

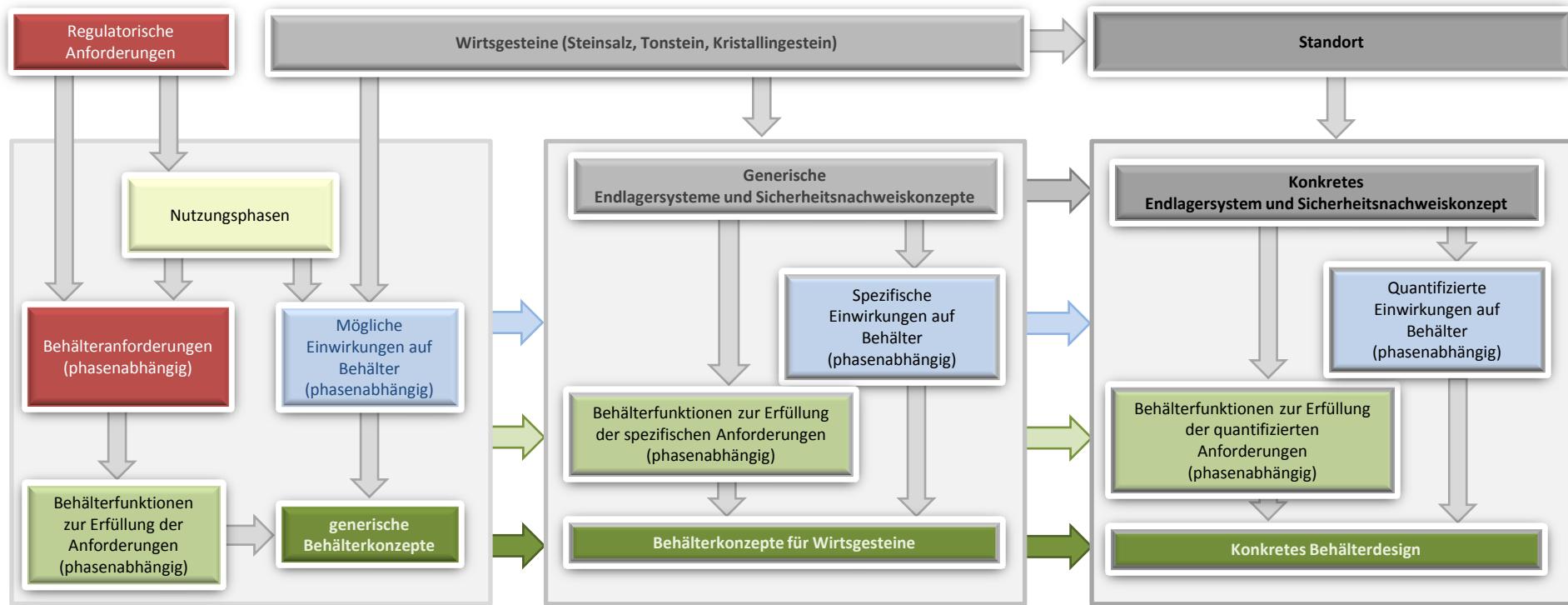
Konzepte und Anforderungen für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBrA)

AP 3: Herleitung von Behälteranforderungen

Ansgar Wunderlich, Wilhelm Bollingerfehr
BGE TECHNOLOGY GmbH

Inhalt

- Top-Down Ansatz zur Entwicklung anforderungsgerechter Endlagerbehälter
- Grundlegende Behälteranforderungen
 - Nutzungsphasen
 - Klassifizierung von Einwirkungen auf Endlagerbehälter
 - Generische Anforderungen in Abhängigkeit der Nutzungsphasen
- Spezifizierung der generischen Anforderungen anhand bestehender Endlager- und Sicherheitsnachweiskonzepte
- Quantifizierung von Einwirkungen und Behälterfunktionen
- Schlussfolgerungen



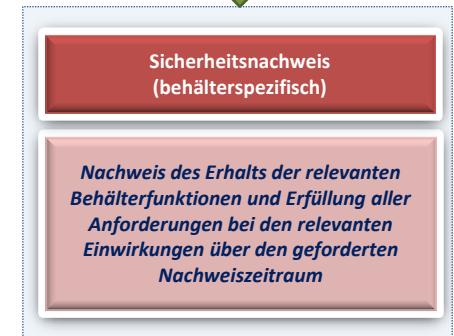
Top-Down-Ansatz zur Entwicklung
anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

