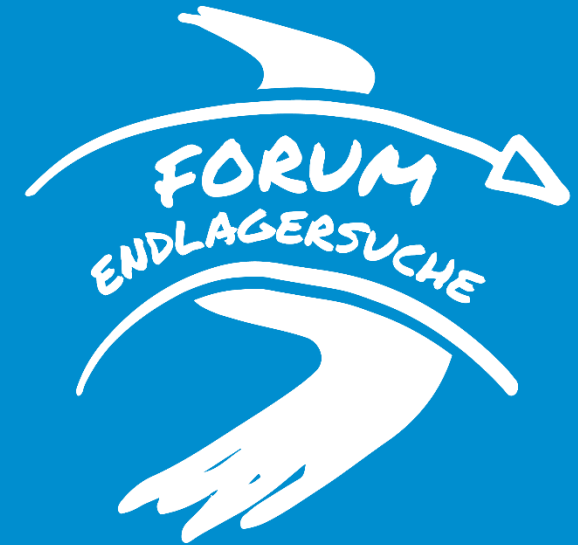


**AG 7**  
**Bürger:innen stärken die**  
**Endlagersicherheit – Das SAFE-**  
**Forschungsteam des Vorhabens**  
**TRANSENS**



im Rahmen des 2. Forums Endlagersuche



## Übersicht

Poster (1): Methodik: Sicherheitsuntersuchungen und Safety Case\*

Poster (2): Governance: Wer macht was bei den Sicherheitsuntersuchungen?\*

Feedback zu Methodik und Governance (Teilnehmende der Arbeitsgruppe)

Poster (3): Lange Zeiträume: Szenarien

Feedback zu Szenarien (Teilnehmende der Arbeitsgruppe)

Poster (4): Analoga als zusätzliche Argumente im Safety Case\*

Feedback zu Analoga (Teilnehmende der Arbeitsgruppe)

Poster (5): Modellierung: Barrierenintegrität\*

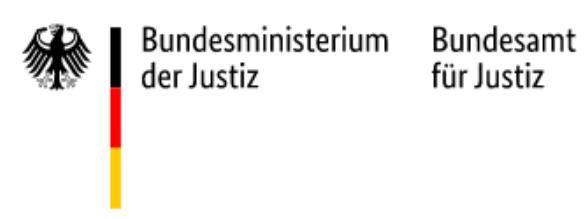
Poster (6): Dosisabschätzung durch radioökologische Modellierung\*

Feedback zur Modellierung

\*Erstellt von Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig (TU Clausthal) und dem SAFE-Forschungsteam des Vorhabens TRANSENS



## Sicherheitsuntersuchungen und Safety Case



### Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) § 1 Zweck des Gesetzes

[...] die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren [...]

Wie soll das gehen?

#### § 26 Sicherheitsanforderungen

...

#### § 27 Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen

...

Begründung zur einschlägigen Verordnung: „Die Regelungen [für Sicherheitsuntersuchungen] orientieren sich am international üblichen Vorgehen bei der Erstellung eines sog. „**Safety Case**“ und den entsprechenden Empfehlungen der Endlagerkommission.“

(Deutscher Bundestag Drucksache 19/19291)

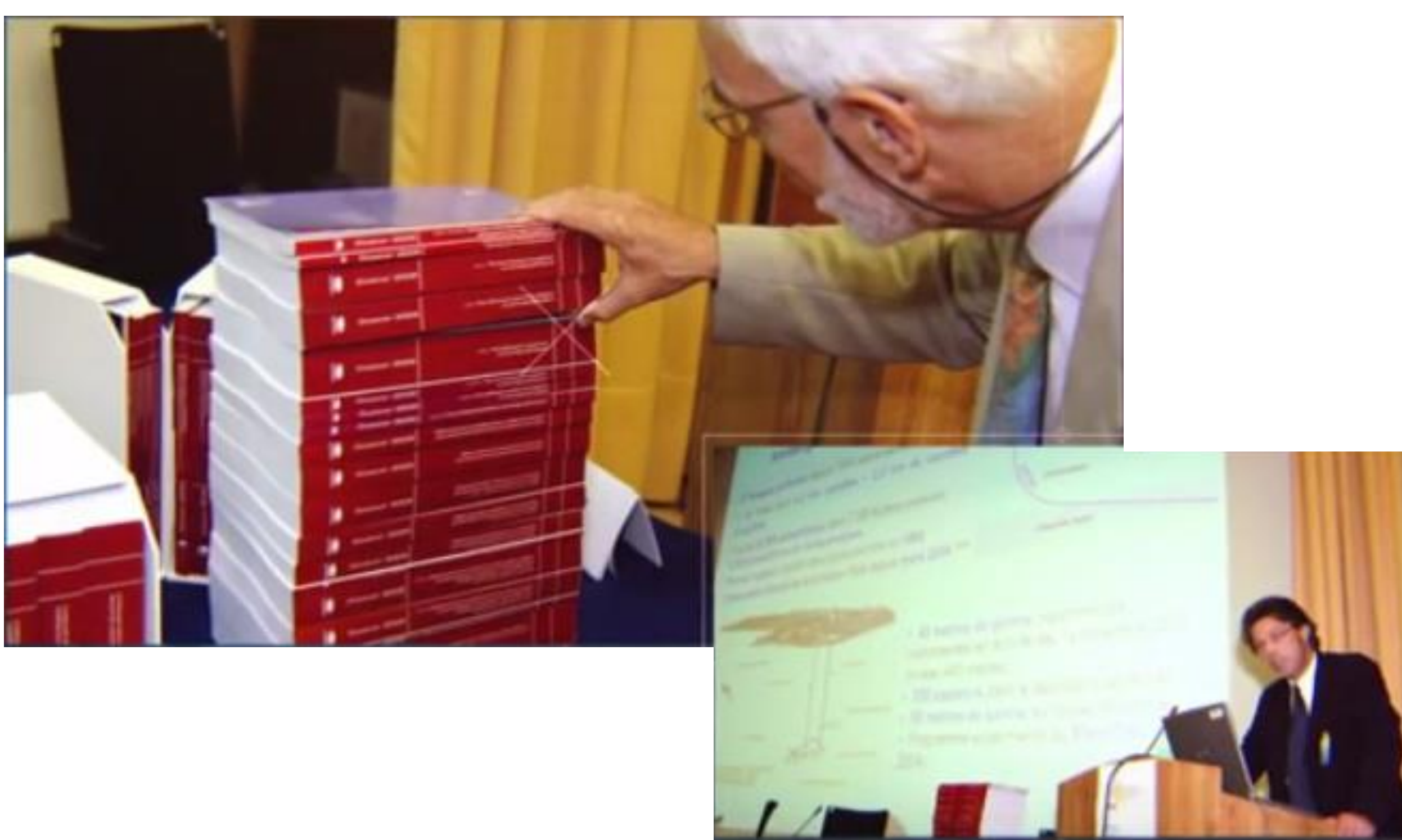


<https://www.faz.net/aktuell/feuilleton/endlager-suche-die-hybris-11542026.html>

## Was also ist ein „Safety Case“? → Berichtswerk und Methodik

## Safety Case: Kernelemente und Ablauf (vereinfacht)

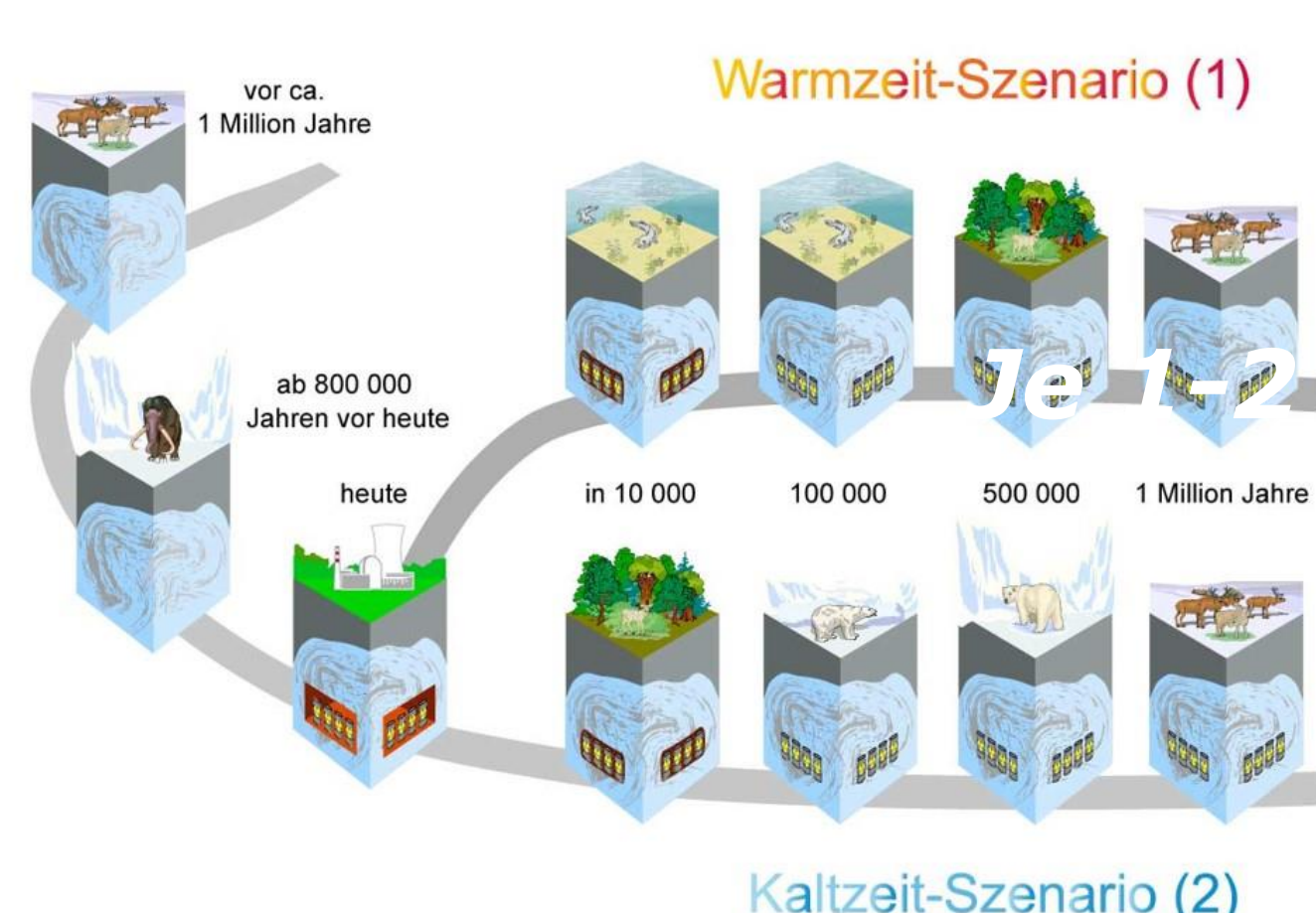
Nach OECD/NEA 2008, 2012, GRS 2013



Screenshot: www.andra.fr / YouTube

- Abfall: Was, wieviel?
- Prinzipien und Regeln (z. B. Sicherheitsanforderungen)
- Geologie: Wie ist der Standort beschaffen, wie wird er sich entwickeln?
- Konzepte und technische Umsetzung (inkl. Errichtung/Betrieb/Verschluss)
- Wie kann sich das System entwickeln („Szenarien“)? **Station 2**
- Wie werden die Barrieren funktionieren („Integrität“)? Könnten Schadstoffe freigesetzt werden? Wie viele?
  - Analoga / Argumente **Station 3**
  - Computersimulationen → Indikatoren **Station 4**
- Was ist bekannt, was (noch?) nicht?
- Synthese: Können Anforderungen eingehalten werden? Wie ist weiter vorzugehen? Was ist noch zu klären / zu verbessern (Erkundung, Forschung, Entwicklung)?

