

# **Sicherheitsgerichtete Abwägung von Teilgebieten im Standortauswahlverfahren – Empfehlungen aus dem Vorhaben RESUS**

Jörg Mönig

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH  
Theodor-Heuss-Str. 4, 38122 Braunschweig, Germany

3. Fachworkshop der BGE  
Tage der Endlagerung, Braunschweig, 13.12.2019

## Das Vorhaben RESUS

Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle

Start: 01.06.2018

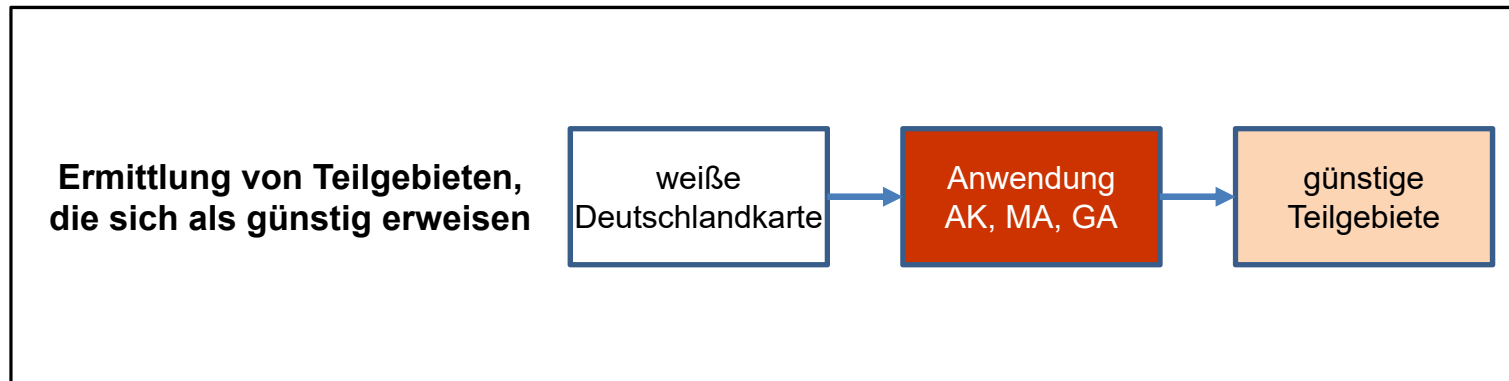
### Projektpartner

- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- BGE TECHNOLOGY



An den inhaltlichen Arbeiten waren über 30 Personen beteiligt

## Schritte im Standortauswahlverfahren



# Ausschlusskriterien & Mindestanforderungen

## Ausschlusskriterien

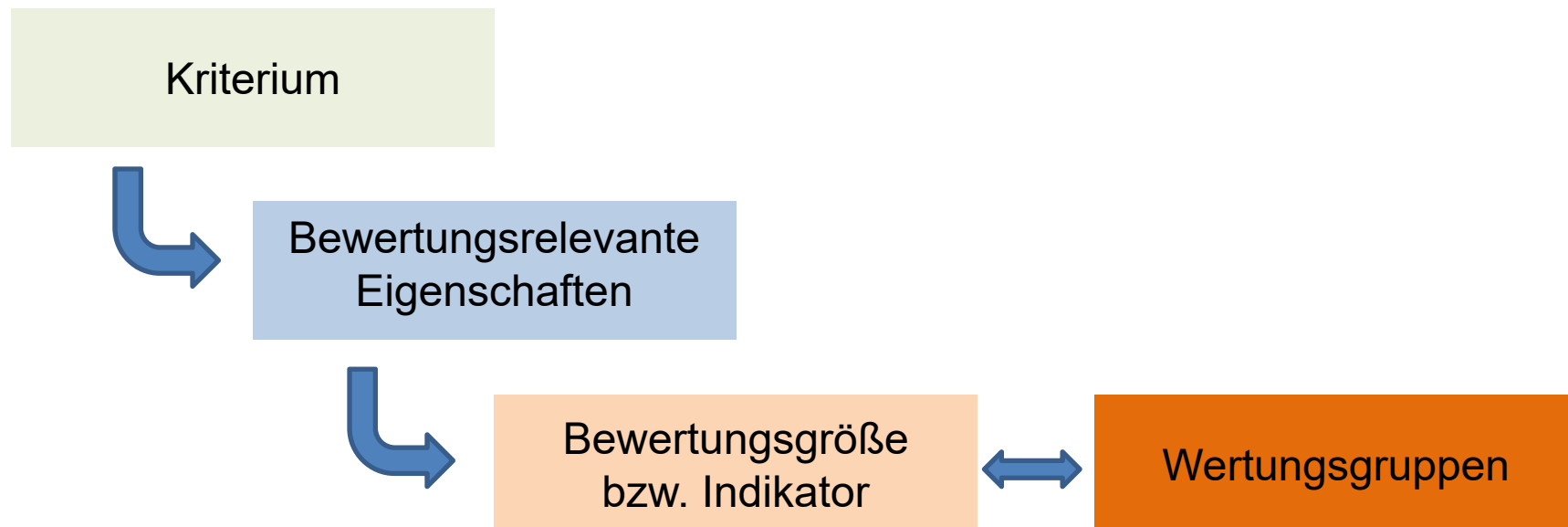
- Großräumige Vertikalbewegungen zu erwarten ( $> 1\text{mm/a}$ )
- Aktive Störungzonen
- Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer Bergbautätigkeit
- Seismische Aktivität  
(seismische Gefährdung  $>$  Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01)
- Vulkanische Aktivität  
(es liegt quartärer Vulkanismus vor oder ist zu erwarten)
- Grundwasseralter  
(Nachweis junger Grundwässer)

## Mindestanforderungen

- Gebirgsdurchlässigkeit im ewG  $< 10^{-10}\text{ m/s}$
- Mächtigkeit des ewG  $> 100\text{ m}$
- Minimale Tiefe des ewG  $> 300\text{ m}$  unter GOK
- Fläche des Endlagers  
(ewG muss eine flächenhafte Ausdehnung aufweisen, die Realisierung des Endlagers ermöglicht)
- Erhalt der Barrierewirkung  
(keine Erkenntnisse/Daten, die Integrität des ewG über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren in Frage stellen)

## Geowissenschaftliche Abwägungskriterien: § 24 StandAG

§ 24 Stand AG Abs.1: Anhand geowissenschaftlicher Abwägungskriterien wird jeweils bewertet, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich nach einer **sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien**. Die in den Absätzen 3 bis 5 aufgeführten Kriterien dienen hierbei als Bewertungsmaßstab.

