

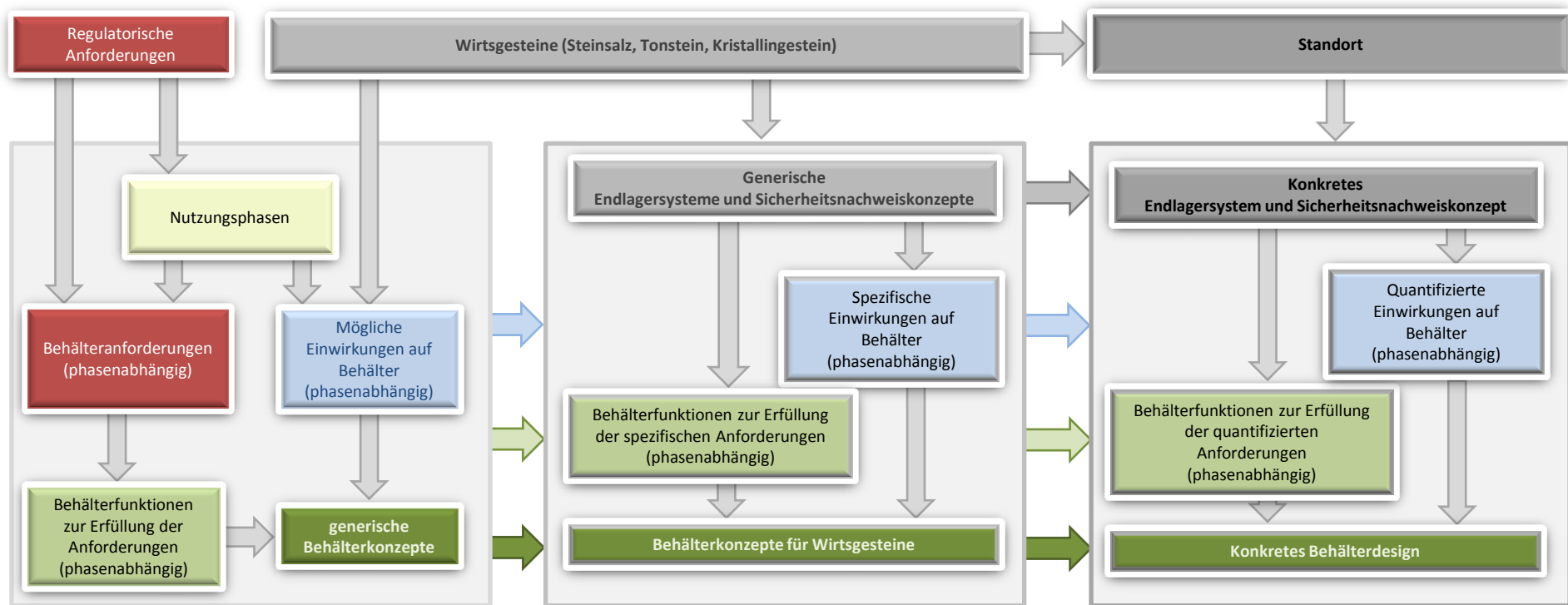
# **Konzepte und Anforderungen für Behälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein (KoBrA)**

## **AP 3: Herleitung von Behälteranforderungen**

**Ansgar Wunderlich, Wilhelm Bollingerfehr  
BGE TECHNOLOGY GmbH**

# Inhalt

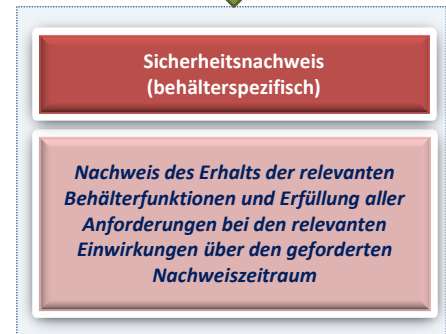
- Top-Down Ansatz zur Entwicklung anforderungsgerechter Endlagerbehälter
- Grundlegende Behälteranforderungen
  - Nutzungsphasen
  - Klassifizierung von Einwirkungen auf Endlagerbehälter
  - Generische Anforderungen in Abhängigkeit der Nutzungsphasen
- Spezifizierung der generischen Anforderungen anhand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