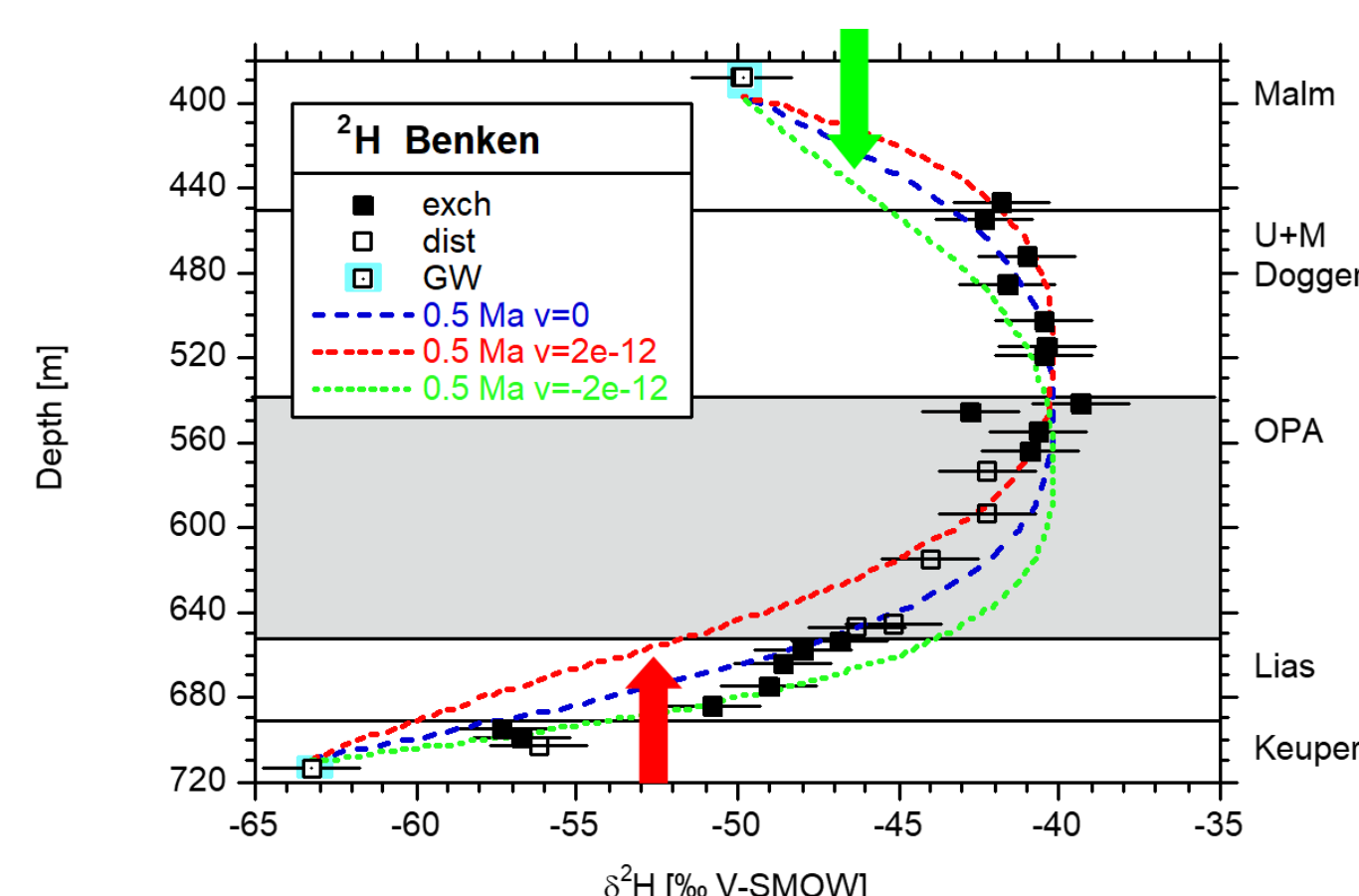
### Station „Szenarien“



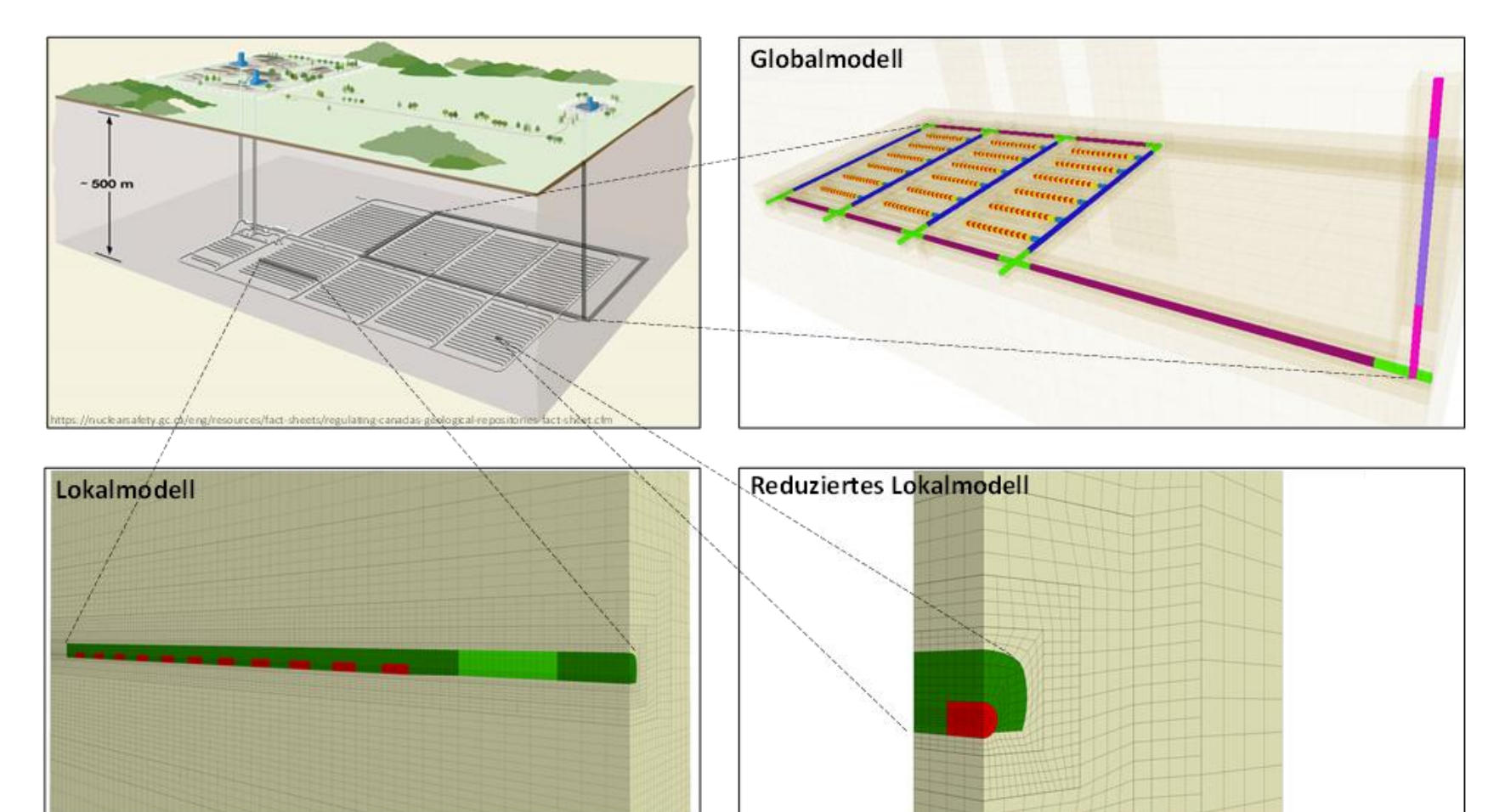
BGR 2010: [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Langzeitsicherheit/Szenarien/szenarien\\_klima.html?nn=1542224](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Langzeitsicherheit/Szenarien/szenarien_klima.html?nn=1542224)

Schaubild Analogon. Original-Abbildung darf aus urheberrechtlichen Bildern nicht reproduziert werden.