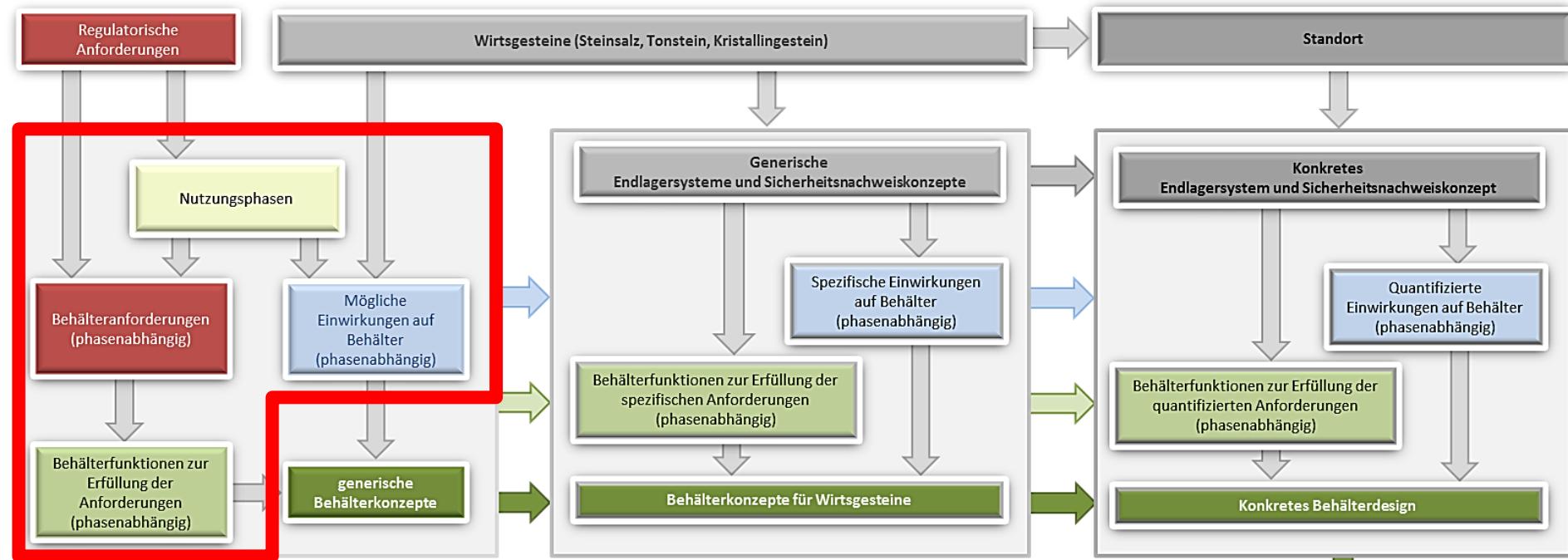


Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung



Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA
BMWi Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537





Top-Down-Ansatz zur Entwicklung
anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA
BMWi Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537



Bundesanstalt
für
Materialforschung
und -prüfung



BGE TECHNOLOGY GmbH

Sicherheitsnachweis
(behälterspezifisch)

*Nachweis des Erhalts der relevanten
Behälterfunktionen und Erfüllung aller
Anforderungen bei den relevanten
Einwirkungen über den geforderten
Nachweiszeitraum*

Verwendete Regelwerke

National:

- Atomgesetz
- Strahlenschutzgesetz und Strahlenschutzverordnung
- Standortauswahlgesetz
- Wasserhaushaltsgesetz
- Bundesberggesetz
- Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle von 2010
- Referentenentwurf Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
- Leitlinien und Empfehlungen der Entsorgungskommission (ESK)
- Technische Regelwerke, Gesundheits- und Arbeitsschutzverordnungen

International:

- Joint Convention on the Safety of Spent Fuel management and on the Safety of Radioactive Waste Management
- Empfehlungen der IAEA, der WENRA und der ICRP
- Anforderungen aus internationalen Konventionen und EU-Richtlinien (EURATOM)

Nutzungsphasen von Endlagerbehältern

Nutzungsphase	Beginn	Ende
Einlagerungsphase	Bereitstellung des Behälters zur Einlagerung	Abschluss der Einlagerung des Behälters
Rückholbarkeitsphase	Abschluss der Einlagerung des Behälters	Verschluss des Endlagers (Schächte bzw. Rampen)
Bergbarkeitsphase	Verschluss des Endlagers	500 Jahre nach Verschluss des Endlagers
Spätere Nachbetriebsphase	500 Jahre nach Verschluss des Endlagers	Ende des Nachweiszeitraumes

Generische Behälteranforderungen und Funktionen (1/2)

Anforderung	Funktion
Einschluss des radioaktiven Inventars	Verhinderung der Freisetzung radioaktiver Stoffe
Abschirmung ionisierender Strahlung	Begrenzung der vom radioaktiven Inventar ausgehenden ionisierenden Strahlung
Kritikalitätsausschluss	Ausschluss selbsterhaltender Kettenreaktionen von Kernbrennstoffen

Generische Behälteranforderungen und Funktionen (2/2)