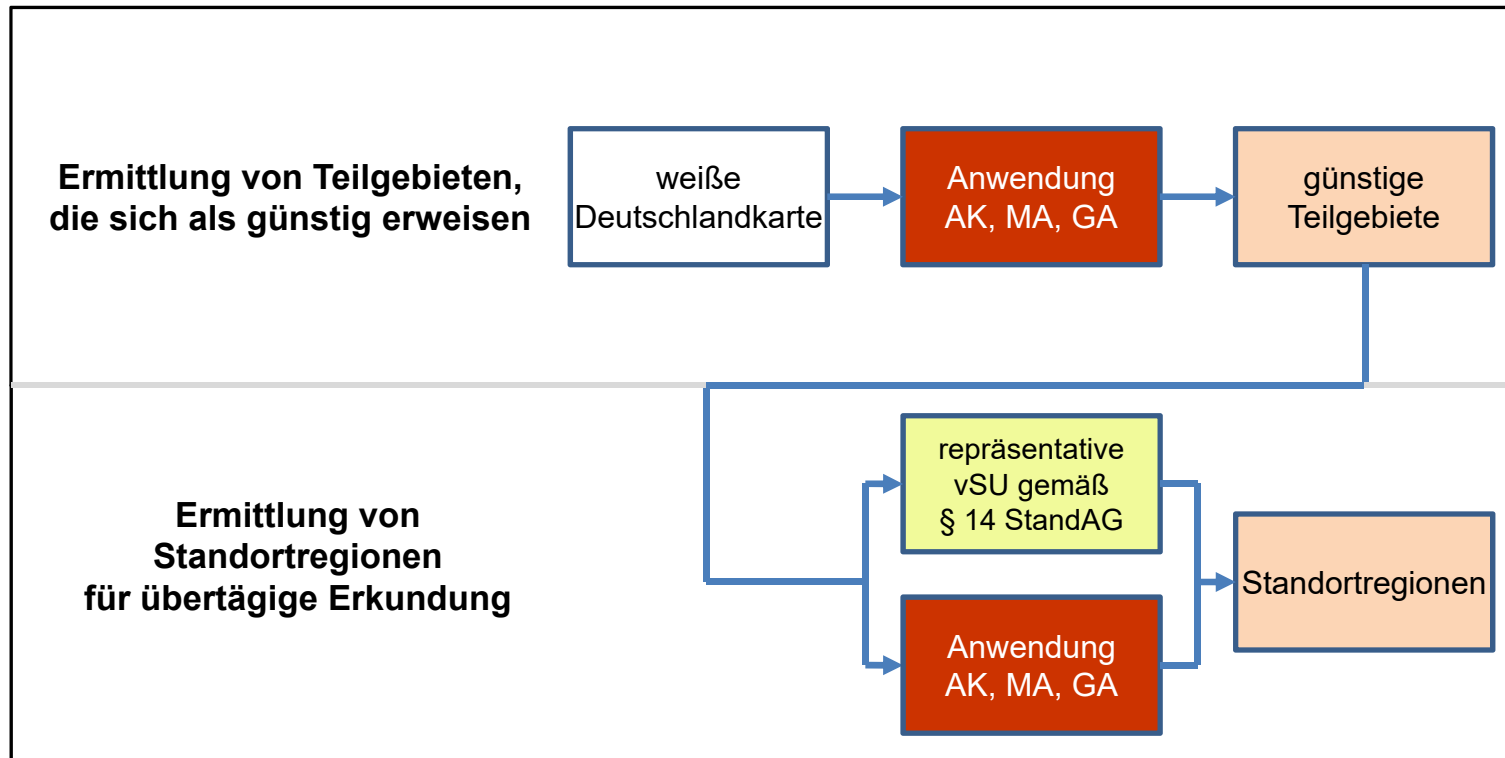


## Anlage 1 zu §24 Absatz 3 StandAG

- Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch GW-Bewegungen im ewG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1
Grundwasserangebot	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	< 10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>-10</sup>	> 10 <sup>-10</sup>
Diffusionsgeschwindigkeit	Diffusionskoeffizient [m <sup>2</sup> /s]	< 10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-11</sup> – 10 <sup>-10</sup>	> 10 <sup>-10</sup>
Diffusionsgeschwindigkeit (Ton)	Absolute Porosität	< 20%	20% - 40%	> 40%
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

# Schritte im Standortauswahlverfahren



# Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Erreichbare Qualität des RN-Einschlusses & Robustheit des Nachweises

- Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegung im ewG
- Konfiguration der Gesteinskörper
- Räumliche Charakterisierbarkeit
- Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse

Absicherung des Isolationsvermögens

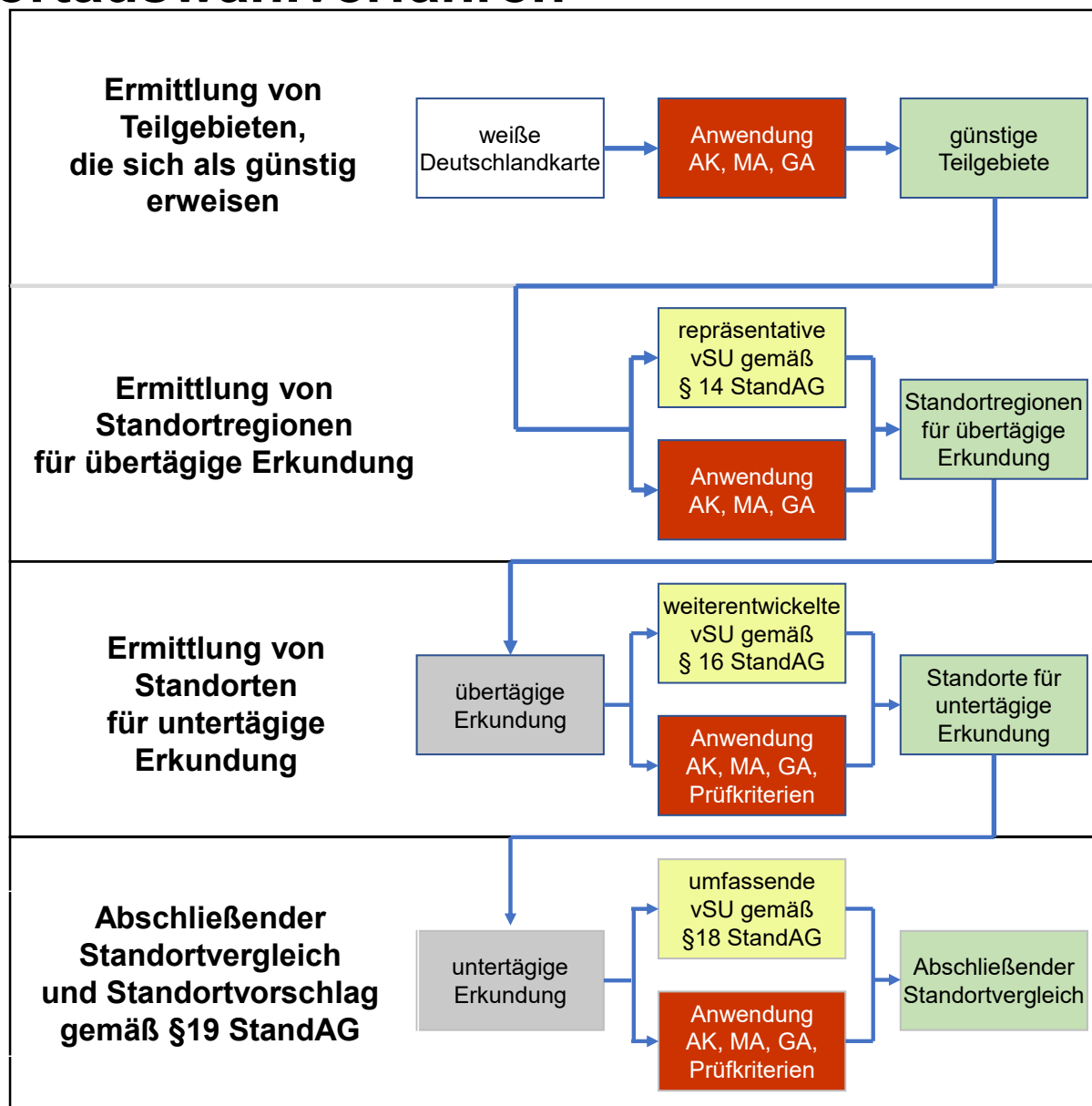
- Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften
- Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Gasbildung
- Temperaturverträglichkeit
- Rückhaltevermögen im ewG
- Hydrochemische Verhältnisse
- Schutz des ewG durch das Deckgebirge



# Standortauswahlverfahren



## Zielsetzungen RESUS (1)

Durchführung von „prototypischen“ vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für Endlagersysteme in allen drei in Frage kommenden Wirtsgesteine

- auf Basis typischer geologischer Situationen für das Wirtsgestein in D
- Art und Menge der radioaktiven Abfälle
- Sicherheitskonzept für das Endlagersystem
- Technisches Endlagerkonzept
- Grundzüge des Nachweiskonzeptes
  - Numerische Analysen zu einigen Elementen des Sicherheitsnachweises

Rückgriff auf Erkenntnisse aus F&E-Vorhaben der letzten 10 Jahre  
(ISIBEL, VSG, AnSichT, CHRISTA-I, KONEKD)

## Betrachtete Endlagersysteme

Endlager-system	Geologische Formation	Einlagerung der Endlagerbehälter	Auslegungstemperatur
S1	Flach lagernde Salzformationen	Streckenlagerung	100 °C
S2	Steil lagernde Salzformationen	Vertikale Bohrlochlagerung	100 °C
S3	Flach lagernde Salzformationen	Streckenlagerung	150 °C
T1	Tongestein größerer Mächtigkeit	Vertikale Bohrlochlagerung	100 °C
T2	Tongestein geringerer Mächtigkeit	Streckenlagerung	100 °C
T3	Tongestein geringerer Mächtigkeit	Streckenlagerung	150 °C
K1	Kristallingestein mit mehreren ewG	Vertikale Bohrlochlagerung	100 °C
K2	Kristallingestein mit überlagernder Salzformation	Streckenlagerung	100 °C
K3	Kristallingestein mit überlagernder Tonformation	Streckenlagerung	100 °C
K4	Kristallingestein mit Einschluss durch technische & geotechnische Barrieren	Vertikale Bohrlochlagerung	100 °C

## Zielsetzungen RESUS (2)

Bewertung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die Sicherheitsaussage (qualitative Einschätzung / Ergebnisse numerischer Analyse)

### Ableitung von Empfehlungen

- zur Aggregation der Einzelbewertungen der Indikatoren zu einer Gesamtaussage für das Kriterium
- zur Aggregation der Kriterienbewertungen zu einer Gesamtaussage für das betrachtete Endlagersystem

### Herausforderungen

- bei drei Kriterien Wertungsgruppe „ungünstig“ statt „weniger günstig“ (Anl. 3, 4, 11 zu §24 StandAG)
- bei manchen Kriterien gibt es nur zwei Wertungsgruppen
- bei manchen Kriterien gibt es nur qualitative Beschreibungen für die Bewertung
  - z.T. ohne Wertungsgruppen

## Sicherheitsuntersuchungen im Vorhaben RESUS

Beschreibung einer „typischen“ geologischen Situation in Deutschland mit Angabe von Kennwerten