### Station „Analoga und Argumente“



### Station „Simulationen → Indikatoren“



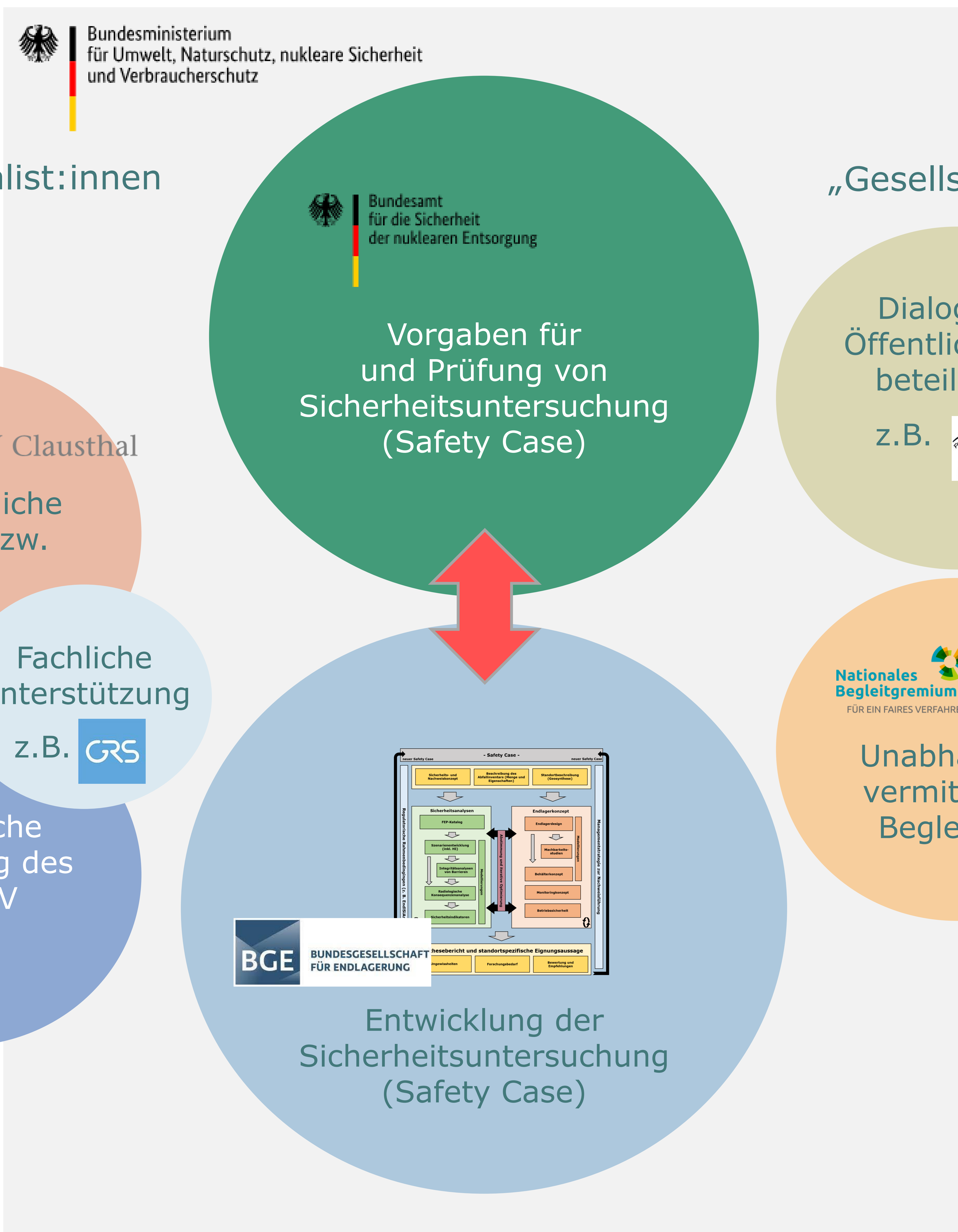
**Und nun: Ihre Fragen, vor allem aber Ihre Kritik!**





Governance: Wer macht was bei den Sicherheitsuntersuchungen?

Wahlberechtigte, Parlament und Regierung



Was kann und soll die interessierte Öffentlichkeit zur Sicherheit beitragen?  
 Wie schätzen Sie die bisherige Aufgaben- und Rollenteilung ein?  
 Haben Sie Vorschläge für den weiteren Verlauf der Standortsuche?



Hinweis:

Mit der Zeit werden aus interessierten Bürgern "Fachleute".  
Wie weit die Bürger-Fachleute von den Berufs-Fachleute akzeptiert werden ist sehr unterschiedlich

- Informationsfluß muß in beide Richtungen erfolgen  
(siehe Postbox Base ↔ Gesellschaft)

unterschiedlichen Wissensbeständen

levels  
inbegriffen

Ethische Fragen  
→ ebenso wichtig

→ abgestuft darstellen  
(z.B. leichte Sprache)

- Stärkung der wissenschaftlichen Ausbildung mit interdisziplinären Studiengängen um mehr Fachkräfte zu gewinnen
- Kompetenzverlust auf allen Ebenen vermeiden

Mengen gerüst ist fragwürdig

→ Urenco Abfälle } Unbegrenzte Laufzeit  
→ BE Fabrik Lingen }

→ Forschungsstrukturen - 11 -

→ Morsleben Kobalt = muss raus

→ ASse II - GUS = Wohin?  
Passen alle Gesteinsformationen? oder  
→ nur SALZ?

→ Falls Schicht KORBAD  
scheitert → plus 300.000 m<sup>3</sup>

→ 1 Mio Jahre, wo findet man Lagerstätten?  
Migration

→ Co-Disposal  
Forschung forcieren

Wissen vernetzen  
Forschung?

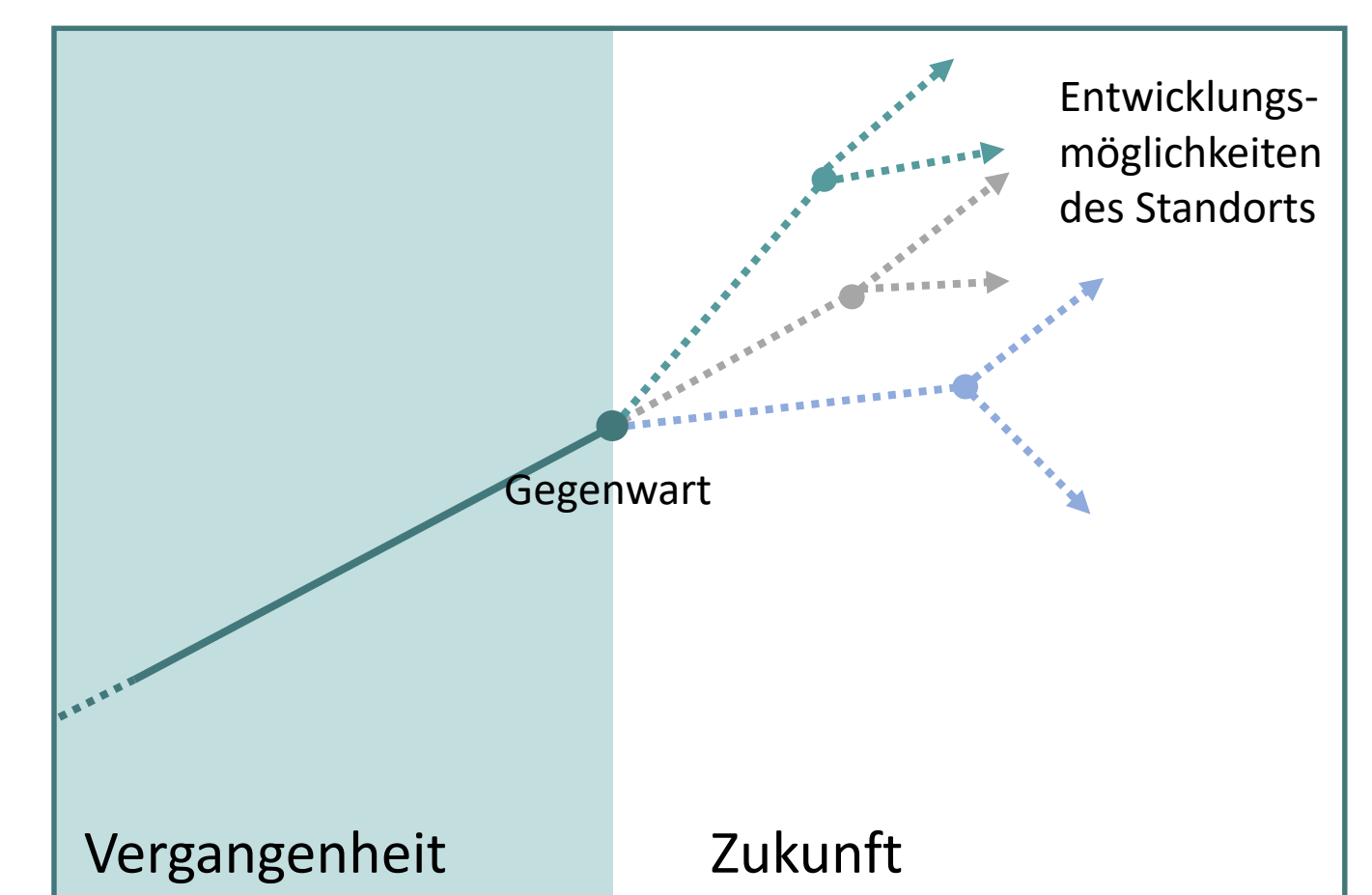
Wer entscheidet, was der Stand von WUT ist?



