

11.02.2021

ANFORDERUNGEN AN BEHÄLTER FÜR DIE ENDLAGERUNG HOCHRADIOAKTIVER ABFÄLLE IN STEINSALZ, TONSTEIN UND KRISTALLINGESTEIN

Holger Völzke

Christian Herold, Dietmar Wolff, Teresa Orellana Pérez (BAM)

Wilhelm Bollingerfehr, Ansgar Wunderlich (BGE TECHNOLOGY GmbH)

Sabine Prignitz (BGE mbH)

Tage der Standortauswahl, Freiberg

11./12.02.2021

1. Einführung
2. Internationale Behälterkonzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
3. Behälterspezifische Randbedingungen und Einwirkungen
4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle
5. Betrachtungen zu möglichen Behälterkonzepten
 - 5.1 Übertragbarkeit bestehender Behälterkonzepte
 - 5.2 Entwicklung generischer Behälterkonzepte
6. Fazit

- Geeignete Behälter zur Aufnahme der hochradioaktiven Abfälle sind zentraler Bestandteil jedes Endlagersystems für eines der für Deutschland in Frage kommenden Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein
- Gestalt und Auslegung der Endlagerbehälter prägen maßgeblich
 - die Randbedingungen für die Transport- und Einlagerungstechnik
 - die Nachweise zur Betriebs- und Langzeitsicherheit

Schlussfolgerung

Die systematische Herleitung der an Endlagerbehälter zu stellenden Anforderungen bildet die Grundlage für eine *zielgerichtete, nachvollziehbare* und *transparente* Entwicklung anforderungsgerechter Behälter.

FuE-Verbundvorhaben **KoBrA**

Anforderungen und **K**onzepte für **B**ehälter zur Endlagerung von Wärme entwickelnden **r**adioaktiven **A**bfällen und ausgedienten Brennelementen in Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein

von

BAM und BGE TECHNOLOGY GmbH

Laufzeit: Juni 2017 bis April 2020

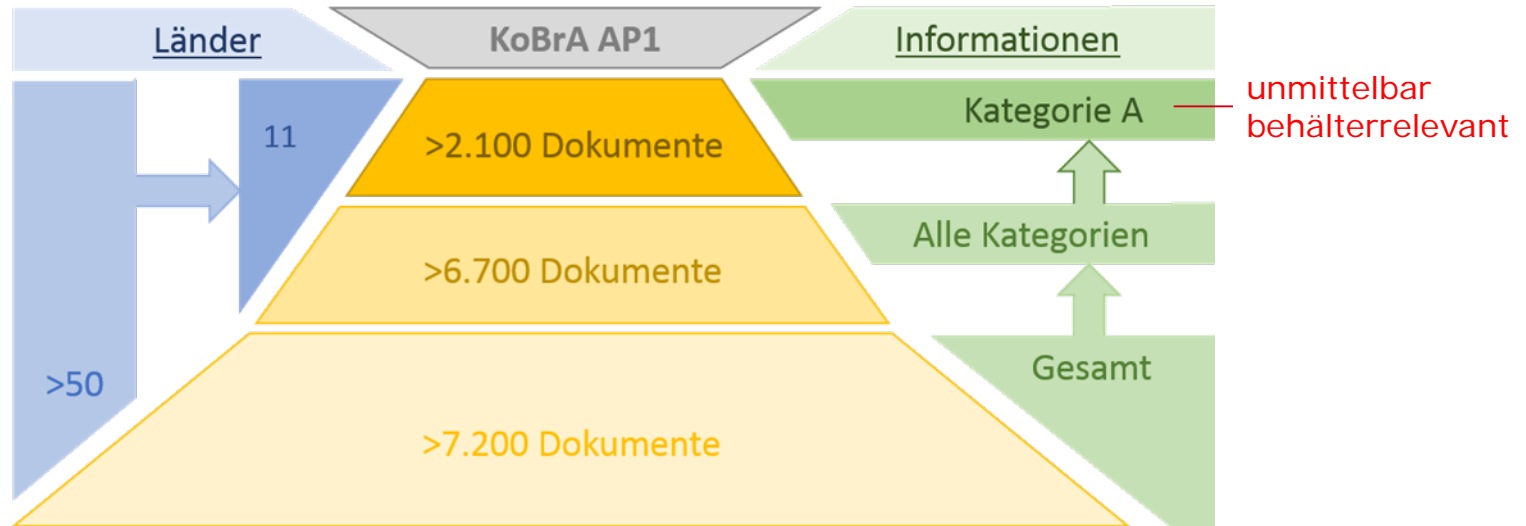
Gefördert von BMWi/PTKA

Förder-Kennzeichen 02E11527 und 02E11537



2. Internationale Behälterkonzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche wurde der nationale und internationale Stand zu Behälteranforderungen und -konzepten für hochradioaktive Abfälle in verschiedenen Wirtsgesteinen erfasst, ausgewertet und in einer Dokumentensammlung zusammengetragen.



