgebirges weisen eine Stabilität auf, so dass in dem auftretenden Temperaturbereich kein Schmelzen oder Erstarren zu betrachten ist.

Der Siedepunkt von Wasser bei Atmosphärendruck liegt in Abwesenheit anderer Stoffe bei einer Temperatur von 100 °C, für eine gesättigte NaCl-Lösung bei 108,8°C (D'Ans & Lax 1983). Mit zunehmendem Druck nimmt die Siedetemperatur des Wassers zu. Ab dem kritischen Punkt, der bei Wasser bei etwa 22,1 MPa und 374°C liegt, kann nicht mehr zwischen den Aggregatzuständen flüssig bzw. gasförmig unterschieden werden.

65.3 Prozessbeschreibung

Bei dem vorliegenden Endlagerkonzept (Bertrams et al. 2017) werden durch die wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle Bereiche in deren unmittelbarer Nähe signifikant aufgeheizt. Daher kann aus den wässrigen Lösungen in der Linerfüllung (Sand), im Ton des Bohrlochverschlusses, im Widerlager und im Streckenversatz sowie im umgebenden Wirtsgestein – in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung und den herrschenden Druckbedingungen – Wasser verdampfen.

Die Siedetemperatur von Wasser in der im Modell „mKBS-3“ zu betrachtenden Tiefenlage bzw. dem zugehörigen Druck liegt bei ≥ 250 °C. Das Verdampfen von Wasser aus den wässrigen Lösungen führt zur Ausfällung von Stoffen und zur Bildung von Gasen. Wenn die Gase aus dem Einlagerungsbohrloch entweichen können, stehen die verdampften Lösungen nicht mehr für andere Prozesse zur Verfügung, z. B. Korrosion und Alteration. Kondensieren die Dämpfe in kälteren Bereichen außerhalb des Einlagerungsbohrlochs, können dort diese Prozesse ausgelöst oder beschleunigt werden. Durch die Bildung von Wasserdampf wird auch der Fluiddruck verändert. Durch das Verdampfen von Wasser wird der Sättigungsgrad des Mediums verringert. Dadurch verändert sich auch dessen relative Permeabilität für Lösungen, bzw. Gase.

Bitumen und Asphalt, wie er in den Streckenabdichtungen vorgesehen ist (Jobmann & Burlaka 2021), wird bei hinreichender Erwärmung flüchtige Kohlenwasserstoffe (Alkane, Alkene, Aromaten etc.) freisetzen. Diese können zur Bildung organischer Säuren führen, die den pH-Wert im Einlagerungsbereich beeinflussen.

Entsprechend der Tiefenlage der Einlagerungsbereiche, die bei ungefähr 600 m u. GOK liegen werden, wird nicht davon ausgegangen, dass sich klimatische Einflüsse dort noch signifikant auswirken und zu Phasenübergängen führen können.

65.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

65.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Der Wasserdampf steht immer im Gleichgewicht mit der Lösung. Dementsprechend verdunstet und kondensiert ständig Wasser.

65.6 Ungewissheiten

- Verändern geringe Mengen an freigesetzten flüchtigen Kohlenwasserstoffen das hydrochemische Milieu so signifikant, dass das nicht zu vernachlässigen ist?

65.7 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- D’Ans, J. & Lax, E. (1983): Taschenbuch für Chemiker und Physiker. – 3. Aufl.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallin-gestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.

66 Übertragung von Spannungen

NEA-Gruppe:	2.3.3	<i>Mechanical processes [waste package]</i>
	3.2.3	<i>Mechanical processes [repository]</i>
	4.2.3	<i>Mechanical processes [geosphere]</i>

66.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Übertragung von Spannungen innerhalb des Endlagersystems durch mechanische, hydraulische oder chemisch-mineralogisch induzierte Lasten.

Thermisch induzierte Lasten werden im FEP „Thermische Expansion und Kontraktion“ beschrieben. Dynamische Spannungsübertragungen durch seismische Einwirkungen werden im FEP „Erdbeben“ beschrieben.

66.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Generell führt eine Spannungsdifferenz in einem Bergwerk, z. B. durch Auffahrungen, zu einer Übertragung von Spannungen auf nicht durchörterte Gesteinsbereiche. Dieser Prozess wird im allgemeinen Sprachgebrauch als ‚Spannungsumlagerung‘ bezeichnet. Spannungen, die bisher auf den Gesteinsbereich einwirkten, der entfernt wurde, müssen jetzt vom umgebenden Gesteinsbereich mitgetragen werden. Der allgemeine Spannungszustand im Gebirge setzt sich aus den effektiven Spannungen im Gebirge (Gerüstspannungen) und dem Fluiddruck in den Poren des Gesteins und den Poren des Materials in den Grubenräumen zusammen.

Folgende Prozesse können zu Spannungen führen, die sich dann auf die jeweilige Umgebung übertragen:

- Bergmännische Auffahrungen,
- Volumenänderungen von Baumaterialien, z. B. Quell- oder Schrumpfungsprozesse, Metallkorrosion sowie Hydratation von Zement (siehe FEP „Quellen, Schwinden und Kriechen von Beton“, „Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen“, „Metallkorrosion“),
- Temperaturerhöhungen im Einlagerungsbereich (siehe FEP „Thermische Expansion oder Kontraktion“)
- Umbildung und Neubildung von Mineralen in der Geosphäre, z. B. in Störungen und Klüften (s. FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“)
- Strömungsprozesse (siehe FEP „Strömungsvorgänge im Grubengebäude“ und „Strömungsvorgänge in der Geosphäre“)
- Änderung von Auflasten (siehe FEP „Erosion“, „Sedimentation“, „Inland- oder Vorlandvereisung“, „Transgression oder Regression“)

Je nach den rheologischen Eigenschaften des Gebirges können diese übertragenen Spannungen ggf. durch Deformation abgebaut werden. Geschieht dies nicht, kann es bei Überschreiten von Festigkeitsgrenzen zu einem Bruch kommen.

Im ungestörten Gebirge liegt ein – meist anisotroper – Primärspannungszustand vor, der speziell durch die Auffahrung des Endlagerbergwerks gestört wird. Durch die Auffahrung stellt sich an der Hohlraumkontur ein deviatorischer Spannungszustand ein. In Abhängigkeit vom Betrag des Spannungsdeviators und aufgrund der hohen Festigkeit der Kristallingesteine werden die Spannungen nur in geringem Umfang bruchlos (s. FEP „Konvergenz“), sondern nach Über-

schreiten der Bruchgrenze, durch Ausbildung einer Auflockerungszone (ALZ) und Bruchverformungen abgebaut. Die Übertragung der Spannungen ist abgeschlossen, wenn die Ausgleichsprozesse zu einem Spannungsgleichgewicht geführt haben.

Das Spannungsfeld in Kristallingesteinen und ihre Störung durch Bergbauaktivitäten wurden umfassend in den Untertagelaboren Äspö in Schweden (SKB 2008, 2011) und Onkalo in Finnland (Hakala et al. 2017, Siren et al. 2017) untersucht. Hier wurden u. a. die Konsequenzen der thermischen Einwirkung der wärmeentwickelnden Abfälle und die mechanischen Einwirkungen des Bentonitquellens auf das Wirtsgestein analysiert.

66.3 Prozessbeschreibung

Während der zukünftigen Systementwicklung werden Spannungsänderungen in allen technischen und geotechnischen Komponenten des Endlagers sowie im umgebenden Gebirge auftreten (Bertrams et al. 2017). Daher müssen alle technischen und geotechnischen Komponenten gegen die erwarteten Spannungsänderungen ausgelegt sein. Die Art und Intensität der Spannungsänderungen hängen vom Standort und den Rahmenbedingungen im Endlagersystem ab.

Spannungen im Bereich der wesentlichen Barrieren (Behälter, Buffer)

In der Abfallmatrix finden Korrosion und Alterationsprozesse statt, die zur „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“ führen. Durch die damit verbundenen Volumenänderungen kommt es zu Spannungsänderungen. Weiterhin führt das Quellen des Bentonit-Buffers zu Spannungen am darin eingebetteten Behälter, in der außen angrenzenden Auflockerungszone des Wirtsgesteins sowie im Festgesteinswiderlager oberhalb des Buffers. Gasbildung durch Metallkorrosion oder durch den Abbau organischer Bestandteile, z. B. durch mikrobielle Prozesse (vgl. FEP „Mikrobielle Prozesse“), erzeugt Änderungen des Fluiddrucks und damit Spannungen an den Endlagerbehältern. Der Temperaturanstieg aufgrund des radioaktiven Zerfalls des Abfallinventars wird thermomechanische Spannungen durch „thermische Expansion oder Kontraktion“ in den Endlagerbehältern und den umgebenden Komponenten (Buffer, Auflockerungszone, Widerlager, Versatz, Wirtsgestein) induzieren.

Spannungsumlagerungen im Wirtsgestein, die aus dem Bohren und anderen Bergbauaktivitäten resultieren, erzeugen Konvergenzen, die die Kontaktzone zwischen dem Buffer und der Hohlraumkontur schließen. Bei der hohen Festigkeit kristalliner Gesteine ist die Konvergenz in der Regel sehr klein. Anschließend wird der Buffer mit dem eingeschlossenen Endlagergebäude durch den lithostatischen Druck eingespannt. Weitere Spannungsänderungen, die aus der Konvergenz der Hohlraumkontur resultieren, werden zunächst durch Deformation des Buffers aufgenommen bevor sie zu einer signifikanten Lasterhöhung auf den Behälter führen. Eventuelle Scherbewegungen im Gestein und die damit verbundenen Spannungen werden daher nicht direkt auf den Endlagerbehälter übertragen. Nur wenn die Gesteinsbewegungen eine bestimmte Größenordnung überschreiten, kann der Behälter durch die damit verbundenen Spannungen in Mitleidenschaft gezogen werden. Exemplarische Untersuchungen ergaben, dass z. B. bei Scherbewegungen an Klüften von bis zu 16 cm, eine Beeinträchtigung des Behälters nicht zu befürchten ist (Jobmann et al. 2008).

Die zunehmende Feuchtigkeit im Buffer kann zu einer Metallkorrosion führen. Die resultierenden Metallkorrosionsprodukte haben ein größeres Volumen als das Ausgangsmaterial und erzeugen daher im Behälter und seiner Umgebung Spannungen. Die korrosionsbedingte Gasbildung wird den Fluiddruck in der Einlagerungsstrecke erhöhen. Die zunehmende Feuchtigkeit im Buffer durch zutretende Lösungen führt auch zur Entwicklung eines Quelldrucks, der das Spannungsfeld in seiner Umgebung verändert.

Bei einem ausreichenden Feuchtigkeitsgehalt im Behälterinneren kann es zur Korrosion der Brennstoffmatrix bzw. Alteration der Glasmatrix und einer Metallkorrosion kommen (s. entsprechende FEP). Solange die Endlagerbehälter dicht sind, kann die Gasbildung durch Metallkorrosion den Fluidruck und damit die Spannungen im Behälter erhöhen. Nach einem Versagen von Endlagerbehältern ist auch eine Übertragung der Spannungen und damit eine direkte mechanische Einwirkung auf die Abfallmatrix möglich.

Spannungen im Bereich weiterer Barrieren im Grubengebäude

Im Grubengebäude sind folgende weitere Barrieren angeordnet:

- Kluftverschlüsse an hydraulisch leitfähigen, geklüfteten Bereichen,
- Versatz (Gemisch aus Bentonit und Ausbruchmaterial),
- Schacht- und Rampenverschlüsse sowie
- Abdichtungen von übertägigen und untertägigen Erkundungsbohrungen.

Die hydraulische Funktion dieser Barrieren ist die Begrenzung des Lösungszutritts in das Grubengebäude, um eine Erosion von Versatz und Buffer zu minimieren. Durch die Bohrlochabdichtungen werden potentielle Fließwege zwischen der Einlagerungssohle und der Biosphäre bzw. zwischen verschiedenen Grubenräumen verschlossen.

Die mechanische Funktion der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen ist die Stabilisierung des Gebirges, um eine Vergrößerung der Auflockerungszone oder eine mechanische Aktivierung von Klüften im Wirtsgestein zu verhindern. Alle Verschlüsse werden gegen den litho- und hydrostatischen Druck und den Quelldruck des Bentonits ausgelegt. Alterationen der Baumaterialien führen zu Volumenänderungen, aus denen Spannungsänderungen in den Barrieren und ihrer Umgebung resultieren. Thermomechanische Effekte sind aufgrund des großen Abstandes zu den Behältern für diese Verschlüsse von untergeordneter Bedeutung.

Da Kluftverschlüsse an stark wasserführenden Klüften errichtet werden, können anfangs ggf. hohe hydraulische Drucke kluftseitig auf die Verschlüsse einwirken. Langzeitig werden sich die Bentonite in den Verschlüssen und im Versatz aufsättigen bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die steifen, in das Gebirge eingespannten Widerlager werden die Dichtelemente an ihrer Einbauposition fixieren. Sie werden gegen litho- und hydrostatischen Druck ausgelegt. Der Quelldruck der Tone wird ggf. durch die Wahl einer geeigneten Rezeptur begrenzt, um der Entstehung von Mikrorissen im Gebirge vorzubeugen.

Generell können im Bereich der Schächte oder Rampen durch klimatische Einwirkungen sowie Auflastveränderungen an der Oberfläche thermomechanische Spannungen im Gebirge sowie in Versatz und Verschlusselementen induziert werden. In der frühen Nachverschlussphase wird eine Wiederangleichung der Umgebung der verfüllten Schächte und Rampen an den natürlichen geothermischen Wärmefluss incl. des entsprechenden Spannungsfeldes stattfinden.

Die Sicherheitsfunktion dieser Schacht- und Rampenverschlüsse ist die Begrenzung des Lösungszutritts in das Grubengebäude. Zum einen dient dies dazu, eine Erosion der Versatzmaterialien und Verschlüsse innerhalb des Grubengebäudes zu minimieren. Zum anderen soll dadurch über einen möglichst langen Zeitraum ein stabiles hydrochemisches Gleichgewicht in der Einlagerungssohle erhalten bleiben.

Die mechanische Funktion der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen ist die Stabilisierung des Gebirges, um eine Vergrößerung der Auflockerungszone oder einer Aufweitung von Klüften im Wirtsgestein entgegen zu wirken. Durch die Gebirgskonvergenz werden Spannungen aus dem Gebirge auf die Verschlusselemente übertragen und führen ggf. zu einer Kompaktion der Verschlusselemente. Im Gegenzug werden durch den sich entwickelnden Quelldruck der tonbasierten Elemente und des Betons Spannungen in das Gebirge übertragen. Diese gegenseitige Spannungsübertragung findet solange statt, bis ein Spannungsgleichgewicht erreicht ist.

Abgesehen von den klimatischen Einwirkungen in den Schächten und/oder Rampen sind thermisch induzierte Spannungsübertragungen aufgrund des großen Abstandes zu den Einlagerungsbereichen für diese Verschlüsse von geringer Bedeutung. Alterationen der Baumaterialien führen zu Volumenänderungen und damit zu einem Druckaufbau in den Barrierekomponenten, die auf deren Umgebung übertragen werden.

Außerdem gibt es technische Einrichtungen für die Betriebsphase, die die mechanische und hydraulische Entwicklung während der Nachverschlussphase beeinflussen. Schacht- und Rampenaustritt stabilisieren die Grubenräume, insbesondere in intensiv geklüfteten Bereichen mit ggf. aufgelockertem Gebirge. Da die Ausbauten nur für eine Funktionsdauer ausgelegt sind, die der Betriebsphase entspricht, werden sie während der Nachverschlussphase irgendwann ihre mechanische Stabilität verlieren. Obwohl sie durch den Versatz oder Verschlussbauwerke gestützt werden, wird ihre Zerstörung zu einer Spannungsübertragung auf die Verschlusselemente führen.

Spannungen im Wirtsgestein

Das Primärspannungsfeld des Wirtsgesteins entspricht weitgehend dem tiefenabhängigen lithostatischen Druck. Dieser ist auch entscheidend für das sekundäre Spannungsfeld, das sich nach der Auffahrung des Endlagerbergwerks einstellt. Bergbauerfahrungen belegen, dass sich nach der Auffahrung der Grubenräume sekundäre Spannungen an der Hohlraumkontur einstellen. Diese führen zu einer Spannungsumverteilung mit einer Überschreitung der Dilatanzgrenze des Gebirges und es bildet sich eine konturnahe Auflockerungszone. Außerdem können – je nach Intensität der Spannungsänderungen und der mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins – Bruchverformungen an der Hohlraumkontur auftreten.

In der frühen Nachverschlussphase wird eine thermische Wiederangleichung der Umgebung des Grubengebäudes an den natürlichen geothermischen Wärmefluss inklusive des entsprechenden Spannungsfeldes stattfinden. In den Einlagerungsfeldern wird dieser thermische Ausgleich durch den Abfall induzierten Wärmestrom und die resultierende Fluiddruckänderung überlagert. Gravierende Klimawechsel (Kaltzeiten) können die Temperaturen bis zur Einlagerungssohle um einige Kelvin erniedrigen (vgl. FEP „Klimatisch bedingter Wärmestrom“) und thermomechanische Spannungen verursachen (vgl. FEP „Thermische Expansion oder Kontraktion“).

Weiterhin können veränderte Auflasten (z. B. durch Inland- oder Vorlandvereisung, glaziale Rinnenbildung, Sedimentation, Erosion) oder Erdbeben das Spannungsfeld beeinflussen und Klüfte im Wirtsgestein verändern. Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen in der Auflockerungszone oder in Klüften führen zu Volumenänderungen, aus denen Spannungsänderungen resultieren.

Spannungen im Deckgebirge

In der frühen Nachverschlussphase wird eine Wiederangleichung der Umgebung der verfüllten Schächte und Rampen an den natürlichen geothermischen Wärmefluss inklusive des entsprechenden Spannungsfeldes stattfinden. Bei gravierenden Klimaänderungen (vgl. FEP „Permafrost“) können das Deckgebirge und die oberen Bereiche des Wirtsgesteins gefrieren. Aus der Volumenzunahme durch das Gefrieren des Wassers resultieren thermisch induzierte Spannungen, die z. B. auf vorhandene Klüfte übertragen werden und diese ggf. mechanisch aufweiten können.