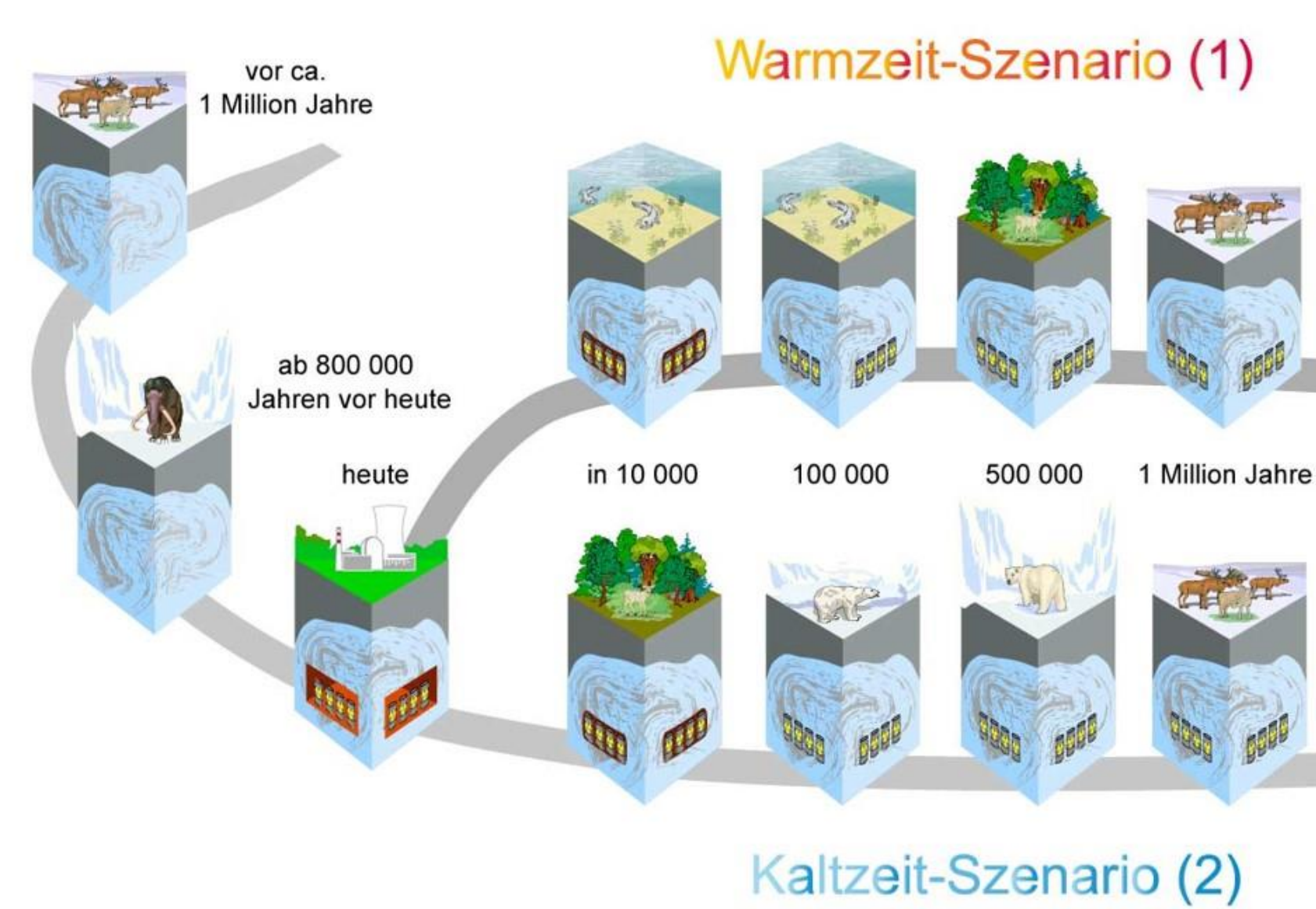
## Lange Zeiträume: Szenarien

### Warum Szenarien?

- Die exakte Entwicklung eines Standortes mit allen Komponenten des Endlagers ist nicht für lange Zeiträume vorhersagbar.
- Eine systematische Ableitung verschiedener Szenarien ist erforderlich, um alle plausiblen Möglichkeiten abzudecken.
- Grundlage für die Systembeschreibung und die Aufstellung von Modellen



### Wie lange ist lange genug?



BGR 2010 (bund.de)<sup>1</sup>

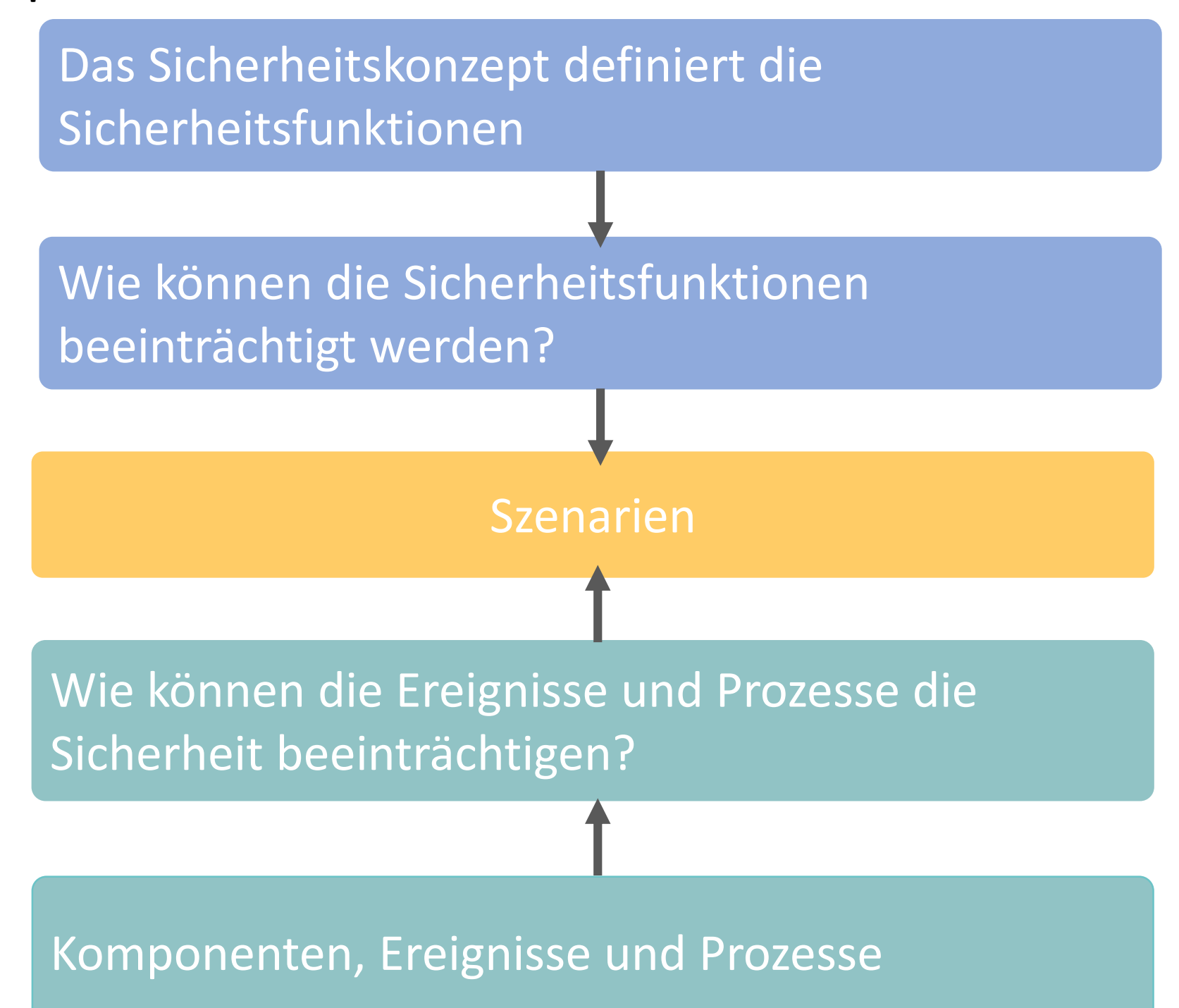
- Wann und wie lange sind die Radionuklide schädlich?
  - Gefährdung durch Freisetzung aus dem Endlager und Transport in die Biosphäre
  - Mobilisierung, Transport, Rückhaltung, Verdünnung und Radiotoxizität sind von Bedeutung
  - Halbwertszeiten einiger Radionuklide können sehr lang sein (Iod-129:  $t_{1/2} = 15,7$  Mio. Jahre)
- Für welchen Zeitraum können Wissenschaftler Aussagen treffen?
  - Weite Gebiete Deutschlands haben über viele Millionen Jahre keine wesentlichen Änderungen sicherheitsrelevanter geologischer Merkmale erfahren
  - Prognosen der zukünftigen geologischen Entwicklung sind in der Größenordnung von wenigen Millionen Jahren begründbar

➔ Gesetzliche Festlegung des Bewertungszeitraums erfolgte auf 1 Mio. Jahre

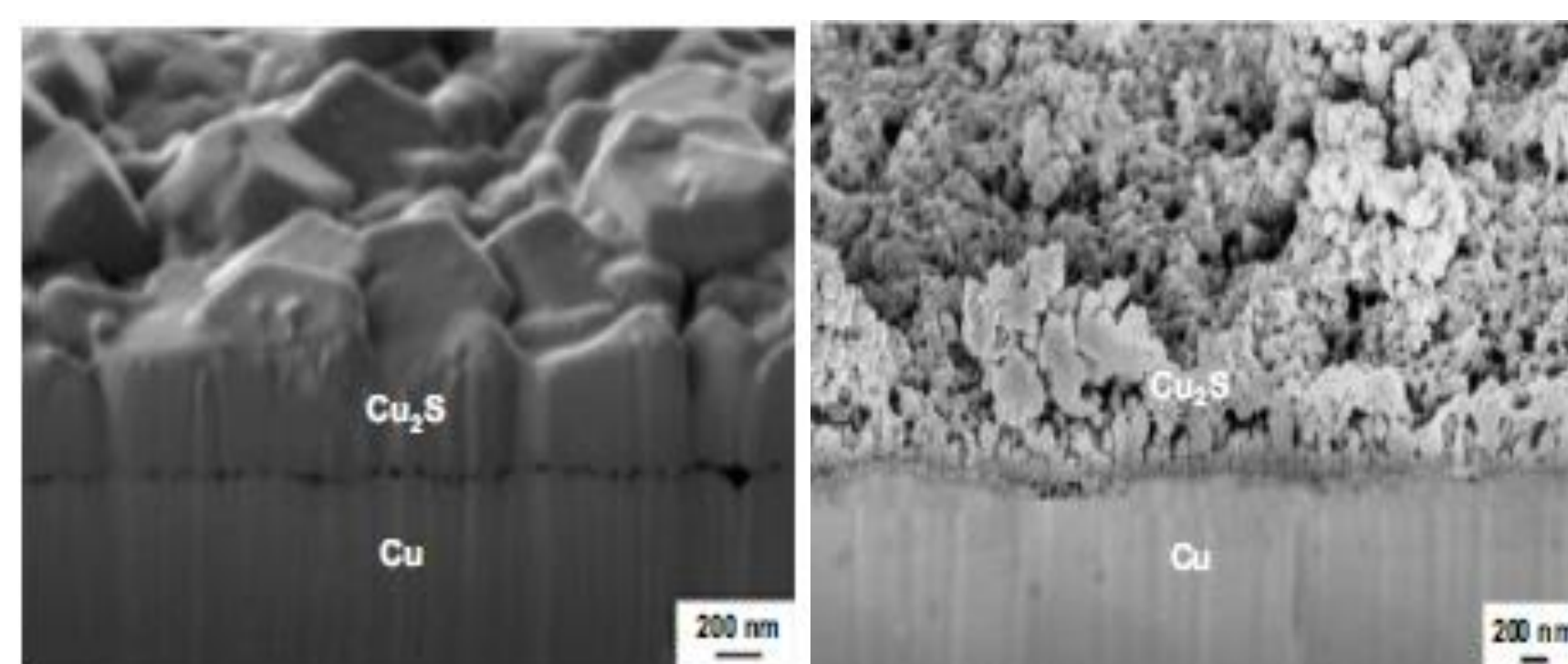
### Wie Szenarien herleiten?