- keine konkreten Standorte betrachtet

Angabe der zu berücksichtigenden radioaktiven Abfälle

Sicherheitskonzept für das jeweilige Endlagersystem

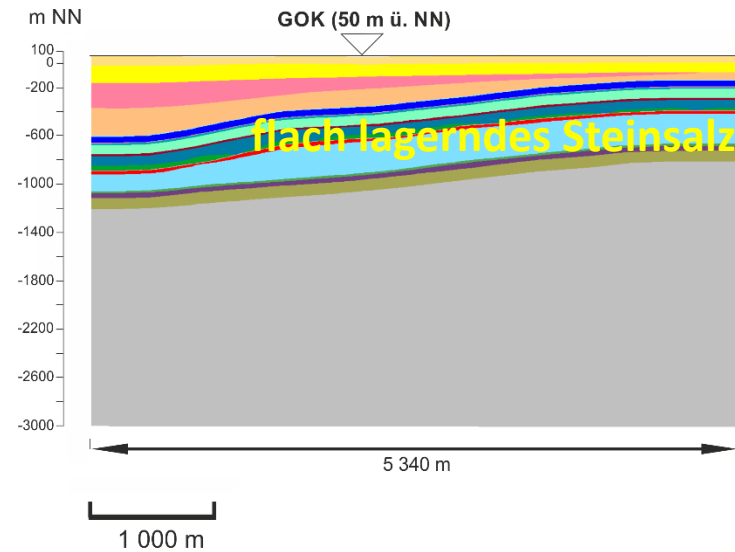
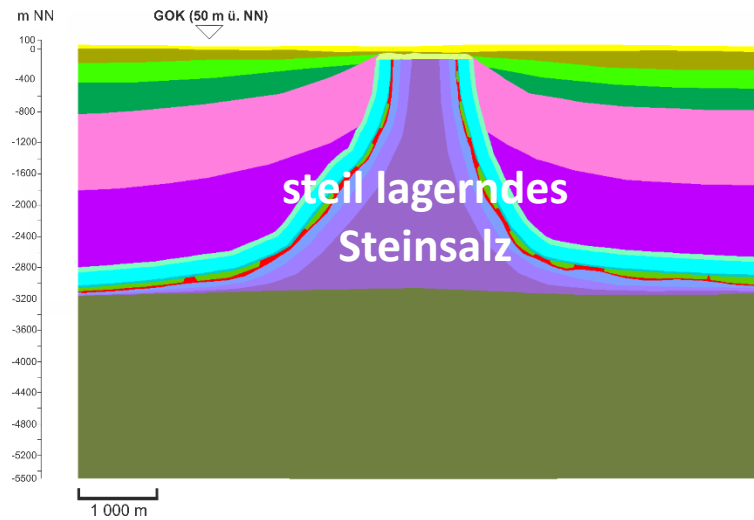
technisches Endlagerkonzept inkl. Auslegung des Grubengebäudes und Verfüll- und Verchlusskonzept

Beschreibung der zu erwartenden Entwicklung und möglicher abweichender Entwicklung (keine Szenarienanalyse)

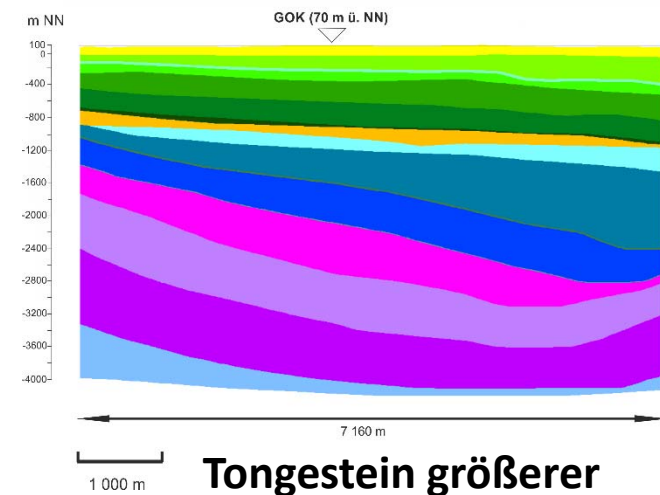
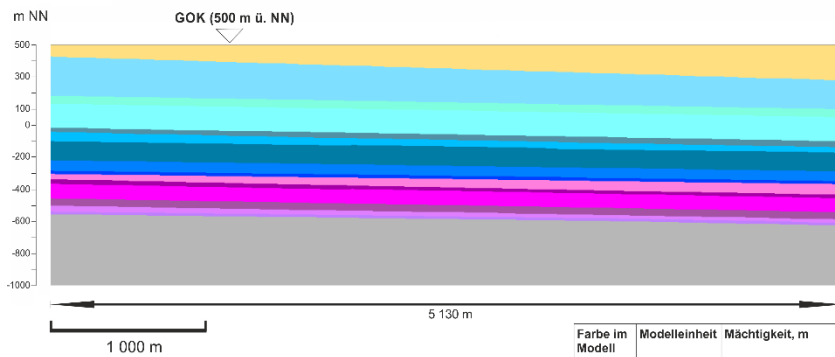
Quantitative Analysen

- Analyse der Barrierenintegrität (geologische Barriere / technische Barriere bei K4)
- Analyse der Einschusswirkung für Radionuklide

# Beispiele für betrachtete geologische Situationen



## Tongestein geringerer Mächtigkeit



## Tongestein größerer Mächtigkeit

## Menge radioaktiver Abfälle in Deutschland ist bekannt

				Brennelemente	tSM
ausgediente Brennelemente von Leistungsreaktoren	DWR	UO2		12.450	6.415
		MOX		1.530	765
	SWR	UO2		14.350	2.465
		MOX		1.250	220
WWER	UO2		5.050	580	
gesamt					10.445
Abfälle aus der Wiederaufbereitung ausgedienter Brennelemente	CSD-V	Areva NC (F)		3.025 Behälter	
		Sellafield (UK)		570 Behälter	
		VEK (G)		140 Behälter	
	CSD-B	Areva NC (F)		308 Behälter	
	CSD-C	Areva NC (F)		4.104 Behälter	
	gesamt			8.147 Behälter	
Brennelemente von Forschungs- und Prototypreaktoren					

## Menge radioaktiver Abfälle in Deutschland ist bekannt

				Brennelemente	tSM
ausgediente Brennelemente von Leistungsreaktoren	DWR	UO2		12.450	6.415
		MOX		1.530	765
	SWR	UO2		14.350	2.465
		MOX		1.250	220
WWER	UO2		5.050	580	
gesamt					10.445
Abfälle aus der Wiederaufbereitung ausgedienter Brennelemente	CSD-V	Areva NC (F)		3.035 Behälter	
		Sellafield (UK)		570 Behälter	
		VEK (G)		140 Behälter	
	CSD-B	Areva NC (F)		308 Behälter	
	CSD-C	Areva NC (F)		4.104 Behälter	
	gesamt			8.147 Behälter	
Brennelemente von Forschungs- und Prototypreaktoren					