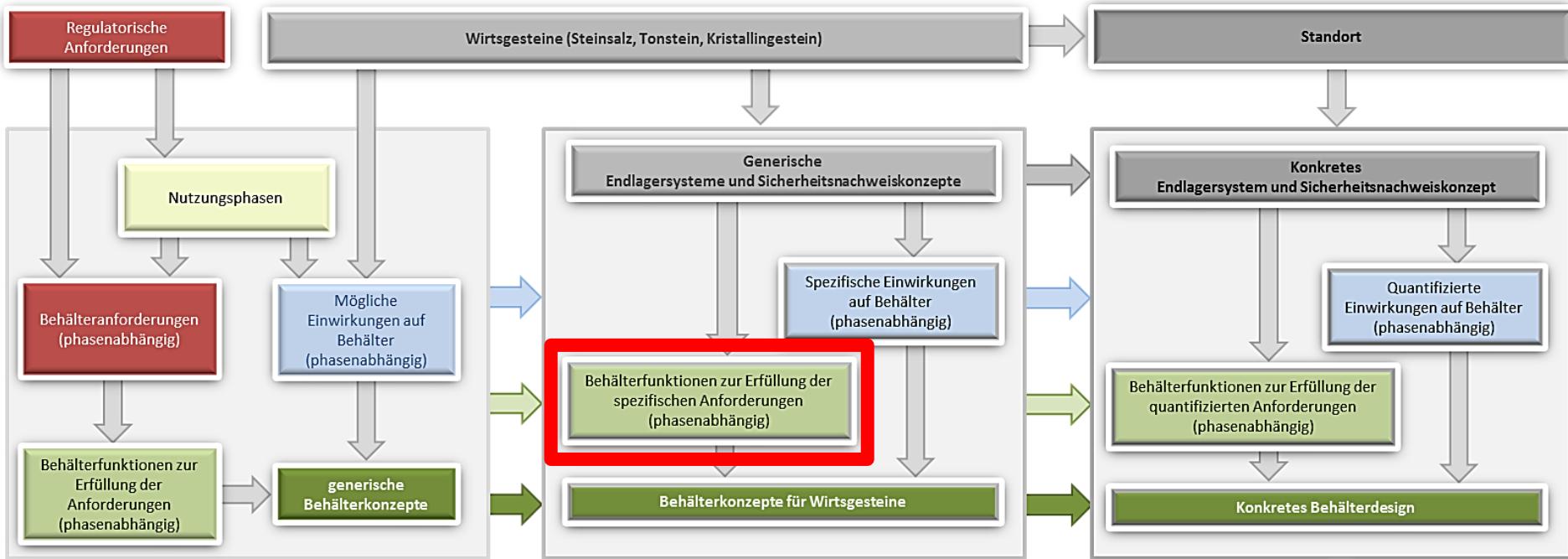
Anforderung	Funktion
Temperaturbeschränkung	Vermeidung thermischer Schädigung natürlicher, technischer und geotechnischer Barrieren
Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion	Vermeidung der Schädigung natürlicher, technischer und geotechnischer Barrieren durch hohe Gasdrücke und der Ausbildung sicherheitsgefährdender Gastransportpfade
Handhabbarkeit	Gewährleistung der Einlagerung der Endlagergebinde und ihrer Rückholung bzw. Bergung im Zusammenwirken mit Handhabungsgeräten

Generische Behälteranforderungen in Abhängigkeit der Nutzungsphasen

Anforderungen	Nutzungsphasen			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	spätere Nachbetriebsphase
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten			Abhängig vom Sicherheits- und Sicherheitsnachweiskonzept
Abschirmung ionisierender Strahlung	Zum Schutz des Personals, der Bevölkerung und Umwelt ggf. im Zusammenwirken mit Transferbehälter zu gewährleisten			
		Zur Vermeidung von radiolytischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen der Barrieren zu gewährleisten		
Kritikalitätsausschluss	Für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffs zu gewährleisten			
Temperaturbeschränkung	Für gefahrlose Handhabung ggf. im Zusammenwirken mit Transferbehälter zu gewährleisten			
		Zur Vermeidung der thermischen Schädigung der Barrieren, des Wirtsgesteins und des Inventars zu gewährleisten		
Begrenzung Korrosion und Gasproduktion		Bei Kontakt mit dem geochemischen Milieu in Behälterumgebung zu gewährleisten		
Handhabbarkeit	Uneingeschränkt zu gewährleisten			

Klassifizierte Einwirkungen auf Endlagerbehälter

Einwirkungsklasse	Relevante Einwirkung
Mechanisch	Scherbeanspruchung
	Isotroper Druck
	Anisotroper Druck
	Beschleunigung
	Vibration
	Schlag/Stoß
Thermisch	Thermische Lasten
Radiologisch	Materialversprödung durch Strahlung
Chemisch	Korrosion
	Materialversprödung durch Wasserstoff
	Zersetzung



Top-Down-Ansatz zur Entwicklung
anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA
BMWi Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537