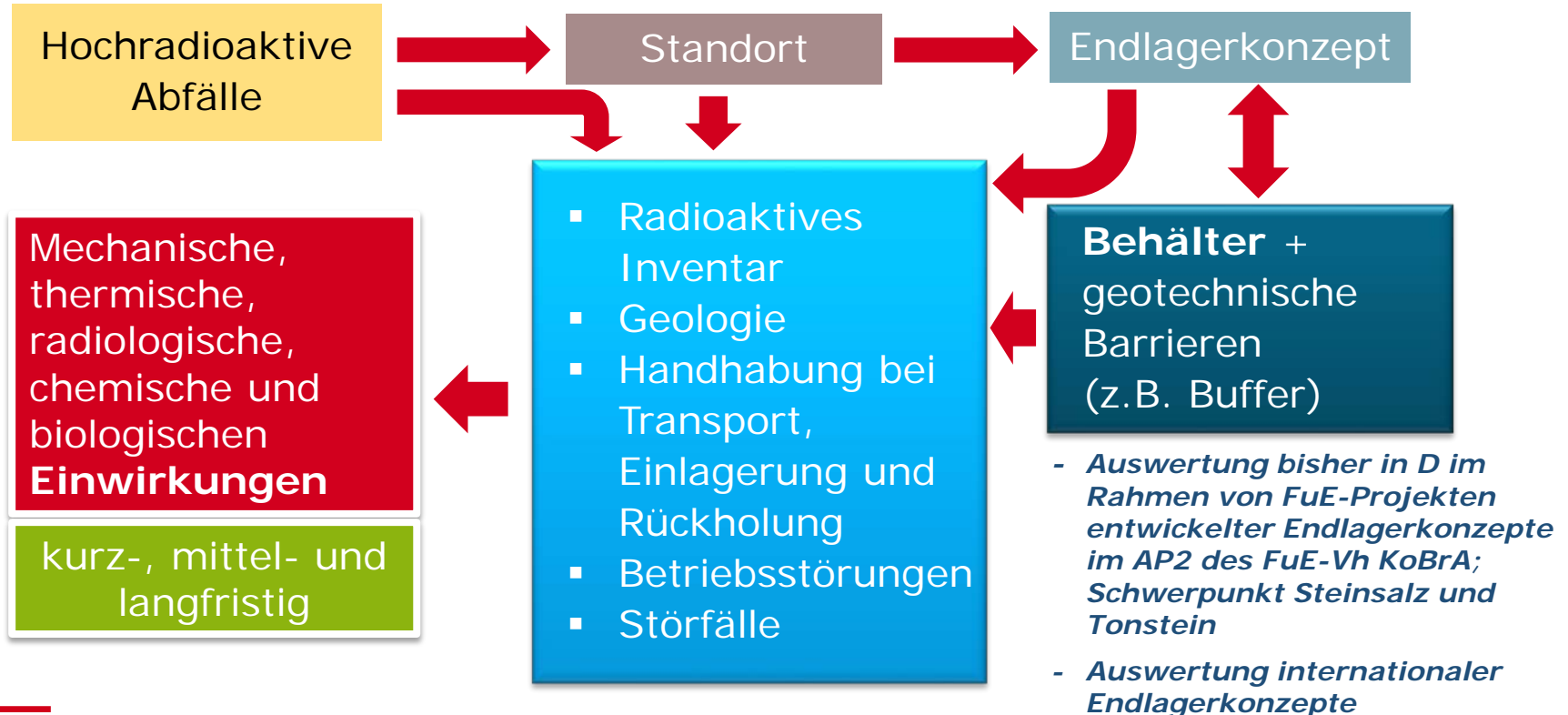
2. Internationale Behälterkonzepte zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Relevante internationale Endlagerprogramme

Gestein	Land	Standort	Standortauswahl	Baugenehmigung	Beginn Endlager-Betrieb	Betreiber	Aufsicht
Kristallin	Schweden	Forsmark	2009	≈ 2020	≈ 2030	SKB	SSM
	Finnland	Olkiluoto	2001	2015	nach 2022	Posiva Oy	STUK
	Kanada	5 Kandidaten	zeitlich nicht begrenzt			NWMO	CNSC
	Rep. Korea	offen	k. A.		nach 2040	KHNP	NCS/ KINS
	Tschechien	7 Kandidaten	2025	bis 2050	2065	SÚRAO	SÚJB
Tonstein	Belgien	offen	offen			ONDRAF / NIRAS	FANC / AFCN
	Frankreich	Bure	2013	2022	2025	Andra	ASN
	Schweiz	3 Kandidaten	2030	nach 2024	2060	Nagra	ENSI
Kristallin Tonstein Steinsalz	Deutschland	offen	2031	offen		BGE	BASE
	Großbritannien		bislang kein Zeitplan			NDA	ONR, Environm. Agencies
Tuff	Vereinigte Staaten von Amerika	Yucca Mountain (1987-2010)	1987	offen	offen	U.S. DOE	U.S. NRC
offen		offen	2026	2042	2048		

- International weitestgehend gleiche Schutzzieldefinitionen
- Die Mehrzahl der international betrachteten Konzepte beinhaltet zwar robuste, jedoch nicht ausreichend für Handhabung und Transport abgeschirmte Behälter, so dass zusätzliche Transferbehälter benötigt werden.
- Behälterstandzeiten
 - Kristallin bis 100.000 Jahre (für D bis 1 Mio. Jahre)
 - Tonstein: einige tausend Jahre
 - Steinsalz: bis ca. 500 Jahre (D)

3. Behälterspezifische Randbedingungen und Einwirkungen



3. Behälterspezifische Randbedingungen und Einwirkungen

Übersicht über die in den betrachteten Endlagerkonzepten auf die Endlagergebäude wirkenden statischen mechanischen Lasten (Drücke).

Wirtsgestein	Land	Teufe [m]	Druck [MPa]			
			lithostatisch	hydrostatisch	Schwelldruck	Gletscherdruck
Kristallin	Schweden	500	--	5	≤ 15	≤ 25
	Finnland	420		4,1		
	Rep. Korea	500		5	10	
	Tschechien				15	
	Kanada				≤ 11,5	≤ 30
Tonstein	Belgien	240	4,5	2,2	5..6	
	Frankreich	525	12	-- (5,3)	≤ 7	
	Schweiz	450...850	15...22	4,5...8,5	2..4	≤ 5
Steinsalz (VSG)	Deutschland	870	18,8	--	--	≤ 15

3. Behälterspezifische Randbedingungen und Einwirkungen

Übersicht über die anzunehmenden thermischen und radiologischen Randbedingungen in den betrachteten Endlagerkonzepten.