66.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

66.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Eine Übertragung von Spannungen erfolgt überall im Endlagersystem im gesamten Bewertungszeitraum.

66.6 Ungewissheiten

- Es ist ungewiss, wie lange die transiente Phase dauert, speziell die Aufsättigung und damit die Quelldruckentwicklung innerhalb der Einlagerungsbohrlöcher und Strecken.
- Es ist ungewiss, ob grundsätzlich von einem deviatorischen Spannungszustand auszugehen ist, der ausreicht, um durch rheologisches Deformationsverhalten, das bei Kristallineinstein ohnehin sehr gering ausgeprägt ist, die Auflockerungszonen wieder vollständig zu schließen. Es bleibt demnach ungewiss, bis zu welchem Grad eine spannungsbedingte Schließung der ALZ wahrscheinlich ist.
- Es ist ungewiss, mit welchen Auflast- und damit Spannungsänderungen an der Erdoberfläche im Bewertungszeitraum durch geologische Prozesse zu rechnen ist.

66.7 Literaturquellen

- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallineinstein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Hakala, M., Siren, T., Strom, J., Valli, J., Hakala, v., Heine, J., Sireni, S., Kemppainen, K. & Savunen, J. (2017): In situ stress- measurements in Onkalo with LVDT-cell. – Posiva, 2016-20; Eurajoki, Finland.
- Jobmann, M. (Editor), Brewitz, W., Fahrenholz, Ch., Fein, E., Hammer, J., Keesmann, S., Krone, J., Mrugalla, S., Wolf, J. & Ziegenhagen, J. (2008). Untersuchungen zur Wirksamkeit des geologischen und geotechnischen Barrierensystems im Hinblick auf die Standortauswahl in magmatischen Gesteinen (WIBASTA). – DBE Technology GmbH, Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Peine.
- SKB (2008): Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report TR-08-05; Stockholm.
- SKB (2011): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-11-01, Volume I, Main report of the SR-Site project: 276 pp.; Stockholm.
- Siren, T., Hakala, M., Valli, J., Christiansson, R., Mas Ivars, D., Lam, T., Mattila, J. & Suikkanen, J. (2017): Parametrisation of Fractures - Final Report. – Posiva, Report 2017-1; Eurajoki, Finland.

67 Strömungsvorgänge in der Geosphäre

NEA-Gruppe: 4.2.2 *Hydraulic processes [geosphere]*

67.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Strömung von Fluiden und der darin enthaltenen Stoffe in der Geosphäre aufgrund von Potentialunterschieden.

67.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

In Mittelgebirgsregionen mit Kristallingestein ist der wasserführende Untergrund generell in zwei verschiedene Aquifertypen gegliedert: Das geklüftete Festgestein bildet einen Kluftgrundwasserleiter, die darüber liegende Verwitterungszone einen Porengrundwasserleiter (Vornehm 2005). In Kluftgrundwasserleitern ist die hydraulische Leitfähigkeit des ungestörten Gesteins meist sehr gering und spielt für den Grundwasserfluss eine untergeordnete Rolle. Als Folge tektonischer Beanspruchung enthalten diese Gesteine jedoch häufig Störungen und Klüfte, die bevorzugte Wasserfließwege darstellen. Daneben können z. B. Ganggesteine oder Vererzungen Wasserwegsamkeiten aufweisen.

Die Wasserführung eines Kluftgrundwasserleiters im Kristallingestein hängt stark von der Verteilung der hydraulisch wirksamen Klüfte und Störungen ab (vgl. FEP „Lösungen im Wirtsgestein“ und „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“). Dabei bilden die durch verschiedene Prozesse entstandenen Klüfte (Entspannungsklüfte, tektonische Klüfte oder Abkühlungsklüfte) ein hydraulisch leitfähiges Netzwerk, das sich auf einer repräsentativen Skala wie ein homogener Aquifer verhält (Stober 1995). In geklüfteten kristallinen Gesteinen variieren die Hohlräume von mikroskopischen Poren bis zu makroskopisch erkennbaren Öffnungen, wie z. B. bei entahlten Klüften. Durch die Verteilung und die unterschiedlichen Eigenschaften von Klüften kann es zu einer unregelmäßig ausgeprägten Grundwasseroberfläche kommen. Bei einem schwach geklüfteten Wirtsgestein können wenige Deformations-/Kluftzonen die Strömungsvorgänge kontrollieren (SKB 2010).

Der Antriebsmechanismus für Strömungsprozesse sind Gradienten im Fluiddruck. Diese können durch den lokalen Fluiddruck, Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Fluiden (Auftrieb) oder innerhalb eines Fluids (Konvektion) hervorgerufen werden. Entsprechend dem Darcy-Gesetz ist der Fluidstrom proportional zum Fluiddruckgradienten. Der Proportionalitätsfaktor im Darcy-Gesetz ist je nach seiner Formulierung die Permeabilität k [m²] bzw. der Durchlässigkeitsbeiwert k_f [m/s].

Fluiddruckunterschiede können von der festen Phase auf Fluide übertragen werden (FEP „Übertragung von Spannungen“). Dies geschieht zum Beispiel bei Prozessen, die das Volumen der Festphase ändern. Weiterhin können Prozesse (z. B. Temperaturschwankungen), die die Menge bzw. das Volumen der flüssigen oder gasförmigen Phase verändern, Fluiddruckunterschiede bewirken.

Werden in einem Medium Fluide in unterschiedlichen Phasen bewegt, spricht man von Mehrphasenströmung. In der Natur am bedeutendsten ist die Zweiphasenströmung von Gasgemischen (z. B. Luft) und wässrigen Lösungen. Treten mehrere Phasen auf, werden die Permeabilitäten für die einzelnen Phasen verringert (effektive Permeabilitäten). Das Verhältnis zwischen effektiver und absoluter Permeabilität ist als relative Permeabilität für die jeweilige Phase definiert.

In kristallinen Gesteinen spielen folgende Strömungsprozesse eine Rolle:

- die laminare Strömung wässriger Lösungen in gesättigten Medien (Darcy-Strömung, turbulente Strömungen sind im Wirtsgestein unwahrscheinlich),
- die Gasströmung,
- der Zweiphasenfluss im Falle des Transports von Gasen bei gleichzeitiger Verdrängung von Lösungen.

Die Strömung von Lösungen bewirkt auch einen Transport von gelösten Stoffen in der flüssigen Phase sowie von Gaskomponenten in der Gasphase mit der Strömung des Transportmediums (Wasser oder Gas). Dieser Prozess wird als Advektion bezeichnet. Der gelöste Stoff wird bei der Advektion mit der Geschwindigkeit des Transportmediums bewegt. Die Stoffverteilung bewegt sich bei einem gleichförmigen Geschwindigkeitsfeld der Strömung ohne Veränderung ihrer räumlichen Ausbreitung. Ein absolut gleichförmiges Geschwindigkeitsfeld ist allerdings ein Idealzustand und tritt in natürlichen Systemen nicht auf (siehe FEP „Dispersion“ und „Diffusion“). In Lösungen vorhandene kolloidale Partikel (z. B. Tonkolloide), können Radionuklide anlagern und deren Transport beeinflussen (vgl. FEP „Kolloidbildung und -filtration“). Die advective Geschwindigkeit von Kolloiden kann dabei größer sein als die Abstandsgeschwindigkeit des Fluids, da die Fluidgeschwindigkeit innerhalb einer Kluftöffnung mit Annäherung an die Kluftwände abnimmt. Aufgrund der Ladung der Kolloide bewegen sich diese aber bevorzugt im mittleren Bereich der Kluftöffnung.

Die Grundlagen der Grundwasserhydraulik werden in einer Reihe von Standardwerken beschrieben (Bear 2013; de Marsily 1986; Domenico & Schwartz 1997; Freeze & Cherry 1979; Singhal & Gupta 2010; Stober & Bucher 2000; Lege et al. 1996).

67.3 Prozessbeschreibung

Im Modell „mKBS-3“ wird ein Kluftgrundwasserleiter angenommen (s. a. FEP „Störungen und Klüfte im Deckgebirge“, „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“), bei dem die Strömung von Lösungen im Wirtsgestein aufgrund seiner geringen Gesteinspermeabilität hauptsächlich im hydraulisch vernetzten (offenen) Kluftnetzwerk erfolgt. Im Wirtsgestein ist ein generisches Kluftsystem mit sechs Klufrichtungen enthalten. Durch das Zusammentreffen von mehreren hydraulisch wirksamen Klüften entstehen größere Vernetzungsbereiche. Dabei sind nicht alle Klüfte hydraulisch vernetzt, so dass voneinander getrennte Cluster von Klüften vorliegen können (Mrugalla et al. 2020). Aus der statistischen Verteilung ergeben sich im Wirtsgestein unterschiedlich stark vernetzte Bereiche.

Das Grundwasser befindet sich im Modell „mKBS-3“ hauptsächlich im Bereich von Hohlräumen innerhalb des Kluftnetzwerkes des Deckgebirges und Wirtsgesteins. Das Wirtsgestein ist zu Beginn der Nachverschlussphase vollständig lösungsgesättigt. Lediglich die direkt angrenzenden Bereiche der Auflockerungszone um das Grubengebäude können ungesättigt sein (vgl. FEP „Gase im Wirtsgestein“, „Lösungen im Wirtsgestein“), während es im Deckgebirge nahe der Geländeoberfläche vermehrt Bereiche gibt, die luftgefüllt sind. Generell nimmt die Wassersättigung in der ungesättigten Zone mit der Annäherung an die Geländeoberfläche ab. Dennoch besteht auch in der ungesättigten Zone die Möglichkeit, dass sich dort aufgrund von variierenden Gesteinseigenschaften kleinere vollständig gesättigte Bereiche ausbilden, die den Grundwasserspiegel unregelmäßig erhöhen können. In diesem Fall bildet sich keine einheitliche von der Geländeoberfläche und dem atmosphärischen Druck beeinflusste Grundwasseroberfläche aus.

Die Grundwasserströmung im vereinfacht dargestellten stark geklüfteten Deckgebirge erfolgt hauptsächlich auf Klüften und wird im Wesentlichen durch die Schwerkraft bestimmt. Im oberen Bereich der Verwitterungszone, in dem Granitgrus vorkommt, sind im natürlichen System

die Kristallingesteine auch als Porengrundwasserleiter ausgebildet (BMU 2003) bzw. als Kluft-/Porengrundwasserleiter mit unterschiedlicher hydraulischer Leitfähigkeit. Im Modell „mKBS-3“ wird diese Unterscheidung nicht umgesetzt, sondern eine einheitliche hydraulische Leitfähigkeit des Deckgebirges bis zu einer Tiefe von 200 m u. GOK angenommen.

Grundwasser kann eine Reihe von Gasen wie Stickstoff und Helium in gelöster Form enthalten. Gelöste Gase haben meist einen geringen Effekt auf die Strömungseigenschaften des Grundwassers. Eine Zweiphasenströmung entsteht z. B., wenn der Druck auf das Grundwasser abnimmt. In diesem Fall kann das Gas eine Grenzschicht bilden, die die Permeabilität des Gesteins für wässrige Lösungen herabsetzt.

Strömungsvorgänge in der Gasphase erfolgen im Wirtsgestein nur dann, wenn Gase aus dem Grubengebäude in das Wirtsgestein eingedrungen sind. Dazu ist das Überschreiten des Gas-eindringdrucks oder der minimalen Hauptspannung des Wirtsgesteins erforderlich. Wenn Gase in das Wirtsgestein eindringen, so führen diese zu einer teilweisen Verdrängung der vorhandenen Lösungen. Aufgrund der Grundwasserströmung können Gase, die z. B. durch Gasproduktion aus dem Endlager freigesetzt werden, bei Kontakt mit dem Grundwasser in größerem Umfang in Lösung gehen. Ob nach Druckentlastung eine freie Gasphase im Deckgebirge entsteht, oder ob sämtliche Gase in gelöster Form vorliegen, muss im Einzelfall geprüft werden.

Aufgrund der durch die Strömungsprozesse verursachten Advektion können Stoffe im Endlagersystem transportiert werden. Die transportierten Inhaltsstoffe können u. U. einen Einfluss auf die hydrochemischen Verhältnisse haben.

Strömungsvorgänge in der Geosphäre werden auch durch klimatisch bedingte Prozesse beeinflusst. In der frühen Nachverschlussphase werden durch den Wärmeeinfluss der Abfälle Druckunterschiede hervorgerufen, die eine konvektive Strömung verursachen können. Allerdings müssen Faktoren wie eine großflächige Eisüberdeckung durch Gletscher mit veränderten Bedingungen an der Gletscherbasis, isostatische Effekte oder eine Verlagerung der Küstenlinie infolge von Meeresspiegelschwankungen aufgrund der Annahmen für das geologische Umfeld des Modells nicht betrachtet werden. Schwankungen der Niederschlagsmenge und Permafrost sind hingegen zu erwarten (vgl. FEP „Niederschlagseintrag“ und „Permafrost“).

Die Verteilung der Wässer bestimmt Transportprozesse und ist ebenfalls wichtig für Austauschprozesse wie die Sorption. Die oberflächennahen Prozesse haben aufgrund der angenommenen fehlenden Zirkulation im Bereich des Modellgebietes keine oder nur geringe Auswirkungen auf die Lösungen im Wirtsgestein, so dass sich eine chemische Zonierung ausbilden kann. Daher ist davon auszugehen, dass sich die Lösungen im Wirtsgestein innerhalb der nächsten eine Million Jahre nur langsam verändern werden (vgl. FEP „Lösungen im Wirtsgestein“).

67.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

67.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

In der Geosphäre sind Lösungen und hydraulische Druckunterschiede vorhanden, wodurch Strömungsvorgänge ausgelöst werden und ständig ablaufen.

67.6 Ungewissheiten

- Die Beschreibung des kompletten Strömungsverhaltens von Lösungen in Klüften und dessen numerische Modellierung sowie die in situ Bedingungen in großen Teufen sind nur näherungsweise möglich.

67.7 Literaturquellen

- Bear, J. (2013): Dynamics of Fluids in Porous Media. – 802 pp.; New York (Dover Publications).
- BMU (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Ed.): 239 S.; Bonn.
- de Marsily, G. (1986): Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers. – 1: 464 pp.; Orlando (Academic Press).
- Domenico, P.A. & Schwartz, F.W. (1997): Physical and Chemical Hydrogeology. – 2: 528 pp.; (Wiley).
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. (1979): Groundwater. – 604 pp.; Englewood Cliffs, New Jersey (Prentice-Hall).
- Lege, T., Kolditz, O. & Zielke, W. (1996): Strömungs- und Transportmodellierung. – Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 2: XV, 419 S.; Berlin (Springer). DOI: 10.1007/978-3-642-61407-1
- Mrugalla, S., Frenzel, B., Sönnke, J., Stark, L. & Weitkamp, A. (2020): CHRISTA-II – Beschreibung der generischen geologischen Modelle für die Endlagerkonzepte „multipler ewG“ und „mKBS-3“, Ergebnisbericht, BGR, Hannover.
- Singhal, B.B.S. & Gupta, R.P. (2010): Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. – 2; (Springer). DOI: 10.1007/978-90-481-8799-7
- SKB (2010): Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR 10-48: 276 pp.; Stockholm.
- 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).
- Vornehm, C. (2005): Hydro-geochemische Untersuchungen zum System Niederschlag – Boden – Grundwasser im Grundgebirge des Bayerischen Waldes. – PhD, Ludwig-Maximilians-Universität, Fakultät für Geowissenschaften: 185 S.; München.

68 Strömungsvorgänge im Grubengebäude

NEA-Gruppe:	2.3.2	<i>Hydraulic processes [waste package]</i>
	3.2.2	<i>Hydraulic processes [repository]</i>

68.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt die Strömung der im Grubengebäude vorhandenen Fluide in den vernetzten Poren- und Resthohlräumen des Grubengebäudes in Folge der herrschenden Potentialunterschiede und den Transport der in den Fluiden enthaltenen Stoffe.

68.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Die wesentlichen Antriebsmechanismen für Strömungsvorgänge im Grubengebäude sind der hydraulische Gradient, Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Fluiden (Auftrieb) oder innerhalb eines Fluids (Konvektion) (Bear 1972). Strömungsvorgänge in der Gasphase werden durch Gasbildung, die Porenraumverringerung durch Konvergenz und Quellen der Tonminerale, sowie den Auftrieb verursacht. In lösungserfüllten Hohlräumen können gebildete Gase zu einer Verdrängung vorhandener Lösungen führen sofern die Gase unter den herrschenden Druckverhältnissen nicht in Lösung gehen. Die resultierende Strömungsgeschwindigkeit wird sowohl durch die Eigenschaften des durchströmten Mediums (Porosität und Permeabilität), als auch durch die des strömenden Fluids (Viskosität, Dichte) beeinflusst (Platten & Legros 1984).

Werden in einem Medium Fluide in unterschiedlichen Phasen bewegt, wird dies als Mehrphasenfluss bezeichnet (Van Genuchten 1980). In der Natur am bedeutendsten ist der Zweiphasenfluss von Gasgemischen (z. B. Luft) und wässrigen Lösungen. Treten im Porenraum mehrere Phasen auf, werden die Permeabilitäten für die einzelnen Phasen verringert (effektive Permeabilitäten). Das Verhältnis zwischen effektiver und absoluter Permeabilität ist als relative Permeabilität für die jeweilige Phase definiert.

68.3 Prozessbeschreibung

Es spielen grundsätzlich folgende Strömungsprozesse eine Rolle:

- eine laminare Strömung wässriger Lösungen in gesättigten Grubenbauen, z. B. durch die Gasbildung angetrieben (Darcy-Strömung, turbulente Strömungen sind unter Endlagerbedingungen unwahrscheinlich),
- eine Gasströmung durch Bildung von Gasen sowie
- ein Zweiphasenfluss im Falle des Transports von Gasen in Porenräumen bei gleichzeitiger Verdrängung von Lösungen.

Während der Wiederaufsättigung des Grubengebäudes ist davon auszugehen, dass der letztgenannte Prozess im Grubengebäude vorherrscht. Nach der weitgehenden Wiederaufsättigung ist anhand der zeitlichen Entwicklung der Gasbildungsraten abzuschätzen, welcher Strömungsprozess vorherrscht.