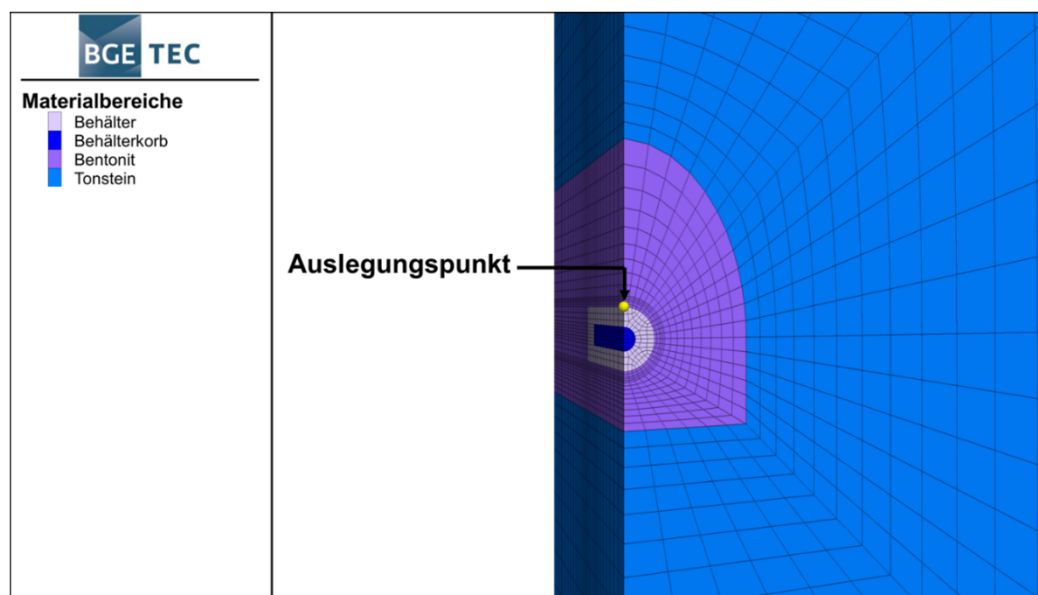


# Technisches Endlagerkonzept

## Bestimmende Aspekte

- Art und Menge der radioaktiven Abfälle
- Einlagerungskonzept (Streckenlagerung / Bohrlochlagerung)
- Auslegungstemperatur (in der Regel 100 °C gemäß § 27 Abs. 4 Stand AG)

- Betriebssicherheit
- bergbauliche Anforderungen
- Rückholbarkeit



# Auslegungstemperatur - Stellgrößen

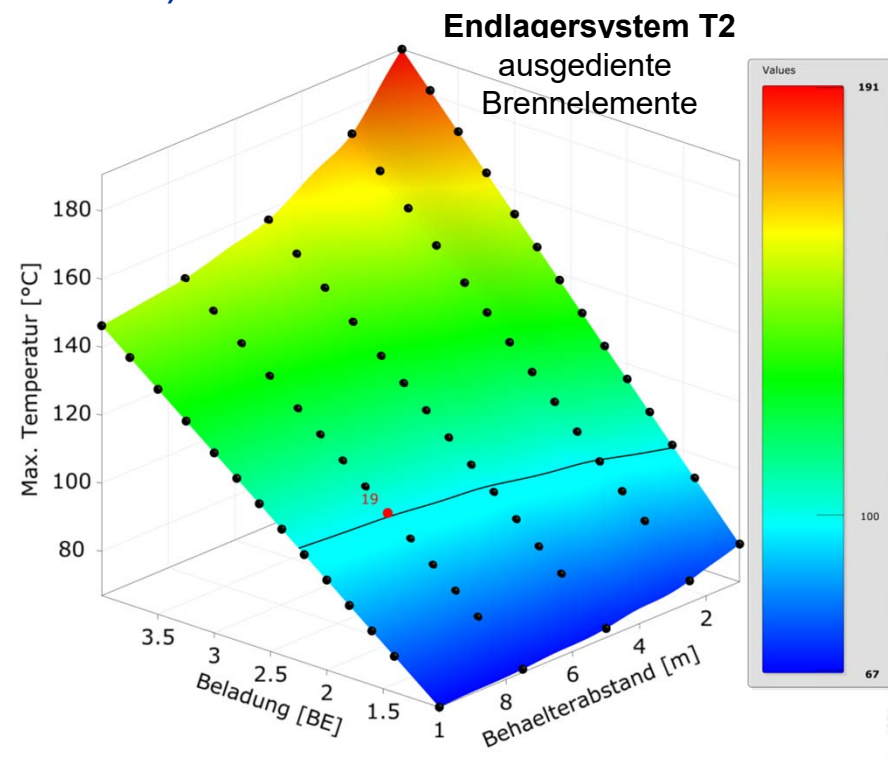
- Wärmeleistung eines Endlagerbehälters (Beladung)
  - Einlagerungsbeginn 2050, Einlagerungsdauer 30 Jahre
- Abstand der Endlagerbehälter in einer Einlagerungsstrecke / Bohrloch
- (Abstand der Einlagerungsstrecken / Bohrlöcher)