Wirtsgestein	Land	Teufe [m]	Gesteins-temperatur [°C]	Ortsdosisleistung an der Gebinde-oberfläche [Gy/h]
Kristallin	Schweden	500	10,5	$\leq 0,055^B$
	Finnland	420	10...12	$\leq 0,22^B$
	Rep. Korea	500	35^B	$\leq 0,1^B$
	Tschechien		10	
	Kanada		11	$\leq 0,135^{B,D,*}$
Tonstein	Belgien	240	16	$< 25^B$
	Frankreich	525	23	< 30
	Schweiz	450...850	30...45	$< 0,035^B$
Steinsalz (VSG)	Deutschland	870	38	(POLLUX®) $< 0,01^{A,*}$
				(BSK-3) $\leq 100^{B,*}$

A – nach Auslegung
 B – berechnet
 D - Abstand von 20 cm zur Oberfläche der „buffer box“ nach 10 a Abklingzeit
 * – Werte in Sv/h berechnet (Äquivalentdosisleistung).

4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle

Grundlegende regulatorische Vorgaben

- Atomgesetz
- Strahlenschutzgesetz mit zugehörigen Verordnungen
- Standortauswahlgesetz - **StandAG**
- **Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV** (06. Okt. 2020)
vormals Sicherheitsanforderungen des BMU an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle vom 30. September 2010
- Leitlinien und Empfehlungen der ESK, z.B. EMPFEHLUNG der Entsorgungskommission - *Anforderungen an Endlagergebäude zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle* (2017)

4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle

Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV



Nutzungsphasen

Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Späterer Nachbetrieb
Bereitstellung des Behälters zur Einlagerung bis Abschluss der Einlagerung	Abschluss Einlagerung des Behälters bis Beginn der Stilllegung des Endlagers	Beginn Stilllegung bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers	500 Jahre nach Verschluss des Endlagers bis zum Ende des Nachweiszeitraums

4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle

Grundlegende Anforderungen an Endlagerbehälter (unabhängig vom Wirtsgestein)

- **Einschluss des radioaktiven Inventars**

Ausschluss unzulässiger Freisetzung von radioaktiven Stoffen zum Schutz der Biosphäre. Dazu sind Dichtheit und Integrität des Endlagerbehälters unter Betriebsbedingungen und auch unter den Einwirkungen von Betriebsstörungen und Störfällen während aller Betriebsphasen zu gewährleisten.
- **Abschirmung ionisierender Strahlung**

Sicherer Endlagerbetrieb und Vermeidung von Schäden an weiteren Barrieren des Endlagersystems
- **Ausschluss von Kritikalität**

$k_{\text{eff}} < 0,95$ bis 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers und nachfolgend $k_{\text{eff}} < 0,98$ (n. EndISiAnfV)
- **Temperaturbeschränkung der Abfallgebinde**

Vermeidung von sicherheitsrelevanten thermischen Schäden an Behälter, Inventar oder geotechnischen und geologischen Barrieren (vorläufige Grenztemperatur nach StandAG = 100°C)

4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle

Weitere grundlegende Anforderungen an Endlagerbehälter (unabhängig vom Wirtsgestein)

- Begrenzung der 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*

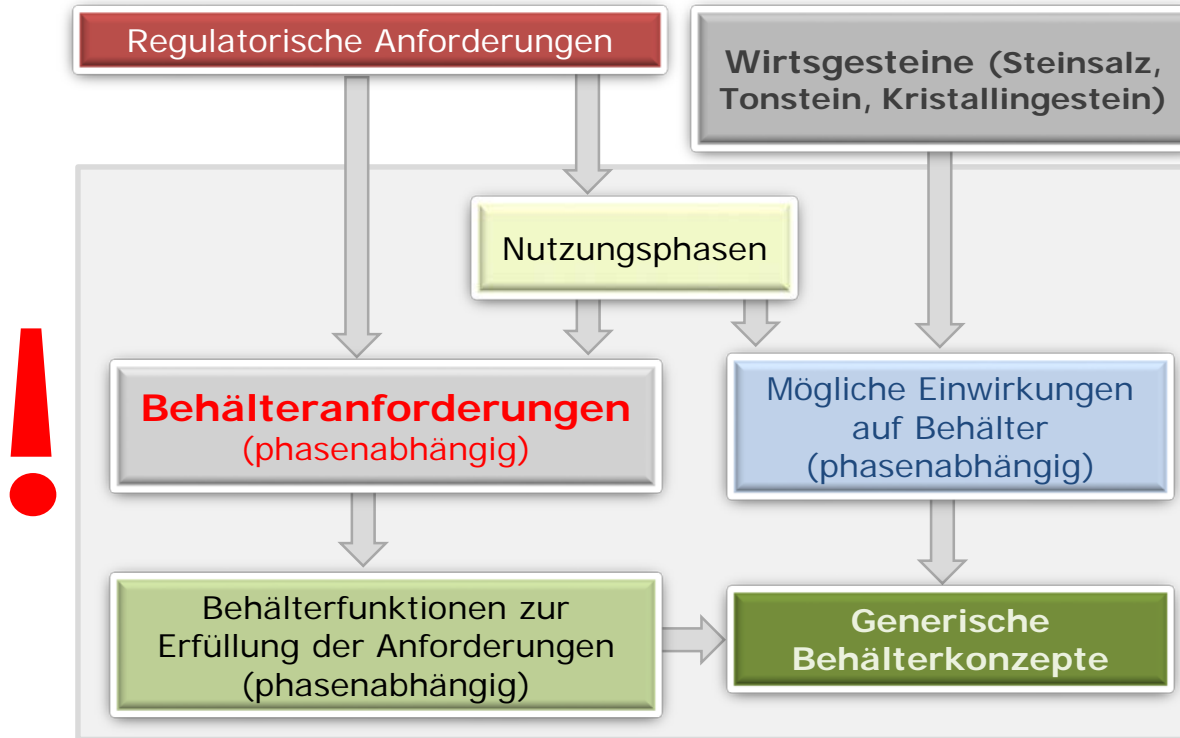
4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle

Zeitliche Abhängigkeit der grundlegenden Behälteranforderungen

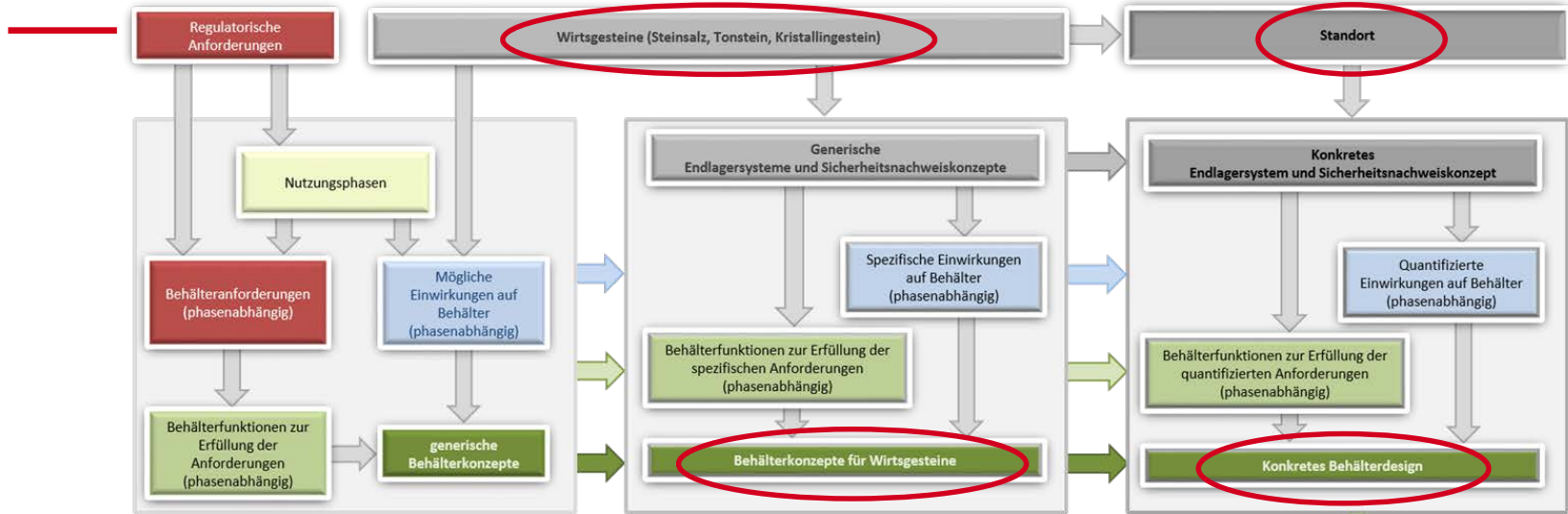
Grundlegende Anforderung	Nutzungsphase			
	Einlagerung	Rückholbarkeit	Bergbarkeit	Später Nachbetrieb
Einschluss des radioaktiven Inventars	Uneingeschränkt zu gewährleisten			Abhängig vom Sicherheits- und Nachweiskonzept
Abschirmung ionisierender Strahlung	Hinreichend zu gewährleisten <i>Schutz des Personals, der Bevölkerung und der Biosphäre; ggf. im Zusammenwirken mit Transferbehälter</i>			
		Hinreichend zu gewährleisten <i>Vermeidung von sicherheitsrelevanten radiolytischen bzw. radiolytisch begünstigten Schädigungen der Barrieren</i>		
Kritikalitätsausschluss	Uneingeschränkt zu gewährleisten <i>für die reaktivste Anordnung des Kernbrennstoffs</i>			
Temperaturbeschränkung	Hinreichend zu gewährleisten <i>Gefahrlose Handhabung ggf. im Zusammenwirken mit Transferbehälter</i>			
		Hinreichend zu gewährleisten <i>Vermeidung der sicherheitsrelevanten thermischen Schädigung der Barrieren, des Wirtsgesteins und des Behälterinventars</i>		
Begrenzung der Korrosion und Gasproduktion		Hinreichend zu gewährleisten <i>Vermeidung der Schädigung der Barrieren durch hohe Gasdrücke und der Ausbildung sicherheitsgefährdender Gastransportpfade</i>		
Handhabbarkeit	Hinreichend zu gewährleisten			

4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle

— Konzept zur Entwicklung generischer Behälterkonzepte

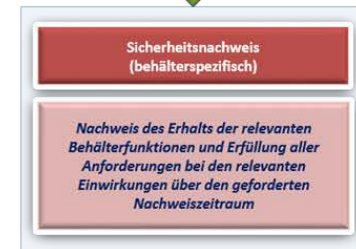


4. Herleitung der Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle



Top-Down-Ansatz zur Entwicklung anforderungsgerechter Behälter zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