Die Durchströmung des Versatzes und der geotechnischen Barrieren wird durch deren Strömungswiderstand und gegebenenfalls durch den Gaseindringdruck beeinflusst. Dabei ist jeweils die Auflockerungszone zu berücksichtigen. Der Strömungswiderstand des Versatzes ist zu Beginn der Nachverschlussphase zeitlich variabel und hängt vom Quellen der dem Versatz

beigefügten Tonminerale ab. Sobald der Quellprozess des Versatzes abgeschlossen ist, verändert sich der Strömungswiderstand nicht mehr wesentlich. Nach Abschluss der transienten Verhältnisse stellen sich die natürlichen Druckverhältnisse wieder ein. Diese bestimmen dann die Strömungsverhältnisse im Grubengebäude. Die Konvergenz des Wirtsgesteins ist so gering, dass sie als Antriebsmechanismus für Strömungsprozesse vernachlässigt werden kann (siehe FEP „Konvergenz“).

Die Strömungsprozesse beeinflussen die Fluidmengen in den Grubenbauen und den Transport der in den Fluiden vorliegenden Stoffe. Beim Transport sind sowohl der Lösungs- als auch der Gaspfad zu betrachten.

Die Strömung von Lösungen bewirkt auch einen Transport von gelösten Stoffen in der flüssigen Phase, sowie von Gaskomponenten in der Gasphase mit der Strömung des Transportmediums (Wasser oder Gas). Dieser Transportprozess wird als Advektion bezeichnet. Der gelöste Stoff wird bei der Advektion mit der Geschwindigkeit des Transportmediums bewegt. Die Stoffverteilung bewegt sich bei einem gleichförmigen Geschwindigkeitsfeld der Strömung ohne Veränderung ihrer räumlichen Ausbreitung. Ein absolut gleichförmiges Geschwindigkeitsfeld ist allerdings ein Idealzustand und tritt in natürlichen Systemen nicht auf (siehe FEP „Dispersion“).

Die transportierten Inhaltsstoffe können u. U. einen Einfluss auf die hydrochemischen Verhältnisse haben. In Lösungen vorhandene kolloidale Partikel, u. a. Tonkolloide und Zementkolloide, können Schadstoffe anlagern und deren Transport beeinflussen.

Strömungsprozesse können zu einer Kanalisierung in Dichtelementen führen, z. B. wenn sich der Versatz ungleichmäßig aufsättigt.

68.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

68.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Strömungen von Lösungen sind aufgrund der aus Klüften im Wirtsgestein zutretenden Lösungen wahrscheinlich. Weiterhin erfolgt eine Strömung von Gasen aufgrund der Gasbildung und der eingeschlossenen Luft im Endlager.

68.6 Ungewissheiten

- Welcher Gastransportprozess herrscht langfristig vor, bzw. können aufgrund der geringen Gasbildungsraten die Gase vollständig im Wasser gelöst werden, oder ist mit einem Zweiphasenfluss zu rechnen?
- Verbleibt ein Ausbau in den Strecken und wenn ja, welche Rolle spielt dieser für die Strömungsprozesse?
- Wie lange dauert die transiente Phase, bis der Versatz vollständig aufgesättigt ist? Aufgrund des lokalen Zutritts von Lösungen über Klüfte müssen sich die Lösungen erst entlang der Strecken verteilen, was ggf. ein langandauernder Prozess sein kann.
- Muss über den gesamten Bewertungszeitraum von einer gleichbleibenden ALZ ausgegangen werden.

- Es ist ungewiss, bis zu welchem Grad die Strömungsprozesse im Grubengebäude mit denen im Kluftnetzwerk des Wirtsgesteins wechselwirken.
- Die Durchlässigkeit der ALZ lässt sich nur mit einer gewissen Bandbreite abschätzen.

68.7 Literaturquellen

Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. – New York (Dover Publications).

Platten, J.K. & Legros, J.C. (1984): Convection in Liquids. – Berlin, Heidelberg (Springer)

Van Genuchten, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. – Soil Sci. Soc. Am. J. 44:892-898.

69 Migration von Asphalt

NEA-Gruppe:	3.2.2	<i>Hydraulic processes [repository]</i>
	4.2.2	<i>Hydraulic processes [geosphere]</i>

69.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt das druckgetriebene Abwandern des Asphalts aus Asphalt-Dichtelementen in andere Teile der Verschlussbauwerke bzw. des Grubengebäudes oder in das angrenzende Gebirge.

69.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Seit Ende des 19. Jahrhunderts wird Bitumen bzw. Asphalt (= Bitumen + Zuschlagstoff) für Abdichtungen vor allem in den Schächten im Bergbau eingesetzt (Kerkhoven, 1960, Kudla et al. 2009). Dies basiert auf einer Reihe von Eigenschaften, die das Bitumen für Abdichtfunktionen interessant macht (Sitz 1981):

- Wasserundurchlässigkeit und Wasserunlöslichkeit,
- chemische Beständigkeit gegenüber (zement-)aggressiven Wässern, CO₂, Säuren, Salzen und anderen (zement-)aggressiven Medien,
- viskoses Verhalten, so dass Gebirgsbewegungen oder Widerlagerverschiebungen rissfrei gefolgt werden kann (Selbstheilungsvermögen),
- Dichte und Viskosität können durch einfache Maßnahmen (Zugabe von Beschwerungsstoffen, Verschnitt- und Lösungsmitteln, Verwendung von Bitumina unterschiedlicher Viskosität) den Erfordernissen angepasst werden,
- gute Alterungsbeständigkeit.

Wesentlich für die angestrebte Dichtfunktion in Endlagern sind das Fließverhalten und die Viskosität des Bitumens, die durch Zuschlagstoffe entsprechend der vorgesehenen Funktion angepasst werden kann. Eine weitere Voraussetzung für eine Dichtfunktion ist eine hinreichende Adhäsion/Haftung des Bitumens an den angrenzenden Komponenten bzw. dem Gebirge.

Die Bitumenviskosität ist – neben der Zusammensetzung – stark von der Temperatur abhängig. So sinkt sie für den Bitumen B80 (= B70/100) von 200.000 Pa s bei 20°C auf 5 Pa s bei 100°C (Sitz 1981). Für den Bitumen B200 (= B160/220) sind die Werte halb so hoch. Bei Temperaturen unter 30°C verhält sich Bitumen strukturviskos, bei höheren Temperaturen newtonsch (Krakau & Sitz 1991). Zur Einbringung in die Dichtelemente und zur Erzielung einer guten Haftung wird das Bitumen in der Regel heiß (> 80 °C) eingebracht. Beim Abkühlen kommt es zum Schrumpfen des Bitumens. Während dies bei Schachtverschlüssen aufgrund des gravitativen Nachfließens des Bitumens unproblematisch ist, kann es bei Horizontaldichtungen zum Entstehen neuer Hohlräume z. B. im Firstbereich führen (Kudla et al. 2009).

Um Materialverluste durch ein Abströmen und Abwandern des Bitumens in das Gebirge zu reduzieren, werden häufig Zuschlagstoffe verwendet, die die Viskosität des Bitumens erhöhen (Ruck 1962). Diese Mischungen werden – je nach Korngröße der Zuschlagstoffe – als "Asphalt" (> 0,1 mm) oder "gefülltes Bitumen" (< 0,09 mm) bezeichnet. Für die Funktionalität dieser Mischungen ist die Sinkgeschwindigkeit der Einzelpartikel in der Bitumenmatrix wichtig. Laboruntersuchungen haben ergeben, dass die Sinkgeschwindigkeit erst bei Temperaturen von 12,5°K oberhalb des Erweichungspunktes (bei B80 > 60,5 °C) dem Stokes'schen Gesetz folgen (Krakau & Sitz 1991). Bei der Anwendung in Bergwerken sind daher überwiegend niedrigere Absetzgeschwindigkeiten zu unterstellen.

Durch Variation des Bindemittelgehaltes kann das rheologische Verhalten des Asphaltes grundlegend – vom festkörperähnlichen bis zu flüssigkeitsähnlichen Verhalten – gesteuert werden. Asphalt mit 15,6 % Bindemittel liegt im Übergangsbereich. Die relative Viskosität des Bitumens steigt proportional mit der Masse der zugemischten Zuschlagsstoffmenge an. Die Viskosität hat auch einen großen Einfluss auf das Haftvermögen der Asphaltmischung. Deshalb sollte die Dichte nur soweit erhöht werden, dass sie über der Dichte der zutretenden Lösung liegt und die Sedimentationsstabilität erreicht wird. Als mineralischer Zuschlag haben sich insbesondere feinkörnige, blättchen- oder nadelförmige Füllermaterialien bewährt. Kriterien für die Festlegung der Mindestviskosität ergeben sich u. a. aus der Permeabilität der Auflockerungszone und des Gesteins sowie aus der Öffnungsweite von Rissen, Störungen und Klüften.

Die Funktionstüchtigkeit einer Asphaltabdichtung unter axialer Fluidruckbelastung ist von ihrer Verformungsmöglichkeit abhängig. Eine absolute Verformungsbehinderung würde die optimale Dichtwirkung gewährleisten. Im Normalfall bestehen aber Defekte oder Resthohlräume, in die Bitumen unter Druck zeitabhängig eingepresst werden kann. Zu Einschränkungen der Dichtwirkung kann es auch kommen, wenn sich die Filterschichten/Widerlager der Barriere verschieben (Kudla et al. 2009). Bindemittel mit sehr hoher Viskosität bieten zwar eine große Sicherheit gegen den dauerhaften Abfluss, aber gleichzeitig sind diese Bindemittel zu zäh (fast spröde) um durch Relaxationsvorgänge innere Spannungen abzubauen bzw. Selbstheilungsprozesse auszuführen. Für die Abdichtung von Schächten werden Mastixasphalte (Gesteinskörnung < 2 mm) und gefülltes Bitumen empfohlen. Vorteile dieser Materialien sind die hohe Plastizität, geringe Dilatanzneigung, ihre Pumpfähigkeit, die einen verdichtungslosen Einbau ermöglicht, und die weitgehende Undurchlässigkeit.

Fließverhalten, Viskosität und Haftvermögen von Bitumina können auch durch Alterationsprozesse beeinflusst werden. So kann in den Schächten die Oxidationsalterung eine Rolle spielen. Weiterhin ist eine Strukturalterung durch Änderung der Kolloidstruktur (Synärese) zu betrachten. Dabei verliert das Material seinen Flüssigkeitscharakter und versprödet zunehmend (Neumann & Iradj Rahimian 1992, Neumann 1995). Die mikrobielle Degradation von Bitumina (durch Pilze und Bakterien) im aeroben und anaeroben Milieu kann ebenfalls zu einer Erhöhung der Viskosität und zum Verspröden des Bitumens führen (Wolf 1989). Die Abbauraten sind im aeroben Milieu um den Faktor 100 höher als im anaeroben Milieu.

Praktische Erfahrungen bei der Verwendung von Bitumina in Schachtverschlüssen liegen aus dem Steinsalz- und Kalibergbau sowie von der Abdichtung unterirdischer Gasspeicher vor (Kudla et al. 2009, Sitz 1981, 2004). Für drei Endlagerbergwerke wurden Schachtverschlusskonzepte entwickelt, die weitgehend auf Asphaltdichtelementen basieren (Endlager Konrad, (NMU 2002) und ERAM) oder Asphaltdichtelemente einschließen (WIPP-Site, New Mexiko (US), SANDIA 2002).

69.3 Prozessbeschreibung

Im Verschlusskonzept für das Modell "mKBS-3" sind kombinierte Bentonit-Asphalt-Dichtelemente in den Kluftverschlüssen vorgesehen, sowie in Schacht- und Rampenverschlüssen vorgesehen (Jobmann & Burlaka 2021). Die Kluftverschlüsse bestehen aus Betonwiderlagern, Bentonit-Asphalt-Dichtelementen beidseitig der Kluft und einem Schotterelement im wasserführenden Bereich der Kluft. Die Widerlager gewährleisten die Lagestabilität des angrenzenden Bentonit-Asphalt-Dichtelementes und des Schotterelementes sowie des Versatzes in der folgenden Zugangsstrecke. Durch diese Anordnung setzt mit der Aufsättigung des Bentonits ein Quelldruck ein, durch den einerseits die Kontaktzone zum Gebirge abgedichtet und zum anderen ein Druck auf das Asphalt-Dichtelement ausgeübt wird. Dadurch wird der Asphalt

gegen das Widerlager und gegen die Streckenkontur gepresst. Dadurch wird analog zum Bentonitelement ebenfalls die Kontaktzone zur Streckenkontur an dieser Stelle abgedichtet. Außerdem kann die im Randbereich geplante Asphaltemulsion je nach Viskosität ein stückweit in die Auflockerungszone eindringen und damit ihre hydraulische Leitfähigkeit reduzieren. Dass ein derartiger Prozess – unter Heißeinbau – stattfinden kann, wurde im Rahmen von in situ Versuchen innerhalb des Vorhabens ELSA-II gezeigt (Kudla et al. 2009, 2012a, b). Zusätzlich wirkt der Asphalt noch über kapillare Sperrdruckeffekte einem Eindringen von Lösung entgegen. Aufgrund ihrer hydrophoben Eigenschaften sind Asphalt und wässrige Lösungen praktisch nicht miteinander löslich, d. h. es findet keine wechselseitige Beeinflussung statt.

Für die Schächte und Rampen sind, analog zum Schachtverschlusskonzept für das ERAM, Schotter-Asphalt-Widerlager/Dichtelemente vorgesehen. Dafür wird der Schotter mit Gussasphalt vergossen. Die entsprechende Technik wurde durch einen Großversuch im ERAM erprobt. Bei einer Druckbeaufschlagung des Asphalt-Dichtelementes mit langsam steigendem Fluiddruck kann das Bitumen aus dem Dichtelement in Störungen und Klüfte des angrenzenden Gebirges gepresst werden und der Asphaltspiegel wird an der Firste gleichmäßig abgesenkt (Kudla et al. 2012a). Letztendlich hängt die Abdichtwirkung eines Asphalt-Dichtelementes maßgeblich von der Permeabilität der angrenzenden Auflockerungszone und des Gebirges ab, die das Eindringvermögen des Asphalts und damit das Volumen des abwandernden Bitumens bestimmen. Bei einem raschen Fluiddruckanstieg können an der Phasengrenze Bitumen/Lösung röhrenartige Vertiefungen entstehen (viscous fingering), die sich später nach einem Druckabfall aber wieder schließen.

69.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

69.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Aufgrund seiner viskosen Eigenschaften und einem entsprechenden Druck wird der Asphalt aus den Dichtelementen in alle Wegsamkeiten des angrenzenden Gebirges (z.B. Kontakt- und Auflockerungszone, Störungen und Klüfte im Gebirge) eindringen. Daher ist der Prozess wahrscheinlich.

69.6 Ungewissheiten

Keine.

69.7 Literaturquellen

- Jobmann, M. & Burlaka, V. (2021): Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallgestein in Deutschland, Forschungsprojekt CHRISTA-II, Technischer Bericht, BGETEC 2021-15, BGE Technology GmbH, Peine.
- Kerkhoven, R.E. (1960): Bitumen im Schachtbau. – Chemie-Ing-Techn., 32. Jg., 1960/1: 40-45.
- Krakau, U. & Sitz, P. (1991): Auswahl von Bitumen und Asphalt für untertägige Verwendung. – Glückauf 127 (1991), Nr. 11/12: 459-464; Essen.

- Kudla, W., Dahlhaus, F., Glaubach, U., Gruner, M., Haucke, J., Hofmann, M. & Wasowiecz, B. (2009): Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. – Abschlussbericht, Förderkennzeichen 02C1124, TU Bergakademie Freiberg; Freiberg
- Kudla, W., Glaubach, U. & Hofmann, M. (2012a): Bergbautechnische Erprobung von Bitumen / Asphalten als Dichtmaterial in langzeitstabilen Schachtverschlussbauwerken. – 3. Zwischenbericht "Halbtechnische Versuche zum Einguss von Bitumen in Basaltschotter", TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- Kudla, W., Glaubach, U., Hofmann, M. & Dietze, R. (2012b): Bergbautechnische Erprobung von Bitumen / Asphalten als Dichtmaterial in langzeitstabilen Schachtverschlussbauwerken. – 2. Zwischenbericht "Untersuchungen zur Optimierung der Benetzungsfähigkeit von Bitumen". TU Bergakademie Freiberg; Freiberg.
- Neumann, H.-J. & Iradj Rahimian, B.P.-L. (1992): Zur Strukturalterung von Bitumen. – Bitumen Magazin, 2: 54–56.
- Neumann, H.-J. (1995): Was ist Bitumen? – Bitumen Magazin 4/95: 146-151.
- NMU (2002): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter als Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt; Hannover.
- Ruck, R. (1962): Stand der Untersuchungen von Füllern und Füller-Bitumen-Gemischen im In- und Ausland.- Bitumen 9/1962, 226-238.
- SANDIA (2002): Waste Isolation Pilot Plant. [repository] Isolation Systems Department, SANDIA National Laboratories, Shaft Sealing System Compliance Submittal Design Report, Attachment 12; Albuquerque (US).
- Sitz, P. (1981): Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen. – Freiburger Forschungshefte, A643 Bergbau und Geotechnik; Leipzig.
- Sitz, P. (2004): Verschlussbauwerke für aktive und stillgelegte Bergwerke, Untertagedeponien, Endlager, Speicherbergwerke – praktische Erfahrungen, Forschungsergebnisse, offene Fragen. – Fachgespräch "Verschlussmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen - Kenntnisstand, offene Fragen, FuE-Bedarf" Braunschweig 25.-26. März 2004, Materialien PTWTE Karlsruhe.
- Wolf, M. (1989): Mikrobieller Abbau von Bitumen. – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Technischer Bericht.

70 Dispersion

- NEA-Gruppe: 3.3.1 *Water-mediated migration [repository]*
 4.3.1 *Water-mediated migration [geosphere]*

70.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Dispersion wird in diesem FEP die mechanische Dispersion verstanden. Als mechanische Dispersion wird die Ausweitung von Stoffverteilungen, die in einem Fluid gelöst vorliegen, durch ungleichförmige Geschwindigkeitsprofile und unterschiedliche Weglängen in den Hohlräumen eines porösen bzw. geklüfteten Mediums bezeichnet.

