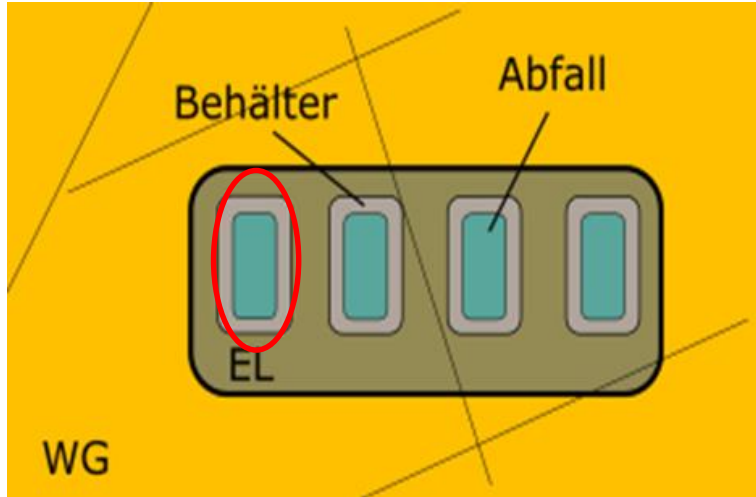


Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Kristallingestein in Deutschland

Michael Jobmann
Victoria Burlaka

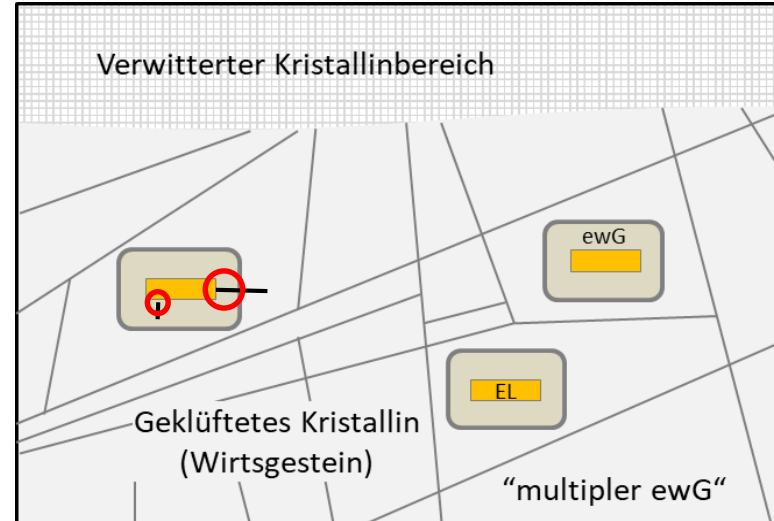
Unterschiede mit Blick auf Verschlusssystem

mKBS3



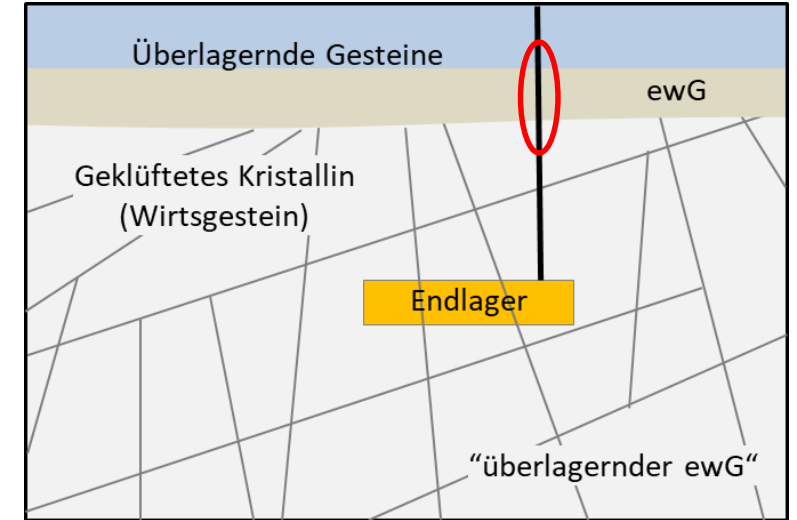
Behälter
Buffer
Widerlager

multipler ewG



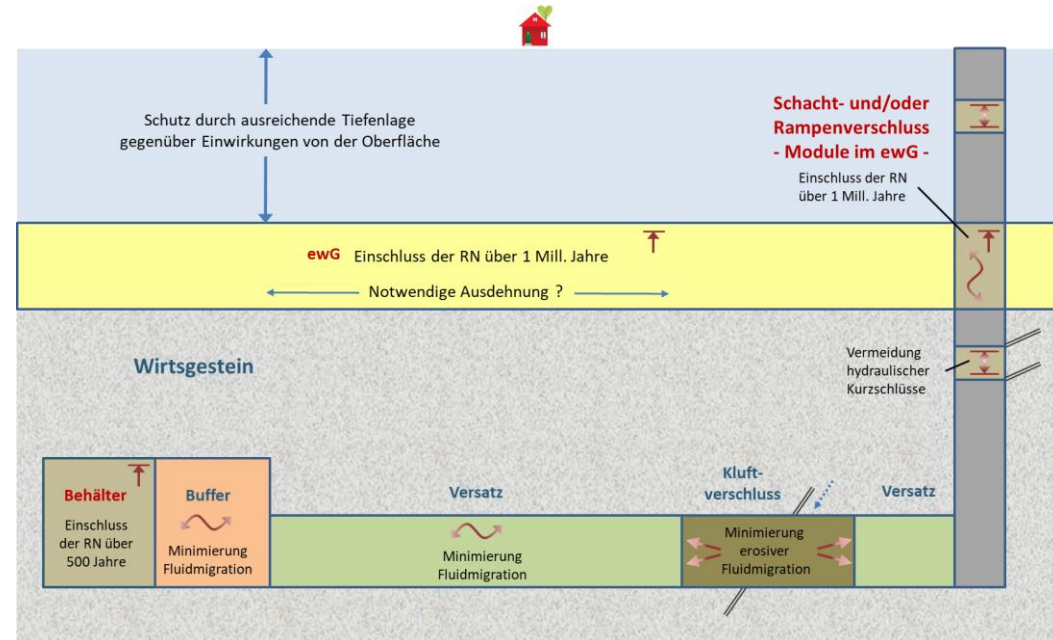
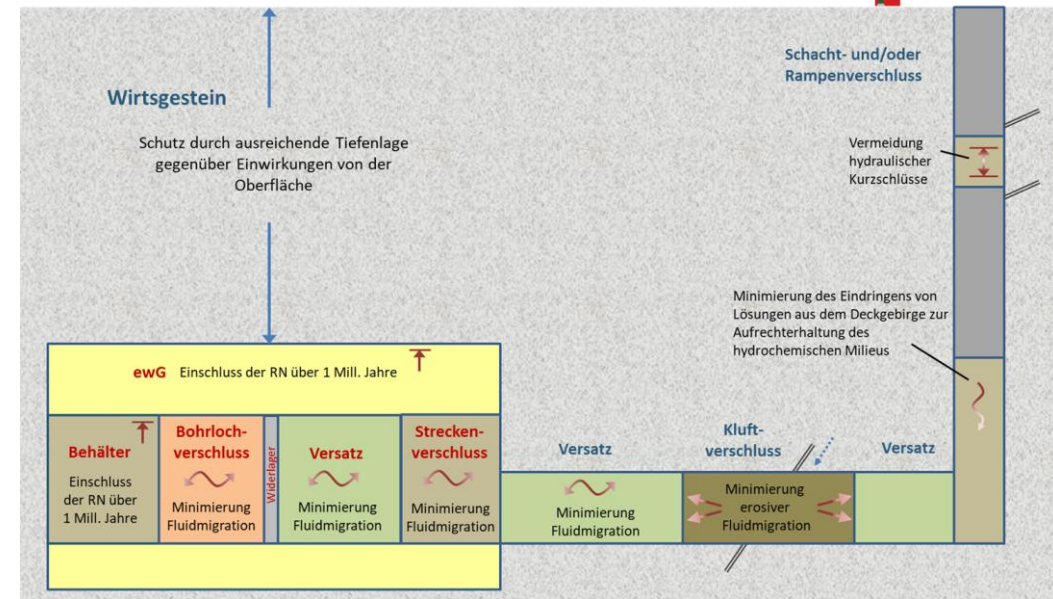
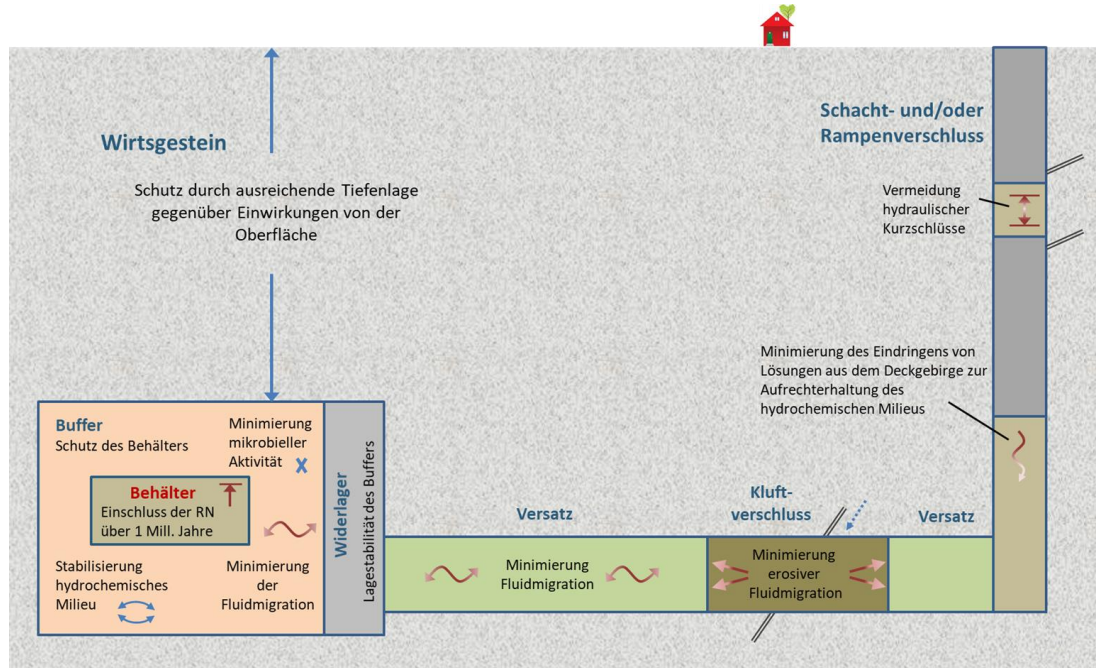
Bohrlochverschluss
Streckenversatz
Streckenverschluss