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

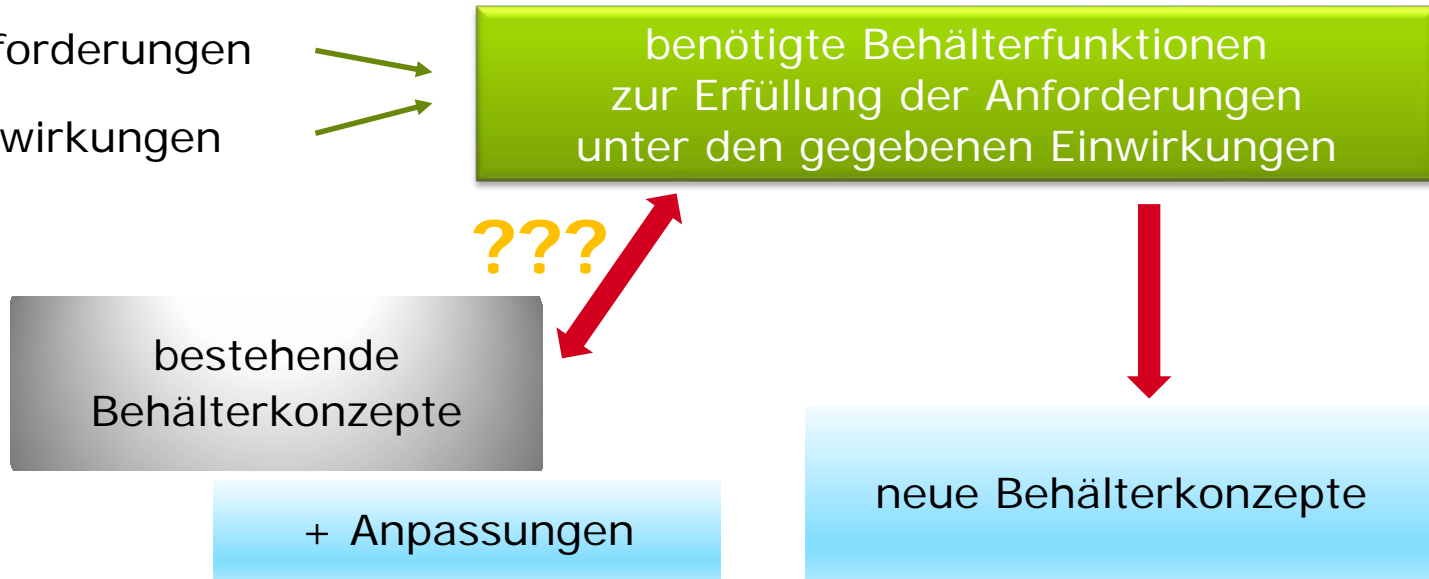


5. Betrachtungen zu möglichen Behälterkonzepten BAM

Grundlagen:

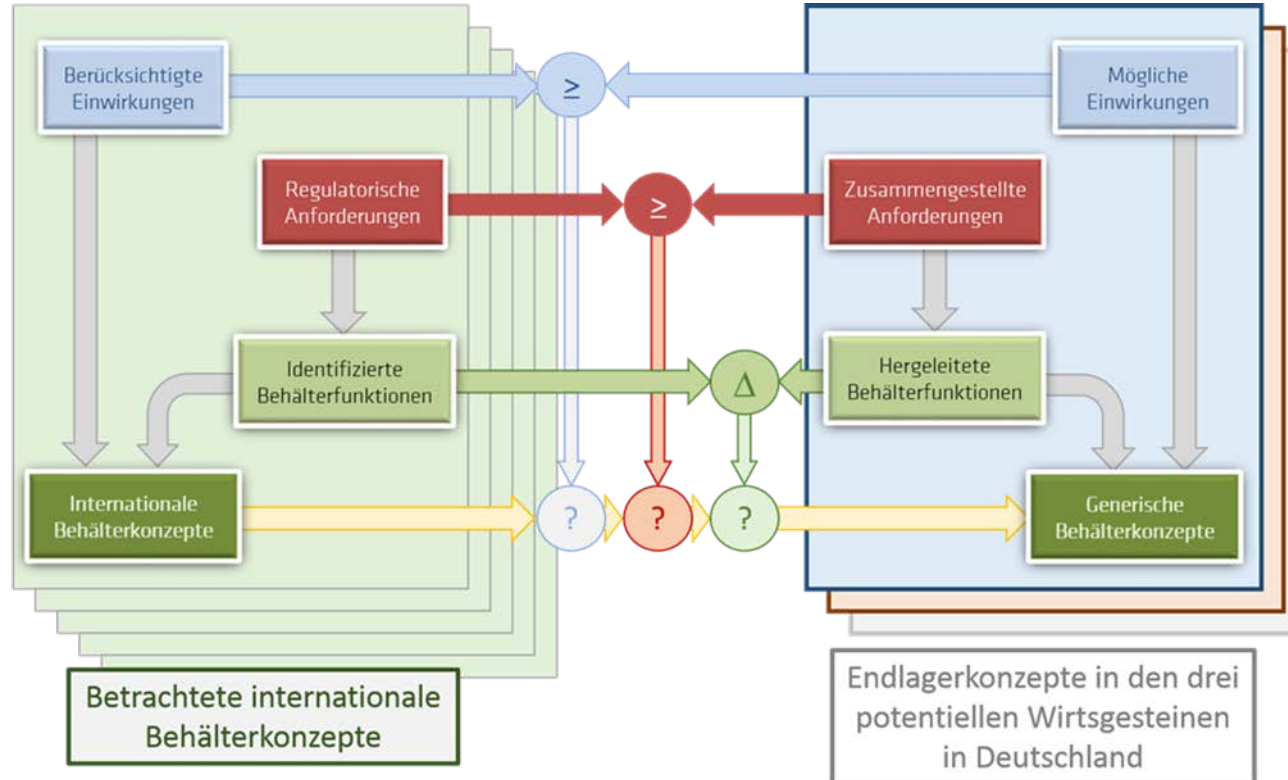
Generisch → Wirtsgestein → Standort

- Top-Down-Ansatz → „vom Allgemeinen zum Speziellen“
- Anforderungen
- Einwirkungen