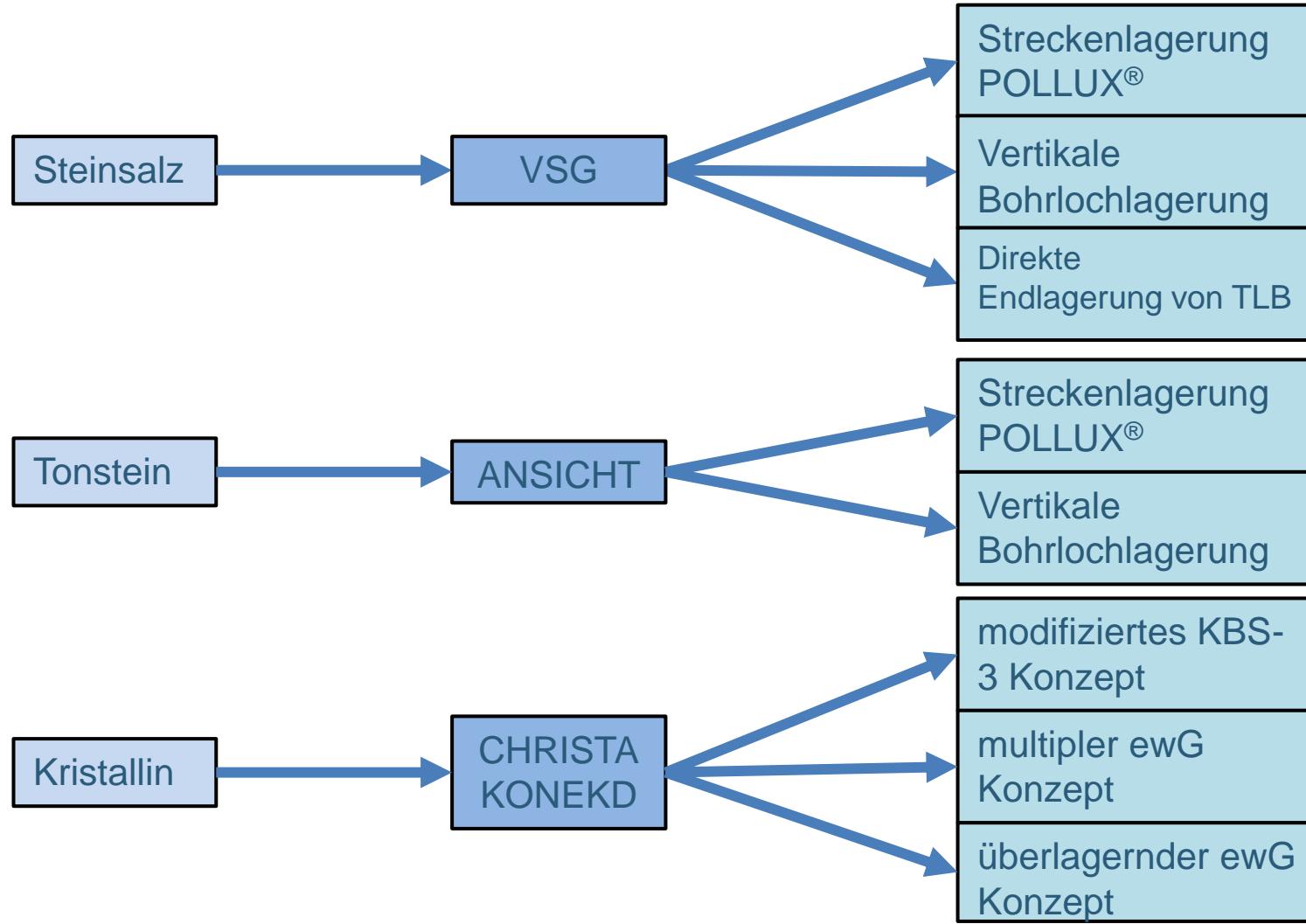


Bundesanstalt
für
Materialforschung
und -prüfung



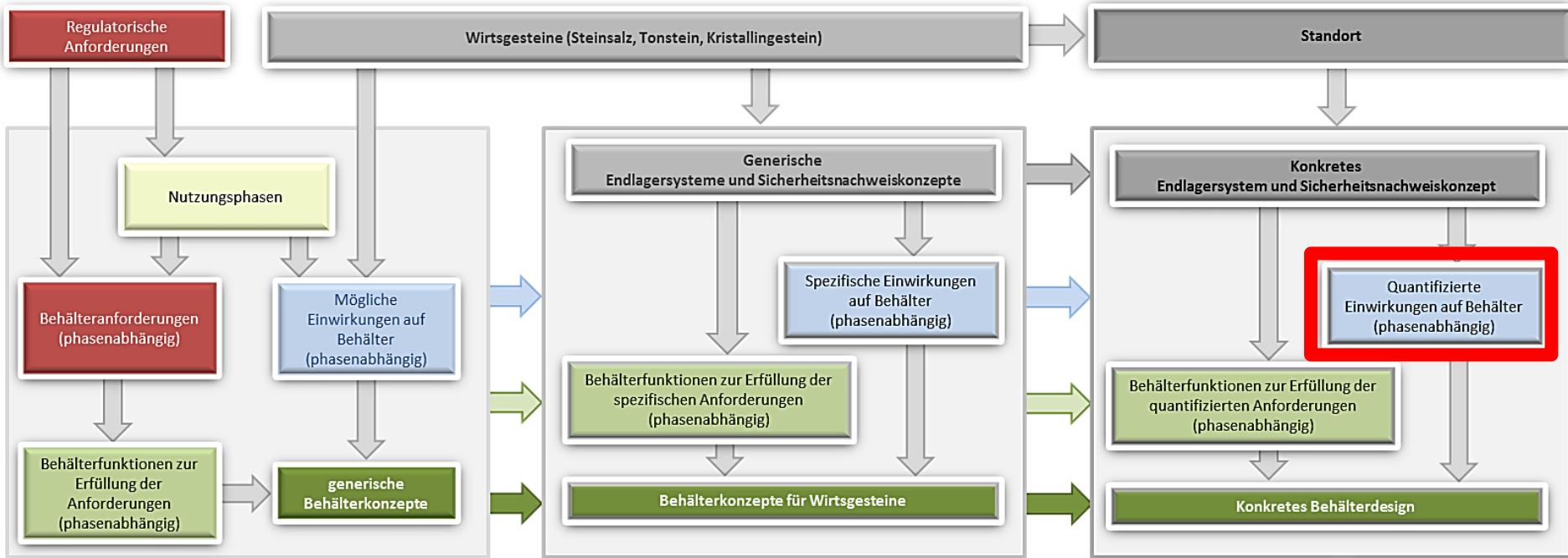
BGE TECHNOLOGY GmbH

Spezifizieren der Behälteranforderungen anhand der Sicherheits- und Nachweiskonzepte