70.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Mechanische Dispersion findet nur im Zusammenhang mit Strömungsprozessen statt. Während die Strömung des Transportmediums üblicherweise mit einer mittleren Geschwindigkeit auf dem hydraulisch kürzesten Weg durch das poröse Medium dargestellt wird, findet sie tatsächlich in den tortuösen Fließkanälen um die Festbestandteile des porösen Mediums herum statt. Dadurch wird auf der Kornskala ein vielfach wiederholtes Aufteilen und Mischen des Mediums bedingt. Die tatsächliche Weglänge für ein gelöstes Teilchen kann dadurch um ein Vielfaches länger sein als der gedachte mittlere Weg. Entsprechend der Weite der Fließkanäle ist außerdem die tatsächliche Fließgeschwindigkeit auf kleinster Skalenebene veränderlich (Konstriktivität). Beide Effekte haben makroskopisch die Ausbreitung einer ursprünglich eng begrenzten Teilchenwolke sowohl in Fließrichtung als auch quer dazu zur Folge. Einzelne Teilchen können durch die Dispersion also langsamer, andere schneller als die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Transportmediums transportiert werden. Die Dispersion ist in natürlichen, porösen Medien in der Regel in Ausbreitungsrichtung des Fluids (longitudinal) stärker als senkrecht dazu (transversal).

Da die Vielzahl der Fließwege eine genaue mathematische Beschreibung der Fließwege unmöglich macht, wird die mechanische Dispersion makroskopisch als gradientenkontrollierte Ausbreitung wie etwa bei der Diffusion beschrieben. Außerdem hängt die Stärke der Dispersion von der Fließgeschwindigkeit ab. Bei der Transformation auf größere Skalen müssen ggf. zusätzliche Inhomogenitäten (z. B. die Schichtung des Gesteins, Materialwechsel) berücksichtigt werden. Die formale Zusammenfassung von Diffusion und mechanischer Dispersion wird auch als hydrodynamische Dispersion bezeichnet (Scheidegger 1961).

In geklüftet porösen Medien wie etwa dem Kristallingestein sind daneben die Besonderheiten des Strömungsfeldes in einer Kluft zu berücksichtigen. Klüfte wurden in der Vergangenheit häufig durch planparallele Begrenzungen angenähert. Die Permeabilität solcher Klüfte ist dabei von der dritten Potenz der Kluftweite abhängig. Die Dispersion einer Wolke gelöster Stoffe kann in diesem Fall durch die variable Geschwindigkeit über den Kluftquerschnitt erfolgen (Taylor-Dispersion). Tatsächlich ist eine Kluft jedoch durch Oberflächenrauigkeiten gekennzeichnet, die zu einer von Ort zu Ort stark veränderlichen Kluftweite führen. In diesem Fall führen die veränderlichen Kluftweiten wie in einem porösen Medium zu örtlich veränderlichen Fließquerschnitten. Wegen der kubischen Abhängigkeit der örtlichen Permeabilität können die Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten jedoch erheblich sein und damit die bewegte Menge an Transportmedium örtlich stark konzentrieren. Dieser Effekt heißt „Channeling“ und macht ggf. die Beschreibung der dispersiven Ausbreitung gelöster Stoffe unmöglich.

Eine weitere Besonderheit mit Bezug auf Strömung und Transport folgt aus dem Zusammenspiel mehrerer Klüfte. Die Geometrie, die Kluftdichte und das Ausmaß der Konnektivität der

Klüfte in einem Kluftnetzwerk bestimmt die Dispersion im Kristallingestein (Posiva 2012). Bei geringer Kluftdichte und/oder geringer Konnektivität kann es jedoch zu einer Konstellation kommen, die die Bildung eines repräsentativen Elementarvolumens (REV) (Bear 1972) unmöglich macht. Sofern ein solches Volumen nicht gefunden werden kann, gelten die Gesetze für die Mittelwertbildung von Strömungs- und Transportparametern auf Elementebene eines numerischen Berechnungsverfahrens nicht mehr, was der Berechnung der hydrodynamischen Dispersion nach Scheidegger die Grundlage entzieht (Bear 1972). Vor diesem Hintergrund werden zurzeit Ausbreitungsmodelle auf der Grundlage von Fließkanälen innerhalb von Klüften formuliert (z. B. Shakarami 2017). Solche Modelle erklären die Dispersion im Wesentlichen durch Unterschiede in den Fließgeschwindigkeiten sowie der Größe und der Ausrichtung der Fließkanäle.

70.3 Prozessbeschreibung

Die mechanische Dispersion spielt bei advektiven Transportprozessen im Endlagersystem immer eine Rolle. Die mechanische Dispersion bewirkt dabei eine Ausweitung der Konzentrationsfront sowohl in Richtung der Strömung als auch senkrecht dazu.

Zur detaillierteren Beschreibung der Dispersion ist eine genaue Charakterisierung des Kluftnetzwerks im Kristallingestein des potentiellen Standorts notwendig.

70.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

70.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Dispersion ist bei der Strömung in porösen und geklüfteten Medien unvermeidlich und daher wahrscheinlich.

70.6 Ungewissheiten

- Bestimmung von Dispersionslängen in geklüfteten Medien

70.7 Literaturquellen

- Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. – New York (Dover Publication).
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Scheidegger, A.E. (1961): General theory of dispersion in porous media. – Journal of Geophys. Research 66, 3273–3278. <https://doi.org/10.1029/JZ066i010p03273>.
- Shakarami, P. (2017): Solute Transport in Fractured Rocks – The Effect of Stagnant Water Zones and Velocity dispersion. – Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, School of Chemical Science and Engineering; Stockholm.

71 Diffusion

NEA-Gruppe:	3.3.1	<i>Water-mediated migration [repository]</i>
	3.3.2	<i>Gas mediated migration [repository]</i>
	4.3.1	<i>Water-mediated migration [geosphere]</i>

71.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter Diffusion wird die Durchmischung verschiedener Stoffe verstanden, die durch die thermisch bedingte Eigenbewegung der beteiligten Teilchen (Brownsche Molekularbewegung) zustande kommt (z. B. Ionen, Atome, Moleküle). Besteht in einem Gasgemisch oder in einer Lösung für eine Substanz ein Konzentrationsgefälle, so wird dieses durch die Diffusion reduziert.

71.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Wesentliches Kennzeichen der Diffusion ist, dass die Teilchenbewegung Konzentrationsunterschiede im System ausgleicht: Die Teilchen wandern (diffundieren) dabei im Mittel (Nettostrom) von Orten mit höherer Konzentration zu solchen mit niedrigerer Konzentration bis diese Unterschiede ausgeglichen sind. Die Bewegung der Teilchen wird im Allgemeinen mit zunehmender Temperatur schneller. Daher nimmt auch die Diffusionsrate mit steigender Temperatur zu.

Das Fick'sche Gesetz beschreibt phänomenologisch den durch die Diffusion verursachten Stoffstrom. Demnach ist der Strom pro Flächeneinheit direkt proportional zu dem Konzentrationsgradienten des Stoffes. Der stoffabhängige Proportionalitätsfaktor wird Diffusionskoeffizient genannt. In einem porösen Medium ist der Stoffstrom zusätzlich proportional zur Porosität des Mediums. Das Produkt aus Porosität und Diffusionskoeffizienten wird auch als effektiver Diffusionskoeffizient bezeichnet. Weiterhin kann sich ein Stoff aufgrund der verwinkelten Geometrie des Porenraums nicht geradlinig durch das poröse Medium ausbreiten. Dadurch verringert sich auch der Diffusionskoeffizient im Porenwasser gegenüber jenem in freiem Wasser um einen Faktor, der von den Gesteinseigenschaften Tortuosität und Konstriktivität abhängig ist.

Die Zusammenfassung von Diffusion und mechanischer Dispersion (siehe FEP „Dispersion“) wird auch als hydrodynamische Dispersion bezeichnet. Als Matrixdiffusion bezeichnet man den diffusiven Übergang von gelösten Stoffen aus Bereichen, in denen advektiver Transport dominiert, in eine Matrix mit immobilem Porenwasser. Der Effekt der Matrixdiffusion ist insbesondere bei Gesteinen zu betrachten, in denen neben wasserführenden Klüften mit advektiv-dispersiv dominiertem Transport von gelösten Stoffen auch ein angrenzendes, gering durchlässiges Festgestein existiert (z. B. Neretnieks 1980).

In Gesteinen mit sehr kleinen Porendurchmessern steht den im Wasser gelösten Radionukliden üblicherweise nicht der gesamte Porenraum zur Diffusion zur Verfügung. Die diffusionszugängliche Porosität ist somit kleiner als die totale Porosität. Als totale Porosität wird der Anteil des Volumens des Porenfluids am Gesamtvolumen bezeichnet. Der Effekt, dass ein Teil des Porenraums für die Diffusion der Radionuklide nicht zugänglich ist, ist vor allem eine Folge der geringen Weite der Poren. Der Ausschluss der Radionuklide aus einem Teil des Porenwassers wird durch unterschiedliche Effekte verursacht, wie z. B. die elektrostatische Wechselwirkung der transportierten Stoffe mit dem Gestein (Anionenausschluss). Aus diesem

Grund kann der Diffusionskoeffizient für unterschiedlich geladene Spezies ebenfalls unterschiedlich sein. Weiterhin können abgeschlossene Porenraumbereiche (Totporen) eine Rolle spielen.

71.3 Prozessbeschreibung

Diffusionsprozesse können sowohl in der Gas-, wie auch in der Lösungsphase stattfinden. Die Diffusion spielt für verschiedene Prozesse und in unterschiedlichen räumlichen Skalen eine Rolle, z. B.:

- Diffusion von Ionen durch die Gelschicht (Glaskorrosion),
- Diffusion von Wasser durch Korrosionsschichten bei Behälterkorrosion,
- Diffusion stellt Gleichgewichte ein, z. B. Auflösung und Ausfällung,
- Instant Release aus Kernbrennstoff erfolgt z. T. durch Diffusion an Korngrenzen,
- Diffusion gelöster Radionuklide im Porenwasser des Versatzes, Wirtsgesteins und Deckgebirges.

Da in allen Bereichen des Endlagersystems in jedem Fall von Konzentrationsunterschieden gelöster oder gasförmiger Stoffe auszugehen ist, werden in jedem Fall auch diffusive Transportprozesse stattfinden.

Die Diffusion spielt bei vielen chemischen Prozessen, vor allem bei elektrochemischen wie z. B. der Korrosion von Metallen oder bei der Alteration von Verschlussbauwerken, eine wichtige Rolle, da sie Edukte zuführt und Produkte abführt und somit die Kinetik der Prozesse bestimmt.

Im Falle einer Radionuklidfreisetzung bewirkt die Diffusion bei einem vorhandenen Konzentrationsgefälle einen Transport im Endlagersystem. Findet eine Lösungsbewegung statt, so überwiegt im Allgemeinen die Advektion gegenüber der Diffusion beim Transport. Im ungeklüfteten Wirtsgestein spielt der Anteil der Diffusion am Radionuklidtransport jedoch eine Rolle, da die Permeabilität der gewählten Wirtsgesteinsformation so niedrig ist, dass die Ausbreitung von Schadstoffen durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse ist.

Im geklüfteten Bereich des kristallinen Wirtsgesteins, das im Modell „mKBS-3“ einem Granit entspricht, wird der Radionuklidtransport advektiv entlang von wasserführenden Klüften stattfinden (Posiva 2012). In der Kluft transportierte Radionuklide können lateral aus der Kluft in das angrenzende Netzwerk aus Mikroklüften und Mikroporen im Granit diffundieren. Das Wasser in diesem Bereich ist immobil und trägt nicht zum advectiven Transport bei, d. h. der Radionuklidtransport wird durch Diffusion in den Granit retardiert. Diesen Prozess bezeichnet man als Matrixdiffusion (s. o.). Durch Sorption an den Mineralen im Granit wird der Retardationseffekt noch verstärkt (Posiva 2012).

Durch die Diffusion werden Gradienten der Konzentration der Lösungsinhaltsstoffe abgebaut. Dadurch werden auch die hydrochemischen Verhältnisse beeinflusst.

71.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

71.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Diffusion von Stoffen findet immer statt.

71.6 Ungewissheiten

- Zur Quantifizierung der Matrixdiffusion im kristallinen Wirtsgestein ist eine genaue Charakterisierung der Klüfte und des angrenzenden Gesteins notwendig.
- Die Bedeutung der Diffusion gegenüber dem advektiven Transport hängt von den Druckbedingungen und den Permeabilitäten der potentiellen Ausbreitungswege ab.

71.7 Literaturquellen

Neretnieks, I. (1980): Diffusion in the Rock Matrix: An important Factor in Radionuclide Retardation? – J. Geophys. Res. 85: 4379 - 4397.

Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.

72 Lösen und Ausgasen

NEA-Gruppe:	2.3.2	<i>Chemical processes [waste package]</i>
	3.2.2	<i>Chemical processes [repository]</i>
	4.3.1	<i>Chemical processes [geosphere]</i>

72.1 Definition/Kurzbeschreibung

Das FEP beschreibt den Übergang von Gasen zwischen dem gasförmigen Zustand und dem gelösten Zustand in Flüssigkeiten.

72.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Gase können sich in Flüssigkeiten lösen. Bei diesem Vorgang diffundieren Gasmoleküle über die Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gasphase. Die Diffusionsrate ist dabei proportional zu der Konzentration des Gases in der Flüssigkeit und seines Partialdrucks in der Gasphase. Wenn die Flüssigkeit und die Gasphase im Kontakt zueinander bleiben, dann stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem Diffusionsstrom in und aus der Flüssigkeit ein, so dass die Konzentrationen konstant bleiben. Die Zeitdauer, bis sich das Konzentrationsgleichgewicht einstellt, hängt von der Diffusionsgeschwindigkeit, den Volumina von Flüssigkeit und Gasphase sowie der Größe der Kontaktfläche ab.

Die Gleichgewichtskonzentrationen werden über das Henry'sche Gesetz beschrieben. Demnach ist die Konzentration eines Gases in der Flüssigkeit proportional zu dem Partialdruck in der Gasphase. Der Proportionalitätsfaktor wird Henry-Koeffizient genannt. Der Henry-Koeffizient ist temperaturabhängig, so dass sich die Löslichkeit der meisten Gase in Wasser mit zunehmender Temperatur verringert. Weiterhin ist die Löslichkeit von Gasen auch von der Konzentration anderer Stoffe in der flüssigen Phase, wie z. B. der Salinität abhängig (z. B. Smith & Kennedy 1982). Die Löslichkeit vieler Gase ist in Nachschlagewerken tabelliert (z. B. D'Ans & Lax 1967).

Je nach den vorliegenden Druckverhältnissen und den Mengenverhältnissen von Flüssigkeit und Gasen, können sich unter Umständen die Gase vollständig in der Flüssigkeit lösen.

72.3 Prozessbeschreibung

Im Grubengebäude des Endlagers befinden sich zum Beginn der Nachverschlussphase nur geringe Lösungsmengen (FEP „Lösungen im Grubengebäude“), vor allem aus der Feuchtigkeit des Versatzes und der geotechnischen Bauwerke. Somit liegen zu Beginn der Nachverschlussphase die Gase im Grubengebäude vorwiegend in der Gasphase vor und bestehen vor allem aus Grubenluft. Mit zunehmender Wiederaufsättigung des Grubengebäudes und der Gasbildung durch Korrosion der Behälter in den Einlagerungsstrecken und der damit verbundenen Druckentwicklung erhöht sich auch die Menge der gelösten Gase. Die Korrosionsgase bestehen überwiegend aus Wasserstoff (siehe FEP „Metallkorrosion“).

Gase können auch aus dem Grubengebäude in das Wirtsgestein eindringen. Im Wirtsgestein (FEP „Gase im Wirtsgestein“) wird davon ausgegangen, dass sich nur lokal eine freie Gasphase bildet. Hier liegt das Gas somit überwiegend in gelöstem Zustand vor.

Im Deckgebirge (FEP „Gase im Deckgebirge“) können Gase die im Endlager gebildet werden und unter Umständen in gasförmiger Form bis in das Deckgebirge aufsteigen, zumindest teil-

weise im Grundwasser gelöst werden. An der Oberfläche des Grundwasserspiegels im Deckgebirge stehen die gelösten Gase mit der Bodenluft und somit auch mit der Atmosphäre im Kontakt.

72.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

72.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Sobald eine freie Gasphase auftritt, findet der Prozess Lösen und Ausgasen statt. Freie Gasphasen können in allen Bereichen des Endlagersystems auftreten.

72.6 Ungewissheiten

- Die Löslichkeiten der meisten Gase sind gut bekannt und die Ungewissheit gering. Die Ungewissheit der Lösungszusammensetzung in den jeweiligen Teilbereichen des Endlagersystems bedingt auch die Ungewissheit des Prozesses Lösung und Ausgasen.

72.7 Literaturquellen

D'Ans, J. & Lax, E. (1983): Taschenbuch für Chemiker und Physiker. – 3. Aufl.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).

Smith, S.P. & Kennedy, B.M. (1982): The solubility of noble gases in water and in NaCl brine. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol 47: 503-515.

73 Radioaktiver Zerfall und ionisierende Strahlung

NEA-Gruppe:	4.2.6	<i>Radiological processes [geosphere]</i>
	3.2.6	<i>Radiological processes [repository]</i>
	2.3.6	<i>Radiological processes [waste package]</i>

73.1 Definition/Kurzbeschreibung

Unter radioaktivem Zerfall versteht man die spontane, d. h. ohne äußeren Anlass verlaufende, Umwandlung instabiler Atomkerne unter Abgabe einer charakteristischen ionisierenden Strahlung. Diese besteht aus Teilchen oder Photonen. Für den radioaktiven Zerfall wird nur das mit den Abfällen eingebrachte Radionuklidinventar und keine natürlichen Radionuklide in anderen Materialien betrachtet.