5.1 Übertragbarkeit bestehender Behälterkonzepte

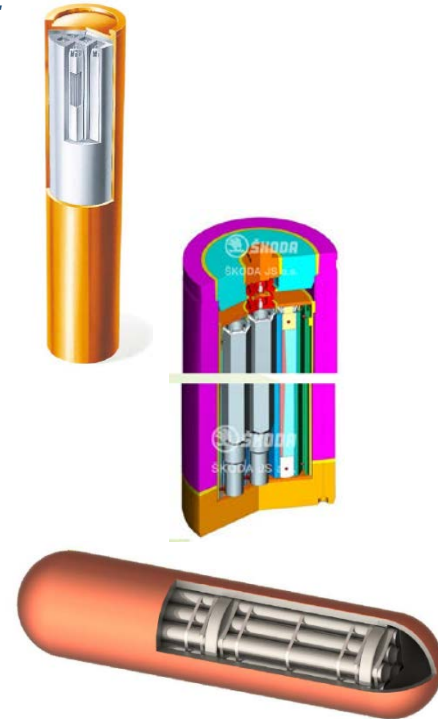
Methodik zur Untersuchung existierender Behälterkonzepte hinsichtlich der Übertragbarkeit auf Endlagerkonzepte in Deutschland



5.1 Übertragbarkeit bestehender Behälterkonzepte

Kurzbeschreibung der international für hochradioaktive Abfälle entwickelten Behälterkonzepte, die hinsichtlich Übertragbarkeit auf deutsche Endlagerkonzepte im FuE-Vorhaben KoBrA betrachtet wurden

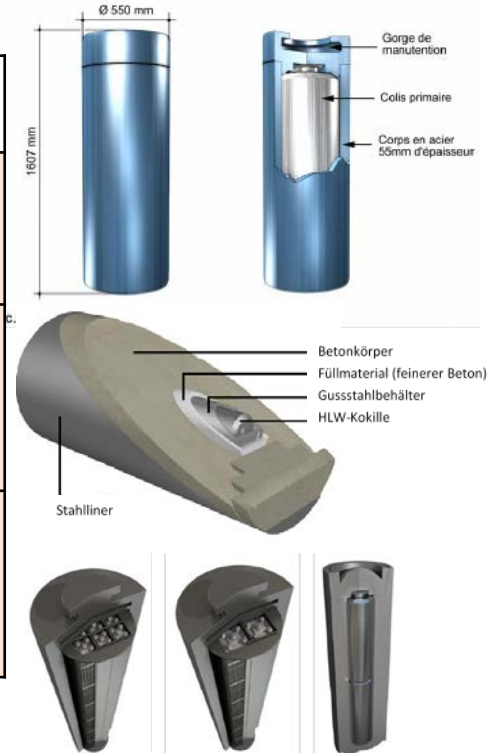
entwickelt für Wirtsgestein	Behälterkonzept (Entwickler)	Beschreibung	Stand der Entwicklung
Kristallin	KBS-3 (SKB/Posiva Oy, Schweden, Finnland)	unabgeschirmter Doppelhüllenbehälter (Gusseisenbehälter mit massiver Kupferhülle) für Brennelemente	weit fortgeschritten im Genehmigungsverfahren (Tests für Fertigung, Beladung, Verschluss, Transport, Einlagerung)
	UOS (Škoda, Tschechien)	unabgeschirmter Doppelhüllenbehälter aus verschiedenen Stählen für Brennelemente	vom KBS-3 abgeleitete Konzeptstudie („KBS-3 aus Stahl“)
	UFC-II (NWMO, Kanada)	unabgeschirmter Stahlbehälter mit dünner Kupferbeschichtung für (CANDU-) Brennelemente	fortgeschrittenes Konzept (Material-, Fertigungs- und Behältertests)



5.1 Übertragbarkeit bestehender Behälterkonzepte

Kurzbeschreibung der international für hochradioaktive Abfälle entwickelten Behälterkonzepte, die hinsichtlich Übertragbarkeit auf deutsche Endlagerkonzepte im FuE-Vorhaben KoBrA betrachtet wurden

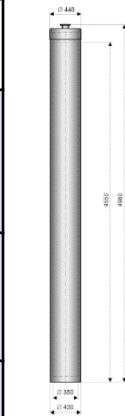
entwickelt für Wirtsgestein	Behälterkonzept (Entwickler)	Beschreibung	Stand der Entwicklung
Tonstein	Kategorie-C-Behälter (Andra, Frankreich)	unabgeschirmter Stahlbehälter für Kokillen oder Brennelemente	fortgeschrittenes Konzept (Material-, Fertigungs- und Behältertests)
	Supercontainer (ONDRAF/NIRAS, Belgien)	in Betonkörper eingeschlossener Stahlbehälter für Brennelemente oder Kokillen	Materialtests
	Referenzkonzept (Nagra, Schweiz)	unabgeschirmter, robuster Stahlbehälter für Brennelemente oder Kokillen	generisches Design für BE und Kokillen



5.1 Übertragbarkeit bestehender Behälterkonzepte

Kurzbeschreibung der international für hochradioaktive Abfälle entwickelten Behälterkonzepte, die hinsichtlich Übertragbarkeit auf deutsche Endlagerkonzepte im FuE-Vorhaben KoBrA betrachtet wurden