Ziel war Minimierung der Anzahl der Endlagerbehälter

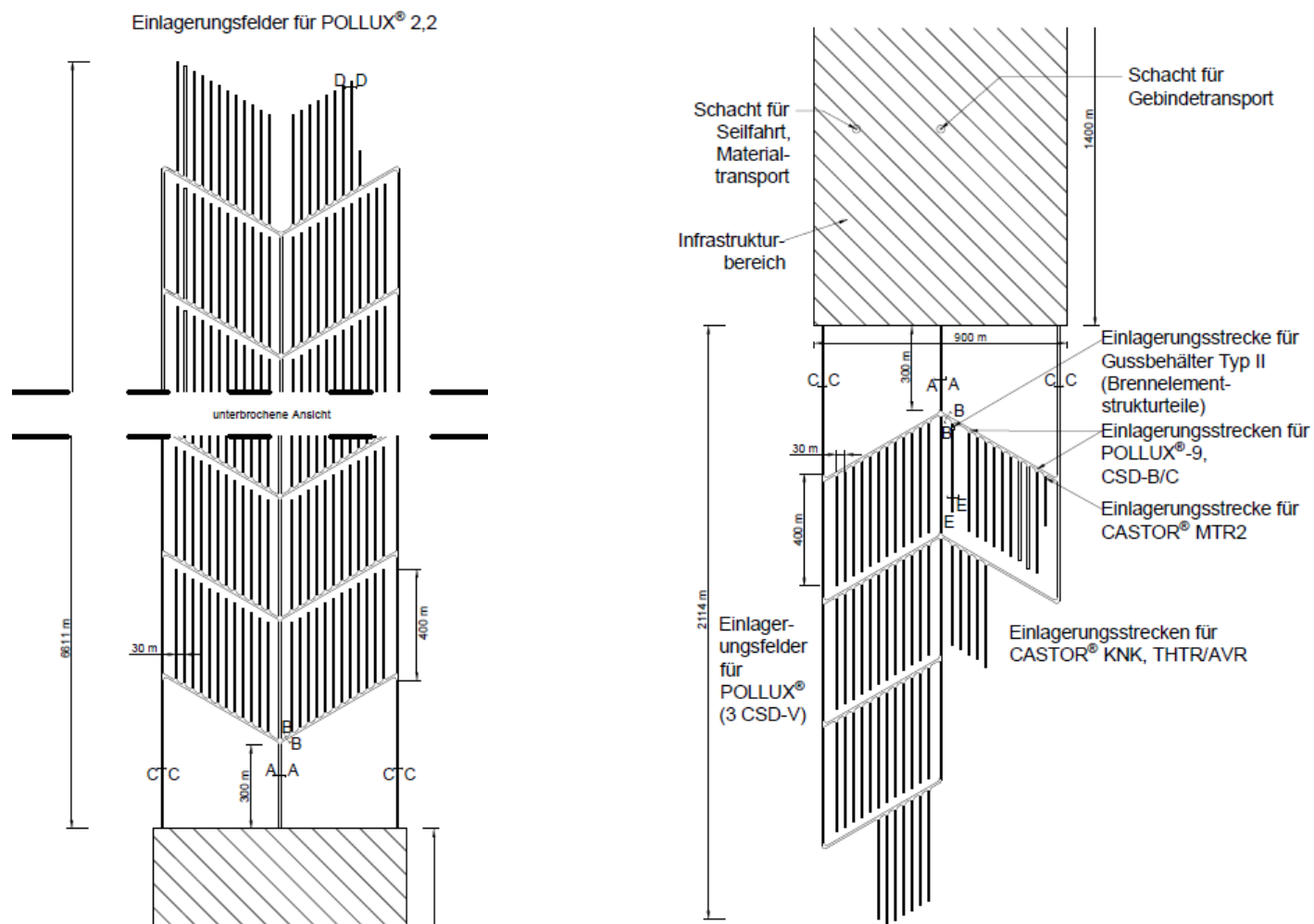
## Endlagersystem T2

(BE / Abfälle Wiederaufarbeitung)

- Behälterabstand = 7,5 m / 10 m
- Beladung = Brennstäbe von 2,2 BE / drei Ko
- Abstand der Einlagerungsstrecken = 30 m



# Anordnung des Grubengebäudes – Endlagersystem T2



# Bewertung der Barrierenintegrität

## Verwendete Indikatoren

- Dilatanz
- Fluiddruck
- Temperatur (bezogen auf eine wirtsgesteinsspezifische Grenztemperatur)
- Advektion (nur bei Tongestein)

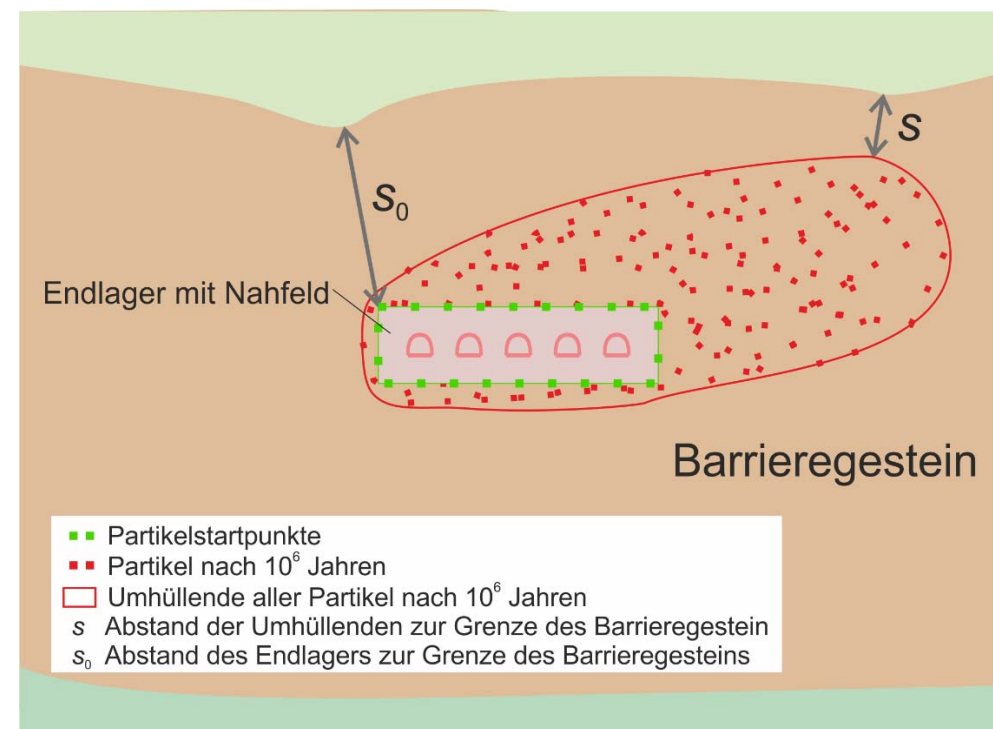
# Indikator Advektion - Bewertung der Integrität geol. Barriere