überlagernder ewG

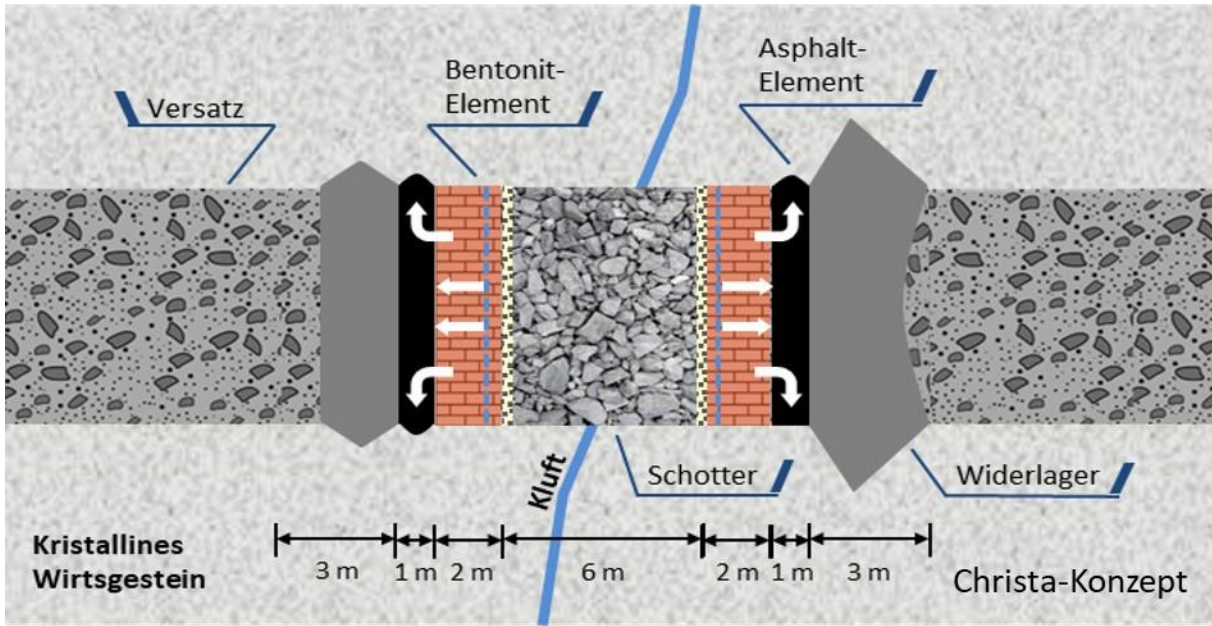


Schacht- und/oder
Rampenverschluss

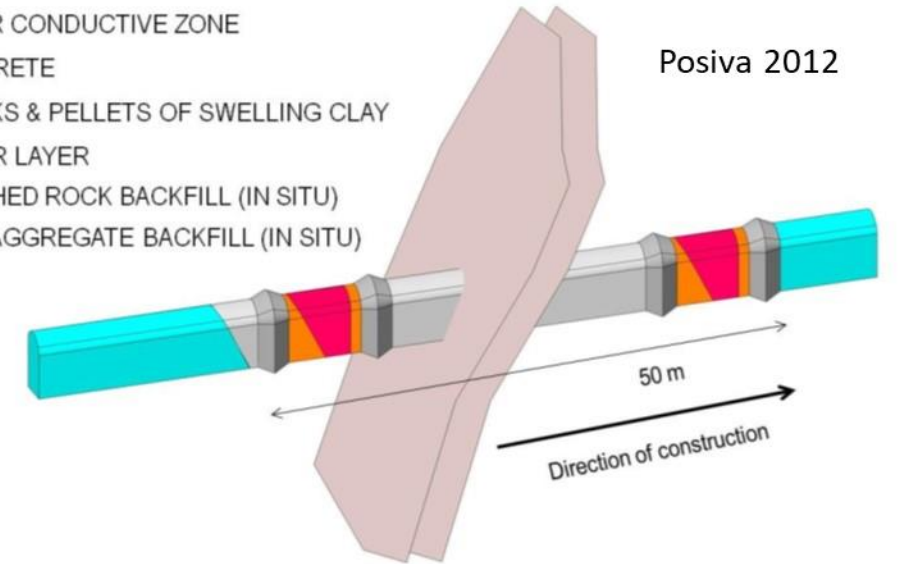
Verschlussssysteme



Kluftverschluss (alle Optionen)

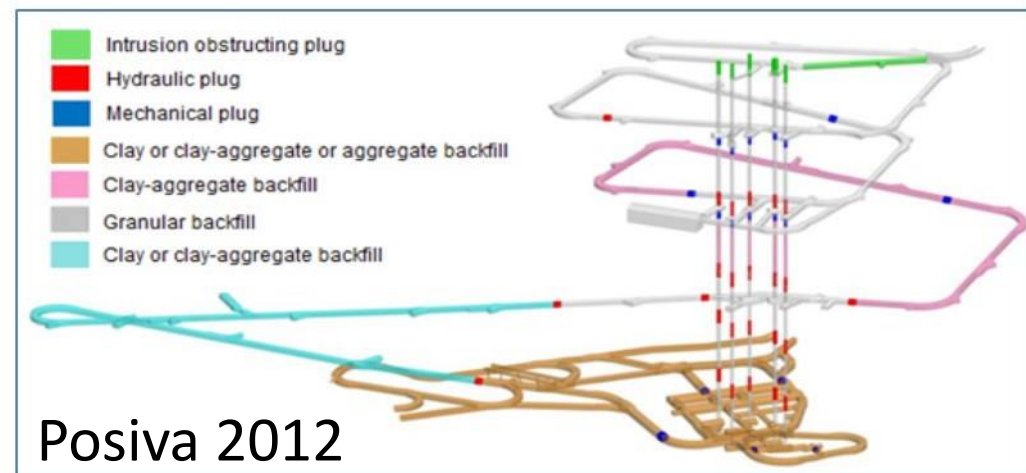
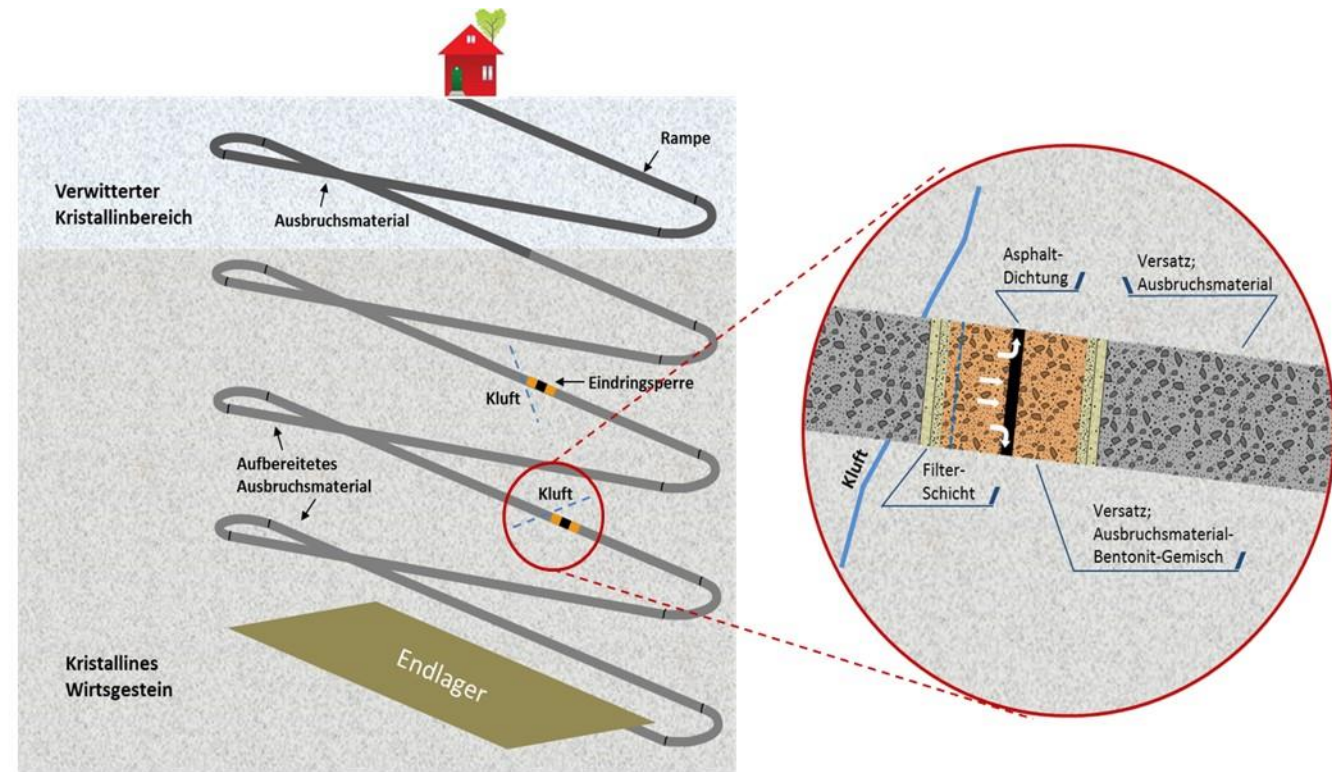
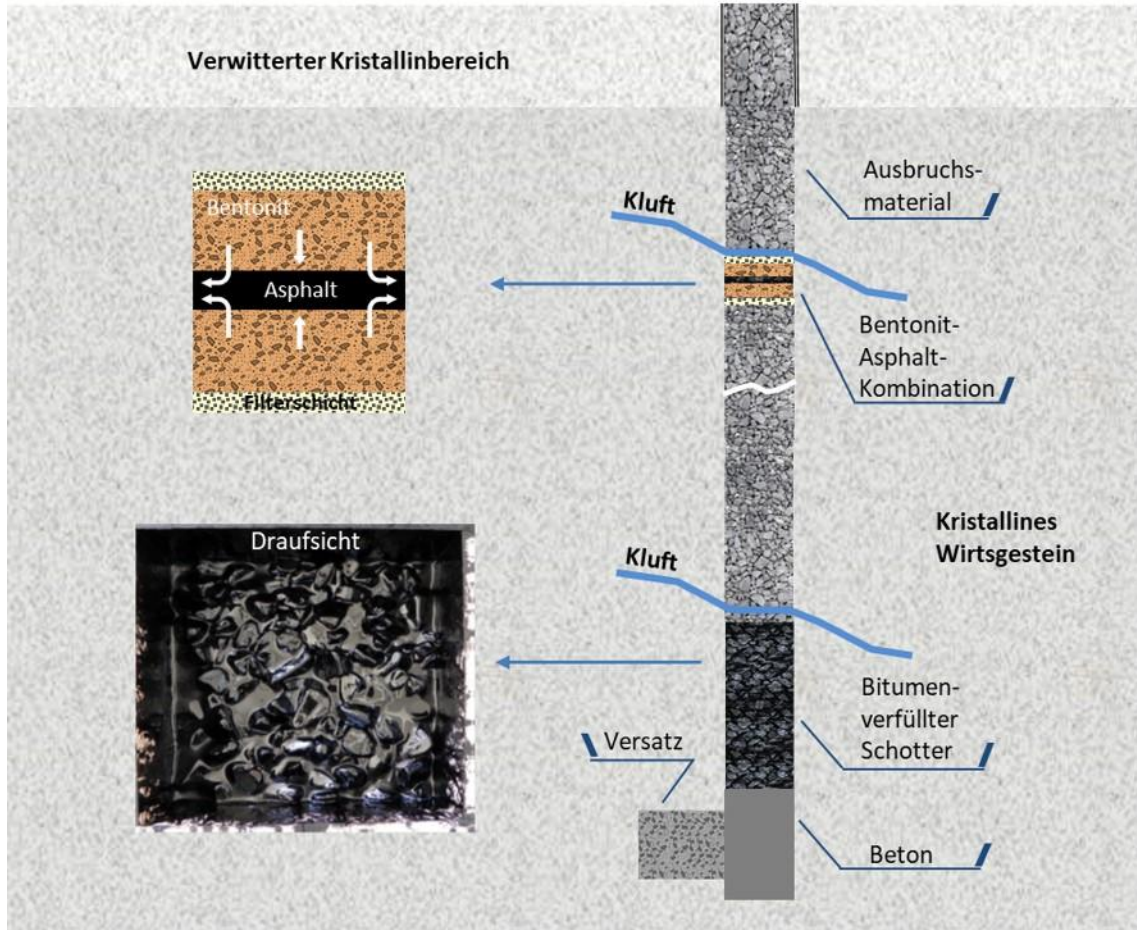