73.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Von den ca. 3.000 bekannten Nukliden sind weniger als 10 % stabil. Bei den übrigen Nukliden findet ein radioaktiver Zerfall statt. Sie werden daher auch als Radionuklide bezeichnet. Eine komplette Aufstellung aller bekannten Nuklide findet man in der Karlsruher Nuklidkarte (Magill et al. 2018). Kennzeichnend für ein Radionuklid sind seine Halbwertszeit, die Art der ionisierenden Strahlung (Alpha-, Beta- oder Gamma-Strahlung) sowie die abgegebene Energie. Durch die Absorption der Strahlung in einem Körper kann die Energie in Wärme umgewandelt werden. Beim radioaktiven Zerfall entstehen Tochternuklide, die ihrerseits wieder zerfallen können, so dass eine Zerfallskette entsteht.

Detaillierte Beschreibungen zu den Eigenschaften der Radionuklide und den Zerfallsreihen finden sich in der Fachliteratur (z. B. Lieser 1991; Adloff & Guillaumont 1993; Wiles 2002). Die Aktivität eines Stoffes wird in der SI-Einheit Becquerel (Bq) gemessen. Die Einheit Becquerel gibt die mittlere Anzahl der radioaktiven Zerfälle pro Sekunde an.

Von den eingelagerten Radionukliden ist für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers nur ein kleiner Teil von Interesse (Rimkus & Storck 1985):

- Radionuklide, wie beispielsweise ^{129}I , ^{79}Se , ^{135}Cs , oder ^{238}U die zum Zeitpunkt der Einlagerung in radiologisch bedeutsamen Mengen vorliegen und die eine ausreichend hohe Lebensdauer haben,
- kurzlebige Radionuklide, wie z. B. ^{60}Co oder ^{90}Sr , mit einer hohen Aktivität, deren Zerfall und die dadurch verursachten Temperaturen und Gasentwicklungen eine Freisetzung langlebiger Radionuklide ermöglichen könnte, und
- Actinide am Ende der Zerfallsreihen, wie ^{210}Po oder ^{227}Ac , die zwar zum Zeitpunkt der Einlagerung kaum vorhanden sind, die aber durch den Zerfall von Mutternukliden aufgebaut werden.

Durch den radioaktiven Zerfall ändert sich das Aktivitätsinventar im Endlager im Laufe der Zeit. Bei einzelnen Zerfallsprozessen, vor allem bei ^{238}U , kann sich auch durch Aufbau von Tochternukliden die Gesamtaktivität erhöhen. Der Zerfall in stabile Isotope verringert dagegen die Gesamtaktivität. Insgesamt nimmt die Gesamtaktivität in einem Endlager schnell ab: Sowohl bei verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung als auch bei abgebrannten Brennelementen wird die Aktivität nach wenigen Hundert Jahren auf wenige Prozent der Anfangsaktivität zurückgehen (Rübel et al. 2004).

Der Alpha-Zerfall von Radionukliden der Abfälle führt zur Bildung von Helium in den Hohlräumen der Abfallmatrix (Posiva 2012). Alpha-Strahler in den Abfällen sind hauptsächlich die Aktiniden. Die emittierten Alpha-Teilchen sind Heliumkerne und bilden gasförmiges Helium in der Abfallmatrix, welches stabil und inert ist. Die Menge an Heliumgas steigt entsprechend dem kontinuierlich stattfindenden Alpha-Zerfall mit der Zeit an. Die Heliumproduktion findet so lange statt, wie Uran oder andere Aktiniden in den Abfällen vorhanden sind. Aufgrund der langen Halbwertszeiten von Mutternukliden wie ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th findet die Heliumproduktion über viele Millionen Jahre statt, sie nimmt aber entsprechend der Aktivität der Alpha-Strahler im Abfall mit der Zeit ab.

Bisherige Betrachtungen beschränken sich hauptsächlich auf abgebrannten UO_2 -Brennstoff. In den Brennstäben wird sich das Heliumgas im Ringspalt zwischen den Brennelementpellets und den Hüllrohren ansammeln, wodurch es zu einem Druckanstieg in den Brennstäben kommt, was zu einem mechanischen Defekt des Hüllrohrs führen kann. Nach Berechnungen von SKB baut sich durch Heliumproduktion in einem intakten Brennstab mit einem Hohlraumvolumen von 50 cm^3 nach 100 000 Jahren ein Druck von 3,4 bis 4,4 MPa auf (SKB 2010). Für den Fall, dass die Hüllrohre undicht werden und das insgesamt gebildete Helium aus den Brennstäben in den Resthohlraum des schwedischen Behälters freigesetzt wird, stellt sich nach 100.000 Jahren ein Druck von 0,5 bis 0,65 MPa im Behälter ein. Dieser Druck ist deutlich niedriger als der externe Druck auf den Behälter und hat deshalb nur vernachlässigbare Auswirkungen auf die Behälterintegrität.

Die Rate der Heliumproduktion hängt vom Abbrand des Brennstoffs ab. Berechnungen haben gezeigt, dass sich für einen Brennstoff mit einem Abbrand von 52 MWd/kgU nach 1.000 Jahren $7 \cdot 10^{18}$ Atome He, und nach 50.000 Jahren $2,6 \cdot 10^{19}$ Atome He pro Gramm UO_2 bilden (Ferry et al. 2010). Für einen Abbrand von 60 MWd/kgU ist die nach 1.000 Jahren gebildete Menge etwa 15 % höher, die Differenz wird danach geringer. Der größte Teil des gebildeten Heliums wird in der Brennstoffmatrix bleiben. Obwohl experimentelle Untersuchungen von Guilbert et al. (2003) zur He-Ion Implantierung bei 500°C andeuten, dass es zur Flockenbildung an der UO_2 -Oberfläche kommt, konnten Ferry et al. (2010) zeigen, dass der Druckaufbau durch Heliumproduktion in der Matrix die deutlich unterhalb der Drücke liegt, die zur Rissbildung in der UO_2 -Matrix führen. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Integrität der Matrix durch Heliumproduktion nicht beeinträchtigt wird.

Generell wird die Produktion und Freisetzung von Helium durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Das Radionuklidinventar (Abbrand und Anreicherung) bestimmt die Heliumbildung.
- Die Temperatur bestimmt die Diffusion von Helium in der Brennstoffmatrix.
- Mechanische Spannungen können zur Rissbildung in den Brennstoffmatrix führen und damit die Freisetzungsrates von Helium aus der Matrix erhöhen.

73.3 Prozessbeschreibung

Außer beim Gamma-Zerfall ändert sich durch den Zerfall bzw. die Spaltung eines radioaktiven Stoffes seine chemische Identität. Dies kann die stoffliche Zusammensetzung, die auch die Alpha-Teilchen umfasst, in den Brennelement-Behältern und sonstigen Endlagerbehältern, im Versatz sowie in den Lösungen und Gasen im Grubengebäude signifikant ändern.

In den übrigen Komponenten im Grubengebäude, im Wirtsgestein und im Deckgebirge kann die Relation zwischen freigesetzten Radionukliden und natürlich vorhandenen Isotopen jedoch als so gering betrachtet werden, dass hier kein bzw. nur ein vernachlässigbarer Einfluss auf

die stoffliche Zusammensetzung vorliegt. Ebenso sind Einflüsse durch die ionisierende Strahlung, wie z. B. die Absorption von Strahlung mit nachfolgender Wärmeproduktion, sowie Aktivierung von Materialien nur in den Einlagerungsbereichen zu erwarten.

Die Heliumproduktion ist auf die radioaktiven Abfälle begrenzt. Diese kommen nur in den Einlagerungsbereichen des Endlagers vor (Bertrams et al. 2017). Der Ablauf der Heliumproduktion ist ausschließlich vom Radionuklidinventar, speziell der Menge und zeitlichen Veränderung der Alpha-Strahlung emittierenden Radionuklide, abhängig.

Der Prozess ist hauptsächlich für die Behälter mit abgebrannten Brennelementen im Hinblick auf die Integrität der Abfallmatrix relevant. Die größten Mengen an Alpha-Strahlung emittierenden Radionukliden befinden sich in den abgebrannten Brennstoffen. Dort sind neben UO_2 -Brennstoff auch MOX-Brennstoff sowie Brennstoffe aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren zu berücksichtigen (s. FEP "Korrosion der Brennstoffmatrix").

In den verglasten Abfällen (CSD-V) sind Uran- und Plutoniumisotope nur in sehr geringen Mengen enthalten, da sie im Wiederaufarbeitungsprozess abgetrennt werden. Dementsprechend ist der Anteil an alphastrahlenden Radionukliden und damit auch die spezifische Heliumproduktion viel geringer als in den abgebrannten Brennelementen. Auch in den Abfallformen CSD-B und CSD-C befinden sich viel geringere Mengen an Alpha-Strahlung emittierenden Radionukliden.

Ein wichtiger Aspekt ist die in dem Konzept geforderte Lebensdauer der Behälter von einer Million Jahre (Bertrams et al. 2017). Hier ist zu überprüfen, ob sich über diesen Zeitraum Gasdrücke im Behälter bilden können, die seine Integrität gefährden.

73.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

Alpha emittierende Radionuklide treten überwiegend in den Zerfallsreihen auf. Aufgrund der Langlebigkeit der Mutternuklide in den Zerfallsreihen mit Halbwertszeiten z. T. weit über eine Million Jahre, findet der Prozess über den gesamten Bewertungszeitraum statt.

73.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Aufgrund der eingelagerten radioaktiven Abfälle ist der radioaktive Zerfall ein Prozess, der in jedem Fall stattfindet.

73.6 Ungewissheiten

- Ist die Produktion von Rn-222 außerhalb der Biosphäre von Bedeutung?
- Quantifizierung der Neutronenstrahlung und ihrer zeitlichen Entwicklung.
- Quantitative Abschätzungen zur Heliumproduktion für Behälter mit Glas- und allen Arten von Brennstoffabfällen im deutschen Konzept fehlen. Insbesondere sind die Auswirkungen auf den Behälter über einen Zeitraum von einer Million Jahre noch nicht bekannt.

73.7 Literaturquellen

- Adloff, J.-P. & Guillaumont, R. (1993): Fundamentals of Radiochemistry. – Boca Raton, USA (CRC Press).
- Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): Projekt KONEKD. Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallin-gestein in Deutschland. – DBE Technology GmbH, Abschlussbericht, FKZ 02E11516, TEC-20-2017-AB; Peine.
- Ferry, C., Piron, J.-P. & Ambard, A. (2010): Effect of helium on the microstructure of spent fuel in a repository: An operational approach. – Journal of Nuclear Materials. Vol. 407, no. 2, p. 100-109.
- Guilbert, S., Sauvage, T., Erramli, H., Barthe, M.-F., Desgardin, P., Blondiaux, G., Corbel, C. & Piron, J.-P. (2003): Helium behavior in UO₂ polycrystalline disks. – Journal of Nuclear Materials, Vol. 321 (2), p. 121-128.
- Lieser, K.H. (1991): Einführung in die Kernchemie. – Weinheim (Verlag Chemie).
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- SKB (2010): Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-46: 143 pp.; Stockholm. ISSN 1404-0344.
- Magill, J., Dreher, R. & Sóti, Zs. (2018): Karlsruher Nuklidkarte. – 10. Auflage 2018, Nucleonica GmbH.
- Rimkus, D. & Storck, R. (1985): Nuklid Auswahl für Aktivitätsinventare eines Endlagers hinsichtlich der Erfordernisse von Langzeitsicherheitsanalysen. – Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlussbericht; Berlin.
- Rübel, A., Müller-Lyda, I. & Storck, R. (2004): Die Klassifizierung radioaktiver Abfälle hinsichtlich der Endlagerung. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS), GRS-203; Braunschweig.
- Wiles, D.R. (2002): The Chemistry of Nuclear Fuel Waste Disposal. –Montreal (Polytechnic International Press).

74 Radiolyse

NEA-Gruppe: 2.3.6 *Radiological processes [waste package]*

74.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als Radiolyse wird die Zersetzung von chemischen Verbindungen – in Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen – durch ionisierende Strahlung bezeichnet.

74.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Es wird bei der durch radioaktive Abfälle verursachten Radiolyse zwischen der inneren Radiolyse im Abfallgebinde und der außerhalb der Abfallgebinde (äußere Radiolyse) unterschieden. Die innere Radiolyse ist generell vernachlässigbar gegenüber den Auswirkungen der äußeren (Rodwell et al. 1999). Die äußere Radiolyse ist abhängig von der Abschirmung der ionisierenden Strahlung durch die Abfallmatrix und die Abfallbehälter.

In den FEP-Katalogen von SKB und Posiva wird nur die Radiolyse in wässrigen Lösungen und die Auswirkungen auf Tonminerale, die als technische Barrieren verwendet werden, behandelt (SKB 2010, Posiva 2012).

Tonminerale zeigen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlung mit den punktuellen Strukturdefekten, die sich auf Elektronenlöcher an siliziumgebundenen Sauerstoffatomen der Mineralschichten begrenzen (Allard et al. 2012). Restkerne der an Tonmineralen, z. B. in Buffer oder Bohrlochverschluss sorbierten und durch Emission von Alpha-Teilchen zerfallenden Radionuklide können hingegen eine Amorphisierung der Tonmineralstruktur verursachen. Jedoch reichen die in radioaktiven Abfällen innerhalb von einer Million Jahre zu erwartenden akkumulierten Dosen von bis zu 10^9 Gy nicht aus, um solche Effekte im anliegenden tonhaltigen Material hervorzurufen (Allard et al. 2012). Falls Versatz oder Bohrlochverschluss Kohlenwasserstoffe enthalten, so können diese radiolytisch zersetzt werden.

Bei Anwesenheit von Lösungen in der Umgebung der Behälter, wie z. B. im Bohrlochverschluss, ist vor allem die Radiolyse von Wasser relevant, die zunächst im Wesentlichen durch Gamma-Strahlung erfolgt. Nach etwa 500 Jahren wird wegen des Zerfalls wichtiger Gamma- und Beta-Strahler, die durch Alpha-Strahlung des Abfalls verursachte Radiolyse dominieren (Grambow et al. 1996). Sie kann aber wegen der geringen Reichweite der Alpha-Strahlung nur innerhalb der Behälter und in der näheren Umgebung der freigesetzten Alpha-strahlenden Radionuklide stattfinden.

Neutronen verlieren bei Zusammenstößen mit leichten Atomkernen, insbesondere mit denen des Wasserstoffs aber auch des Sauerstoffs und Siliziums, besonders viel Energie und breiten sich deshalb nur noch wenig aus, bevor sie absorbiert werden.

Die Radiolyse von wässrigen Lösungen führt zur Zersetzung des Wassers und zur Bildung von molekularen Bestrahlungsprodukten, die gasförmig (z. B. Wasserstoff-Gas) oder gelöst (z. B. Wasserstoffperoxid) vorliegen. Der genaue Mechanismus und die Ausbeute der verschiedenen Bestrahlungsprodukte hängen von der Art der ionisierenden Strahlung, der Dosisleistung und den Lösungsinhaltsstoffen ab. Durch die Radiolyse wird lokal die Zusammensetzung der wässrigen Lösungen verändert; dieser Effekt ist besonders bei der Alpha-Radiolyse ausgeprägt, bei der sich oxidierende Bedingungen einstellen.

74.3 Prozessbeschreibung

Die Restfeuchte innerhalb des Behälters kann immer auch durch Alpha-Strahlung radiolytisch zersetzt werden. Solange der Abfall durch die Abfallbehälter physikalisch von dem umliegenden Buffer und Wirtsgestein bzw. den Lösungen im Grubengebäude getrennt ist, sind außerhalb des Behälters nur die Auswirkungen der Radiolyse durch Gamma- und Neutronenstrahlung zu betrachten. Außerhalb des Behälters ist zu frühen Zeitpunkten Feuchtigkeit im tonhaltigen Versatz und Kluftverschluss sowie in der ALZ im im geklüfteten Gebirge vorhanden. Diese Restwassermengen können radiolytisch zersetzt werden.

Inwieweit durch die radioaktive Strahlung die Mineralogie und Struktur des Kristallingesteins beeinträchtigt werden kann, ist noch zu untersuchen.

Durch Radiolyse von Lösungen können unter anderem gasförmige Verbindungen entstehen (Radiolysegasbildung). Nach Röhlig et al. (1999) ist die Gasbildung infolge Radiolyse um zwei bis drei Größenordnungen kleiner als die durch Korrosion und mikrobielle Prozesse verursachte Gasbildung.

74.4 Zeitliche Beschränkung

Aufgrund des radioaktiven Zerfalls und der damit verbundenen Abnahme der Alpha- Beta- und Gamma-Aktivität wird die Intensität der Radiolyse kontinuierlich abnehmen.

74.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Aufgrund der eingelagerten radioaktiven Abfälle ist die Radiolyse zu betrachten.

74.6 Ungewissheiten

- Bewertung der Auswirkungen (Strahlenschäden, geochemische Bedingungen und Gasbildung) der Gamma- und Neutronenstrahlung außerhalb des nichtabgeschirmten Behälters.
- Zeitliche Entwicklung der Reichweite der Radiolyse in Buffer und Wirtsgestein.
- Die Strahlungsenergien sind gut bekannt. Die Ungewissheiten der Stoffzusammensetzung in der Umgebung der Strahlungsquellen bestimmt hauptsächlich die Ungewissheit der Radiolyse.

74.7 Literaturquellen

- Allard, T., Balan, E., Calas, G., Fourdrin, C., Morichon, E. & Sorieul, S. (2012): Radiation-induced defects in clay minerals: A review. – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 277: 112-120.
- Grambow, B., Loida, A. & Smailos, E. (1996): Langzeitstabilität von Abfallgebinden und abgebranntem Kernbrennstoff gegenüber Korrosion unter Endlagerbedingungen. Direkte Endlagerung; Sammlung der Vorträge anlässlich der Abschlußveranstaltung am 7. und 8. Dezember 1995 in Karlsruhe. – FZK, Technik u. Umwelt, PTE, Wiss. Ber.: FZKA-PTE Nr. 2; Karlsruhe.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.

- Rodwell, W.R., Harris, A.W., Horseman, S.T., Lalieux, P., Müller, W., Ortiz Amaya, L. & Pruess, K. (1999): Gas migration and two-phase flow through engineered and geological barriers for a deep repository for radioactive waste. A joint EC/NEA Status Report. – European Commission & Nuclear Energy Agency: EUR 19122 EN; Brüssel.
- Röhlig, K.-J., Baltes, B., Becker, A., Bogorinsky, P., Fischer, H., Fischer-Appelt, K., Javeri, V., Lambers, I., Martens, K.-H., Morlock, G. & Pörtl, P. (1999): Sicherheit in der Nachbetriebsphase von Endlagern für radioaktive Abfälle, Abschlußbericht. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: GRS- A-2656; Köln.
- SKB (2010): FEP report for the safety assessment SR-Site. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-45, Stockholm.