- Zwei Herangehensweisen:
  - Top-Down:** Sicherheitsfunktionen der Komponenten (z.B. Erhalt der mechanischen Stabilität) werden identifiziert und davon ausgehend werden Prozesse bewertet, die diese Sicherheitsfunktion beeinflussen können.
  - Bottom-Up:** Alle Prozesse, die an einem Standort stattfinden können, werden identifiziert und ihre Wirkung auf die Komponenten betrachtet.
  - Hybrider Ansatz:** Eine Kombination der beiden Herangehensweisen
- Heranziehen **internationaler FEP-Listen** (Features, Events & Processes) und standort- und wirtsgesteinsspezifisch bewerten.
- Aktualitätsprinzip:
  - Beispiel:** Für die Herleitung der Klimaentwicklung (z.B. Permafrost, Gletscher,...) haben die Prozesse und Einflussfaktoren, die das Paläoklima bestimmten, auch in Zukunft Bestand.
- In-Situ und Laborexperimente:
  - Beispiel:** Versuche zur Metallkorrosion unter Endlagerbedingungen liefern wichtige Informationen zum Ablauf und der Ausprägung des Prozesses.
- Natürliche Analoga:
  - Beispiel:** Tonformationen, die erhöhter Temperatur ausgesetzt waren, liefern wichtige Informationen zur Ausprägung verschiedener Prozesse wie der Mineralumwandlung über die Zeit.

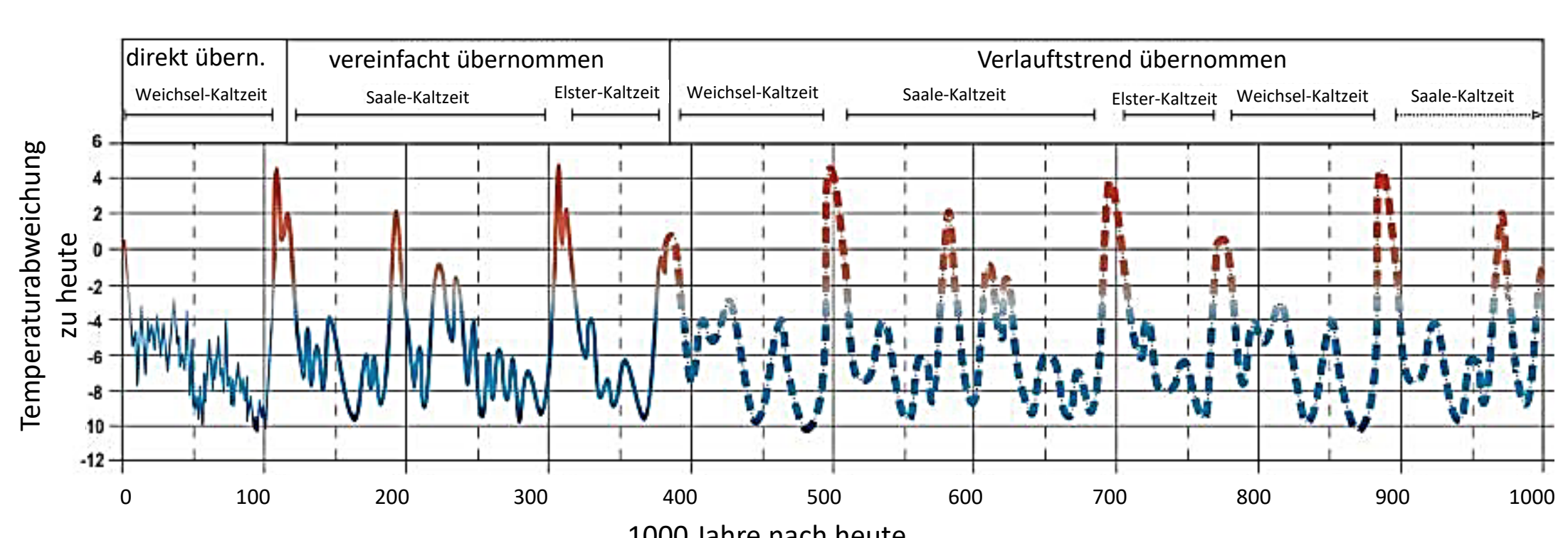
Top-Down



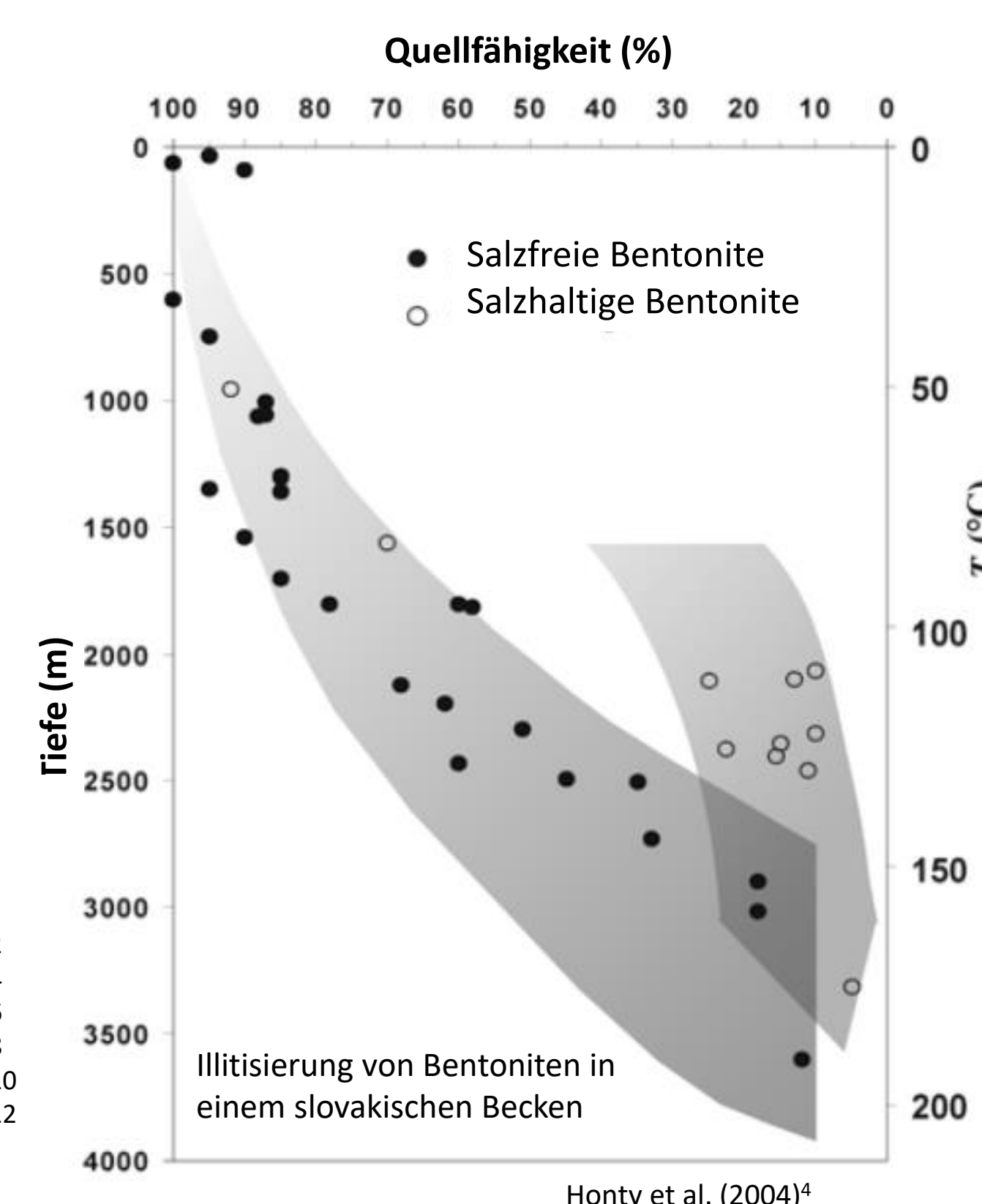
Bottom-Up



Ausbildung einer (a) kompakten und (b) porösen Korrosionsschicht für Kupfer  
SKB (2019)<sup>2</sup>



Datenbasis der Klimakurve: globale Klimaverlaufsreihe aus Eiskern DOME C, Anlarkis (Lüthi et al., Nature, Band 453, 2008)  
Alterseinstufungen der Kalt- und Warmzeiten: nach LITT et al. (2007) und HEUSSCH et al. (2007)  
Lommerzheim et al. (2015)<sup>3</sup>



Honty et al. (2004)<sup>4</sup>

### Was wäre, wenn...?

Zur Bewertung der Robustheit eines Endlagers und zur Identifizierung von Optimierungsbedarf werden auch hypothetische Szenarien aufgestellt, die nicht systematisch abgeleitet werden können, sondern sogenannte „What if“-Betrachtungen darstellen.

### Kann das Wissen über das Endlager verlorengehen?

Davon muss man ausgehen. Daher müssen auch Szenarien zum unbeabsichtigten Eindringen in das Endlager berücksichtigt werden. **Zukünftige menschliche Aktivitäten** können nicht systematisch abgeleitet werden. Hier müssen Annahmen getroffen werden. Z.B. wird unterstellt, dass auch zum Zeitpunkt des unbeabsichtigten Eindringens die gleichen technischen Möglichkeiten bestehen wie heute.



Vereisungen  $10 \times 1 \text{ Mga} = \text{Tektonik?}$

Wichtig ist, dass die Szenarien möglichst vollständig werden  
aber: nicht alle Szenarien müssen bis in Ewigkeit 100% beherrscht werden.

Keine Anglizismen bei der Öffentlichkeits-  
Beteiligung  
(Stichwort „safety case“)

Nicht nur auf die Langzeitsicherheit achten  
1.000.000 Jahre beginnt jetzt → was passiert in den ersten 100 Jahre?

Welches Wissen soll in TRANSENS einbezogen werden?  
Wer spricht? Welche Rollen haben die Beteiligten?



## Analoga als zusätzliche Argumente im Safety Case

### Einführung

Bewertung der Sicherheit des Endlagers erfolgt über 1 Mio Jahre

- Konsequenzen werden über Modellrechnungen ermittelt
- Modelle und Parameter häufig aus Laborexperimenten

Warum Analoga?