- WATER CONDUCTIVE ZONE
- CONCRETE
- BLOCKS & PELLETS OF SWELLING CLAY
- FILTER LAYER
- CRUSHED ROCK BACKFILL (IN SITU)
- CLAY-AGGREGATE BACKFILL (IN SITU)



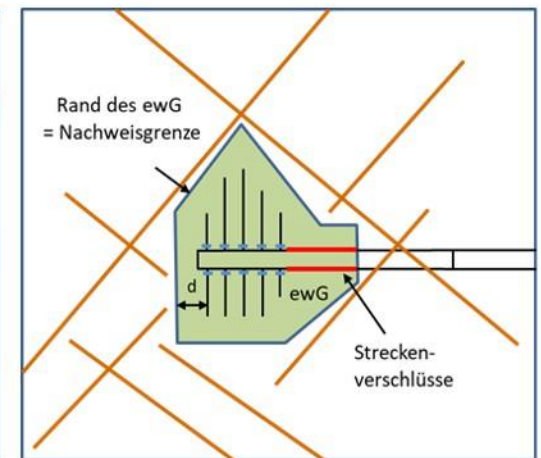
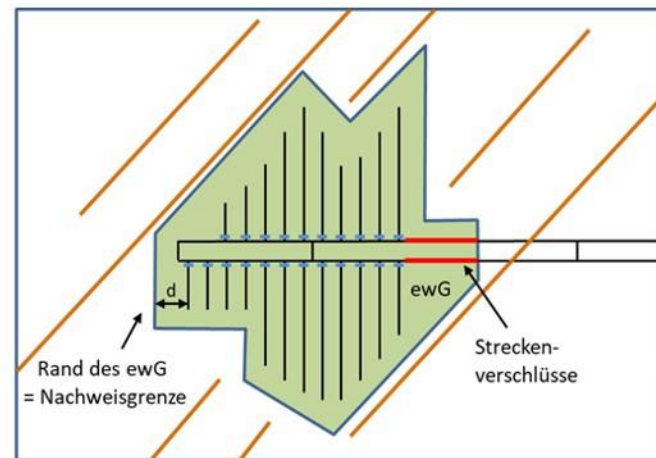
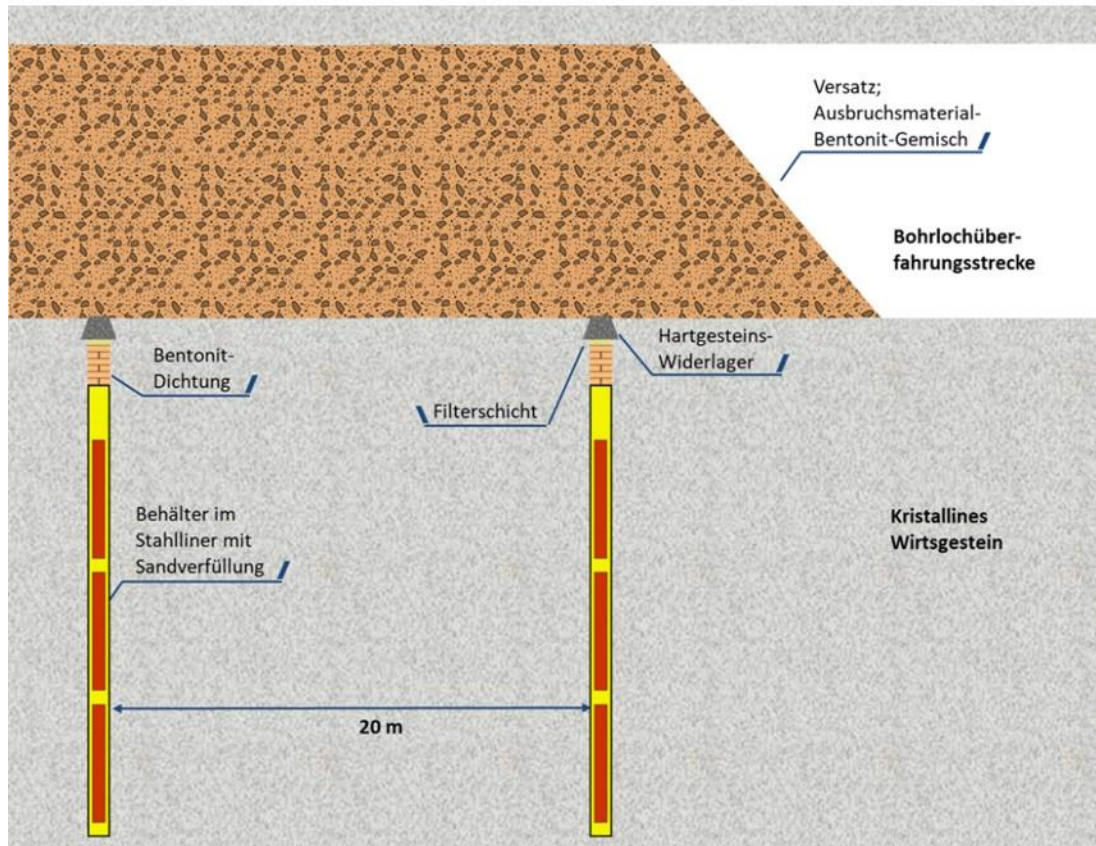
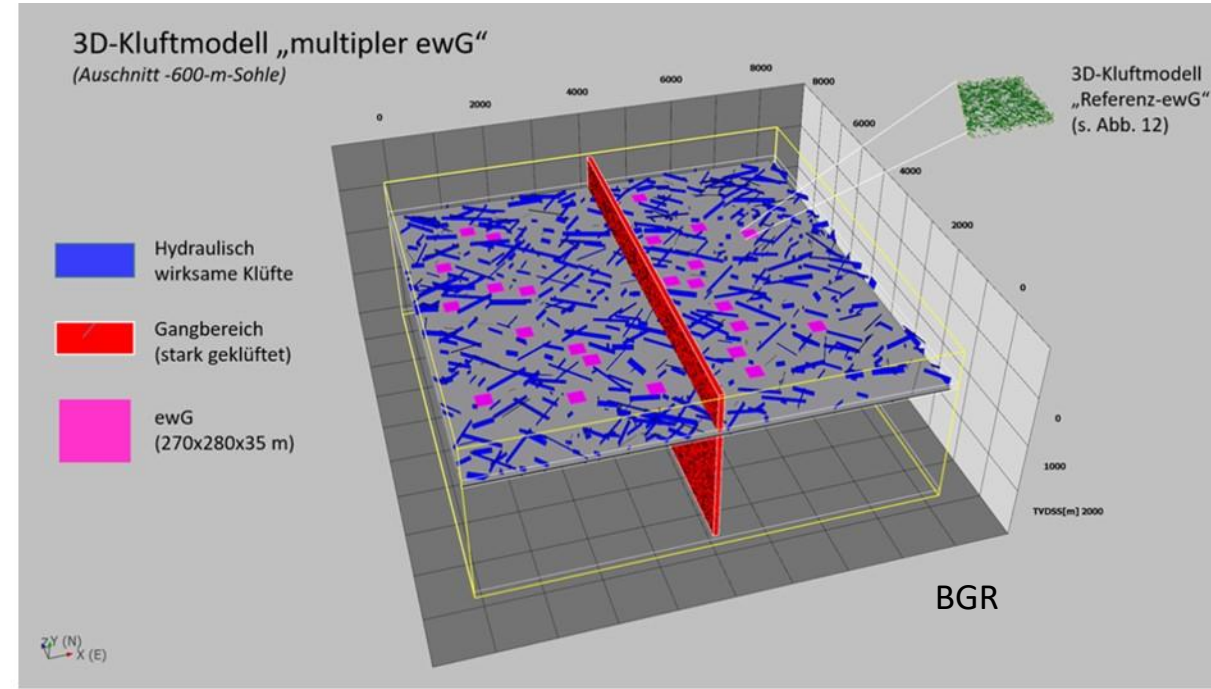
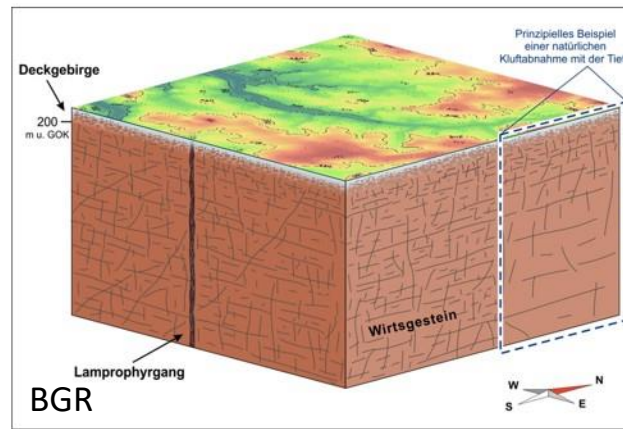
Asphalt/Bitumen Blöcke (Kudla 2009); TUBAF