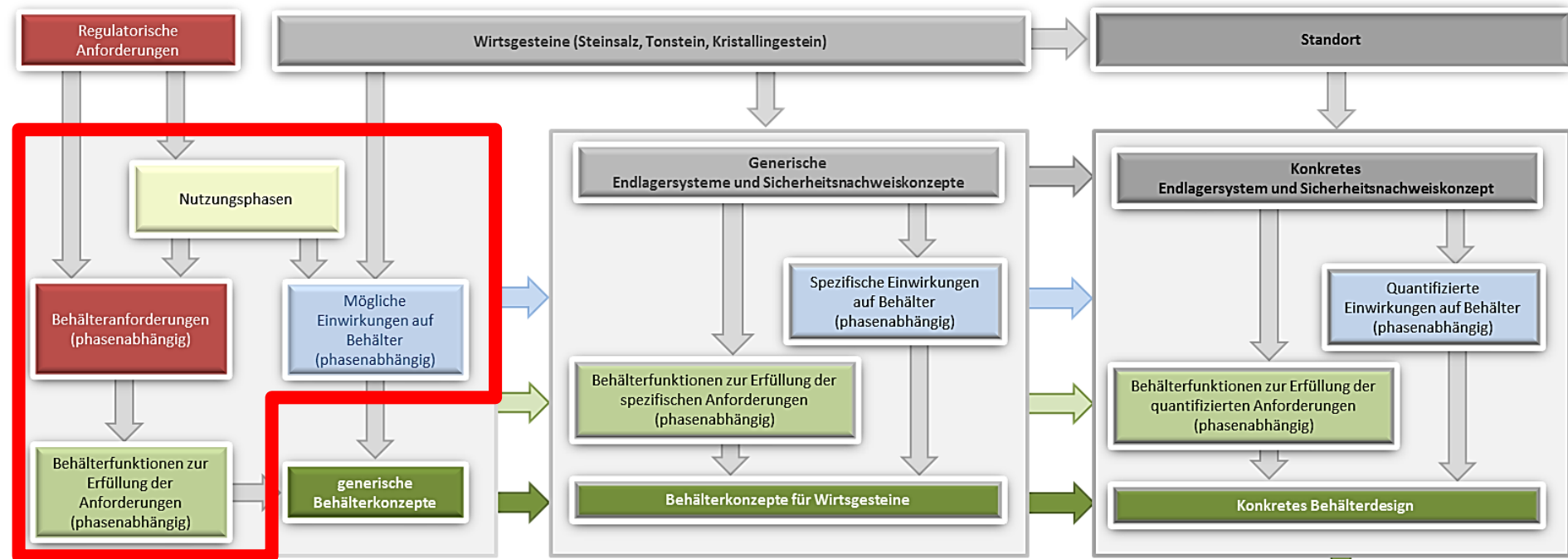


Top-Down-Ansatz zur Entwicklung  
anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung  
Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle



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

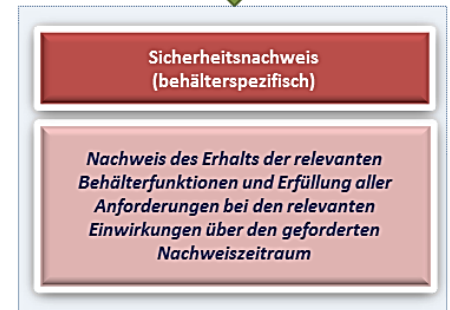




# Top-Down-Ansatz zur Entwicklung anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA

BMWi Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537



# Verwendete Regelwerke

## National:

- Atomgesetz
- Strahlenschutzgesetz und Strahlenschutzverordnung
- Standortauswahlgesetz
- Wasserhaushaltgesetz
- 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                                     |