- Analoga können Ergebnisse aus Laborexperimenten unterstützen
- Decken andere Zeiträume und komplexe natürliche System ab

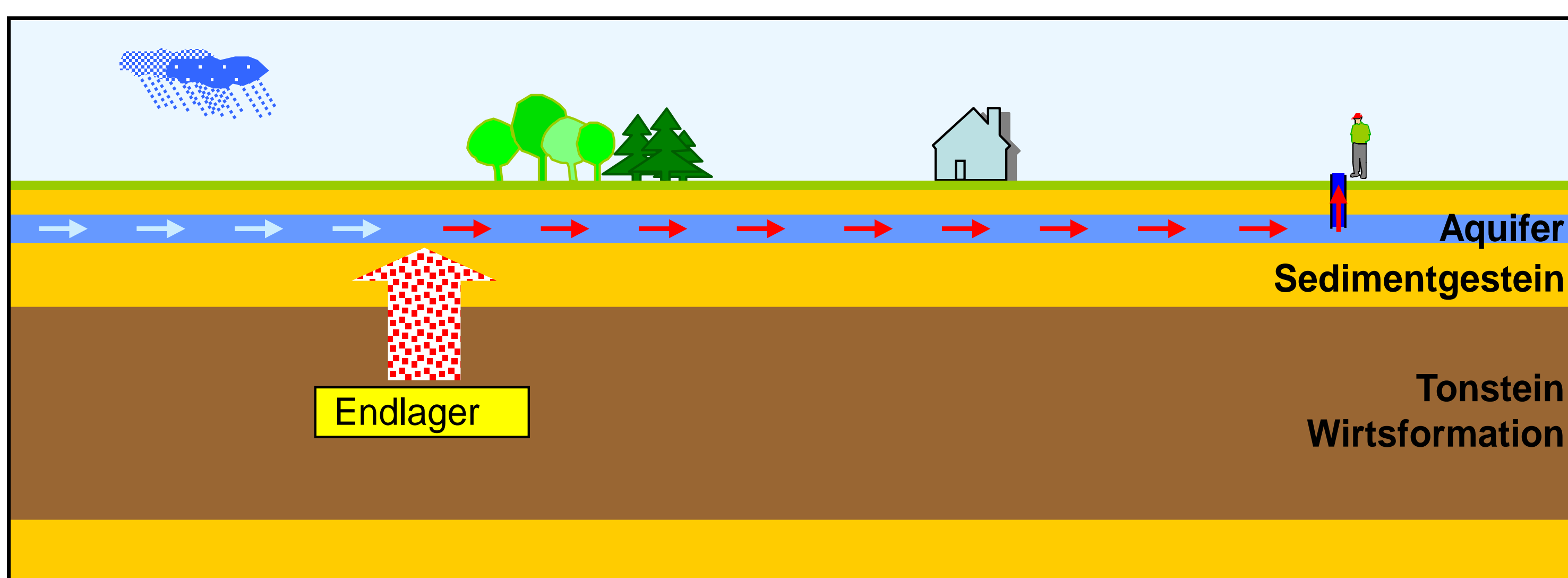
Was sind Analoga?

- Analoge Studien sind Untersuchungen natürlicher, anthropogener, archäologischer oder industrieller Systeme, die eine definierbare Ähnlichkeit mit einem Endlager für radioaktive Abfälle haben

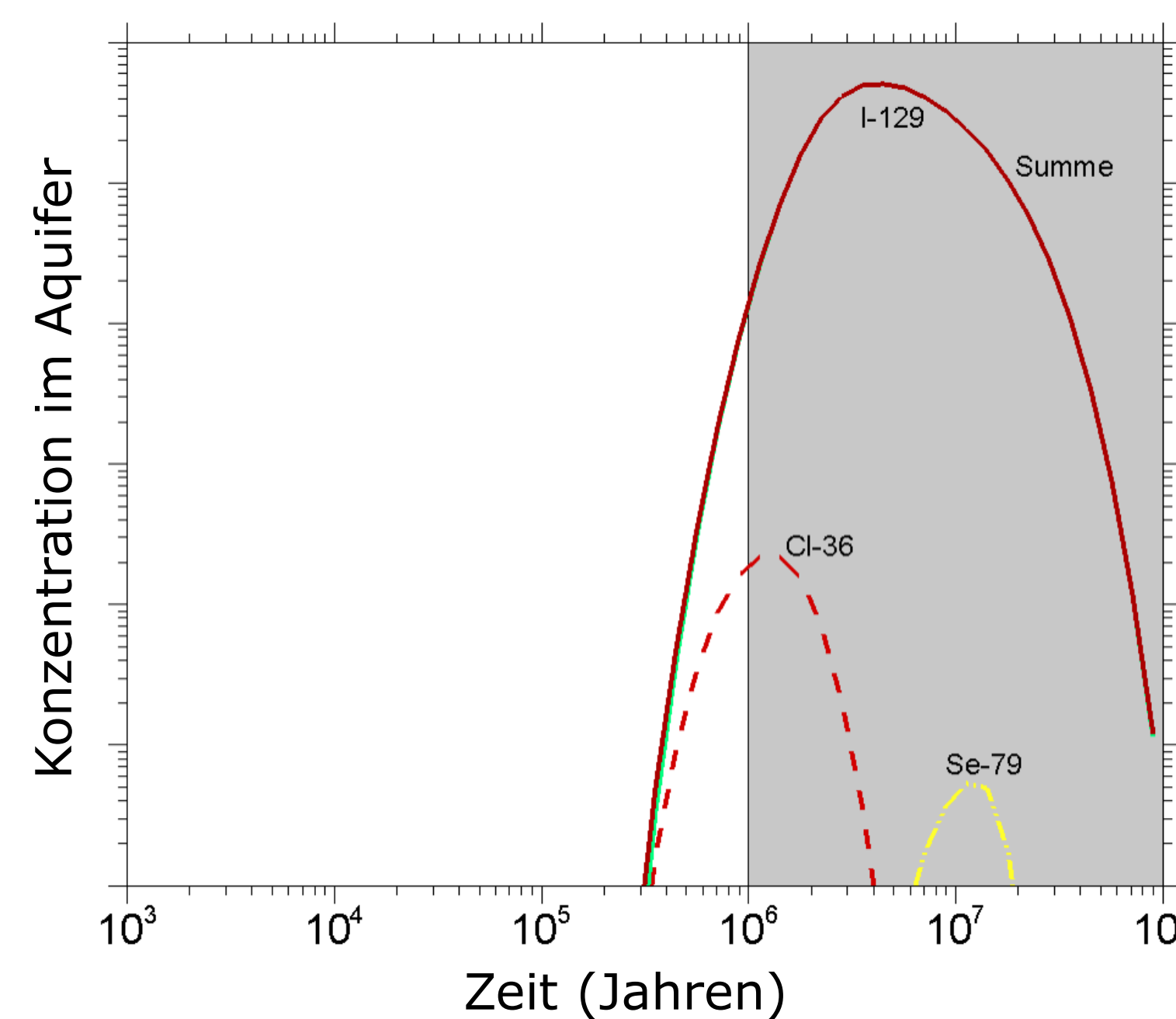
Aspekt	Analoga Studien	Labor- und Feldexperimente
Zeitraum	z.T. sehr lang (Zehn - Milliarden Jahre)	kurz (Wochen bis wenige Jahre)
Randbedingungen	Häufig schlecht definiert	Gut definiert durch den Experimentator
Materialien	Nur angenähert Endlagermaterialien	Materialien, die tatsächlich im Endlager verwendet werden
Systeme	Komplex, mit gekoppelten Prozessen → realistisch, aber schwer zu modellieren	Einfacher, einfach zu modellieren → kann unrealistisch sein
Bedingungen	Natürliche Bedingungen, teilweise geringe Reaktionsgeschwindigkeiten	Reaktionen oft beschleunigt durch Erhöhung der Temperatur oder Verwendung aggressiver Reagenzien

### Anwendungsbeispiel: Endlager in einer Tonformation

Vereinfachter Querschnitt des betrachteten Systems



Annahmen und Ergebnisse von Modellrechnungen

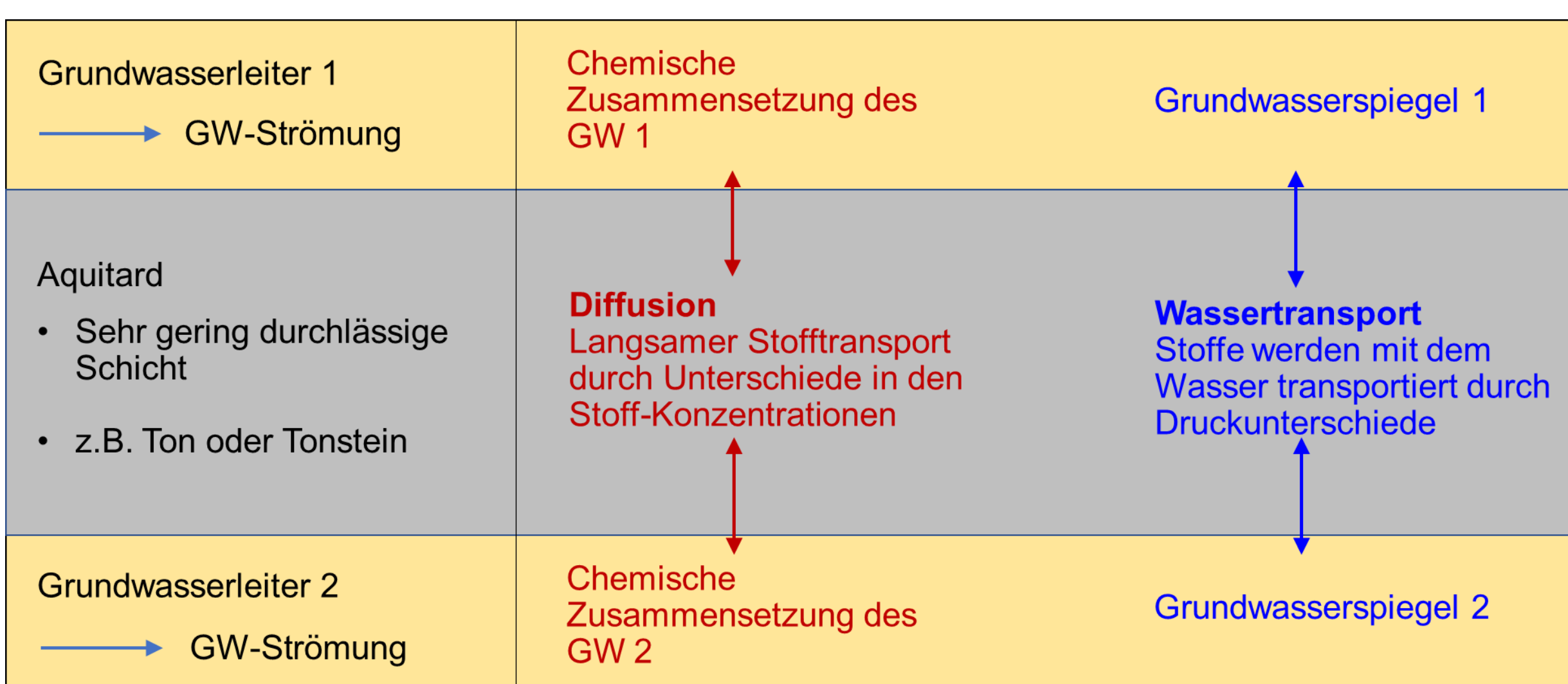


- Sehr geringe hydraulische Leitfähigkeit
- Sehr „dichtes“ Gestein
  - Kein Wassertransport
  - nur sehr langsamer Stofftransport durch „Diffusion“
- Nur wenige Radionuklide verlassen die Formation nach 100 Mio Jahren  
→ Alle anderen verbleiben dort