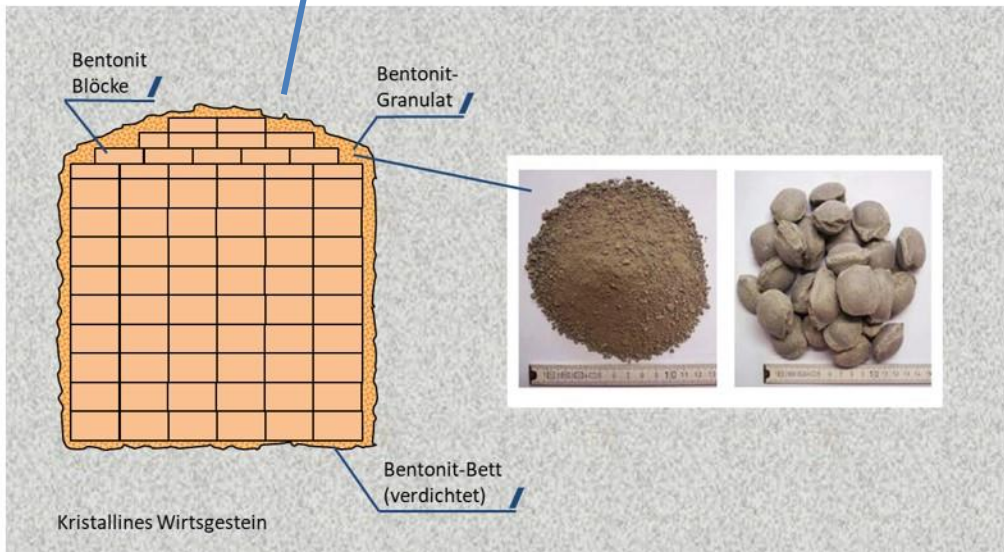
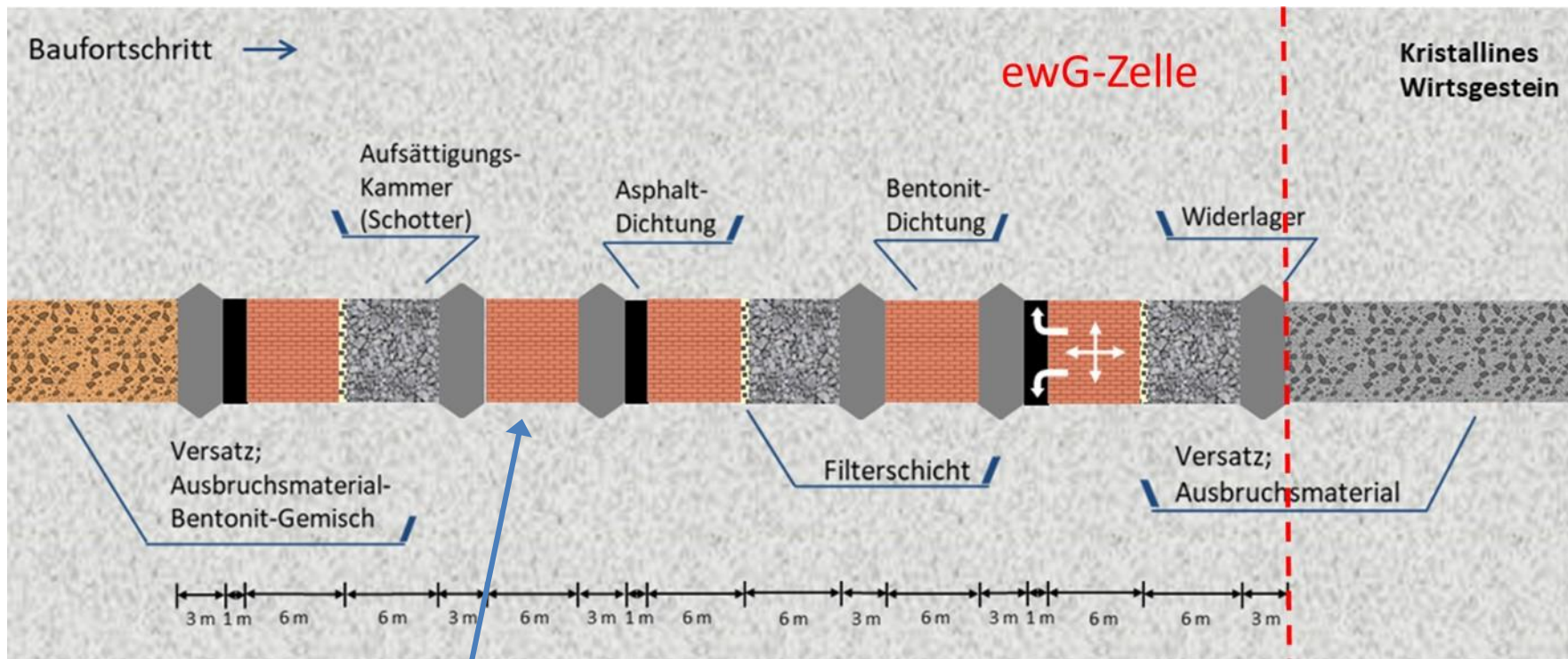
Schacht- und Rampenverschluss (mKBS3 + mewG)



multipler ewG

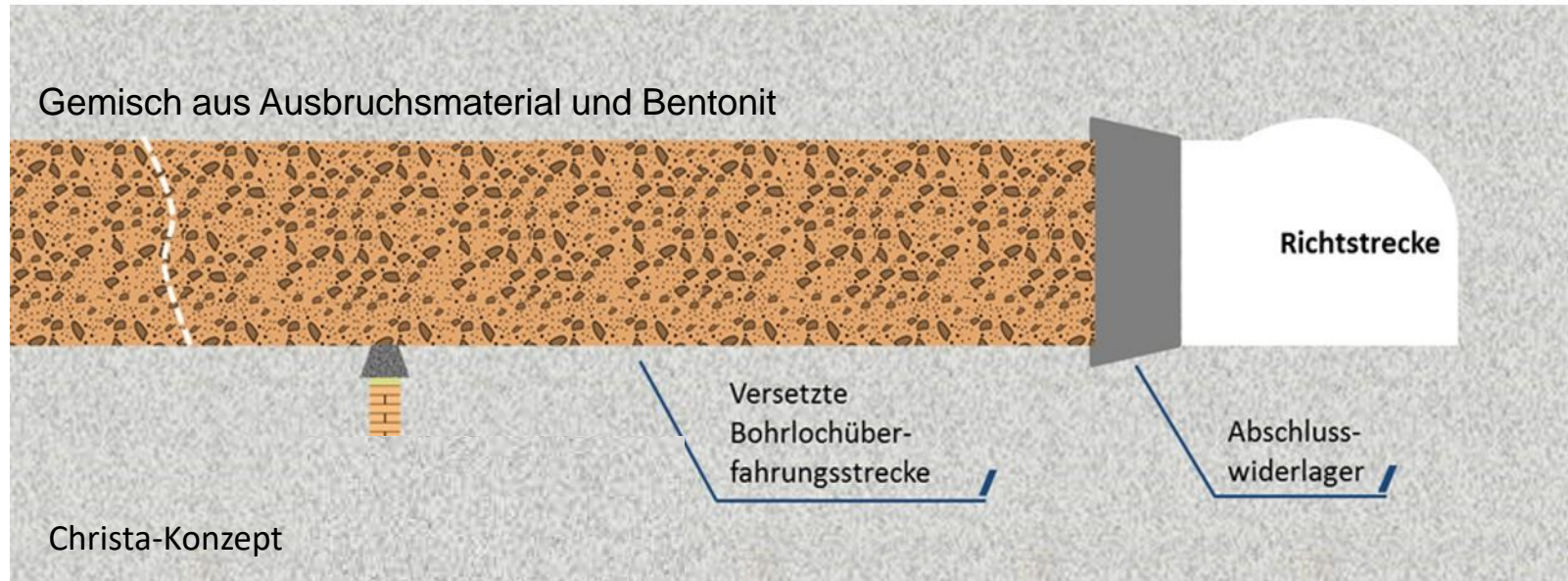
- Bohrlochverschluss
- Versatz
- Streckenverschluss





TSX-Versuch (Chandler et al. 2002)

Streckenversatz (mKBS3 + mewG)

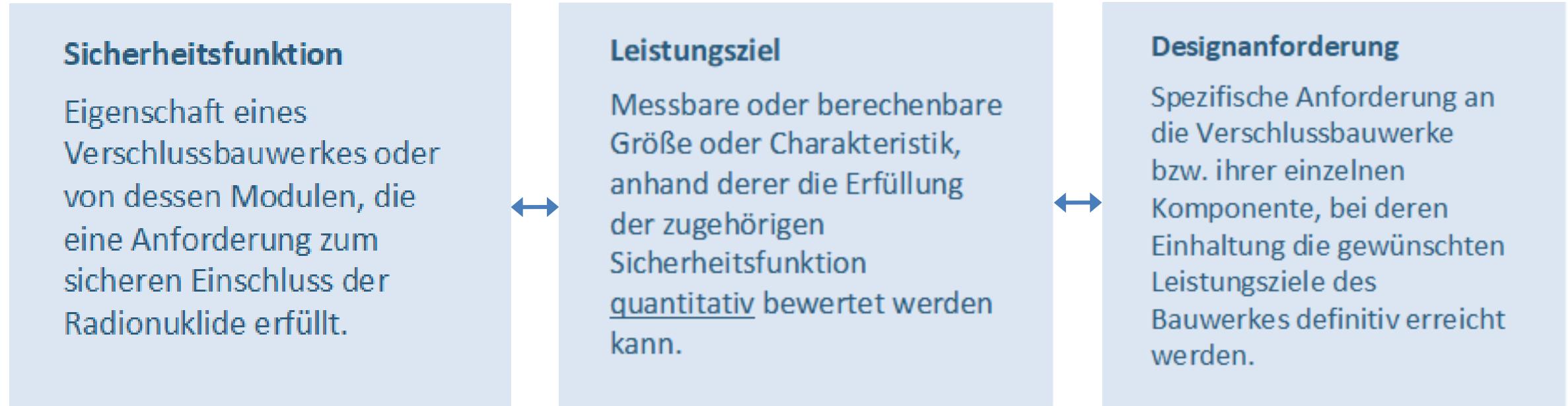


Design-Spezifikationen:

- Arbeitshypothese: Mischungsverhältnis von 70/30 (aufbereitetes Ausbruchsmaterial / Bentonit)
- Bei 70/30 wurden Permeabilitäten von 10^{-17} bis 10^{-18} m² gemessen (Pusch1998)
- Der Versatz soll einen Quelldruck von $p_q > 0,1$ MPa entwickeln. Dabei wird auch eine eventuell vorhandene Kanalbildungen (Piping) wieder versiegelt (Posiva & SKB 2017).
- Eine optimale Korngrößenverteilung ist noch zu bestimmen.
Der Bentonitanteil sollte nicht aus dem Korngerüst ausgespült werden.

Funktionen und Anforderungen

- „wesentliche“ Barrieren: **Sicherheitsfunktionen** (EndlSiAnfV 2020, §2 und §10)
- „weitere“ Barrieren“: **Schutzfunktionen**



Dreiteilung ist analog zur Einteilung von POSIVA und SKB:

Safety functions ↔ Performance targets ↔ Design specification

(Posiva/SKB 2017)

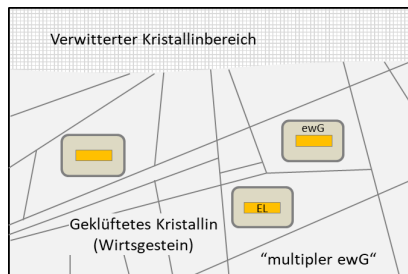
Funktionen und Leistungsziele der einzelnen Funktionselemente

Tab. 3.2: Überblick über Sicherheitsfunktionen, Schutzfunktionen und Leistungsziele der Verschlusskomponenten innerhalb (rot) und außerhalb (blau) eines ewG.

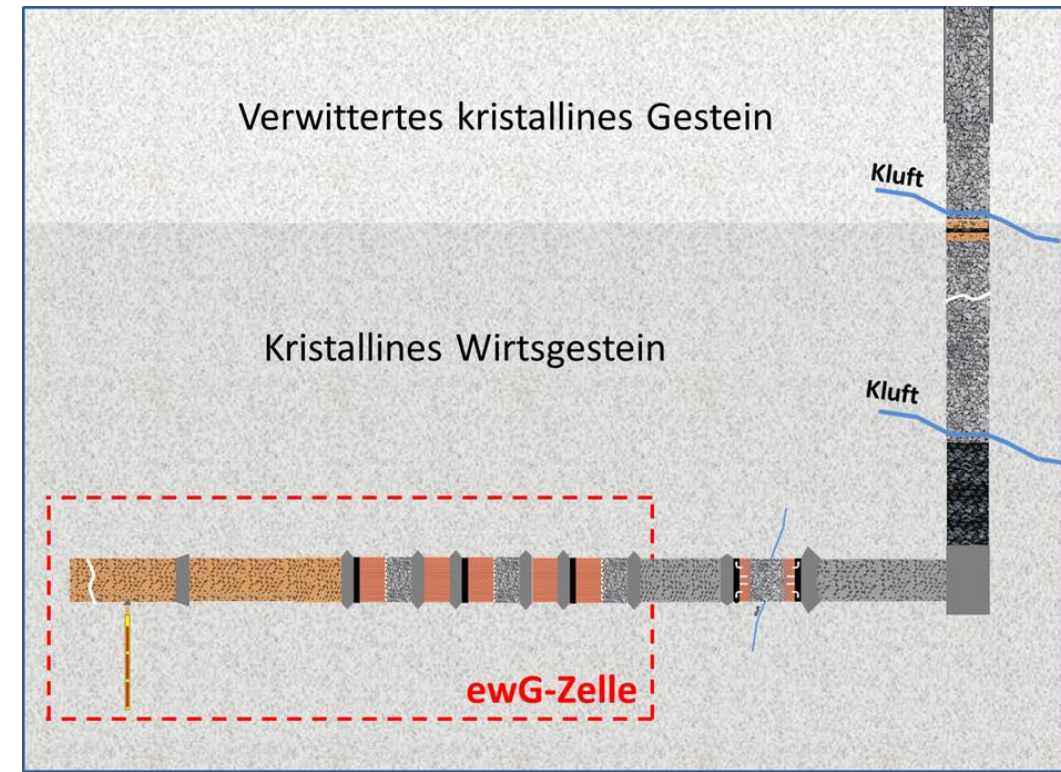
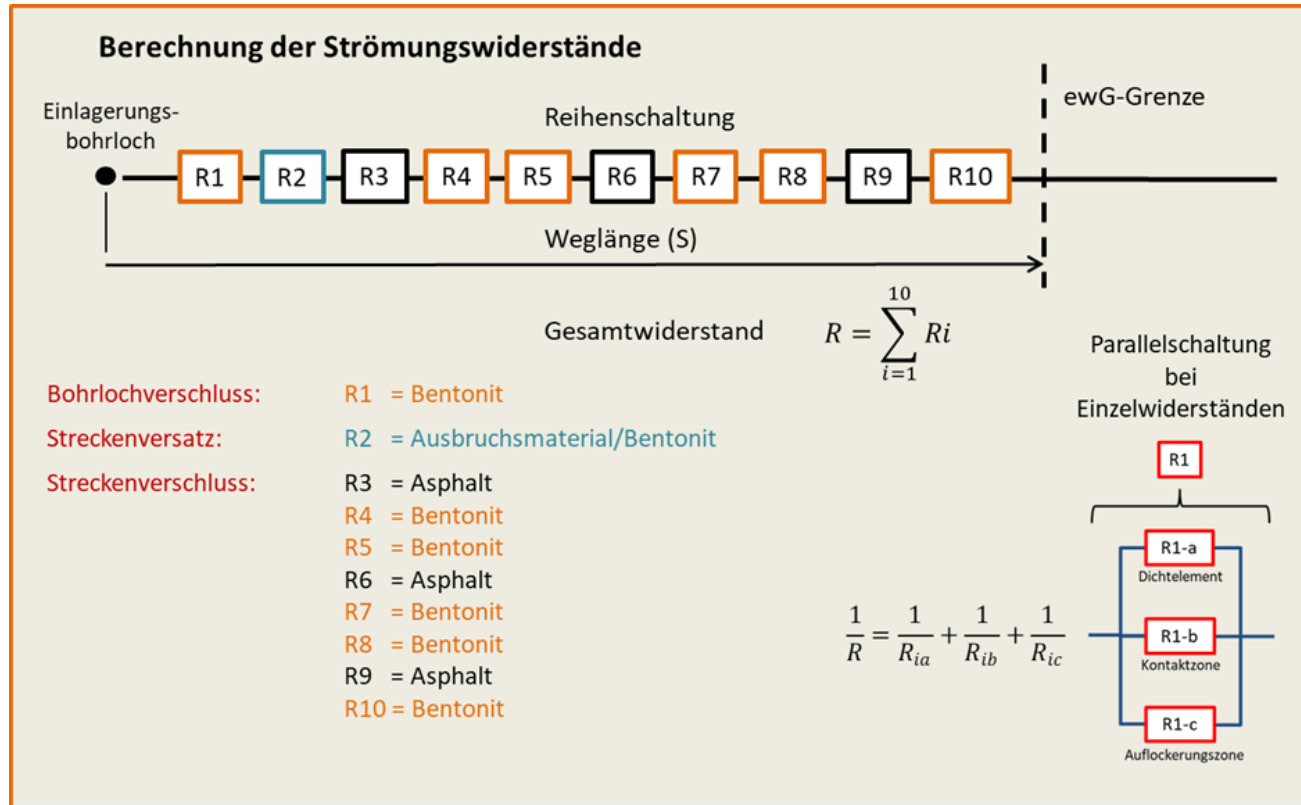
Bohrlochverschluss	<i>Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb des Bohrloches</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Bentonit-Dichtelement	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb des Bohrloches.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$	Mittlere Einbautrockendichte des Bentonit-Elementes $\geq 1.650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Quelldruck $\geq 1,1 \text{ MPa}$. Vorkompaktierte zylindrische Blöcke mit Bentonitgranulat als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume.
Widerlager	Gewährleistung der Lagestabilität des Bentonit-Elementes. Gewährleistung, dass bei der gewünschten Quellentwicklung des Dichtelementes dieses sich nicht auflockert, sondern dass sein Volumen weitestgehend konstant bleibt.	Maximale Hebung des Widerlagers $\leq 3\%$ der Länge des Bentonit-Dichtelementes.	Verwendung von arteigenem /autochthonen Material. Hohes Eigengewicht des Materials. Gebirgsverbundene Errichtung unter Ausnutzung des Gewölbeeffectes.
Filterschicht	Verteilung von Widerlager-seitig eindringender Lösung auf der gesamten Oberfläche des Dichtelementes.	Homogenisierung der vertikalen Quellentwicklung des Dichtelementes.	Lagenweiser Einbau von Schichten aus granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.
Versatz	<i>Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Strecken im ewG</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziele	Designanforderung
Versatz in der Bohrlochüberfahrungsstrecke	Minimierung druckgetriebener Fluidbewegung innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecke. Funktionelle Unterstützung der Widerlager in den Einlagerungsbohrlöcher.	Permeabilität $\leq 5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	Versatz als Gemisch von aufbereitetem Ausbruchsmaterial und Bentonit im Verhältnis von 70/30. Mittlere Trockendichte des granularen Bentonitanteils $\geq 1.500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Quelldruck des Tonanteils $\geq 0,3 \text{ MPa}$.
Abschlusswiderlager vor der Einmündung in die Zugangsstrecken	Gewährleistung der Lagestabilität des Versatzes in der Bohrlochüberfahrungsstrecke.	Hohe Festigkeit. Geringe Permeabilität. Ausreichende Widerstandskraft gegenüber einseitigem Druck aus der Bohrlochüberfahrungsstrecke (Quell- druck + hydraulischer Druck)	Gebirgsverbundene Ausführung. Verwendung von Beton für massige Bauteile gemäß DIN. Verwendung von Niedrig-pH-Beton. Mindestfestigkeitsklasse C35/45. Beton mit hohem chemischen Widerstand und hoher Sulfat-Angriffsresistenz. (z. B.: Expositionsklasse XA3). (w/z-Wert $\leq 0,5$; geringe Porosität)