Indikator gilt als eingehalten, wenn ein gelöster konservativer Tracer innerhalb des Nachweiszeitraums nicht allein auf Grund der Bewegung des Porenwassers vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden kann (Berechnung über Partikel-Tracking)

$$\text{Indikator Advektion} = \begin{cases} 1 - \frac{s}{s_0} & \text{wenn } s > 0 \\ \frac{10^6 a}{t'} & \text{wenn } s = 0 \end{cases}$$

$s_0$ : kleinster Abstand zwischen dem Nahfeld und der äußeren Begrenzung des Barrieregesteins

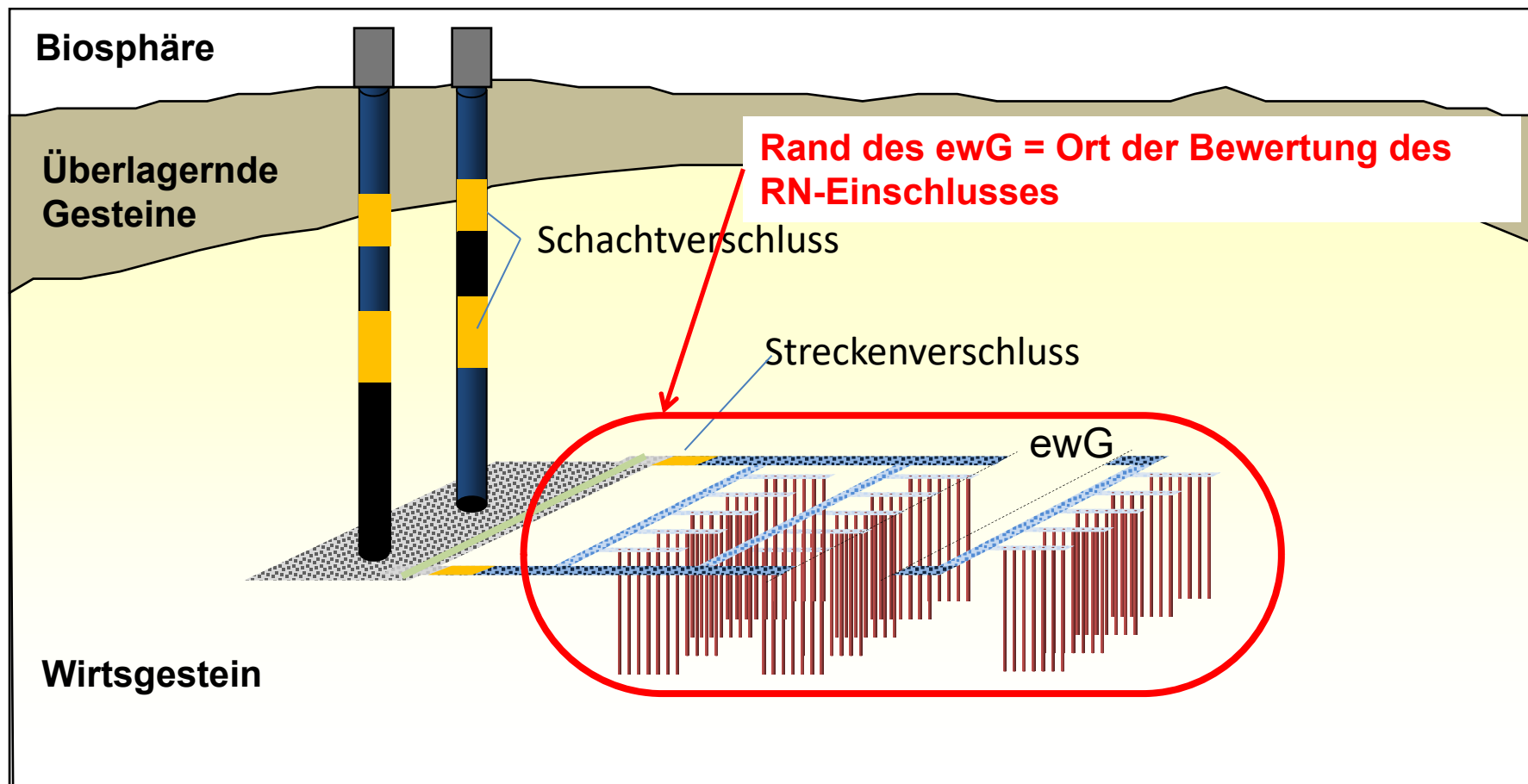
$s$ : kleinster Abstand zwischen der Umhüllenden und der äußeren Begrenzung des Barrieregesteins



Ergebnisse Endlagersystem T2

# Bewertung des Radionuklideinschlusses

- Umwandlung des berechneten RN-Flusses (an einem Punkt / Oberfläche) in eine virtuelle Strahlenexposition, die auf Grenzwerte normalisiert wird → RGI