Spezifizierte Zeitliche Übersicht der Behälteranforderungen für das Endlagerkonzept des überlagernden ewG im Kristallin

Anforderung	Nutzungsphasen			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Spätere Nachbetriebsphase
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten			Bis zur vollständigen Funktionstüchtigkeit der Schachtverschlüsse zu gewährleisten
Abschirmung ionisierender Strahlung	Für den Betrieb zu gewährleisten		Für zu erwartende Entwicklungen zu gewährleisten	
		Vermeidung von radiologischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen des Behälters		
Kritikalitätsausschluss	Für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffs zu gewährleisten			
Temperaturbeschränkung	Für den Betrieb zu gewährleisten		Für zu erwartende Entwicklungen zu gewährleisten	
Begrenzung Korrosion und Gasproduktion		Bei Zutritt wässriger Lösungen zur Vermeidung unzulässiger Gasdrücke zu gewährleisten		
Handhabbarkeit	Handhabbarkeit ist uneingeschränkt zu gewährleisten			



Top-Down-Ansatz zur Entwicklung
anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

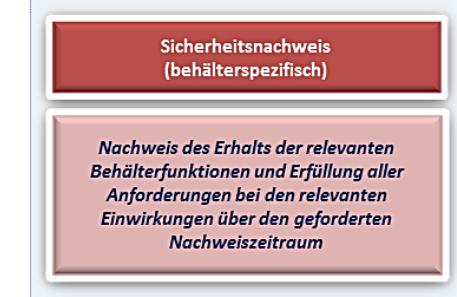
Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA
BMWi Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

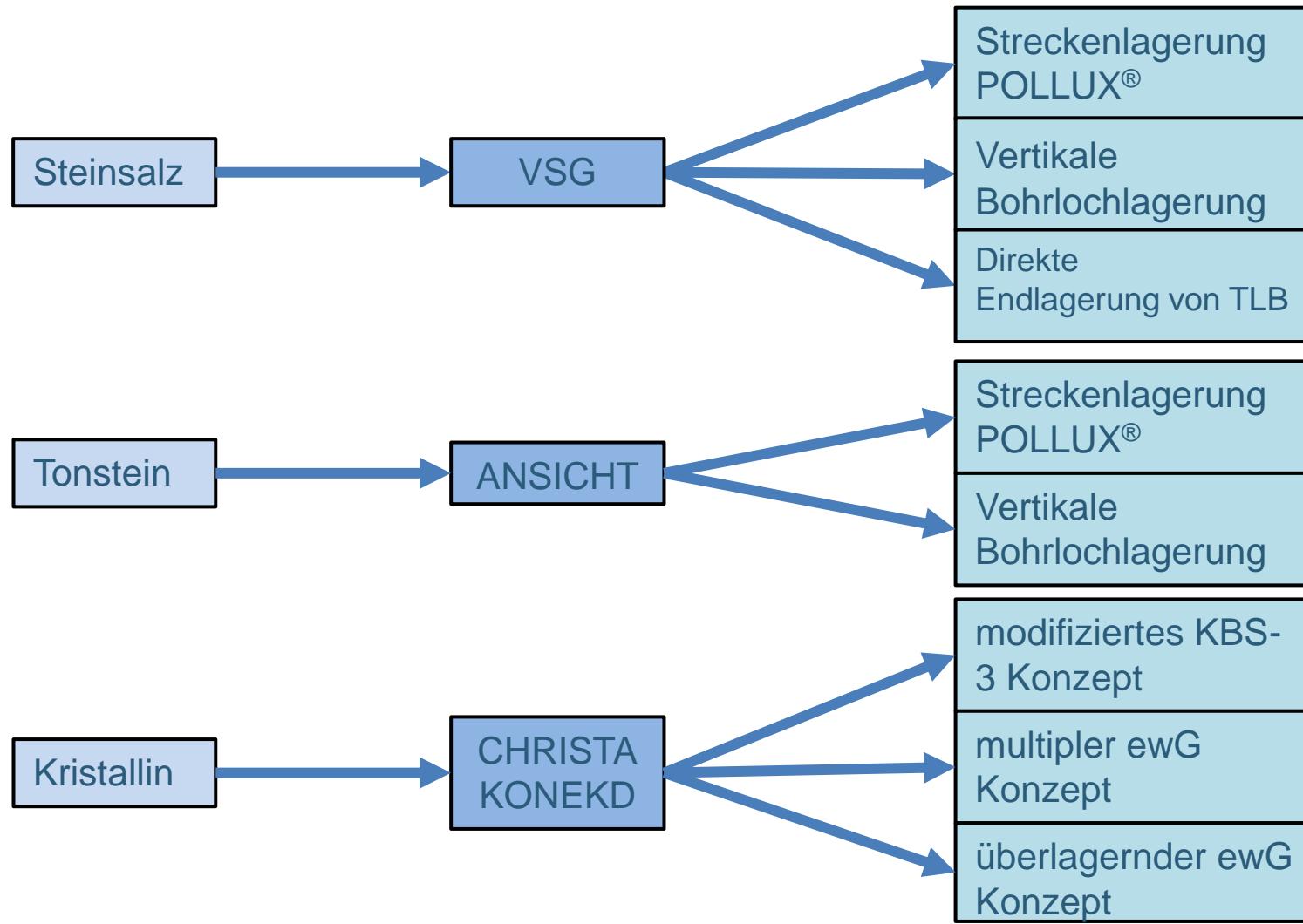


BGE TECHNOLOGY GmbH



Quantifizierte Einwirkungen auf Endlagerbehälter (1/2)