Ausschnitt aus tabellarischer Übersicht

mul. ewG



Bestimmung der Leistungsziele



$$v = s/t$$

$$\frac{v}{v_{Grenz}} < 1$$

$$R_i^{a,b,c} = \frac{\mu \cdot L_i^{a,b,c}}{F_i^{a,b,c} \cdot k_i^{a,b,c}}$$

μ = dynamische Viskosität der Lösung [Pa·s]

L_i = Länge des Moduls [m]

F_i = Querschnittsfläche des Moduls [m²]

k_i = Permeabilität des Moduls [m²]

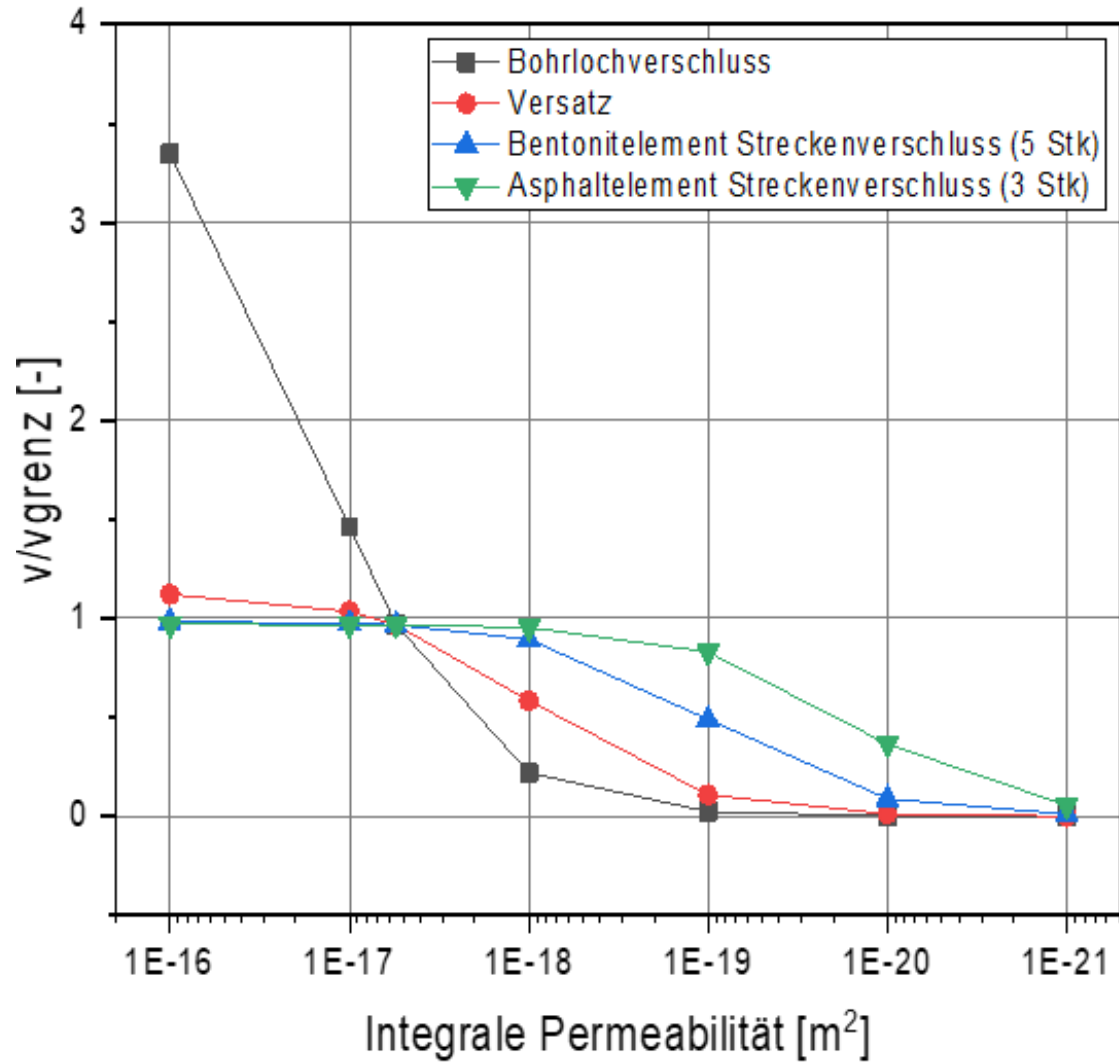
Indizes:

i = Nummer des Dichtmoduls

a, b, c = a: Dichtmaterial, b: Kontaktzone,

c: Auflockerungszone

Effektivität der Elemente



Ein möglichst guter Bohrlochverschluss ist die mit Abstand effektivste Maßnahme

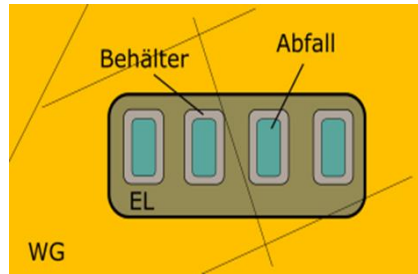
hat auch bautechnische Vorteile (kein Firstspalt)

Die Methode erlaubt auch

- eine Optimierung des Barrierensystems gemäß §12 AV + §6(3) UV
- eine Darlegung der Robustheit des Barrierensystems §6(1) AV

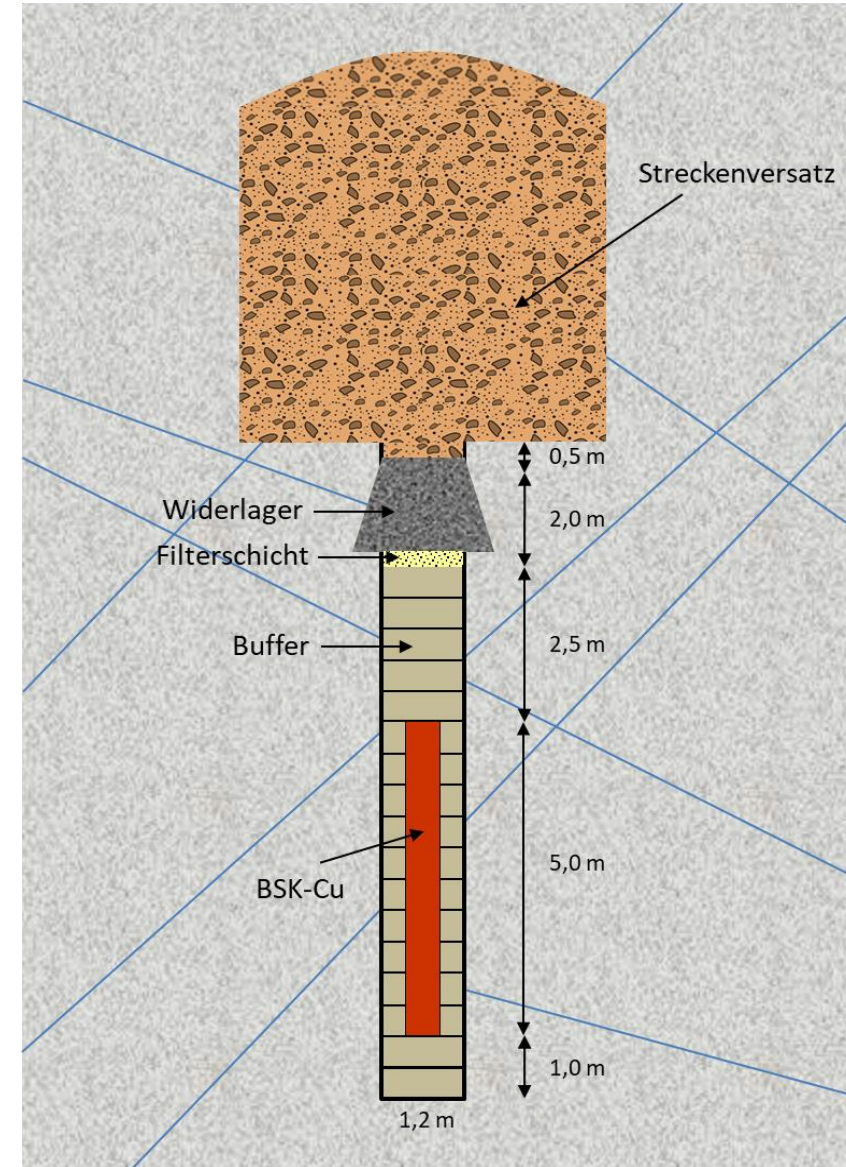
Funktionen und Leistungsziele

mKBS3



Tab. 5.1: Überblick über Sicherheitsfunktionen (rot), Schutzfunktionen (blau), Leistungsziele und Designanforderungen an die Verschlusskomponenten