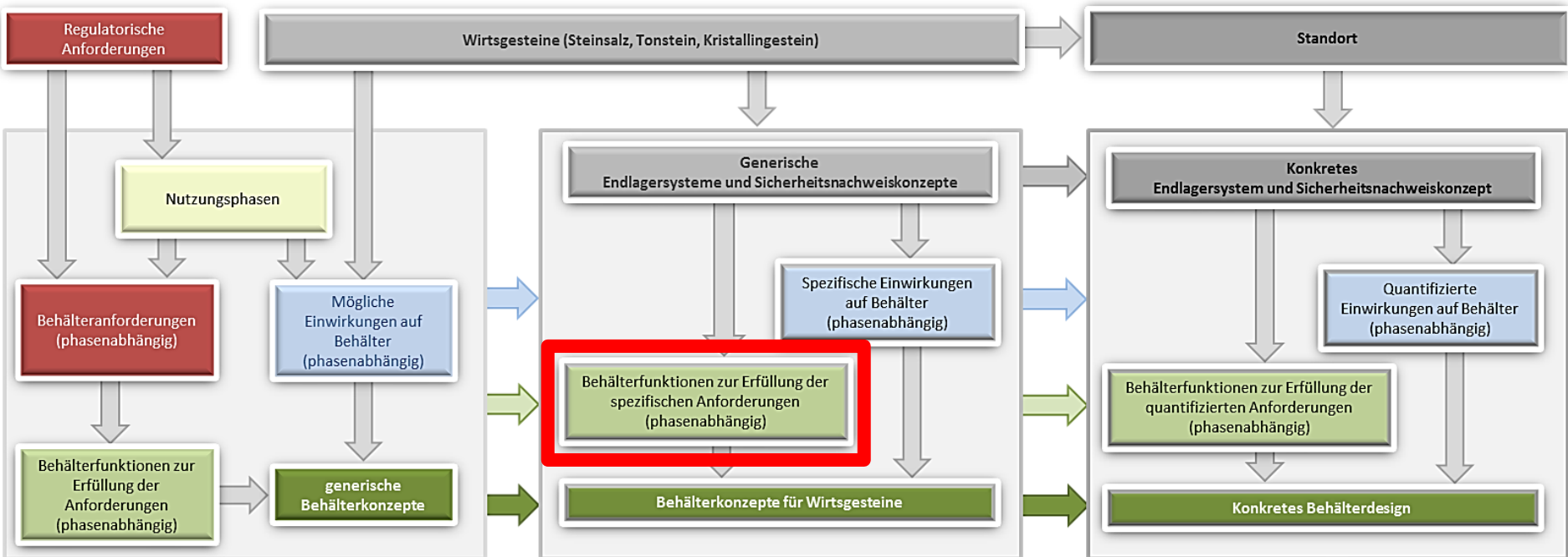


# Generische Behälteranforderungen in Abhängigkeit der Nutzungsphasen

| 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  |   |             |  |

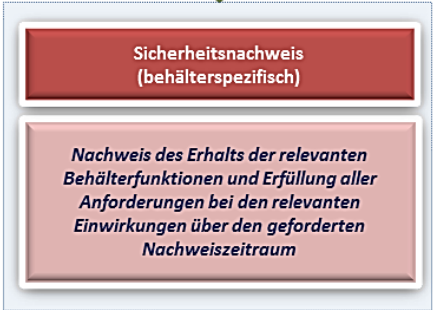
# Klassifizierte Einwirkungen auf Endlagerbehälter

| Einwirkungsklasse          | Relevante Einwirkung                  |                    |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| <b><i>Mechanisch</i></b>   | Statisch                              | Scherbeanspruchung |
|                            |                                       | Isotroper Druck    |
|                            |                                       | Anisotroper Druck  |
|                            | Dynamisch                             | Beschleunigung     |
|                            |                                       | Vibration          |
|                            |                                       | Schlag/Stoß        |
| <b><i>Thermisch</i></b>    | Thermische Lasten                     |                    |
| <b><i>Radiologisch</i></b> | Materialversprödung durch Strahlung   |                    |
| <b><i>Chemisch</i></b>     | Korrosion                             |                    |
|                            | Materialversprödung durch Wasserstoff |                    |
|                            | Zersetzung                            |                    |