75 Strahlungsinduzierte Aktivierung

NEA-Gruppe: 2.3.6 *Radiological processes [waste package]*

75.1 Definition/Kurzbeschreibung

Als strahlungsinduzierte Aktivierung wird die Bildung von radioaktiven Isotopen durch Kernreaktionen nach Absorption von Neutronen bezeichnet.

75.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Treffen Neutronen auf Atomkerne, so können sie in Abhängigkeit von der Neutronenenergie eine Reihe von verschiedenen Kernreaktionen auslösen. Um die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Reaktionen quantifizieren zu können, wird der Wirkungsquerschnitt als Maß verwendet. Dieser hat die Dimension einer fiktiven Fläche, deren Größe durch die experimentell beobachtete Häufigkeit des Auftretens einer Kernreaktion bestimmt ist (Heinicke et al. 1998). Wirkungsquerschnitte werden im Hinblick auf bestimmte Kernreaktionen angegeben. Sie werden als Einfang-, Spalt-, elastische und unelastische Streuquerschnitte bezeichnet.

75.3 Prozessbeschreibung

Durch die emittierte Neutronenstrahlung in der unmittelbaren Umgebung der nicht abgeschirmten Behälter kann es durch strahlungsinduzierte Aktivierung von stabilen Isotopen zu Elementumwandlungen kommen. In welchem Umfang Komponenten des Nahfeldes (Abfallmatrix, Behälter, Buffer und Wirtsgestein) davon betroffen sind, muss noch untersucht werden. Das Ausmaß des Neutronenaktivierungsprozesses im Endlager ist noch nicht berechnet worden. Der Prozess wird aber vermutlich nur eine untergeordnete Rolle spielen. Im Vergleich zu den Inventaren in den eingelagerten Abfällen ist die Aktivierung quantitativ unbedeutend.

75.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

75.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Aufgrund der eingelagerten radioaktiven Abfälle ist eine strahlungsinduzierte Aktivierung in deren unmittelbarer Umgebung zu betrachten.

75.6 Ungewissheiten

- Quantifizierung der Neutronenaktivität und des Neutronenaktivierungsprozesses im Nahfeld der nichtabgeschirmten Behälter.
- Die kernphysikalischen Prozesse sind ausreichend gut bekannt. Die Ungewissheit der strahlungsinduzierten Aktivierung besteht vor allem in der Ungewissheit der stofflichen Zusammensetzung der betroffenen Stoffe im Umfeld der Strahlungsquellen.

75.7 Literaturquellen

Heinicke, W., Krug, H., Thomas, W., Weber, W., Gmal, B. & Moser, E.F. (1998): Handbuch zur Kritikalität. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Garching.

76 Zündung von Gasgemischen

NEA-Gruppe: 2.3.3 *Waste package processes*
3.2.3 *Repository processes*

76.1 Definition/Kurzbeschreibung

Ein zündfähiges Gasgemisch liegt vor, wenn die Volumenverhältnisse des Gasgemisches innerhalb bestimmter Grenzen, den sogenannten Zündgrenzen (oder auch Explosionsgrenzen) liegen, so dass es prinzipiell zu einer Verbrennung kommen kann. Wird die Zündenergie des Gasgemischs überschritten und es kommt zu einer Verbrennung, dann wird je nach der Verbrennungsgeschwindigkeit von einer Deflagration oder einer Detonation gesprochen.

76.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Mit dem Verschluss des Endlagers wird Luft im Grubengebäude eingeschlossen. Weiterhin können im Laufe der Zeit durch die Korrosion metallischer oder die mikrobielle Zersetzung organischer Abfallbestandteile potenziell Gase im Endlager gebildet werden, die prinzipiell zusammen mit dem Sauerstoff der Luft zündfähige Gemische bilden können. Dies sind vor allem Wasserstoff und Methan. Die schnelle Verbrennung von H_2 und O_2 zu Wasser kann je nach Randbedingung entweder deflagrativ oder detonativ ablaufen. Von Deflagration wird gesprochen, wenn die Verbrennungsgeschwindigkeit geringer ist, als die Schallgeschwindigkeit im verbrennenden Medium und von einer Detonation, wenn die Verbrennungsgeschwindigkeit höher ist. Bei der Deflagration sind dementsprechend die Reaktionsgeschwindigkeit und der auftretende Druck erheblich niedriger als bei einer Detonation.

76.3 Prozessbeschreibung

Zum Auftreten einer Deflagration gelten folgende Voraussetzungen:

Die Werte für die untere bzw. obere Zündgrenze in Luft unter Normalbedingungen betragen für Wasserstoff 4 und 75,6 Vol.-% und für Methan 5 und 15 Vol.-%. Bei einem Druck von 0,1 MPa beträgt die minimale Zündenergie für ein Wasserstoff-Luftgemisch, bei dem Wasserstoff und Sauerstoff im stöchiometrischen Verhältnis vorliegen, weniger als 0,02 mJ und für Methan-Luftgemische weniger als 0,3 mJ. Für Detonationen gelten erheblich restriktivere Randbedingungen. Insbesondere liegt die minimale Zündenergie erheblich höher. Für ein Wasserstoff-Luftgemisch unter Normalbedingungen, bei dem Wasserstoff und Sauerstoff im stöchiometrischen Verhältnis vorliegen (29,6 Vol.-% H_2), beträgt die minimale Zündenergie ca. 4 kJ, was etwa der Menge von 1 g Sprengstoff entspricht. Für nichtstöchiometrische Verhältnisse liegt der Wert noch erheblich höher, z. B. bei 155 kJ für 17,4 Vol.-% und bei 498 kJ bei 56,6 Vol.-% H_2 -Konzentration (Guiaro et al. 1989).

Gasförmiger Sauerstoff liegt aus der eingeschlossenen Grubenluft vor, so dass bei Bildung von brennbaren Gasen, wie Wasserstoff, prinzipiell ein zündfähiges Gasgemisch möglich ist. Wasserstoff kann in signifikanten Mengen durch die anaerobe Korrosion der Bohrlochliner und Endlagerbehälter entstehen. Da der Sauerstoff im Endlager nach dessen Verschluss schnell durch aerobe Korrosionsprozesse, bzw. aerobe mikrobielle Prozesse aufgezehrt wird, ist das Auftreten zündfähiger Gasgemische nur zu frühen Zeiten möglich. Weiterhin werden das Nahfeld und die Strecken und Schächte des Endlagers vollständig verfüllt und innerhalb weniger hundert Jahre nahezu vollständig aufgesättigt. Ab diesem Zeitpunkt existiert keine freie Gasphase, die ein zündfähiges Gasgemisch darstellen kann.

Wegen der niedrigen Zündenergien für die Auslösung einer deflagrativen Wasserstoffverbrennung sind auch in der Nachverschlussphase Zündvorgänge denkbar. Dagegen sind keine Prozesse denkbar, bei denen die erforderlichen Energien für eine freie Detonation entstehen. Weiterhin dient der eingebrachte Versatz als Flammensperre und verhindert die Fortpflanzung von eventuell entstehenden Flammenfronten (wie z. B. für Salzgrus in Barnert & Wetzler (1998) diskutiert), so dass selbst im ungünstigen Fall, der Bildung von zündfähigen Gasgemischen, nur von deflagrativen Verbrennungen auszugehen ist.

Für eine deflagrative Wasserstoffverbrennung wurde sowohl in Experimenten, als auch in theoretischen Berechnungen eine maximale relative Druckerhöhung um weniger als eine Größenordnung festgestellt (Landolt-Börnstein 1972, DOE 1996). Durch diese zu erwartenden Druckerhöhungen sind wegen ihrer beschränkten Größe, bzw. Einwirkungsdauer, keine Schädigungen des Gebirges, des Versatzes oder der Streckenabdichtungen zu erwarten. Jedoch hängen die tatsächlichen Druckerhöhungen und Auswirkungen von der jeweiligen Situation im Endlager, wie z. B. den vorhandenen Hohlräumen ab.

76.4 Zeitliche Beschränkung

Prinzipiell keine, aber ein Erreichen der Zündbedingungen ist durch den Verbrauch des Sauerstoffs durch aerobe Korrosionsprozesse und mikrobielle Prozesse nur zu frühen Zeiträumen nach Verschluss des Endlagers wahrscheinlich.

76.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ wahrscheinlich ☐ weniger wahrscheinlich ☐ unwahrscheinlich

Sowohl das Auftreten eines zündfähigen Gasgemisches, als auch der notwendigen Zündenergie ist wahrscheinlich. Damit ist auch das Auftreten zumindest einer Deflagration wahrscheinlich.

76.6 Ungewissheiten

- Für ein gegebenes Endlagerkonzept müssen die Auswirkungen von Deflagrationen oder Detonationen spezifisch untersucht werden. Die möglicherweise auftretenden Druckerhöhungen sind bei der Auslegung der geotechnischen Bauwerke zu berücksichtigen.

76.7 Literaturquellen

- Barnert, E. & Wetzler, H. (1998): Die Löschwirkung von Salzgrus als Flammensperre. – Berichte des Forschungszentrums Jülich, Jül-3494; Jülich.
- DOE (1996): Title 40 CFR 191: Compliance Certification Application for the Waste Isolation Pilot Plant. Appendix PCS. – U.S. Department of Energy (DOE); Carlsbad, New Mexico.
- Guirao, C.M., Knytausas, R. & Lee, J.H. (1989): A Summary of Hydrogen-Air detonation Experiments. – Sandia National Laboratories, NUREG/CR-4961; Washington.
- Landolt-Börnstein (1972): Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik. – 4. Band: Technik. 4. Teil: Wärmetechnik. Bestandteil b: Thermodynamische Eigenschaften von Gemischen, Verbrennung, Wärmeübertragung; Berlin (Springer).

77 Sorption und Desorption

NEA-Gruppe:	2.5.1	<i>Water mediated migration [waste package]</i>
	3.3.1	<i>Water-mediated migration [repository]</i>
	4.3.1	<i>Water-mediated migration [geosphere]</i>

77.1 Definition/Kurzbeschreibung

Feststoffe können aus ihrer Umgebung Stoffe aufnehmen, was als Sorption bezeichnet wird. Der umgekehrte Prozess wird Desorption genannt. Der aufzunehmende Stoff (Sorptiv) kann dabei in das Innere des Feststoffes (Sorbens) eindringen oder sich an seiner Grenzfläche anreichern. Dringt das Sorptiv in die Volumenphase des Sorbens ein, dann wird dies im weitesten Sinne als Einbau oder Absorption bezeichnet. Erfolgt eine Anreicherung des Sorptivs an der Grenzfläche des Sorbens, dann handelt es sich um Adsorption.

77.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Verschiedene chemische und physikalische Prozesse sind Grundlage der Sorption, wie:

- Adsorption,
- Absorption,
- Ionenaustausch,
- Oberflächenausfällung und
- Einbauprozesse.

Diesen Reaktionen liegen Wechselwirkungen zwischen dem Fremdstoff (Sorptiv) und den (Oberflächen-) Eigenschaften des Sorbens zu Grunde.

Der Ladungszustand vieler Oberflächen hängt wesentlich vom hydrochemischen Milieu ab und kann je nach pH-Wert negativ oder positiv sein. Die Speziation (Ladungszustand, etc.) der Radionuklide hängt ebenfalls von den jeweiligen hydrochemischen Verhältnissen ab. Daher ist die Sorption von Radionukliden stark pH abhängig. Weitere Einflussgrößen sind die Art des Sorbens, die Ionenstärke, der Eh-Wert der Lösung, die Temperatur und die Konzentration von Liganden und konkurrierenden Spezies (Bradbury & Baeyens 2003, Altmaier et al. 2004).

Im Allgemeinen wird die Sorption anhand von Gleichgewichtsprozessen beschrieben, in denen die gelöste und die sorbierte Konzentration des betrachteten Sorptivs im chemischen Gleichgewicht miteinander stehen. Ändert sich die Konzentration des Sorptivs, so ändert sich auch die sorbierte Konzentration an der Oberfläche. Allerdings weisen Sorptions- und Desorptionsreaktionen eine zum Teil sehr unterschiedliche Kinetik auf und es ist jeweils zu prüfen, ob für das betrachtete System ein Gleichgewichtszustand angenommen werden kann.

In einfachen Modellen wird das Gleichgewicht zwischen gelöster und sorbierter Konzentration, welches sich bei nicht zu schnellen Strömungen unter isothermen Bedingungen einstellt mit Hilfe von Sorptionsisothermen beschrieben (Stumm & Morgan 1996). Unterschieden wird dabei zwischen linearen Sorptionsmodellen nach dem Kd-Konzept (das Verhältnis zwischen sorbierter und gelöster Konzentration, Henry-Isotherme) oder nichtlinearen Sorptionsmodellen mit Langmuir- oder Freundlich-Isothermen. Diese Isothermen sind im Modell nur anwendbar, wenn die Systemeigenschaften wie pH, Ionenstärke, Anzahl von Sorptionsplätzen, etc. denjenigen der zu Grunde liegenden Messwerte entsprechen (Stumm & Morgan 1996).

Die Sorptionseigenschaften der Gesteine hängen von den enthaltenen Mineralphasen ab. Die mit Verschlussmaterial und Versatz einzubringenden Tone (Bentonite) stellen ein Gemisch von Mineralphasen, die durch unterschiedliche Sorptionseigenschaften gekennzeichnet sind, dar. Für die meisten Radionuklide sind die darin enthaltenen Smektit mit Abstand das wichtigste Sorbens (Bradbury et al. 2010). Neben eingebrachten Tonmineralen spielen im Endlager die Korrosionsprodukte metallischer Materialien und zementhaltige Baustoffe eine wichtige Rolle. Hier sind besonders Eisenoxide und Eisenhydroxide, an denen viele Kationen stark sorbieren von Bedeutung (Dzombak & Morel 1990). Aufgrund der wesentlich geringeren Korrosionsraten sind Korrosionsprodukte von Kupfer, Zirkonium und Nickel basierten Legierungen von geringerer Bedeutung (Posiva 2012). Weiterhin stellen Zementphasen wie Calcium-Aluminate und Calcium-Silikat-Hydrate aber auch deren Zersetzungsprodukte wie Tonminerale und Zeolithe (s. FEP „Korrosionsprodukte aus Betonkorrosion“) gute Sorbentien für viele Kationen dar (Wieland & van Loon 2002; Posiva 2012, Ochs et al. 2016).

Wichtige Minerale im kristallinen Wirtsgestein sind Feldspäte (Plagioklase und Orthoklas/Mikroklin), Quarz, Hornblende und Biotit (s. FEP „Auflösung, Transformation und Neubildung von Mineralen“), wobei Biotit für die Sorption vieler Kationen das wichtigste Sorbens in ungestörten Graniten darstellt (Söderlund et al. 2018). Im Bereich des alterierten Granits können je nach Verwitterungsbedingungen Minerale wie Epidot, Muskovit, Sericit, Calcit und seltener Pyrit und Hämatit aber auch die Tonminerale Kaolinit, Chlorit, Smektit und Illit vorkommen (s. FEP „Alteration, Transformation und Neubildung von Mineralen“). Sehr gute Sorptionseigenschaften haben davon insbesondere die Tonminerale Smektit, Illit und Chlorit.

Die Sorption von Radionukliden verläuft an vielen Mineralen hauptsächlich durch den Mechanismus der Oberflächenkomplexierung. Insbesondere in Tonmineralen und Glimmern (z. B. Muskovit) spielt auch Ionenaustausch eine wichtige Rolle (Bradbury & Baeyens 2003). Sorption durch Ionenaustausch hängt dabei stark von der Ionenstärke und der Lösungszusammensetzung und nur schwach vom pH-Wert ab, während die Oberflächenkomplexierung eine starke Abhängigkeit von pH sowie Radionuklid-Konzentration und eine schwache Abhängigkeit von der Ionenstärke und somit von den Konzentrationen der Hauptkationen der Porenlösung wie Na, K, Mg oder Ca zeigt (Bradbury & Baeyens 2003). Die Oberflächenkomplexierung findet überwiegend an amphoterischen Hydroxylgruppen der Minerale statt und wird als der wichtigste Mechanismus der Sorption von Schwermetallen, Übergangsmetallen, Lanthaniden und Actiniden in Bentoniten (sowohl in kationischer als auch, in geringerem Maße – durch Ligandenaustausch mit strukturellen Hydroxylgruppen, in anionischer Form) angesehen (Bradbury & Baeyens 2003). Die Sorption an Mineralphasen wie Quarz, Kaolinit oder Karbonaten ist als nicht vernachlässigbar jedoch von untergeordneter Bedeutung einzuschätzen.

Die verschiedenen Radionuklide zeigen deutliche Unterschiede in der Sorption, die zu einer Rückhaltung führen könnten: Mehrwertige Kationen, speziell tri- und tetravalente Actiniden werden von vielen Materialien stark adsorbiert, wie z. B. von Montmorilloniten, Metalloxiden oder Zementphasen. Einwertige Kationen, z. B. ^{135}Cs , adsorbieren deutlich schwächer, können aber einen Ionenaustausch eingehen. Anionische Spezies (z. B. von ^{36}Cl , ^{79}Se , ^{129}I) werden gegenüber den Kationen in wesentlich geringerem Maß adsorbiert. Die Sorption an Materialien mit Zementphasen oder an Korrosionsprodukten kann signifikant sein (Ochs et al. 2016) ist jedoch ohne Kenntnisse über die Zusammensetzung von in situ Porenlösungen des Zements quantitativ schlecht einschätzbar.

In zahlreichen Experimenten wurde gezeigt, dass die korrosionsbedingte Freisetzung des Eisens aus eisenhaltigen Materialien und seine Sorption durch Austausch von z. B. Na^+ -Ionen in den Schichtzwischenräumen quellfähiger Tonminerale zur Abnahme ihrer Quellfähigkeit und Kationenaustauschkapazität und zur Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeit des Tons aufgrund seiner Alteration führen kann (Herbert et al. 2011) (FEP „Alteration von Bentonit“). Eine Quantifizierung des Ablaufs und der Auswirkung dieses Prozesses unter in situ Bedingungen ist derzeit nicht möglich.