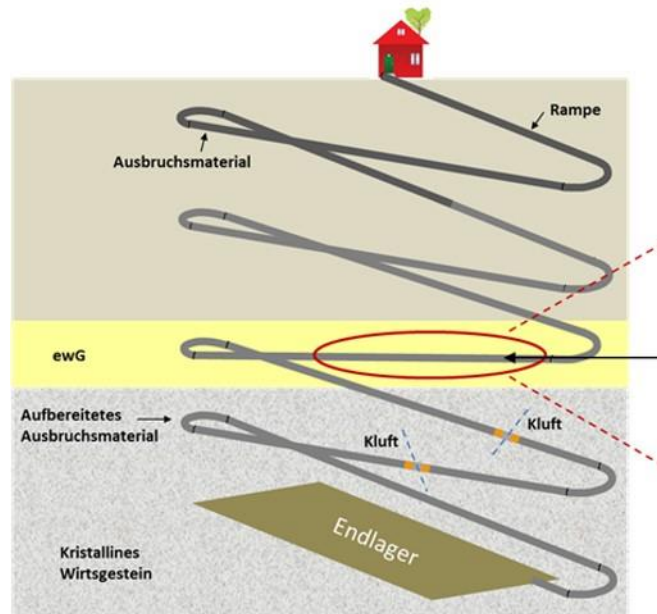
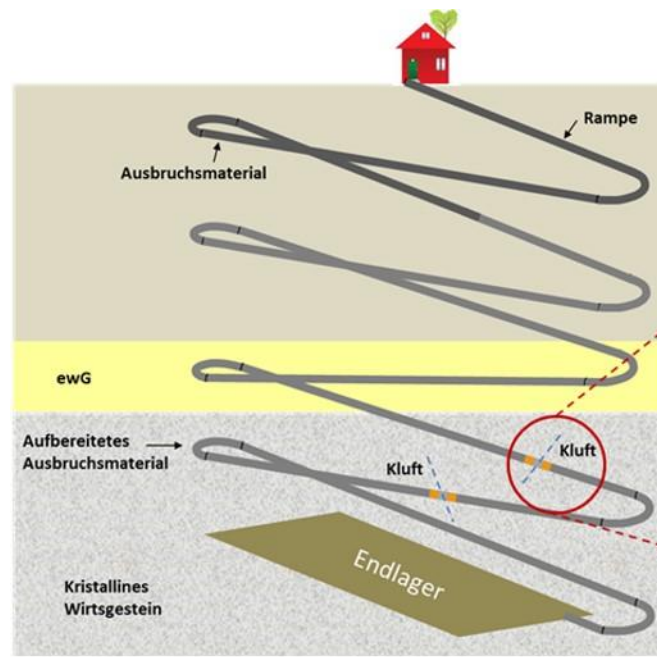
Komponente	Sicherheitsfunktion		
Behälter	<i>Einschluss der Radionuklide im gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Stahlbehälter	Tragfunktion; Schutz des Abfallinventars gegenüber mechanischen Lasten (Umgebungsdruck ggf. asymmetrisch, Scherbeanspruchung); Gewährleistung der Unterkritikalität (innere Struktur des Behälters)	Hohe mechanische Festigkeit; Geringes Deformationsvermögen; Geringe korrosive Gasbildungsrate; Mechanisch handhabbar über den Bergungszeitraum von 500 Jahren	Stahlsorte und Wandstärken sind gegen die zu erwartenden mechanischen Lasten im Nachweiszeitraum auszulegen
Kupferhülle	Einschluss der Radionuklide im gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre	Hinreichende Korrosionsbeständigkeit für 1 Million Jahre unter den lokalen hydrochemischen und mikrobiellen Verhältnissen	Verwendung von geschmiedetem Kupfer; Qualitätsgesichertes Schweißen der Nähte für den Deckel; Geeignete Dicke des Kupfermantels (i) zur Korrosionsresistenz im Nachweiszeitraum und (ii) Minimierung des Nichterkennens von Schweißfehlern; Dicke ≥ 50 mm
Komponente	Schutzfunktion		
Buffer	<i>Schutz und Unterstützung des Behälters für den Einschluss der Radionuklide im gesamten Nachweiszeitraum</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Bentonit-Scheiben Bentonit-Ringe	Minimierung einer Lösungsmigration sowohl zum Behälter hin als auch vom Behälter weg; Stabilisierung des hydrochemischen Milieus durch geringe Lösungsmigration; Temporäre Rückhaltung von Radionukliden durch die Sorptionseigenschaften der Tonminerale	Lösungspermeabilität $\leq 10^{-18} \text{ m}^2$ nach erfolgter Aufsättigung mit Lösung und vollständiger Ausbildung des Quelldruckes gemäß Auslegung; Quelldruck ≥ 2 MPa	Hochkompaktierte zylindrische Bentonitringe zur Aufnahme der Behälter in ihrem Inneren; Hochkompaktierte zylindrische Bentonitscheiben als Auflage und Abdeckung im Bohrloch; Die Trockendichte ist so zu wählen, dass der gemäß Auslegung gewünschte Quelldruck nach Aufsättigung erreicht wird; Einsatz von Bentonitmehl als Füllmaterial für technisch bedingte Resthohlräume speziell an der Kontur zum Gebirge
Bohrlochwiderlager	<i>Gewährleistung der Lagestabilität des Buffers über den gesamten Nachweiszeitraum</i>		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Festgesteinsblöcke	Gewährleistung, dass sich der Buffer bei der gewünschten Quellentwicklung nicht auflockert, sondern sein Volumen weitestgehend konstant bleibt	Lagestabilität unter einseitiger hydromechanischer Last aus der Einlagerungsbohrung resultierend aus der Quellwirkung des Buffers; Vertikale Verschiebung $\leq 3\%$ der vertikalen Erstreckung des Buffers	Verwendung von arteigenem/autochthonem Material; Mechanische Verankerung im Gebirge; Auslegung gegen den zu erwartenden hydromechanischen Druck aus dem Einlagerungsbohrloch; Ausnutzung der „Gewölbewirkung“
Filterschicht	Flächige Verteilung von Widerlagerseitig eindringender Lösung auf der Buffer-Oberfläche	Homogenisierung der (vertikalen) Quelldruckentwicklung des Buffers	Lagenweiser Einbau von granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen



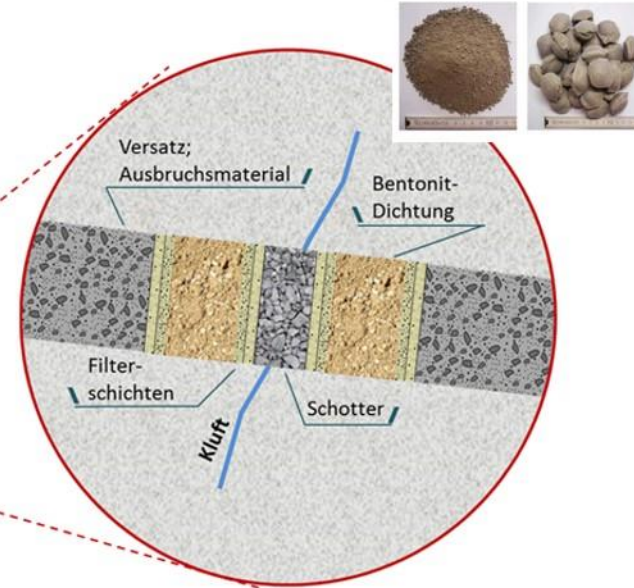
Ausschnitt aus tabellarischer Übersicht

Überlagernder ewG (Salzformation)

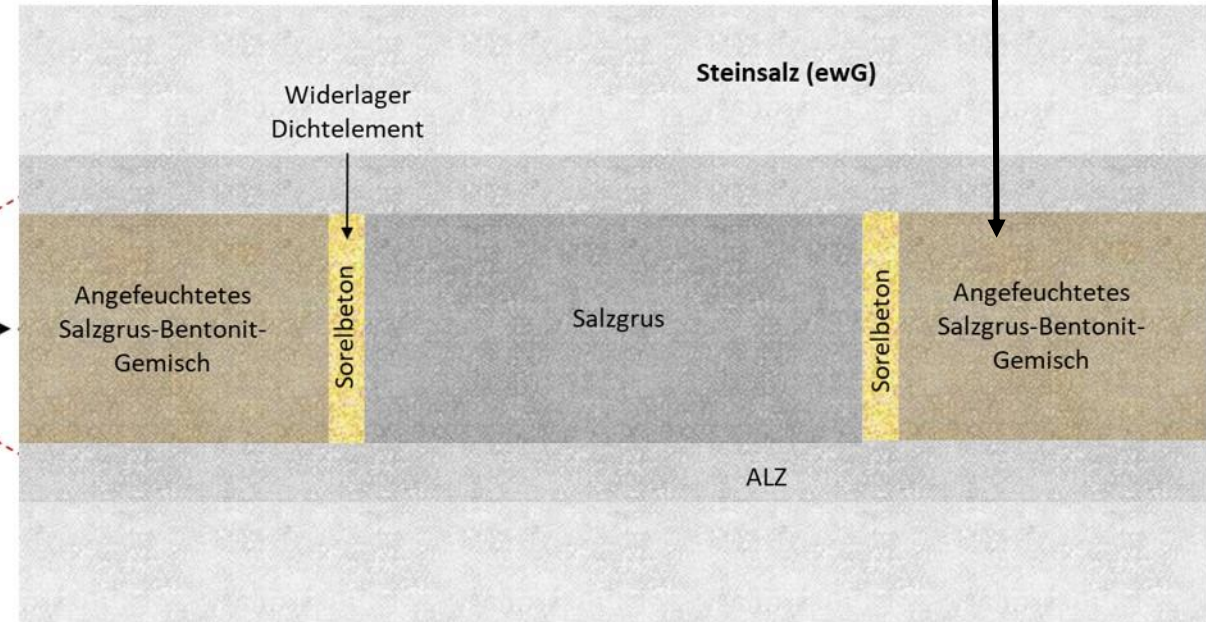
Rampenverschluss



Projekt SV Salzdettfurth

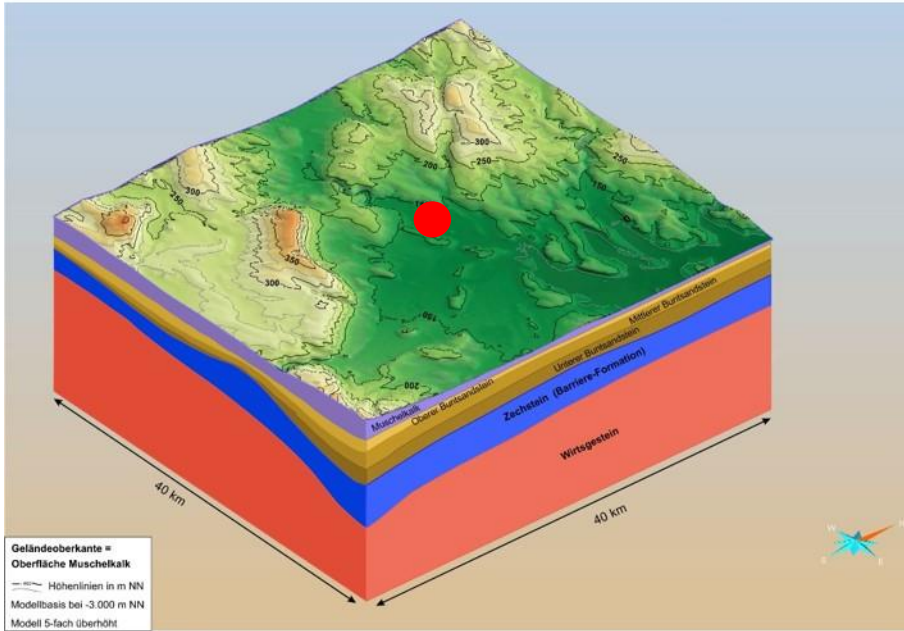


Projekt ELSA-II



Überlagernder ewG (Salzformation)