- Einwirkungen sind abhängig vom Wirtsgestein, Endlagerkonzept, Inventar und Endlagerbehälter selbst



Quantifizierte Einwirkungen auf Endlagerbehälter (2/2)

Mechanische Einwirkungen

Statische Einwirkungen:

- Scherkräfte, Gebirgsdruck, Wärmespannungen, Innerer Gasdruck durch Hüllrohrversagen, Handhabungslasten

Dynamische Einwirkungen:

- Handhabungslasten, Beschleunigungen, Stöße / Schläge, Vibrationen, Fallszenarien

Thermische Einwirkungen

- Wärme des Inventars, Brandlasten im Störfall

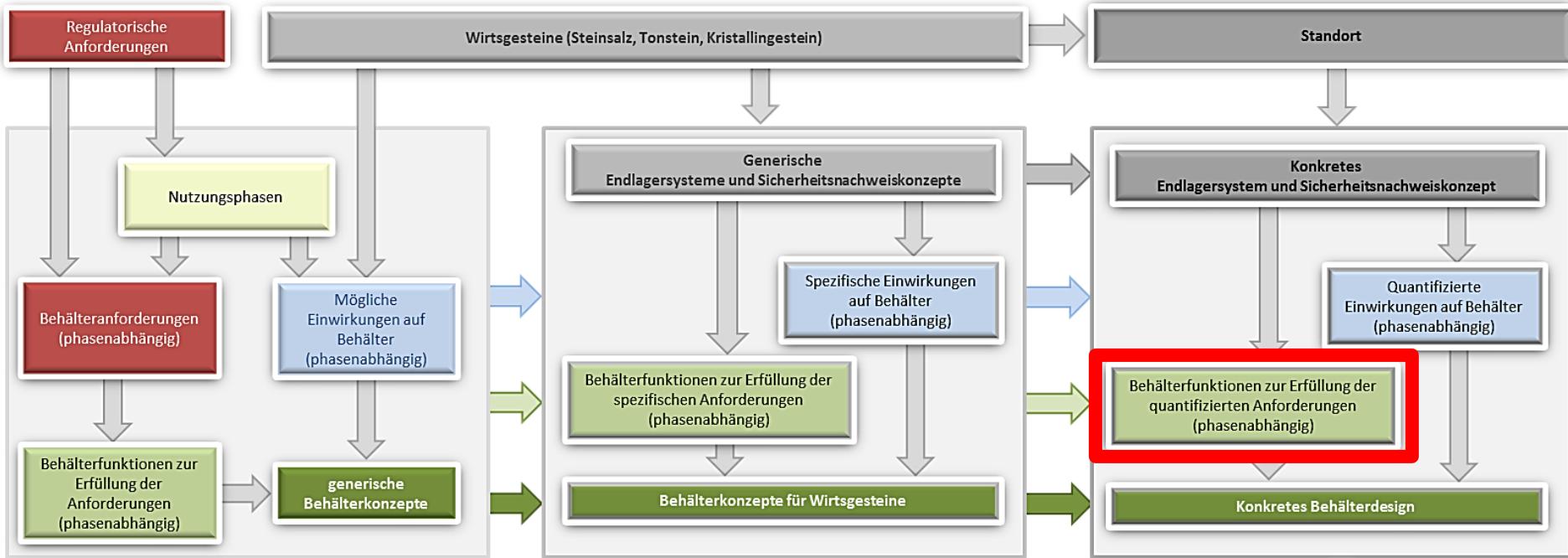
Radiologische Einwirkungen

- Grenzwert Neutronenfluenz für Materialversprödung

Chemische Einwirkungen

- Korrosionsraten, Mikrobielle Korrosion, Materialversprödung durch Wasserstoff, Zersetzung von Polymeren

→ in KoBrA beispielhaft quantifiziert für betrachtete Endlager- und Behälterkonzepte



Top-Down-Ansatz zur Entwicklung
anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

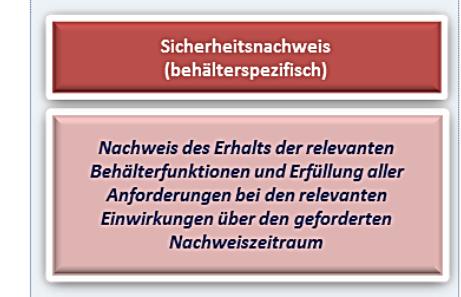
Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA
BMWi Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung



BGE TECHNOLOGY GmbH



Quantifizierte Funktionen für Endlagerbehälter

- Grundlage ist das aktuell gültige Gesetzes- und Regelwerk
 - Vorgaben überwiegend für das gesamte Endlagersystem
 - Diese sind noch für Endlagerbehälter zu spezifizieren
- Erste beispielhafte Überlegungen zur Quantifizierung der Behälterfunktionen