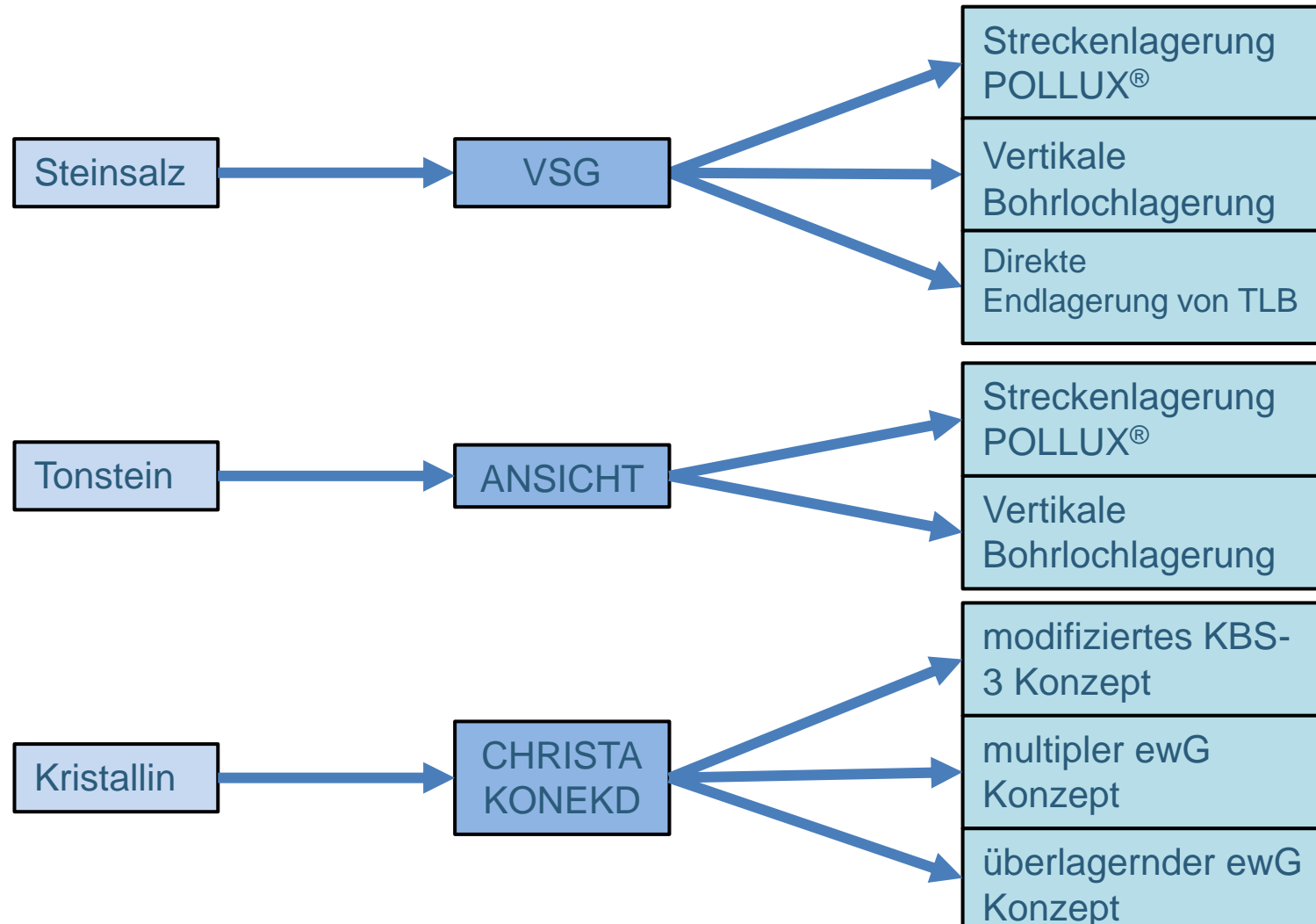


# Top-Down-Ansatz zur Entwicklung anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

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

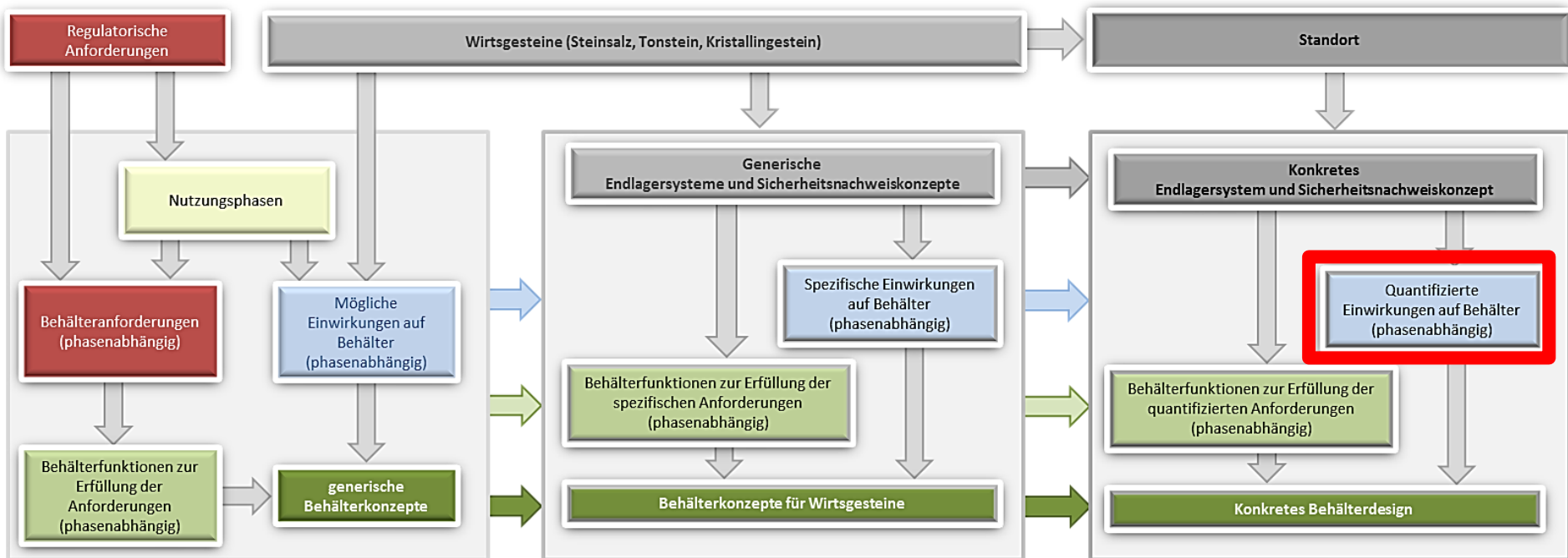


# Spezifizieren der Behälteranforderungen anhand der Sicherheits- und Nachweiskonzepte



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

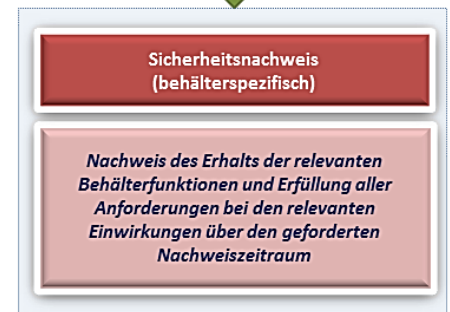
| Anforderung                            | Nutzungsphasen  |   |  |  |
|--|---|---|--|--|
|  | Einlagerung   | Rückholbarkeit  | Bergbarkeit                                      | Spätere Nachbetriebsphase  |
| Einschluss des radioaktiven Inventars  | Uneingeschränkt zu gewährleisten                                  |   |  | 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