Schachtverschluss



Quartär, Sand, Auelehm
Muschelkalk, Kalkstein, mergelig,
verkarstet, Aquifer
Muschelkalk, Kalkstein, Mergelstein,
porös, geklüftet, Aquifer

Oberer Buntsandstein, Rötter,
Tonstein bis Feinsandstein, mergelig,
Grundwassergeringleiter

Mittlerer Buntsandstein, Sandstein,
porös, Aquifer

Unterer Buntsandstein, Schluffstein
bis Feinsandstein,
Grundwassergeringleiter

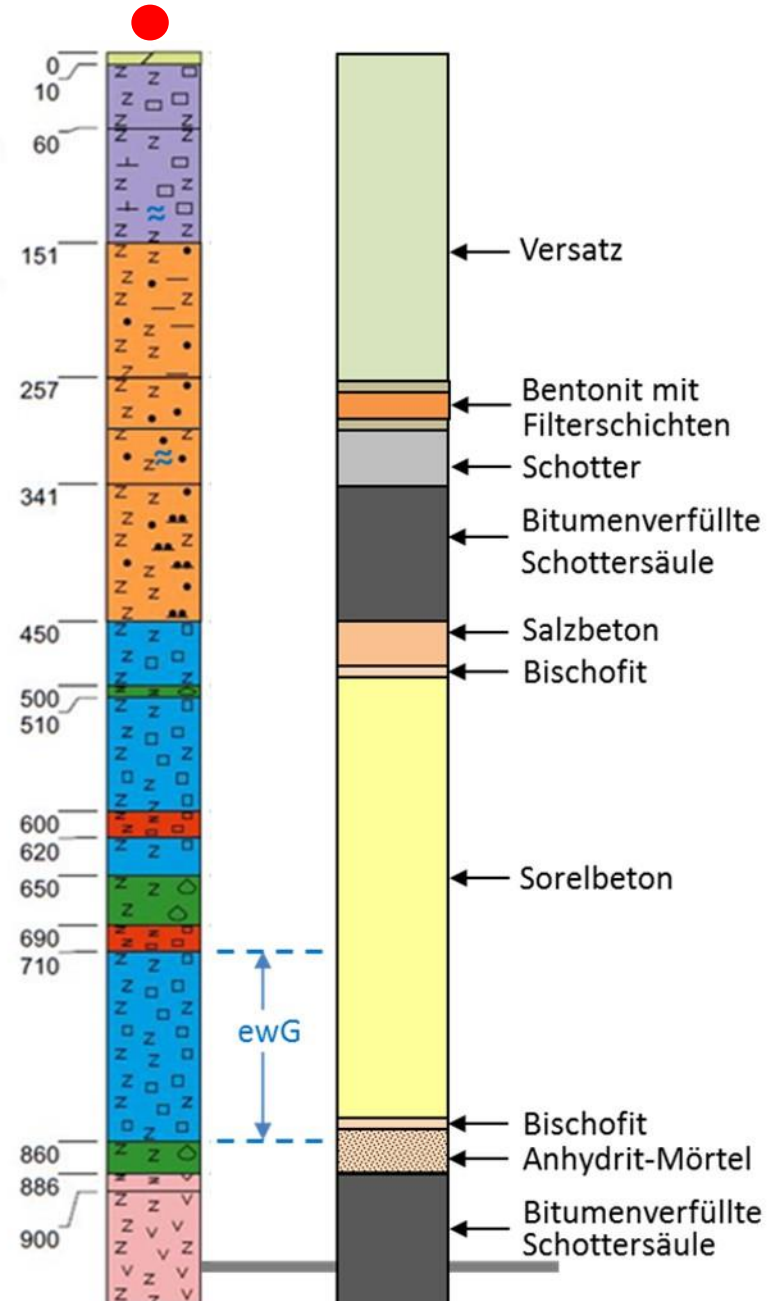
Zechstein, Steinsalz

Zechstein, Anhydritstein
Zechstein, Steinsalz

Zechstein, Kalisalz
Zechstein, Steinsalz
Zechstein, Anhydritstein

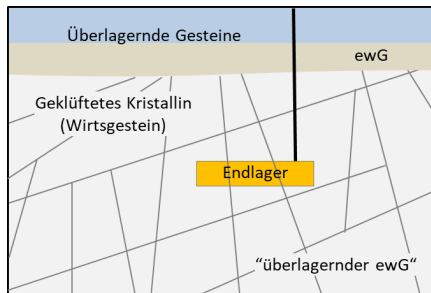
Zechstein, Kalisalz
Zechstein, Steinsalz, beinhaltet den
ewG

Zechstein, Anhydritstein
Paläozoikum, Granit, aufgelockerter
Bereich
Paläozoikum, Granit



Funktionen und Leistungsziele

Überlagernder ewG



Schachtverschluss	Einschluss der Radionuklide im Zusammenspiel mit dem ewG im gesamten Nachweiszeitraum		
Funktionselement	Spezifische Funktion	Leistungsziel	Designanforderung
Sockelelement aus Bitumenverfüllter Schottersäule	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente. Minimierung einer Fluidbewegung innerhalb des Schachtes, insbesondere des Eindringens von Lösungen aus hangenden Gebirgsbereichen in das Grubengebäude. Minimierung des Eindringens von Fluiden aus dem Hangenden für den Zeitraum, den der Streckenversatz benötigt, sich vollständig <u>aufzusättigen</u> .	Geringe Komprimierbarkeit bzw. Setzungsarmut Permeabilität $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ (transiente Phase)	Schotter: Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe. Bitumen: Heißeinbau des Bitumens durch lagenweises Einbringen in den Schotter mit festgeschriebenen Lagenhöhen.
Widerlager aus Anhydrit-Mörtel	Gewährleistung der Lagestabilität der darüber liegenden Verschlusselemente	Mechanische Festigkeit in der Größenordnung des umgebenden Gebirges (nicht größer)	Lagenweiser Einbau
Bischofit	Pufferung NaCl-haltiger Lösungen, so dass sie für das Sorelbeton-Dichteelement verträglich sind und nicht zu Korrosionserscheinungen führen.		Lagenweiser Einbau ober- und unterhalb des Sorelbeton-Dichteelementes.
Sorelbeton-Dichteelement	Minimierung einer Fluidbewegung entlang eines Schachtes im Bereich der Barriereformation	Permeabilität $\leq 10^{-10} \text{ m}^2$ Expansionsdruck $\geq 1 \text{ MPa}$	Heißer flüssiger Einbau ohne lange Wartezeiten um eine Ausbildung von Grenzflächen weitestgehend zu vermeiden. Kohäsive Anbindung an das Barrieregestein.
Salzbeton-Dichteelement	Minimierung einer Fluidbewegung entlang eines Schachtes im Bereich des Überganges vom Deckgebirge zur Barriereformation; speziell zur Minimierung eines <u>Ånstroms</u> NaCl-dominierter Lösung auf das Sorelbeton-Dichteelement.	Permeabilität $\leq 10^{-10} \text{ m}^2$	Heißer flüssiger Einbau ohne lange Wartezeiten um eine Ausbildung von Grenzflächen innerhalb des Bauwerkes weitestgehend zu vermeiden. Kohäsive Anbindung an das Barrieregestein.
Bitumenverfüllte Schottersäule	Minimierung einer Fluidbewegung innerhalb des Schachtes. Verhinderung eines schnellen Eindringens von Lösungen aus hangenden <u>Aquiferen</u> .	Permeabilität $\leq 10^{-20} \text{ m}^2$ (transiente Phase)	Schotter: Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe. Bitumen: Heißeinbau des Bitumens durch lagenweises Einbringen in den Schotter mit festgeschriebenen Lagenhöhen.
Schotter	Durchlass der <u>Aquiferströmung</u> und damit Vermeidung von Änderungen der hydraulischen Druckbedingungen im angrenzenden Deckgebirge.	Hohe Porosität und Permeabilität. Setzungsarmut	Schotter: Einbringtechnologie über Fördergefäß mit Bodenentleerung bei festgeschriebener Fallhöhe.
Filterschichten	Minimierung von Erosionserscheinungen, speziell der Ausbildung lokaler Fließkanäle (Pipes) am Bentonit-Dichteelement.	Homogenisierung bzw. flächenhafte Verteilung des hydraulischen Druckaufbaus an den Stirnflächen des Bentonit-Dichteelementes.	Lagenweiser Einbau von Schichten aus granularem Material mit unterschiedlichen Korngrößen.
Bentonit-Dichteelement	Verhinderung eines hydraulischen Kurzschlusses von <u>Aquiferen</u> in unterschiedlichen Tiefenlagen im Deckgebirge über die Schachtröhre.	Permeabilität $\leq 10^{-17} \text{ m}^2$ Quelldruck 1 MPa Frei von Zugspannungen: $\sigma_{III}(eff) \geq 0$.	Mittlere Einbautrockendichte $\geq 1750 \text{ kg m}^{-3}$ Vorkompaktierte Blöcke (Trockendichte $\geq 2000 \text{ kg m}^{-3}$) mit Bentonitmehl als Füllmaterial für technische bedingte Resthohlräume.
Versatz bis GOK	Keine	Keine	Keine

Ausschnitt aus tabellarischer Übersicht

Zusammenfassung

- Verschlusskonzepte wurden für alle drei Einlagerungsoptionen erarbeitet
- Eine Einteilung in wesentliche und weitere Barrieren ist erfolgt
- Für alle Barrieren wurden Sicherheitsfunktionen und Schutzfunktionen formuliert
- Für alle Funktionselemente der Barrieremodule wurden spezifische Funktionen, Leistungsziele und Designanforderungen formuliert



Bericht:
„Verfüll- und Verschlusskonzepte für HAW
Endlager im Kristallin in Deutschland“

Vielen Dank !

Förderung:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Betreuung:



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie



BGE TECHNOLOGY GmbH