77.3 Prozessbeschreibung

Generell können Radionuklide an verschiedenen Materialien im Endlager sorbieren. Hierzu gehören im Konzept „mKBS-3“:

- Korrosionsprodukte von Behältern und anderen Metallen, speziell Eisenoxide und Eisenhydroxide,
- Tone in bentonithaltigen Buffer, Verschlüssen und Versatz,
- Zemente und Korrosionsprodukte in den Ausbauten sowie
- Granit, alterierter Granit und Kluftfüllmaterialien im Wirtsgestein und Deckgebirge.

Welche Rolle die Sorption während des Transports von Radionukliden spielt hängt insbesondere vom Transportweg (Auflockerungszone, technische Barrieren, Wirtsgestein, Deckgebirge) der Radionuklide ab. Behälter und Bentonitbuffer umgeben die Abfallmatrix. Damit stellen sie bzw. die Korrosionsprodukte der Behälter auf jeden Fall ein Sorbens für aus dem Behälter freigesetzte Radionuklide dar. Zementhaltige Baustoffe, werden nicht in direkter Umgebung der Behälter eingesetzt und sind daher als Sorbentien nur relevant, wenn der Radionuklidtransport durch den Endlagerbereich durch Bohrloch und Strecken stattfindet.

Der Transport durch das Wirtsgestein kann in ungeklüfteten Bereichen lediglich diffusiv durch das Gestein stattfinden. Die Sorption wird dann hauptsächlich durch Biotite, Feldspäte und Glimmer bestimmt. Der bevorzugte Radionuklidtransport wird aber, sofern vorhanden, entlang von wasserleitenden Klüften stattfinden. Hier wird die Sorption durch die Kluftfüllmaterialien, bzw. Coatings auf den Oberflächen offener Klüfte bestimmt und hängt sehr stark von den jeweils darin vorhandenen Mineralen ab. Sofern Tonminerale vorhanden sind, werden diese die Sorption vieler Radionuklide bestimmen.

77.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

77.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

☒ [X] wahrscheinlich ☐ [] weniger wahrscheinlich ☐ [] unwahrscheinlich

Aufgrund des Vorhandenseins von Sorptiven und Sorbenzien im gesamten Endlagersystem ist dieser Prozess wahrscheinlich.

77.6 Ungewissheiten

- Wie sind die Charakteristika von alteriertem Kristallingestein, Kluftoberflächen und Kluftfüllmaterialien für potentielle deutsche Standorte? Diese Information ist für die Quantifizierung der Sorption im Fernfeld notwendig.
- Einsatz von Zuschlagstoffen zur Rückhaltung von mobilen (speziell anionisch vorliegenden) Radionukliden?
- Ungewissheiten bestehen hinsichtlich der Heterogenität der Sorbentien und der lokal variierenden Zusammensetzung der Lösungen, die erheblichen Einfluss auf die Sorption haben.

77.7 Literaturquellen

- Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, B., Kienzler, B., Marquardt, C., Neck, V. & Richter, A. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. – Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlussbericht: FZK-INE 002/04; Karlsruhe.
- Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2003): Near field sorption data bases for compacted MX-80 bentonite for performance assessment of a high-level radioactive waste repository in Opalinus clay host rock. – Paul Scherrer Institut, PSI Bericht 03-07; Villingen.
- Bradbury, M.H., Baeyens, B. & Thoenen, T. (2010): Sorption data bases for generic swiss argillaceous rock systems. – Nagra, Technical Report 09-03; Wettingen.
- Dzombak, D.A. & Morel, F.M. (1990): Surface Complexation Modelling. – 393 S.; (Wiley-Interscience)
- Herbert, H.-J., Kasbohm, J., Lan, N.T., Meyer, L., Thao, H.T.M. & Xie, M. (2011): Fe-Bentonite. Experiments and modeling of the interactions of bentonites with iron. – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Report GRS-295: BMWi-FKZ 02 E 10538; Braunschweig.
- Ochs, M., Mallants, D. & Wang, L. (2016): Radionuclide and Metal Sorption on Cement and Concrete. – Springer International Publishing Switzerland.
- Posiva (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Features, Events and Processes. – Posiva Oy, Report, Posiva 2012-07; Eurajoki.
- Söderlund, M., Ervanne, H., Muuri, E. & Jehto, J. (2018): Sorption of Alkaline Earth Metals on Biotite of Olkiluoto Bedrock. – Posiva, Working Report 2017-41.
- Stumm, W. & Morgan, J.J. (1996): Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. – New York (Wiley).
- Wieland, E. & van Loon, L. (2002): Cementitious near-field sorption database for performance assessment of an ILW repository in Opalinus clay. – Nagra, Technical Report NTB 02-20: 97 pp.; Wettingen, Switzerland. ISSN 1015-2636

78 Komplexbildung

NEA-Gruppe:	2.5.1	<i>Water mediated migration [waste package]</i>
	3.3.1	<i>Water-mediated migration [repository]</i>
	4.3.1	<i>Water-mediated migration [geosphere]</i>

78.1 Definition/Kurzbeschreibung

Eine Komplex-Verbindung besteht aus einem Zentralatom und mehreren Liganden. Diese können Moleküle oder Ionen sein. Durch die Komplexbildung verlieren die Komplexbausteine ihre spezifischen Eigenschaften. Aus diesem Grund werden sie als eigene Stoffklasse behandelt.

78.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Gelöste Radionuklide liegen in der Regel als positive Kationen vor. Einige Spalt- und Aktivierungsprodukte, wie z. B. ^{14}C , ^{36}Cl , ^{129}I , ^{79}Se und ^{99}Tc , können allerdings in Form anionischer Spezies auftreten. Die hydrochemische Stabilität von positiv geladenen Komponenten, d. h. ihre Tendenz keine Komplexe mit Bestandteilen der Lösung einzugehen, nimmt mit der Ladung des Zentralatoms ab. Die Löslichkeit von Radionukliden kann durch Komplexierung signifikant erhöht werden (Stumm & Morgan 1996; Sigg & Stumm 2016). Durch die Verminderung der Ladung von komplexierten Kationen verringert sich die Tendenz zur Sorption (Kienzler et al. 2001).

Bei der Berechnung von Radionuklidkonzentrationen (besonders von Actiniden) in endlager-relevanten Lösungen anhand der thermodynamischen Löslichkeit bestimmter Festphasen muss die Bildung von Komplexen in der Lösung berücksichtigt werden. Die wichtigsten Komplexe in natürlichen Lösungen sind die Komplexe mit Hydroxid- und Karbonat-Ionen, auch als gemischte Hydroxido-karbonato-Komplexe, deren Bildungskonstanten für viele Radionuklide bekannt sind. Daneben können auch Sulfat-, Silikat- und Chloridionen als Komplexliganden eine Rolle spielen (Altmaier et al. 2004).

78.3 Prozessbeschreibung

In der Referenzlösung für das Wirtsgestein im Modell „mKBS-3“ (s. FEP „Lösungen im Wirtsgestein“) stellen Karbonate und Hydroxide aufgrund des pH-Werts von 7,6 die wichtigsten Komplexbildner dar.

Die Komplexe stehen mit den Ionen und den ungelösten Phasen im thermodynamischen Gleichgewicht. Generell führt die Bildung mobiler Komplexe zu einer Erhöhung der Lösungskonzentration. Dies gilt besonders für die Actiniden, die neben Hydroxiden und Karbonaten z. B. auch mit Silikaten Komplexe eingehen können. Im Fall von Uran spielen auch ternäre Komplexe mit Erdalkaliionen (Ca, Mg) und Karbonaten eine wichtige Rolle (Bernhard et al. 2001).

Neben der Erhöhung der Lösungskonzentration spielt aber auch die Auswirkung auf die Rückhaltung der Radionuklide eine entscheidende Rolle. So bilden viele als Kationen vorliegende Actinide unter den Bedingungen des Modellwassers negativ geladene Karbonato-, Hydroxido- oder gemischte Komplexe, die an den bei pH 7,6 häufig negativ geladenen Mineralphasen nicht oder nur geringfügig sorbieren und als Konsequenz viel schneller als die kationische Komponente transportiert werden.

Komplexe mit organischen Verbindungen sind wahrscheinlich von untergeordneter Bedeutung, da in den Abfällen nur geringe Organikamengen vorkommen. Auch Grundwässer im Granit weisen, wenn überhaupt, nur sehr geringe Mengen an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) auf. Sofern der Transport durch das Grubengebäude erfolgt, können kleine organische Moleküle bei der Zersetzung von Asphalten gebildet werden. Außerdem können in oberflächennahen Bereichen organische Stoffe vorkommen und dort zur Komplexbildung beitragen.

78.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

78.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Sowohl Lösungen als auch Komplexbildner sind im Kristallingestein vorhanden. Somit ist in einer Lösung die Komplexbildung zu erwarten.

78.6 Ungewissheiten

- Die hydrogeochemischen Bedingungen beeinflussen die Komplexbildung. Variationen in pH-Wert, Eh-Wert und Zusammensetzung der Grundwässer auch in Wechselwirkung mit technischen Komponenten können die Bildung von Komplexen mit Radionukliden erheblich verändern.

78.7 Literaturquellen

- Altmaier, M., Brendler, V., Bosbach, B., Kienzler, B., Marquardt, C., Neck, V. & Richter, A. (2004): Sichtung, Zusammenstellung und Bewertung von Daten zur geochemischen Modellierung. – Institut für Nukleare Entsorgung (INE) Forschungszentrum Karlsruhe, Abschlussbericht: FZK-INE 002/04; Karlsruhe.
- Bernhard, G., Geipel, G., Reich, T., Brendler, V., Amayri, S. & Nitsche, H. (2001): Uranyl(VI) carbonate complex formation: Validation of the $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq.})$ species. – Radichim. Acta, 89, 511-518.
- Kienzler, B., Schüßler, W. & Metz, V. (2001): Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen. – Institut für Nukleare Entsorgung, Karlsruhe, (In: Larue, J. Brasser, Th., Fischer-Appelt, K., Moenig, J., Kienzler, B., Schüßler, W. & Metz, V. [Hrsg.]: Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung "günstige hydrochemische Bedingungen"). – Bericht an den BMU-Arbeitskreis zur Auswahl von Endlagerstandorten, AkEnd: GRS-A-2939a.
- Sigg, L. & Stumm, W. (2016): Aquatische Chemie. Einführung in die Chemie natürlicher Gewässer. – 6. überarbeitete Auflage, vdf Hochschulverlag AG ETH Zürich.
- Stumm, W. & Morgan, J.J. (1996): Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters. – New York (John Wiley & Sons).

79 Kolloidbildung und -filtration

NEA-Gruppe:	2.5.1	<i>Water mediated migration [waste package]</i>
	3.3.1	<i>Water-mediated migration [repository]</i>
	4.3.1	<i>Water-mediated migration [geosphere]</i>

79.1 Definition/Kurzbeschreibung

Kolloide sind Teilchen mit einer Abmessung zwischen 0,001 und 1 μm , die in einem Medium feinverteilt vorliegen. Die Mobilisierung eines Teilchens dieser Größe in eine Lösung hinein wird als Kolloidbildung bezeichnet. Aufgrund von Wechselwirkungen mit Porenoberflächen kann eine Oberflächenanreicherung – Filtration – der Kolloide erfolgen.

79.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Generell wird zwischen hydrophilen und hydrophoben Kolloiden unterschieden. Bei hydrophilen Kolloiden handelt es sich meist um Polymere, Polyelektrolyte oder Proteine, die gut wasserlöslich sind, spontan eine kolloidale Suspension bilden und relativ unempfindlich auf Destabilisierung durch Elektrolytzusatz reagieren. Im Falle von Metalloxiden/-hydroxiden, die eine geringe Löslichkeit besitzen, liegen zumeist hydrophobe Kolloide vor. Hydrophobe Kolloiddispersionen sind im Wesentlichen nur infolge ihrer Oberflächenladung stabilisiert und besitzen eine hohe Sensitivität gegenüber Elektrolytdestabilisierung. Hydrophobe Kolloide können zusätzlich sterisch stabilisiert werden, wenn Polyelektrolyte wie z. B. Huminstoffe an der Oberfläche sorbieren und einen Kontakt der hydrophoben Oberflächen, der zur Agglomeration führen kann, verhindern.

Radionuklide können an Kolloide gebunden sein. Auch können sich Kolloide aus Radionuklidphasen durch Agglomeration bilden. Deshalb wird unterschieden zwischen „Eigenkolloiden“, bei denen das Radionuklid einen Hauptbestandteil darstellt, und „Fremdkolloiden“ („Pseudokolloiden“), bei denen das Radionuklid an aquatische Kolloide sorbiert bzw. darin eingebaut vorliegt. In Abhängigkeit von den hydrochemischen Verhältnissen, insbesondere vom pH-Wert und von der Ionenstärke der Lösungen, können solche Kolloide langfristig stabil in der Lösung vorkommen und die Speziation bestimmter Radionuklide dominieren (McCarthy & McKay 2004, Geckeis et al. 2004, Wold 2010).

Hydrochemische Bedingungen wie z. B. niedrige Ionenstärke und hoher pH-Wert begünstigen das Entstehen kolloidaler Lösungen. Einbau in bzw. Sorption an Kolloide mit großer spezifischer Oberfläche mobilisiert insbesondere solche Radionuklide wie z. B. die Actiniden Pu, Th und Am, die sonst wegen ihrer starken Sorptionseigenschaften bzw. ihrer geringen Löslichkeit wenig mobil sind (Möri et al. 2003, Geckeis et al. 2004, Wold 2010, Lührmann et al. 1998). Sofern die Kolloide langzeitstabil sind, können sie den Transport dieser Radionuklide erheblich beschleunigen. Vielfach sind Kolloide negativ geladen und wechselwirken mit in natürlichen Systemen häufig negativ geladen Mineraloberflächen kaum. Hier ist dann die Stärke der Bindung des Radionuklids an das Kolloid entscheidend dafür, ob das Radionuklid während des Transports weitgehend vom Kolloid desorbiert und dann doch an Mineraloberflächen zurückgehalten wird oder nicht (Huber et al. 2016, Reiche et al. 2015).

Kolloide können mit laserinduzierter Breakdown-Detektion (hochempfindliche, nicht-invasive Methode zur Bestimmung eines mittleren Durchmessers und der Konzentration aquatischer Kolloide) nachgewiesen und hinsichtlich ihrer Größenverteilung charakterisiert werden.

Die Tonfraktion von tonhaltigen Materialien ist durch eine Korngröße $< 2 \mu\text{m}$ gekennzeichnet, und mindestens eine Abmessung der aus einzelnen Tonmineralschichten bestehenden Tonmineralteilchen ist i. d. R. $< 1 \mu\text{m}$ (Likos & Lu 2006). Daher stellt die Tonfraktion von tonhaltigen Materialien eine Quelle der Kolloide dar, deren Masse sich infolge einer Kolloidbildung und eines anschließenden Abtransportes in einem Erosionsprozess reduzieren kann. Für kompaktierte Bentonite in Kontakt mit einem geklüfteten Granitkörper wurden für diesen Prozess folgende Gesetzmäßigkeiten festgestellt (Baik et al. 2007):

- mit steigender Fließrate des Grundwassers nimmt die Konzentration der mobilisierten Tonkolloide zu und ihr mittlerer Durchmesser ab; bei einer Fließrate von ca. 10^{-7} m/s und 10^{-6} m/s betrug der mittlere Durchmesser der mobilisierten Tonkolloide jeweils etwa $1,4 \mu\text{m}$ und $0,7 \mu\text{m}$,
- die Konzentration der mobilisierten Tonkolloide ist bei alkalischen pH-Werten höher als bei pH 7.

Aus den Ergebnissen der bis zu 36 Tage langen Batch-Versuche mit Montmorillonit-Suspensionen mit Ionenstärken von bis zu $0,01 \text{ mol/l}$ (NaCl) und $0,001 \text{ mol/l}$ (CaCl_2) wurde hingegen in (García-García et al. 2007) extrapoliert, dass Na-Montmorillonit-Kolloide in NaCl -Lösungen mit einer Ionenstärke von bis zu $0,7 \text{ mol/l}$ und Ca-Montmorillonit-Kolloide in CaCl_2 -Lösungen mit einer Ionenstärke von bis zu $0,006 \text{ mol/l}$ stabil bleiben. Untersuchungen von Seher (2011) zeigen, dass aus FEBEX Bentonit isolierte Montmorillonitkolloide in CaCl_2 -Lösungen unabhängig vom pH-Wert bis $0,001 \text{ mol/l}$ stabil sind und Fulvinsäuren die Montmorillonit-Kolloide stabilisieren und diesen Wert auf $0,002 \text{ mol/l}$ erhöhen. (Seher 2011, Schäfer & Noseck 2010). In NaCl -Lösungen wird dagegen eine pH-abhängige Stabilität bis $0,015 \text{ mol/l}$ bei pH 6 und bis $0,35 \text{ mol/l}$ bei pH 9 gefunden.

Die Ergebnisse einer umfangreichen Bentonitstudie (Kaufhold & Dohrmann 2008) bestätigen die Begünstigung der Kolloidbildung durch hohe Alkalinität und zeigen ferner, dass nicht-kompaktierte Na-Bentonite im Vergleich zu Ca-Bentoniten erheblich größere Kolloidmengen freisetzen. Dies wurde auch u. a. auch durch Arbeiten von Missana et al. (2011) bestätigt. Allerdings darf der Anteil des austauschbaren Na^+ in Ca-Bentoniten 10 % nicht überschreiten, da Ca-Bentonite mit einem Na^+ -Anteil von über 10 % ähnliche Kolloidmengen freisetzen wie reine Na-Bentonite (Wold 2010).

Der Einfluss einer erhöhten Temperatur auf die Stabilität der Montmorillonit-Kolloide hängt stark vom pH-Wert der Lösung ab: bei pH von 4 bis 8,3 wird die Stabilität erheblich reduziert, während sie bei pH von 10 bis 11 erhöht wird (García-García et al. 2009). Ferner wird die Stabilität der Na-Montmorillonit-Kolloide durch Bestrahlung mit Gamma-Strahlen erhöht (Holmboe et al. 2009).