Quantifizierung der Funktion Einschluss des radioaktiven Inventars

Größe	Erläuterung	Quelle
Volumen, Masse	Bei Handhabung zur Bergung sollen die Endlagergebinde keine Freisetzung radioaktiver Aerosole erwarten lassen.	Entw. EndlSiAnfV, 2019
Masse	Für zu erwartende Entwicklungen ist nachzuweisen, dass im Nachweiszeitraum 1. Insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} 2. Jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9} der Masse der eingelagerten Radionuklide einschließlich ihrer Zerfallsprodukte aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird.	Entw. EndlSiAnfV, 2019
Aktivität	Verlust von radioaktivem Inhalt unter normalen Beförderungsbedingungen von höchstens $10^{-6} A_2$ pro Stunde; (A_2 =Aktivitätswert von radioaktiven Stoffen nach ADR). Sind Gemische verschiedener Radionuklide vorhanden, muss die Summe der Quotienten von Aktivitätsfreisetzung und dem entsprechenden Grenzwert der Einzelnuclide kleiner als 1 sein, mit der Ausnahme, dass für Kr-85 der 10-fache A_2 -Wert eingesetzt werden kann.	Typ B(U) Versandstücke nach ADR, 2017
Strahlenexposition	Zu erwartende Entwicklungen: Abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für eine Einzelperson aus der Bevölkerung von $10 \mu\text{Sv/a}$	Entw. EndlSiAnfV, 2019
Strahlenexposition	Für abweichende Entwicklungen: Für Einzelpersonen der Bevölkerung eine zusätzliche effektive Dosis von $0,1 \text{ mSv/a}$ nicht überschreiten	Entw. EndlSiAnfV, 2019
Strahlenexposition	Strahlenbelastung einer einzelnen Kerntechnischen Anlage auf eine Einzelperson: 1 mSv/a	StrlSchG, 2017
Strahlenexposition	$0,3 \text{ mSv/a}$ über den Expositionspfad Abluft, $0,3 \text{ mSv/a}$ über den Expositionspfad Abwasser, Rest als Direktstrahlung	StrlSchV, 2018
Strahlenexposition	Grenzwert beruflich exponierte Personen: 20 mSv/a , in Einzelfällen 50 mSv/a ; 100 mSv in 5 aufeinanderfolgenden Jahren, Berufslebensdosis 400 mSv	StrlSchG, 2017

Quantifizierung der Funktion Abschirmung ionisierender Strahlung

Größe	Erläuterung	Quelle
Strahlen-exposition – Betrieb	Ortsdosisleistung max. 2 mSv/h an Gebindeoberfläche oder Overpack Ortsdosisleistung max. 0,1 mSv/h in 2 m Abstand von der Oberfläche des Transportfahrzeugs Ortsdosisleistung max. 10 mSv/h in 1m Abstand von der Gebindeoberfläche unter den Bedingungen der für die Zulassung notwendigen Tests	Typ B(U) Versandstück ADR, 2017
Strahlen-exposition – Betrieb	Strahlenbelastung einer einzelnen Kerntechnischen Anlage auf eine Einzelperson: 1 mSv/a	StrlSchG, 2017
Strahlen-exposition – Betrieb	0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abluft, 0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abwasser, Rest als Direktstrahlung	StrlSchV, 2018
Strahlen-exposition – Betrieb	Grenzwert beruflich exponierte Personen: 20 mSv/a, in Einzelfällen 50 mSv/a; 100 mSv in 5 aufeinanderfolgenden Jahren, Berufslebensdosis 400 mSv	StrlSchG, 2017
Dosis – Schädigung Steinsalz	Vorschlag für einen Grenzwert zum Auftreten von Strahlenschäden im Steinsalz ab 10^4 Gy/h	FuE Vorhaben ISIBEL, Grundlage RSK Stellungnahmen
Dosis – Veränderung Bentonitbuffer	Dosis max. 1 Gy/h an der Behälteroberfläche zur Verhinderung von Radiolyse umgebender Wässer und Lösungen	POSIVA KBS-3 Konzept

Quantifizierung der Funktion Kritikalitätsausschluss

Größe	Erläuterung	Quelle
Neutronenmultiplikationsfaktor	Neutronenmultiplikationsfaktor $k_{\text{effektiv}} < 0,95$ für die reaktivste Anordnung	Entw. EndSiAnfV, 2019

Quantifizierung der Funktion Temperaturbeschränkung

Größe	Erläuterung	Quelle
Oberflächen-temperatur	Max. 85°C für die Handhabung 50°C an berührbaren Oberflächen	Typ B(U) Versandstück ADR, 2017
Oberflächen-temperatur	Vorläufige Behälteroberflächentemperatur von 100°C	StandAG, 2017
Oberflächen-temperatur	Steinsalz: 200°C Tonstein: 150°C Kristallin: 100°C	VSG ANSICHT KBS-3 Konzept
Inventar-temperatur	390°C für DWR-BE 410°C für SWR-BE 500°C für HAW-Glasprodukt	Auslegungs- unterlagen POLLUX®, 1986 FZKA, 2001