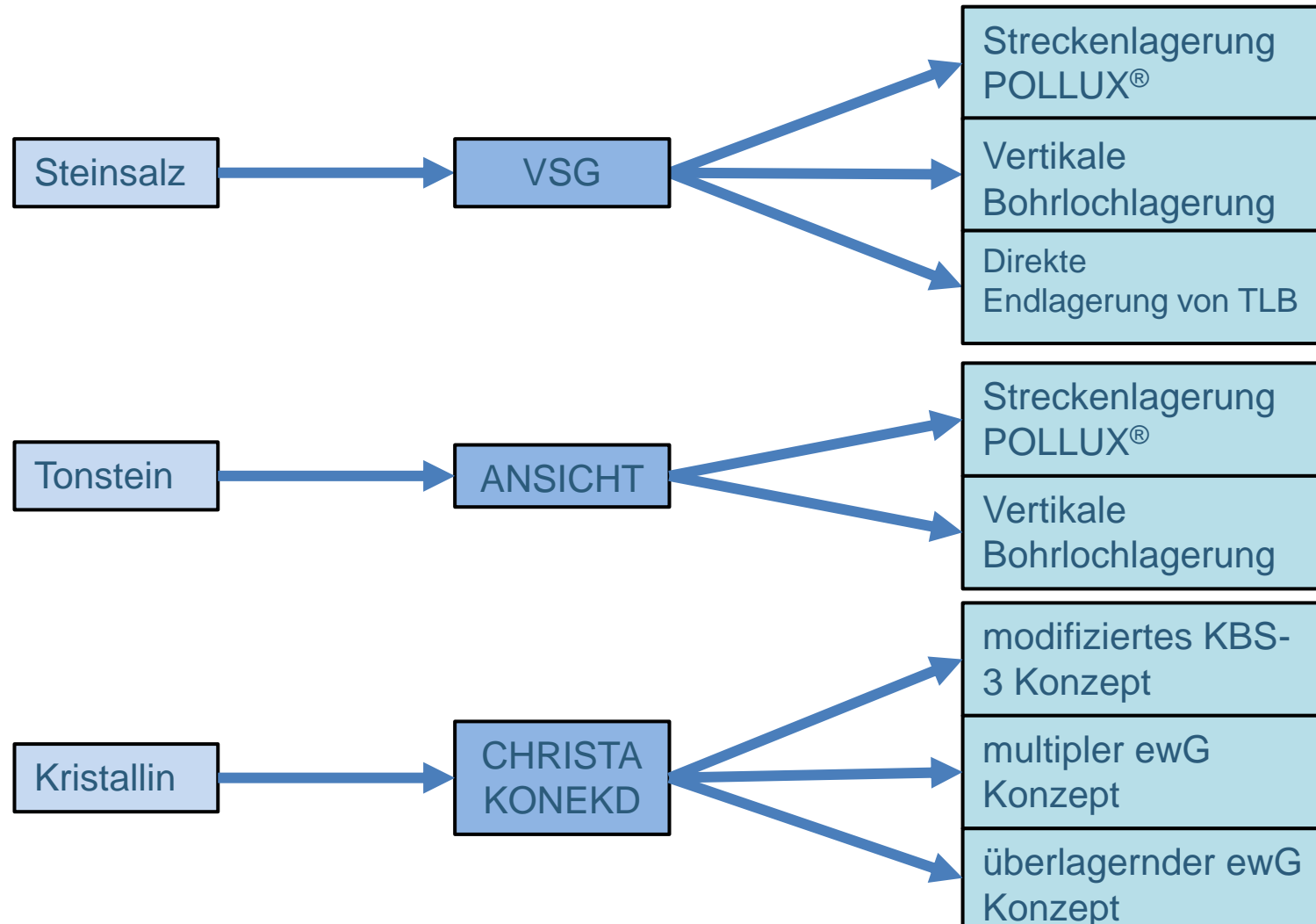
Ergebnisse aus dem FuE-Vh KoBrA

BMW Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537



# 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

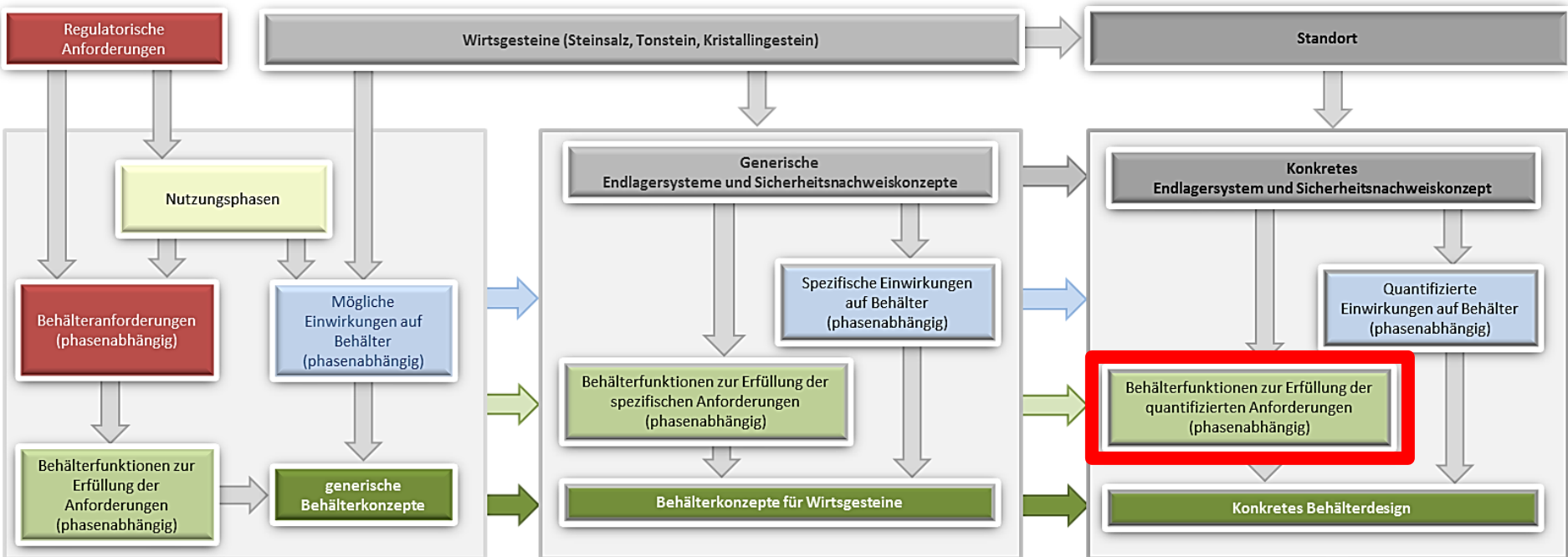
- Grenzwert Neutronenfluenz für Materialversprödung

## Chemische Einwirkungen

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

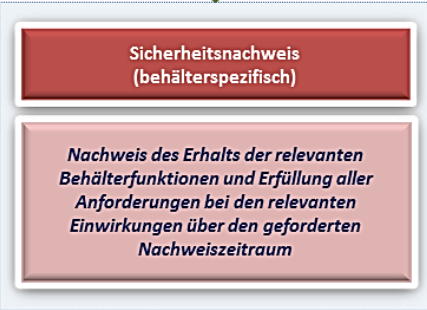
→ in KoBrA beispielhaft quantifiziert für betrachtete Endlager- und Behälterkonzepte