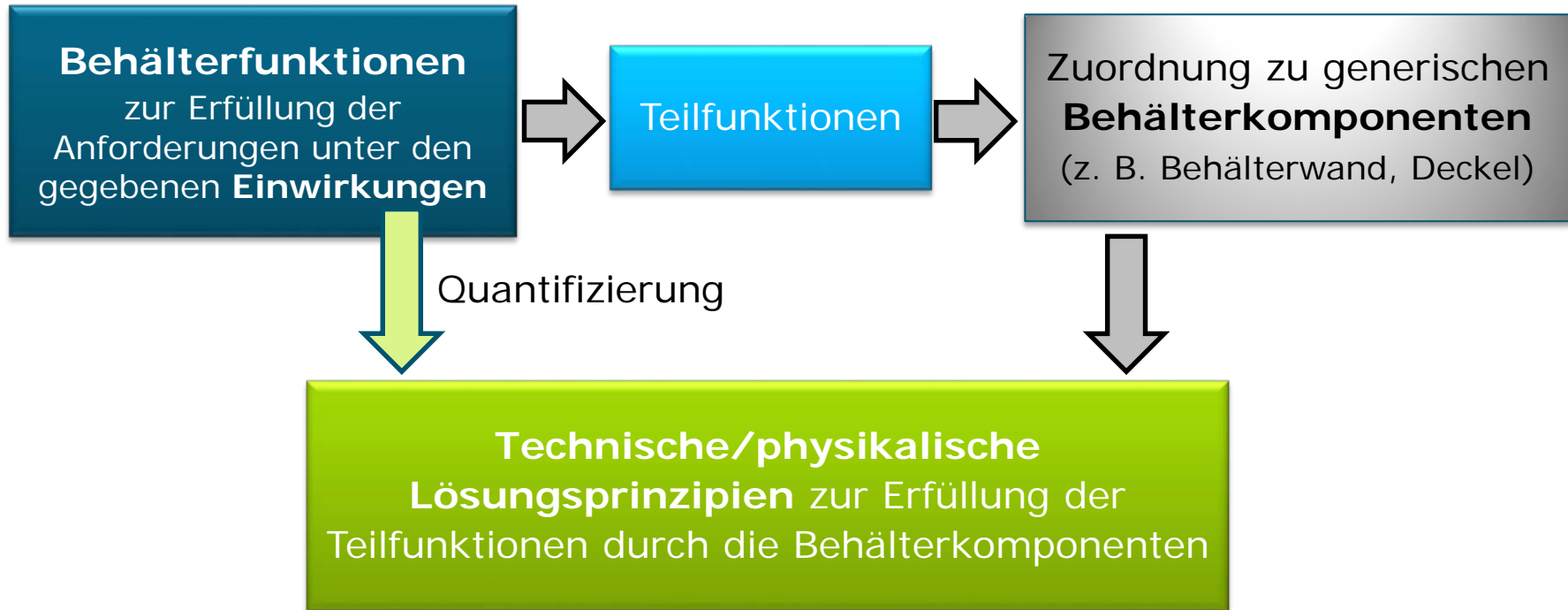
entwickelt für Wirtsgestein	Behälterkonzept (Entwickler)	Beschreibung	Stand der Entwicklung
Steinsalz	Referenzkonzept (Nagra, Schweiz)	unabgeschirmter, robuster Stahlbehälter für Brennelemente oder Kokillen	von RWM als mögliches Referenzkonzept für Endlagerbehälter im Salz in Betracht gezogen
	BSK-3 (GNS, Deutschland)	unabgeschirmte Stahlkokille für die Bohrlochlagerung von gezogenen Brennstäben oder Kokillen	Konzept in FuE-Berichten entwickelt; Einlagerungstechnik an Dummy getestet
	POLLUX®-10 (GNS, Deutschland)	abgeschirmter Doppelhüllenbehälter (Stahl und Gusseisen) für gezogene Brennstäbe oder Kokillen	fortgeschrittenes Konzept (POLLUX®-8 als Prototyp gefertigt; Erprobung der Einlagerungstechnik)
--	Transport- und Lagerbehälter z. B. des Typs CASTOR® , (GNS, Deutschland)	abgeschirmte Transport- und Zwischenlagerbehälter aus Gusseisen oder Schmiedestahl für Brennelemente oder Kokillen	bestehende Behälter; Endlagereignung bisher nicht betrachtet