79.3 Prozessbeschreibung

Die Tonfraktion von einzubringenden tonhaltigen Buffer, bzw. Verschlussmaterialien kann im Modell „mKBS-3“ ein Ausgangsmaterial für die Kolloidbildung darstellen. Das für den Endlagerbereich im Kristallingestein angenommene Modellwasser fördert aufgrund der geringen Salinität und eines leicht alkalischen pH-Werts von 7,6 die Stabilität von Kolloiden. Da es je nach Verschlussoption möglich ist, dass tonhaltige Materialien in Verschlussbauwerken in Kontakt mit zementbeeinflussten alkalischen Lösungen stehen werden, kann ihre Stabilität in betroffenen Grubenbaubereichen erhöht werden.

Zemente stellen ebenfalls eine Quelle für Kolloide dar (Fujita et al. 2003). Kolloidbildung kann zusätzlich durch Ausfällung von Produkten der Metallkorrosion, der Korrosion der Brennstoffmatrix und der Korrosion von Glas und Zement erfolgen (McVay & Buckwalter 1983). Des

Weiteren werden einige Mikrobenarten durch eine Größe $< 1 \mu\text{m}$ gekennzeichnet und repräsentieren in planktonischer Form transportfähige Kolloide.

Kolloidtransport ist in den wasserleitenden Klüften des Kristallingesteins zu erwarten. Wie relevant er ist wird davon abhängen, ob aus den Baustoffen Kolloide freigesetzt werden oder dort natürliche Kolloide auftreten. Insbesondere die Erosion des Bentonitbuffers und ihre Auswirkung auf den kolloidgetragenen Radionuklidtransport ist zu untersuchen.

Kolloidbildung (Erosion) kann auch zum Masseverlust der Tonfraktion der des Buffers Verschlussbauwerke führen. Bei Fließraten deutlich unter 10^{-7} m/s wird der Einfluss dieses Prozesses auf die Funktion von Verschlussbauwerken und des Versatzes als vernachlässigbar eingestuft (Baik et al. 2007). Im Bereich des ungeklüfteten Kristallingesteins sollte dieser Prozess keine Auswirkungen auf Buffer und Verschlüsse haben. Bei Buffer und Verschlüssen im Bereich hydraulisch wirksamer Klüfte ist die Relevanz zu überprüfen.

79.4 Zeitliche Beschränkung

Keine.

79.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Durch das Vorhandensein von Tonpartikeln und anderen potentiellen Kolloidquellen wahrscheinlich, auch wenn fraglich ist, ob die Kolloide langzeitstabil sind.

79.6 Ungewissheiten

- Wie hoch ist der natürliche Gehalt an Kolloiden in der Geosphäre?
- Kolloidbildung durch Erosion des Bentonitbuffers und die Auswirkungen auf den Radionuklidtransport sind unter den Bedingungen am Standort zu untersuchen.
- Wie hoch kann der Masseverlust von Bentonit-Abdichtungen im Bereich hydraulische wirksamer Störungen und Klüfte unter den Voraussetzungen am Standort sein?

79.7 Literaturquellen

- Baik, M.-H., Cho, W.-J. & Hahn P.-S. (2007): Erosion of bentonite particles at the interface of a compacted bentonite and a fractured granite. – Engineering Geology 91; 229-239.
- Fujita, T., Sugiyama, D., Swanton, S.W. & Myatt, B.J. (2003): Observation and characterization of colloids derived from leached cement hydrates. – Journal of Contaminant Hydrology 61, 3-16.
- García-García, S., Wold, S. & Jonsson, M. (2007): Kinetic determination of critical coagulation concentration for sodium and calcium montmorillonite colloids in NaCl and CaCl₂ aqueous solutions. – Journal of Colloids and Interface Science 315, 512-519.
- García-García, S., Wold, S. & Jonsson, M. (2009): Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at different pH and ionic strength. – Applied Clay Science 43, 21-26.

- Geckeis, H., Schäfer, T., Hauser, W., Rabung, Th., Missana, T., Degueldre, C., Möri, A., Eikenberg, J., Fierz, Th. & Alexander W.R. (2004): Results of the colloid and radionuclide retention experiment (CRR) at the Grimsel Test Site (GTS), Switzerland – impact of reaction kinetics and speciation on radionuclide migration. – *Radiochim. Acta* 92, 765–774.
- Holmboe, M., Wold, S., Jonsson, M. & García-García, S. (2009): Effects of gamma-irradiation on the stability of colloidal Na⁺-Montmorillonite dispersions. – *Applied Clay Science* 43, 86-90.
- Huber, F., Noseck, U., Schäfer, Th. (eds.) (2016): Stability of compacted bentonite for radionuclide retardation – experiments and modelling. – KIT report. DOI: 10.5445/IR/1000059756
- Kaufhold, S. & Dohrmann, R. (2008): Detachment of colloidal particles from bentonites in water. – *Applied Clay Science* 39, 50-59.
- Likos, W.J. & Lu, N. (2006): Pore-scale analysis of bulk volume change from crystalline inter-layer swelling in Na⁺- and Ca²⁺-smectite. – *Clays and Clay Minerals* 54, 515-528.
- Lührmann, L., Noseck, U. & Tix, C. (1998): Model of contaminant transport in porous media in the presence of colloids applied to actinide migration in column experiments. – *Water Resources Research* 34, 421-426.
- McCarthy, J.F. & McKay, L.D. (2004): Colloid transport in the subsurface: past, present, and future challenges. – *Vadose Zone Journal* 3, 326-337.
- McVay, G.L. & Buckwalter, C.Q. (1983): Effect of Iron on Waste-Glass Leaching. – *Journal of the American Ceramic Society* 66, 170-174.
- Missana, T., Alonso, U., Albarran, N., García-Gutiérrez, M. & Cormenzana, J.-L. (2011): Analysis of colloids erosion from the bentonite barrier of a high level radioactive waste repository and implications in safety assessment. – *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 1607-1615.
- Möri, A., Alexander, W.R., Geckeis, H., Hauser, W., Schäfer, Th., Eikenberg, J., Fierz, Th., Degueldre, C. & Missana, T. (2003): The Colloid and Radionuclide Retardation Experiment at the Grimsel Test Site: Influence of Bentonite Colloids on Radionuclide Migration in a Fractured Rock. – *Colloids & Surfaces*, 217, 33-47.
- Reiche, T., Noseck, U. & Schäfer, Th. (2015): Migration of contaminants in fractured-porous media in the presence of colloids: effects of kinetic interactions. – *Transp. Porous Med.*, 111, 143–170. DOI: 10.1007/s11242-015-0585-7
- Schäfer, T. & Noseck, U. (eds.) (2010): Colloid/ Nanoparticle formation and mobility in the context of deep geological nuclear waste disposal. – Institut für Nukleare Entsorgung: Karlsruhe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, FZKA Report 7515; Braunschweig.
- Seher, H. (2011): Der Einfluss von Kolloiden auf die Migration von Radionukliden. – Inauguraldissertation, Ruprechts-Karl-Universität; Heidelberg.
- Wold, S. (2010): Sorption of prioritized elements on montmorillonite colloids and their potential to transport radionuclides. – Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-20; Stockholm.

80 Thermochemische Sulfatreduktion

NEA-Gruppe:	3.2.1	<i>Thermal processes [repository]</i>
	3.2.4	<i>Chemical processes [repository]</i>
	4.2.1	<i>Thermal processes [geosphere]</i>
	4.2.4	<i>Chemical processes [geosphere]</i>

80.1 Definition/Kurzbeschreibung

Die Thermochemische Sulfatreduktion (TSR) ist eine Redoxreaktion von organischen Verbindungen oder molekularem Wasserstoff mit Sulfaten in wässrigen Lösungen bei Temperaturen $> 80^{\circ}\text{C}$ unter Bildung von Karbonaten, Sulfiden, Wasser oder CO_2 im Umfeld der eingelagerten Abfälle.

80.2 Allgemeine Informationen und Beispiele

Bei der TSR handelt es sich um einen Prozess, bei dem unter Nutzung von Wasserstoffatomen eines Reduktionsmittels Sulfat reduziert wird und Schwefelwasserstoff sowie Wasser entstehen. Als Wasserstofflieferanten können einfache organische Verbindungen (z. B. Methan) oder höhermolekulare Kohlenwasserstoffe (KW) dienen (Machel 2001, Ostertag-Henning 2008). Ferner ist bekannt, dass auch molekularer Wasserstoff, der z. B. durch Aromatisierung langkettiger Alkane entsteht, zur TSR führen kann. Wasserstoff kann auch bei Korrosionsprozessen oder während der Radiolyse gebildet werden. Sulfat kann generell in Tiefenwässern von Kristallingesteinen vorhanden sein und so z. B. auch bakterielle Sulfatreduktion ermöglichen (Drake et al. 2017). Das reaktive Sulfat stammt aus der Auflösung von festem Calciumsulfat (hauptsächlich Gips und Anhydrit). Gips, Anhydrit sowie weitere Sulfate wie Baryt oder Ettringit sind als Kluftminerale in Kristallingesteinen in verschiedener Vergesellschaftung vorhanden (FEP „Störungen und Klüfte“). Ferner zählen zu den Sulfatquellen gelöstes (SO_4^{2-}) aus Meerwasser, eingeschlossenem Meerwasser sowie evaporativen Laugen (Porenwasser) (Machel 2001), was aber für Kristallingesteine zu vernachlässigen ist. Entscheidend für den Ablauf der TSR ist, dass die dafür notwendigen Gase wie Wasserstoff oder KW erst in Lösung gehen müssen. Die Gase werden nicht direkt, sondern erst durch weitere Reaktionen in der Lösung gebildet. Bei der TSR können als Zwischenprodukte intermediäre Oxidationsstufen des Schwefels (Sulfit, Thiosulfat, elementarer Schwefel oder Polysulfide) entstehen. Diese können sich wiederum auf die Neubildung des für die Sulfatreduktion benötigten Wasserstoffs auswirken, indem sie zur Bildung von Oorganoschwefelverbindungen führen oder die Umsetzung langkettiger Alkane zu Aromaten beeinflussen. Bei der Reaktion sind Bildung und Ausfällung von Karbonaten nach Überschreiten des Löslichkeitsprodukts möglich. In Abhängigkeit von der Anwesenheit oder Abwesenheit spezifischer organischer Reaktanten (Edukte) kann die TSR exotherm oder endotherm ablaufen (Machel 2001).

Die TSR findet bevorzugt in Lösungen mit niedrigen pH-Werten statt. Nachgewiesen ist dieser Prozess über geologische Zeiträume für Temperaturen ab 80°C . In der Natur, d. h. unter geologischen Verhältnissen, läuft die TSR normalerweise bei Temperaturen von 100 bis 140°C ab. Für die TSR gibt es keine allgemeingültige Minimaltemperatur, da ihr Einsetzen und ihre Rate von verschiedenen Faktoren bestimmt werden, die von Ort zu Ort variieren. Dazu zählen die Zusammensetzung der zur Verfügung stehenden organischen Reaktanten, Anwesenheit kinetischer Inhibitoren und/oder Katalysatoren, die Auflösungsrate des Anhydrits, die Benetzbarkeit und schließlich die Migration und Diffusionsraten der Hauptreaktanten (Machel 2001).

Auf der Grundlage experimenteller Befunde wird davon ausgegangen, dass bei einer Temperatur von 200°C die Halbwertszeit für die Umsetzung von Sulfat in der Gegenwart von molekularem Wasserstoff in der Größenordnung von 10 Jahren liegt. Bei 90°C beträgt die extrapolierte Halbwertszeit des Sulfats ca. 210.000 Jahre, falls keine anderen limitierenden Faktoren vorliegen (Truche et al. 2009). Die Sulfatreduktion kann durch das unterschiedliche Volumen von Edukten und Produkten den Spannungszustand im Gebirge beeinflussen. Eine überschlägige Abschätzung ergab, dass bei der Sulfatreduktion in Salzgestein mit einer Volumenzunahme um ca. 10 % der beteiligten Stoffe zu rechnen ist (Weber et al. 2011).

Die Reaktion von organischen Substanzen mit Sulfat kann als Produkt Kohlenstoffdioxid ergeben, das in einer Folgereaktion z. B. als Calciumkarbonat gebunden wird. Durch die Bildung von Karbonat wird die ungehinderte Zugänglichkeit des im Gestein vorhandenen Sulfates für die Kohlenwasserstoffe bzw. den molekularen Wasserstoff erschwert oder vollständig unterbunden. Bei exothermen Reaktionen werden infolge der autokatalytischen Natur des Prozesses die Stabilitäten von organischen Verbindungen im Umfeld der Einlagerungsgebilde durch die erhöhte Temperatur und die geänderten pH-Bedingungen herabgesetzt.

Reaktionsprodukte der organischen Substanzen können auch organische Säuren sein (Machel 2001), die die hydrochemischen Verhältnisse ändern und damit die Integrität der Brennelement-Behälter indirekt zu beeinträchtigen vermögen. Wenn es zur Bildung von Schwefelwasserstoff kommt, ändern sich die Redoxbedingungen im Nahfeld. Durch die neu gebildeten Gase werden auch andere von den hydrochemischen Verhältnissen abhängige Prozesse, wie z. B. die Korrosion der Behältermaterialien und der Abfallmatrix, beeinflusst. So kann die Änderung der Lösungszusammensetzung zu einer veränderten Korrosionsrate von Kupfer führen und die Langzeitstabilität der Behälter beeinträchtigen.

80.3 Prozessbeschreibung

Im Bereich des Modells „mKBS-3“ beträgt der Temperaturgradient 3 K/100 m (FEP „Terrestrischer Wärmestrom“). Eine thermochemische Sulfatreduktion aufgrund des geothermischen Gradienten ist unter diesen Bedingungen im Einlagerungsbereich nicht zu erwarten.

Der Zeitraum, in dem im Wirtsgestein, induziert durch die Einlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle, Temperaturen oberhalb von 80°C herrschen, ist auf wenige Tausend Jahre begrenzt und ist beschränkt auf einen Bereich von wenigen Metern Entfernung zu einer Einlagerungsstrecke.

Die Auswirkungen der thermochemischen Sulfatreduktion hängen stark von den Umsetzungs-raten ab, die wiederum u. a. von der Menge des zur Verfügung stehenden Wasserstoffs sowie von der Zugänglichkeit des Sulfates für den Reduktionsprozess beeinflusst werden. Aufgrund der Lage und der geologischen Entwicklung des generischen geologischen Modells wird unterstellt, dass keine Kohlenwasserstoffe als Wasserstofflieferanten für die thermochemische Sulfatreduktion vorhanden sind. (FEP „Gase im Wirtsgestein“). Das granitische Wirtsgestein enthält kaum freies Porenwasser (FEP „Lösungen im Wirtsgestein“) und im Standortmodell „mKBS-3“ sind auch im Einlagerungsbereich keine hydraulisch wirksamen Klüfte vorhanden, in denen großen Mengen an Lösungen mit organischen Verbindungen, molekularem Wasserstoff oder Sulfat vorhanden sind, die als Edukte für die thermochemische Sulfatreduktion zur Verfügung stehen.

Entstehen im Bereich der Auflockerungszone durch mikrobielle Prozesse, Metallkorrosion oder die Zersetzung von Organika Gase wie Wasserstoff oder Methan, kann dort die thermochemische Reaktion in wässrigen Lösungen bei Temperaturen > 80°C ablaufen.

80.4 Zeitliche Beschränkung

Wenn die Temperatur unter die für die Reaktion notwendige Mindesttemperatur fällt, oder wenn die Edukte verbraucht sind, findet keine thermochemische Sulfatreduktion mehr statt.

80.5 Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit/Begründung

[X] wahrscheinlich [] weniger wahrscheinlich [] unwahrscheinlich

Durch die Aufheizung des Gebirges durch die Abfälle und die Entstehung von molekularem Wasserstoff oder Methan könnte die TSR im Umfeld der Abfälle ablaufen und wird deshalb als wahrscheinlich ablaufender Prozess eingestuft.

80.6 Ungewissheiten

- Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit: Sind im Kristallingestein im Umfeld der Abfälle ausreichend Lösungen mit organischen Verbindungen, molekularem Wasserstoff oder Sulfat vorhanden, damit die thermochemische Sulfatreduktion ablaufen kann? Für eine Einschätzung sind Modellierungen zur Temperatursausbreitung in Kristallingesteinen erforderlich, da Temperaturen von über 80°C notwendig sind.
- Zusammensetzung, pH-Werte der Tiefenwässer von Kristallingesteinen bzw. Gehalt der zur Verfügung stehenden Edukte für die Redoxreaktion wie Wasserstoff bzw. Kohlenwasserstoffe sowie die Zugänglichkeit von Sulfat im Kristallingestein.
- Migrationswege für Wasserstoff, welches bei Korrosionsprozessen oder während der Radiolyse im Grubengebäude entsteht.
- Ungewissheiten ergeben sich in Bezug auf die Verfügbarkeit der Edukte und der Modellierung des Temperaturfeldes.

80.7 Literaturquellen

- Drake, H., Ivarsson, M., Bengtson, S., Heim, C., Siljeström, S., Whitehouse, M.J., Broman, C., Belivanova, V. & Åström, M.E. (2017): Anaerobic consortia of fungi and sulfate reducing bacteria in deep granite fractures. – *Nature Communications* 8: 55.
- Machel, H. (2001): Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: old and new insights. – *Sedimentary Geology* 140: 143-175; Amsterdam.
- Ostertag-Henning, C. (2008): Untersuchungen zur thermochemischen Sulfatreduktion: Etablierung der experimentellen Aufbauten und der analytischen Verfahren. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 19 S.; Hannover.
- Truche, L., Berger, G., Destigneville, C., Pages, A., Guillaume, D., Giffaut, E. & Jacquot, E. (2009): Experimental reduction of aqueous sulphate by hydrogen under hydrothermal conditions: implication for the nuclear waste storage. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 73: 4824-4835; Amsterdam.
- Weber, J.R., Hammer, J. & Schulze, O. (2011): Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 28 S.; Hannover.

BGE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55

31224 Peine – Germany

T + 49 5171 43-1520

F + 49 5171 43-1506

info@bge-technology.de

www.bge-tec.de