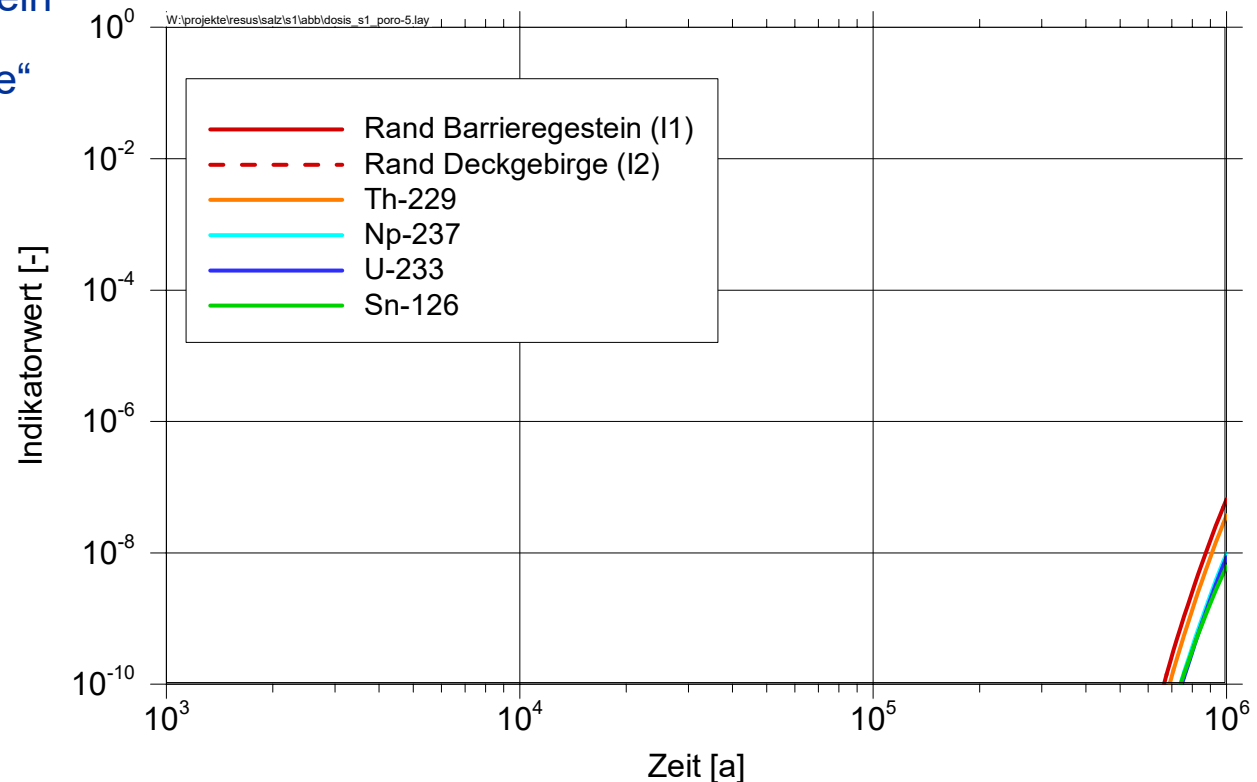


# Radionuklideinschluss beim Endlagersystem T1

## Ergebnisse für zu erwartende Entwicklung

### Zwei Indikatoren

- I1 = Rand Barrieregestein
- I2 = Rand „Deckgebirge“ (nächster Aquifer in Transportrichtung nach ewG)



# Ergebnisse zu den geowiss. Abwägungskriterien

## Grundsätze für die Aggregation – Empfehlungen

- Liegen keine Daten/Informationen für den Betrachtungsraum vor, werden die günstigsten Ausprägungen für die Bewertungsgröße (den Indikator) unterstellt
- Eine ungünstige Bewertung eines Einzelkriteriums führt nicht zum Ausschluss des Betrachtungsraums aus dem Standortauswahlverfahren
  - Begr. zu §24, Abs. 1; Drucksache 18/11398: „Dabei ist ein einzelnes Abwägungskriterium ist nicht hinreichend, um die günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen.“
  - wird auch auf Indikatorebene angewendet



## Empfehlungen zur Aggregation der Kriterienergebnisse

Gehören mehrere Indikatoren zu einer bewertungsrelevanten Eigenschaft eines Kriteriums, dann werden diese vor der Bewertung des Kriteriums zu einer Bewertung der bewertungsrelevanten Eigenschaft aggregiert

- z.T. spezifische Empfehlungen für die Aggregation von Indikatoren bei einzelnen Kriterien

Für jedes der elf Abwägungskriterien in den Anlagen zu § 24 StandAG erfolgt eine eigene Bewertung an Hand seiner bewertungsrelevanten Eigenschaften

Für die Bewertungen der bewertungsrelevanten Eigenschaften der Kriterien werden dieselben Wertungsgruppen wie auf der jeweiligen Indikatorebene verwendet

## Empfehlungen zur Aggregation der Kriterienergebnisse

Die Wertungsgruppe „ungünstig“ wird für die Aggregation generell nicht als „Ausschlusskriterium“ interpretiert, sondern der Wertungsgruppe „weniger günstig“ gleichgesetzt

Die Aggregation der Einzelbewertungen der Kriterien erfolgt verbalargumentativ, es erfolgt keine mathematische Gewichtung der Kriterien

Das Aggregationsschema muss sicherstellen, dass nicht ein Kriterium allein das Gesamturteil bestimmen kann

Kriteriengruppe 1 ist für eine sicherheitsgerichtete Abwägung höher zu bewerten als die Kriteriengruppen 2 und 3

## Beispiele für Ergebnisse der Einzelbewertung von Kriterien

Endlager- system	S1 flach lagerndes Steinsalz	S2 steil lagerndes Steinsalz	T1 Tongestein größerer Mächtigkeit	T2 Tongestein geringerer Mächtigkeit
<b>Erreichbare Qualität des RN-Einschlusses &amp; Robustheit des Nachweises</b>				
Kriterium 1	günstig	günstig	günstig	günstig
Kriterium 2	günstig	günstig	günstig	bedingt günstig
Kriterium 3	günstig	bedingt günstig	günstig	günstig
Kriterium 4	günstig	günstig	günstig	günstig
<b>Absicherung des Isolationsvermögens</b>				
Kriterium 5	günstig	günstig	nicht in günstig	nicht in günstig
Kriterium 6	günstig	günstig	günstig	günstig
<b>Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften</b>				
Kriterium 7	günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
Kriterium 8	günstig	günstig	günstig	günstig
Kriterium 9	weniger günstig	weniger günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
Kriterium 10	nicht in günstig	nicht in günstig	nicht in günstig	nicht in günstig
Kriterium 11	günstig	günstig	günstig	bedingt günstig

## Empfehlungen zur Aggregation der Kriterienergebnisse

		Kriteriengruppe 2 und 3		
		überwiegend geeignet	überwiegend bedingt geeignet	überwiegend weniger geeignet
Kriteriengruppe 1	überwiegend geeignet	geeignete geol. Bedingungen sind zu erwarten	geeignete geol. Bedingungen sind zu erwarten	geeignete geol. Bedingungen sind <b>nicht</b> zu erwarten
	überwiegend bedingt geeignet	geeignete geol. Bedingungen sind zu erwarten	geeignete geol. Bedingungen sind <b>nicht</b> zu erwarten	geeignete geol. Bedingungen sind <b>nicht</b> zu erwarten
	überwiegend weniger geeignet	geeignete geol. Bedingungen sind <b>nicht</b> zu erwarten	geeignete geol. Bedingungen sind <b>nicht</b> zu erwarten	geeignete geol. Bedingungen sind <b>nicht</b> zu erwarten

# Vielen Dank