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

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



# 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. EndISiAnfV, 2019                |
| Masse              | Für zu erwartende Entwicklungen ist nachzuweisen, dass im Nachweiszeitraum<br>1. Insgesamt höchstens ein Anteil von $10^{-4}$<br>2. Jährlich höchstens ein Anteil von $10^{-9}$<br>der Masse der eingelagerten Radionuklide einschließlich ihrer Zerfallsprodukte aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird.  | Entw. EndISiAnfV, 2019                |
| Aktivität          | Verlust von radioaktivem Inhalt unter normalen Beförderungsbedingungen von höchstens $10^{-6}$ A <sub>2</sub> pro Stunde; (A <sub>2</sub> =Aktivitätswert von radioaktiven Stoffen nach ADR). Sind Gemische verschiedener Radionuklide vorhanden, muss die Summe der Quotienten von Aktivitätsfreisetzung und dem entsprechenden Grenzwert der Einzelnuklide kleiner als 1 sein, mit der Ausnahme, dass für Kr-85 der 10-fache A <sub>2</sub> -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 µSv/a  | Entw. EndISiAnfV, 2019                |
| Strahlenexposition | Für abweichende Entwicklungen: Für Einzelpersonen der Bevölkerung eine zusätzliche effektive Dosis von 0,1 mSv/a nicht überschreiten  | Entw. EndISiAnfV, 2019                |
| Strahlenexposition | Strahlenbelastung einer einzelnen Kerntechnischen Anlage auf eine Einzelperson: 1 mSv/a   | StrlSchG, 2017                        |
| Strahlenexposition | 0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abluft,<br>0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abwasser,<br>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-<br>exposition –<br>Betrieb     | <p>Ortsdosisleistung max. 2 mSv/h an Gebindeoberfläche oder Overpack</p> <p>Ortsdosisleistung max. 0,1 mSv/h in 2 m Abstand von der Oberfläche des Transportfahrzeugs</p> <p>Ortsdosisleistung max. 10 mSv/h in 1m Abstand von der Gebindeoberfläche unter den Bedingungen der für die Zulassung notwendigen Tests</p> | Typ B(U)<br>Versandstück<br>ADR, 2017                      |
| Strahlen-<br>exposition –<br>Betrieb     | Strahlenbelastung einer einzelnen Kerntechnischen Anlage auf eine Einzelperson: 1 mSv/a  | StrlSchG, 2017   |
| Strahlen-<br>exposition –<br>Betrieb     | <p>0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abluft,</p> <p>0,3 mSv/a über den Expositionspfad Abwasser,</p> <p>Rest als Direktstrahlung</p>  | StrlSchV, 2018   |
| Strahlen-<br>exposition –<br>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 –<br>Schädigung<br>Steinsalz       | Vorschlag für einen Grenzwert zum Auftreten von Strahlenschäden im Steinsalz ab $10^4$ Gy/h  | FuE Vorhaben<br>ISIBEL,<br>Grundlage RSK<br>Stellungnahmen |
| Dosis –<br>Veränderung<br>Bentonitbuffer | Dosis max. 1 Gy/h an der Behälteroberfläche zur Verhinderung von Radiolyse umgebender Wässer und Lösungen  | POSIVA KBS-3<br>Konzept                                    |

## Quantifizierung der Funktion Kritikalitätsausschluss

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

## Quantifizierung der Funktion Temperaturbeschränkung

| Größe                  | Erläuterung   | Quelle   |
|------------------------|---|--|
| Oberflächen-temperatur | Max. 85°C für die Handhabung<br>50°C an berührbaren Oberflächen   | Typ B(U)<br>Versandstück<br>ADR, 2017                    |
| Oberflächen-temperatur | Vorläufige Behälteroberflächentemperatur von 100°C                | StandAG, 2017  |
| Oberflächen-temperatur | Steinsalz: 200°C<br>Tonstein: 150°C<br>Kristallin: 100°C          | VSG<br>ANSICHT<br>KBS-3 Konzept                          |
| Inventar-temperatur    | 390°C für DWR-BE<br>410°C für SWR-BE<br>500°C für HAW-Glasprodukt | Auslegungs-<br>unterlagen<br>POLLUX®, 1986<br>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                            |
|                                     | Handhabungslasten | F <sub>G</sub> =637,7 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/s²                          |                                |             | -                         | /DBE 1994/             | Kennwerte Schachtförderanlage                                |
|                                     |                   | Beschleunigung: 0,5 m/s²                            |                                |             | -                         |                        |  |
|                                     |                   | Max. 1g   |                                |             | -                         | /DBE 1994/             | Max. Verzögerung durch Selda-Anlage 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   | Rückholbarkeit | Bergbarkeit                | Spätere Nachbetriebsphase |                 |  |
| 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 <sub>2</sub> -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            |