Quantifizierung der Funktion Begrenzung von Korrosion und Gasproduktion

- Quantifizierte Angabe einer zulässigen Gasbildungsrate nicht möglich, weil zu viele Unbekannte, z.B. das chemische und mikrobielle Milieu am Endlagerstandort oder das Speichervolumen im versetzten Grubengebäude
- Korrosion maßgeblich für die Werkstoffauswahl. Es sollte ein Behältermaterial bzw. Materialkombination gewählt werden, welches möglichst keine oder nur geringe Korrosion erwarten lässt. Angepasst an das chemische und mikrobielle Milieu am Endlagerstandort

Quantifizierung der Funktion Handhabbarkeit

- Ebenfalls Anforderungen an Einschluss, Abschirmung und Oberflächentemperatur → bereits abgedeckt
- Behälterabmessungen und Massen:
 - Demonstrationsversuche mit Dummy der Brennstabkokille (5,3 Mg), Transferbehälter (52 Mg) und POLLUX® (65 Mg) erfolgreich durchgeführt
 - Für TLB bis 160 Mg gibt es Konzepte zur Transport- und Einlagerungstechnik die von Sachverständigen als machbar bewertet wurden
 - Mindestabmessungen des Endlagerbehälters sind durch das Inventar vorgegeben
 - Abmessungen sollten zur Minimierung des aufzufahrenden Endlagervolumens kleingehalten werden
- Am Endlagerbehälter sind Lastanschlagpunkte erforderlich
- Lastanschlagpunkte und der Endlagerbehälter selbst müssen unter Einwirkung der Handhabungslasten die Erhaltung der Formstabilität und Funktionssicherheit gewährleisten

Schlussfolgerungen

Die systematische Herleitung von Behälteranforderungen im Vorhaben KoBrA hat folgendes gezeigt:

- Aus den regulatorischen Rahmenbedingungen ergeben sich grundlegende Behälteranforderungen. Diese sind bei der Erstellung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten zu spezifizieren und festzuschreiben.
- Im Rahmen der Sicherheits- und Nachweiskonzepte oder in Einlagerungsbedingungen sind einzuhaltende Leistungsziele, z.B. Ortsdosisleistungen oder Dichtheitskriterien, für den Behälter vorzugeben.
- Einwirkungen auf Endlagerbehälter sind Endlagerkonzept- und Standortabhängig und müssen im Rahmen der Konzeptentwicklung und Standorterkundung ermittelt und quantifiziert werden.
- Ermittelte Einwirkungen sind auf ihre Auslegungsrelevanz zu prüfen.
- Anforderungen aus Rückholung und vor allem Bergung werden für Endlagerbehälter auslegungsrelevant sein.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Zusatzfolie

Beispiel zur Quantifizierung der Einwirkungen Streckenlagerung POLLUX® im Steinsalz

Einwirkungsklasse		Nutzungspasen				Quelle	Erläuterung	
		Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Spätere Nachbetriebsphase			
Statische Mechanische Einwirkungen	Isotroper Druck	-	Lithostatischer Druck 18,8 MPa		/GRS 2012b/		Gebirgsdruck Gorleben, 870m Teufe	
	Handhabungs-lasten	$F_G = 637,7 \text{ kN}$, ca. 160 KN pro Tragzapfen	-		/ GRS 2011b/		Gebindemasse 65 Mg, Verwendung von 4-Tragzapfen	
		288 kN pro Tragzapfen	-		/GRS 2011b/ /KTA 2012/		Berücksichtigung Hublastbeiwert nach KTA 3905	
Dynamische Mechanische Einwirkungen	Beschleunigungen	Bremsverzögerung: 0,5 m/s ²		-	/DBE 1994/	Kennwerte Schachtförderanlage		
		Beschleunigung: 0,5 m/s ²		-				
		Max. 1g		-	/DBE 1994/	Max. Verzögerung durch Seldanlage bei schwerem Übertreiben		
		Max. 1,4g		-	/DBETEC 2008c/	Anstoß Plateauwagen Puffer an Puffer		

Zusatzfolie

Beispiel zur Quantifizierung der Einwirkungen Streckenlagerung POLLUX® im Steinsalz

Einwirkungsklasse		Nutzungspasen				Quelle	Erläuterung
		Einlagerung	Rückhol- barkeit	Berg- barkeit	Spätere Nach- betriebs- phase		
Thermische Einwirkungen	thermische Behälterleistung	Max. 6 kW	< 6 kW			/DBETEC 2016b/	POLLUX®-10 mit DWR mix 89/11; 57a Zwischenlagerung
Korrosion	Innenbehälter POLLUX®, Werkstoff Nr. 1.6210	-	Abtragsrate 71 µm/a		/KFK 1993/	NaCl-Lösung, 150°C, 18 Monate	
		-	Abtragsrate 94 - 117 µm/a			MgCl ₂ -Lösung, 150°C, 18 Monate	
		-	Abtragsrate 127,5 µm/a		/KFK 1992/	Q-Brine; 150°C	
		-	Abtragsrate 0,05±0,01 µm/a		/BAMBUSII 2004/	In-Situ Versuche Asse, 90°C, 3740 Tage	
		-	Abtragsrate 0,05±0,03 µm/a		/BAMBUSII 2004/	In-Situ Versuche Asse, 180°C, 3740 Tage	