### Analogen: Tracerprofile in natürlichen Tonformationen

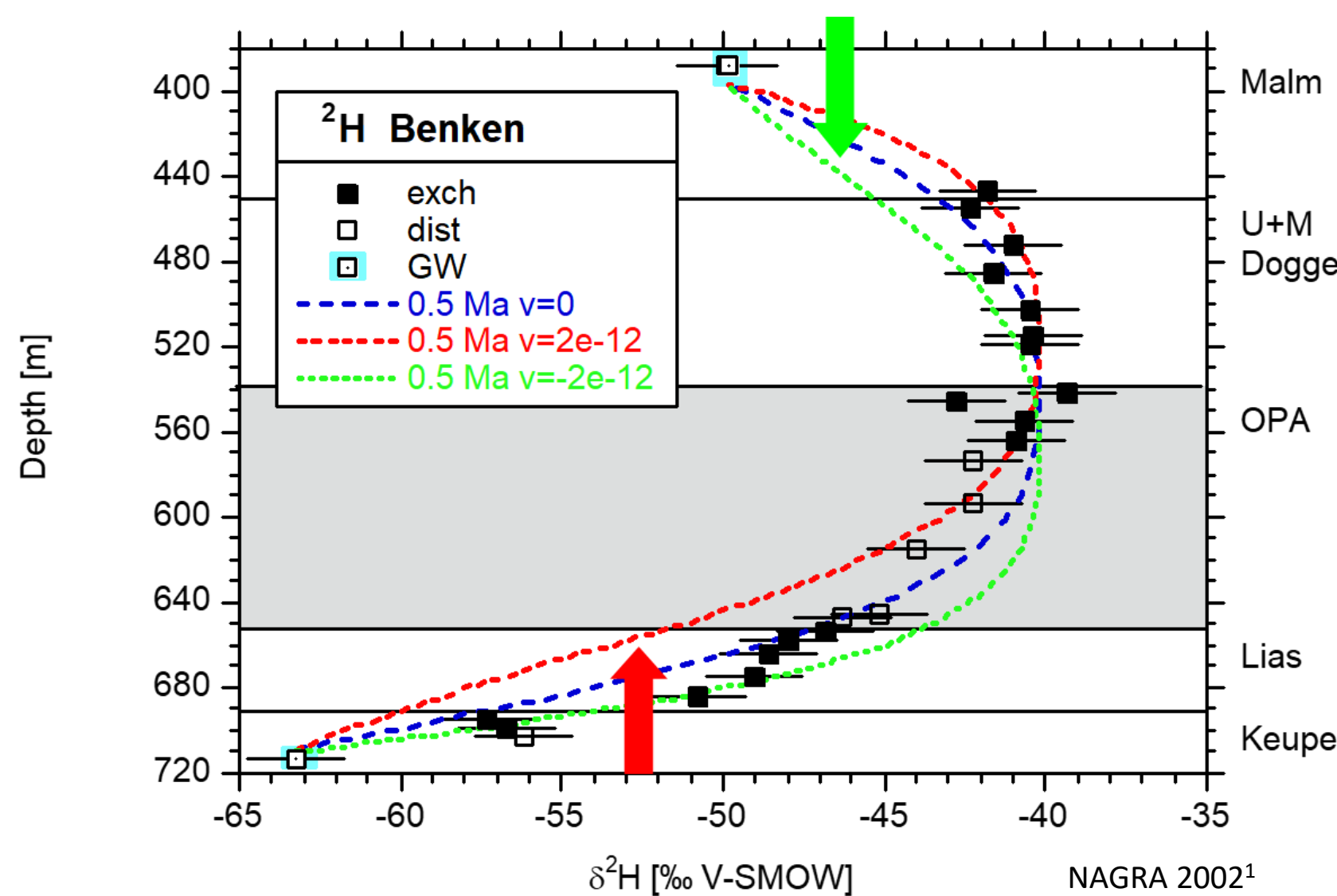
#### Konzept

Dichte Tonformation umgeben von Grundwasserleitern  
Ausbildung von Profilen natürlicher Stoffe in Tonformation  
→ Identifikation des Transportmechanismus



#### Studie in Benken

- Tracerprofile nur durch Diffusion beschreibbar
- Schon extrem geringer Wassertransport führt zu Abweichungen von beobachteten Profilen



Hohe Barrierekapazität der Formation:  
Kein Hinweis auf Wassertransport

→ Vertrauen, dass über Millionen Jahre nur langsamer Transport durch Diffusion erfolgt ist

Im Labor bestimmte Parameter können den Transport über eine Millionen Jahre in der Formation beschreiben

→ Vertrauen, dass alle relevanten Prozesse zur Beschreibung des Radionuklid-Transports im Modell enthalten sind

### Analogen zur Demonstration der geringen Durchlässigkeit und guten Abschirmeigenschaften von Tonformationen

Dunnarobba, Umbrien: Hohe hydraulische Dichtigkeit schirmt eingeschlossene Materialien von der Atmosphäre ab



Miller 2000<sup>2</sup>

Original-Abbildung darf aus urheberrechtlichen Bildern nicht reproduziert werden.

Antiker Wald wurde vor etwa 2 Mio Jahren von Tonschlamm überdeckt und seitdem von der Atmosphäre isoliert

Holz hat seine Eigenschaften über 2 Mio Jahre bewahrt, Baumstämme stehen noch, haben ihre Festigkeit bewahrt und das Holz ist z.B. heute noch brennbar. nahezu

- keine chemische Zersetzung
- kein mikrobieller Abbau

→ Vertrauen, dass Tone ihre Barriere-Eigenschaften über lange Zeiträume behalten

**Fazit: Analoga können helfen, Vertrauen in die Modellrechnungen zu erhöhen und Aussagen eines Safety Case zu untermauern**



Sowie Auswirkungen  
mit unterschiedlicher  $\Delta$  Inventargröße  
Inventare

Erklären, warum es eine Analogie ist  
und eine Signifikanz erklären  
kann.

- \* Übertragbarkeit von Stichproben
  - auf andere Nuklide
  - bei Störungen der Gesteins-  
schicht(en)

~~Nuklide~~ <sup>Fluide</sup> sind nicht nur Wasser,  
sondern auch Gase

Mindesttiefe für unterschiedliche  
Wirtsgesteine?!

\* Bei zu hohem Gasdruck gegebenenfalls Modifikation des Behältermaterials (Kupfer)?

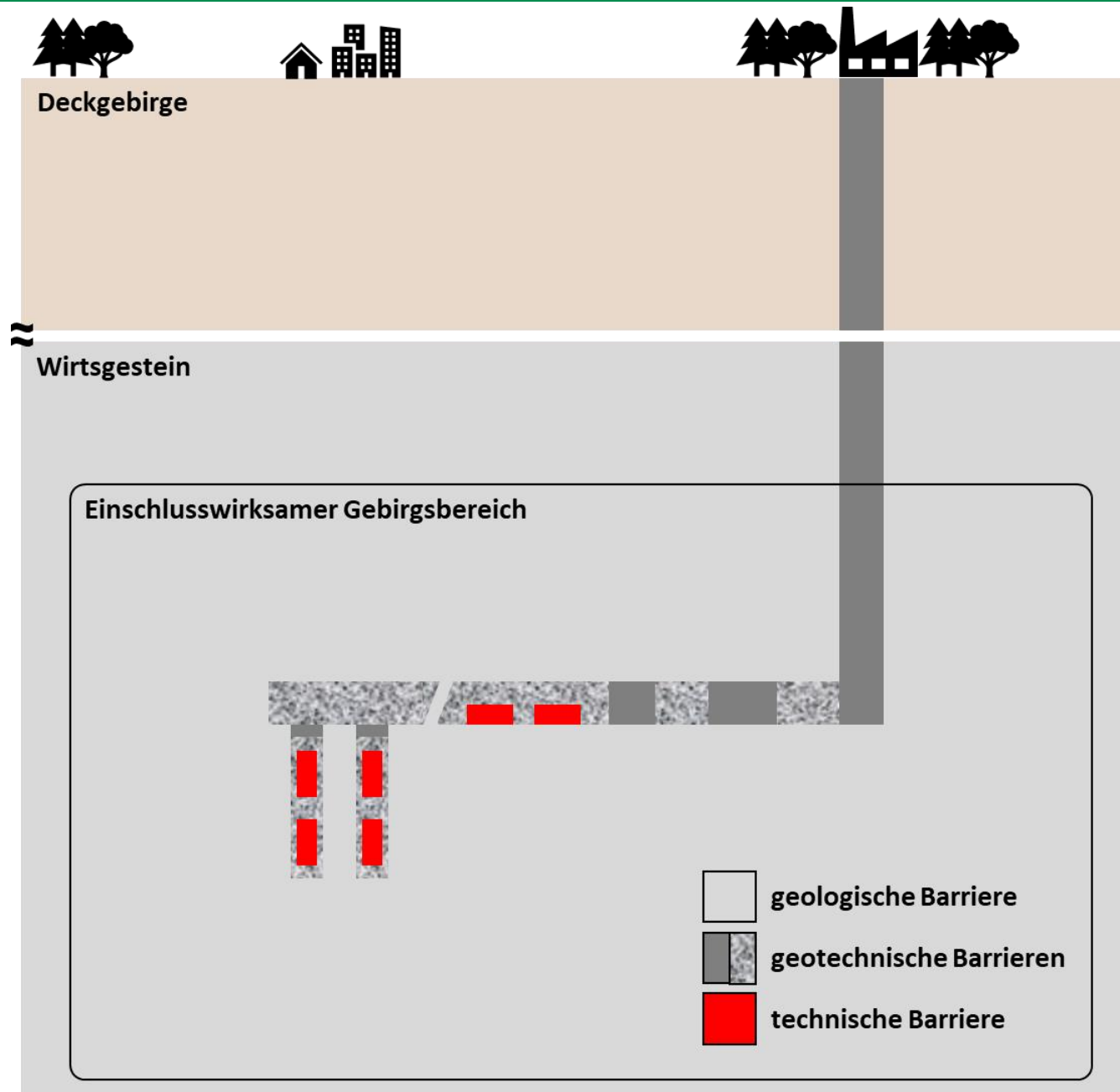
\* Wie fließen die Ergebnisse von TRANSENS in die Endlagerung ein?