Schlussfolgerungen hinsichtlich bestehender Behälterkonzepte

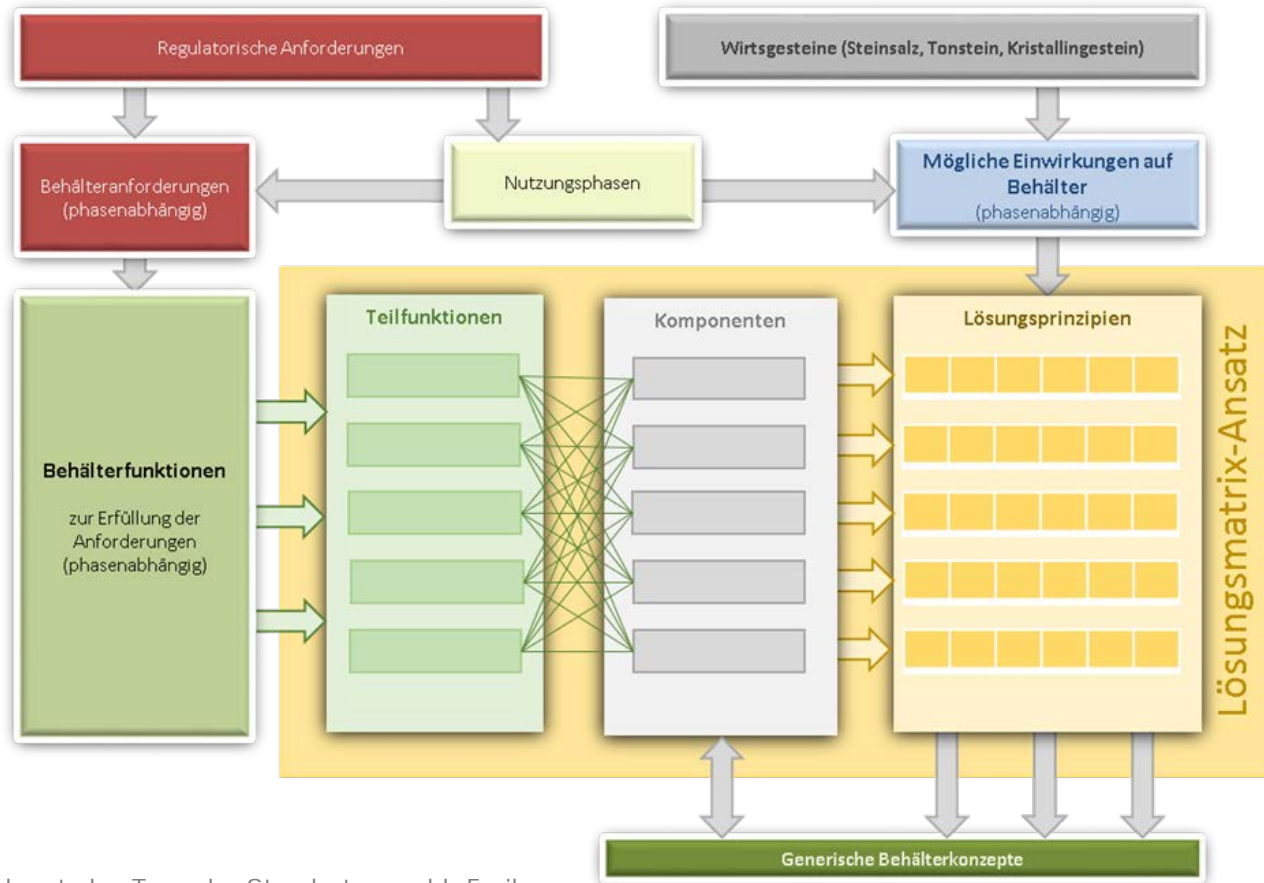
- Bislang existieren bislang überwiegend generische Behälterkonzepte.
- Bislang überwiegen qualitative Aussagen, basierend auf Hypothesen und argumentativen Erwägungen.
- Quantitative Aussagen zu Anforderungen und Einwirkungen sind nur eingeschränkt verfügbar.
- Es bestehen erhebliche Kenntnislücken bzgl. der quantitativen Einwirkungen auf Endlagerbehälter (standortabhängig) → FuE-Bedarf.
- Für Transport- und Lagerbehälter (TLB) besteht erheblicher zusätzlicher Nachweisbedarf; wichtig hierbei ist deren Langzeitbeständigkeit.
- Die Forderung nach Bergbarkeit besteht ausschließlich in D und wurde noch bei keinem Behälterkonzept betrachtet.

5.2 Entwicklung generischer Behälterkonzepte



5.2 Entwicklung generischer Behälterkonzepte

Lösungsmatrix zur Entwicklung generischer Behälterkonzepte



Schlussfolgerungen hinsichtlich generischer Behälterkonzepte

- Durch die Erfüllung aller Teilfunktionen durch die Komponenten erfüllt das Behälterkonzept als Summe der Komponenten auch die Summe der Teilfunktionen.
- Nicht jede freie Kombination von Lösungsprinzipien bietet eine gleichermaßen gute qualitative oder quantitative Erfüllung aller Anforderungen.
- Wechselwirkungen sind zu berücksichtigen.
- Der Optimierungsprozess beinhaltet Gewichtung der Teilfunktionen und Verfügbarkeit von Materialien und (Fertigungs-)Technologien → Erprobungs- und Testprogramme.
- Der systematischen und nachvollziehbaren Optimierung und Einengung geeigneter Behälterkonzepte kommt eine entscheidende Bedeutung zu; dazu ist eine systematische Herleitung und Darstellung von Gewichtungsfaktoren und Optimierungsprozessen notwendig.

- Der im FuE-Vh KoBrA entwickelte Top-Down-Ansatz ermöglicht eine systematische Herleitung geeigneter Behälterkonzepte im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für alle drei Wirtsgesteine; Grundlage dafür sind:
 - eindeutig definierte **Anforderungen** an die Endlagerbehälter unter Berücksichtigung von Rückholbarkeit und Bergbarkeit (Regelwerk),
 - **standortspezifische Einwirkungen** auf Endlagerbehälter (geologische Datenbasis, ggf. abdeckend),
 - Konkretisierung der **betriebsbedingten Einwirkungen** auf die Endlagerbehälter im Zusammenspiel mit der Entwicklung geeigneter Endlagerkonzepte (ggf. abdeckend),
 - Herleitung einer Methodik zur Festlegung von Auswahl- und Entscheidungskriterien für geeignete Endlagerbehälterkonzepte unter Berücksichtigung der Anforderungen an Transparenz und zeitlichen Rahmen des Standortauswahlverfahrens.

- Erste Einschätzung der Eignung bereits entwickelter Behälterkonzepte (national (z. B. POLLUX®), international, TLB) → in allen Fällen sind signifikante Anpassungen und weitergehende Nachweise erforderlich.
- Die allg. Temperaturbegrenzung auf 100°C führt für die Mehrzahl der in D bislang betrachteten Behälterkonzepte zu einem erheblichen Anpassungsaufwand.
- Die Forderung nach Bergbarkeit ist für alle Behälterkonzepte mit offenen Fragestellungen verbunden, die hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit teilweise auslegungbestimmend sein dürften.
- Der entwickelte Lösungsansatz für neue Behälterkonzepte eröffnet eine sehr große Variantenvielfalt, deren schrittweise Optimierung und Einengung nachvollziehbar und transparent erfolgen muss.

- Vor dem Hintergrund des engen Zeitrahmens des Standortauswahlverfahrens sollten robuste Behälterkonzepte auf Grundlage möglichst bereits entwickelter und erprobter Werkstoffe und (Fertigungs-)Technologien, die sich zuverlässig, qualitäts- und termingerecht in der benötigten großen Stückzahl herstellen lassen, bevorzugt werden.

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und dem Projektträger Karlsruhe (PTKA) für die Förderung der diesem Vortrag zugrunde liegenden Arbeiten im Rahmen des FuE-Verbundvorhabens KoBrA unter den Förderkennzeichen 02E11527 und 02E11537