## Modellierung: Barrierenintegrität

### Thematisches Umfeld

In Deutschland wird ein Standort für ein Endlager zur Entsorgung der hochradioaktiven wärmeentwickelnden Abfälle gesucht, welches den dauerhaften Schutz vor den negativen Folgen der ionisierenden Strahlung für Mensch und Umwelt für eine Million Jahre gewährleisten soll. Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle soll durch ein System redundanter und diversitärer Barrieren, bestehend aus **technischen und geotechnischen Barrieren** sowie der **geologischen Barriere** erfolgen, welche die Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern. Als mögliche geologische Barrieren kommen in Deutschland grundsätzlich die **Wirtsgesteine** Steinsalz, Tonstein sowie Kristallingestein in Frage. Innerhalb der Wirtsgesteininformation Steinsalz oder Tongestein sowie auch teilweise im Kristallingestein ist ein **einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)** zu definieren, welcher im Zusammenwirken mit den geotechnischen und technischen Barrieren den sicheren Einschluss gewährleisten soll. Für Endlager, in denen die geologische Barriere die wesentliche Barriere darstellt, also in den Wirtsgesteininformationen Steinsalz und Tonstein, ist für zu erwartende Entwicklungen die Integrität des ewG's zu prüfen und darzustellen.



Für die Integrität der Barrieren innerhalb des ewG's werden folgende Anforderungen bzw. Kriterien in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnV) definiert:

- **Dilatanzkriterium:** Die Dilatanzfestigkeiten der geologischen Barriere im ewG darf mit Ausnahme der konturnahen Auflockerungszone nicht überschritten werden.
- **Fluidkriterium:** Der zu erwartende Fluiddruck darf die Fluiddruckbelastbarkeit der geologischen Barriere im ewG nicht in einem Maß überschreiten, dass zu erheblichen Fluidwegsamkeiten führt.
- **Temperaturkriterium:** Die Temperaturentwicklung im Endlager darf die Barrierewirkung nicht erheblich beeinträchtigen.
- **Chemisches Kriterium:** Veränderte chemische Verhältnisse dürfen die Barrierewirkung nicht erheblich beeinträchtigen.

Neben den obigen Kriterien sind darüber hinaus für die technischen und geotechnischen Barrieren die sicherheitstechnischen Eigenschaften im Sicherheitskonzept zu spezifizieren und deren qualitätsgesicherte Herstellung und Errichtung aufzuzeigen sowie gegebenenfalls die Herstellung, Errichtung und Funktion zu erproben.

### Modellierung

Die Prüfung und Darstellung der Integrität des ewG's im Rahmen des „Safety Cases“ erfordert die Modellierung und numerische Simulation des thermisch, hydraulisch, mechanisch gekoppelten Endlagersystemverhaltens. Hierfür ist das multiphysikalische Verhalten der einzelnen, in der geologischen Barriere sowie den geotechnischen und technischen Barrieren enthaltenen Materialien physikalisch-mathematisch zu modellieren und mit laborativ oder experimentell ermittelten lokationsspezifischen Materialparametern nachzubilden. Darüber hinaus ist die räumliche Ausprägung der Barrieren in geometrischen Modellen abzubilden und in Verbindung mit den physikalisch-mathematischen Modellen sowie den lokationsspezifischen Materialparametern numerisch zu simulieren. Auf Basis der dabei erarbeiteten Simulationsergebnisse kann eine Darstellung sowie Prüfung der Barrierenintegrität nach den Kriterien der EndLSiAnV erfolgen. Im Folgenden werden exemplarische Aspekte zu Materialien, Parametern, geometrischen und physikalisch-mathematischen Modellen sowie der numerischen Simulation gegeben.

#### Materialien

##### Geologische Barriere

##### Geotechnische Barriere

##### Technische Barriere

#### Geometrische Modelle

#### Physikalisch-mathematische Modelle

**M** Stoffmodell Lux/Wolters/Lerche

**T** 2-Phasenfluss

$$q_{m;\kappa\varphi} = -\rho_{\varphi} \cdot X_{\kappa\varphi} \cdot K_{rel;\varphi}(S_{\varphi}) \cdot \frac{K}{\eta_{\varphi}} \cdot \nabla(p_{\varphi} + \gamma_{\varphi} \cdot z)$$

**H2** Wärmeleitung

$$q_E^{cond} = -\lambda \cdot \nabla T$$

#### Parameter

Materialgroup	Constitutive model	Rock salt	Crushed salt	
Rock salt	Lux/Wolters/Lerche	density $\rho$	2170 kg/m <sup>3</sup>	1800 kg/m <sup>3</sup>
		Young's modulus E	25000 J/m <sup>2</sup>	13000 J/m <sup>2</sup>
		Young's modulus E <sub>1</sub>	25000 J/m <sup>2</sup>	13000 J/m <sup>2</sup>
		Young's modulus E <sub>2</sub>	2000 J/m <sup>2</sup>	650 J/m <sup>2</sup>
		Poisson-ratio $\nu$	0.27	0.21
		$\sigma_1$	2.8 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>	1.933
		$\sigma_2$	-0.13 J/m <sup>2</sup>	0.02
		$\sigma_3$	-0.13 J/m <sup>2</sup>	0.11
		$\tau_1$	4.8 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>	0.2
		$\tau_2$	-0.12 J/m <sup>2</sup>	0.36
		$\tau_3$	2.03 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>	5500 J/m <sup>2</sup>
		$\tau_4$	-0.05 J/m <sup>2</sup>	1.9
$\alpha$	-1	1.2		
$\alpha_{1,2}$	0.0	1.0		
$\alpha_3$	0.7	0.36		
$\alpha_{1,2,3}$	0.8	0.04		
$\alpha_4$	0.11	0.002		
$\alpha_5$	0.85	0.0		
$\alpha_{1,2,3,4}$	0.85	0.2		
$\alpha_5$	0.065 J/m <sup>2</sup>	0.002997		
$\alpha_{1,2,3,4,5}$	0.05 J/m <sup>2</sup>	0.0		
$\alpha_6$	97 J/m <sup>2</sup>	4.20 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>		
$\alpha_7$	37 J/m <sup>2</sup>	5.73 J/(m·K)		
$\alpha_8$	0.37 J/m <sup>2</sup>	862 J/(kg·K)		
Crushed salt	Clusby	initial density $\rho_0$	1800 kg/m <sup>3</sup>	
		bulk density $\rho_b$	2170 kg/m <sup>3</sup>	
		initial Young's modulus E	650 J/m <sup>2</sup>	
		Poisson-ratio $\nu$	0.21	
		$\sigma_1$	2.02 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>	
		$\sigma_2$	-0.18 J/m <sup>2</sup>	
		$\sigma_3$	-0.02 J/m <sup>2</sup>	
		$\tau_1$	0	
		$\tau_2$	0	
		$\tau_3$	0.665 J/m <sup>2</sup>	
		$\tau_4$	0.22 J/m <sup>2</sup>	
		$\tau_5$	1.85 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>	
$\alpha$	0			
$\alpha_{1,2}$	1.85 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_3$	0.235			
$\alpha_4$	1.0 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_5$	0.07			
$\alpha_6$	1			
$\alpha_7$	0.0113 J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_8$	4.20 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_9$	5.73 J/(m·K)			
$\alpha_{10}$	862 J/(kg·K)			
Salt concrete	Elastic	density $\rho$	1970 kg/m <sup>3</sup>	
		Young's modulus E	23900 J/m <sup>2</sup>	
		Young's modulus E <sub>1</sub>	23900 J/m <sup>2</sup>	
		Young's modulus E <sub>2</sub>	2000 J/m <sup>2</sup>	
		Poisson-ratio $\nu$	0.28	
		$\sigma_1$	1.94 · 10 <sup>10</sup> J/m <sup>2</sup>	
		$\sigma_2$	-0.18 J/m <sup>2</sup>	
		$\sigma_3$	-0.05 J/m <sup>2</sup>	
		$\tau_1$	0	
		$\tau_2$	0	
		$\tau_3$	0.4	
		$\alpha$	0.002	
$\alpha_{1,2}$	0.0			
$\alpha_3$	0.85			
$\alpha_{1,2,3}$	0.85			
$\alpha_4$	0.065 J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_{1,2,3,4}$	0.05 J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_5$	97 J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_6$	47 J/m <sup>2</sup>			
$\alpha_7$	37 J/m <sup>2</sup>			
Concrete	Elastic	density $\rho$	2400 kg/m <sup>3</sup>	
		Young's modulus E	21000 J/m <sup>2</sup>	
		Poisson-ratio $\nu$	0.29	
		initial permeability $K_0$	0.0001	
		initial porosity $\phi_0$	0.0	
		initial saturation level $S_{i,0}$	0	
		initial dilatation level $\delta_{i,0}$	0	
		initial dilatation level $\delta_{i,1}$	0	
		initial dilatation level $\delta_{i,2}$	0	
		initial dilatation level $\delta_{i,3}$	0	
		initial dilatation level $\delta_{i,4}$	0	
		initial dilatation level $\delta_{i,5}$	0	
initial dilatation level $\delta_{i,6}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,7}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,8}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,9}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,10}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,11}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,12}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,13}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,14}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,15}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,16}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,17}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,18}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,19}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,20}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,21}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,22}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,23}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,24}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,25}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,26}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,27}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,28}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,29}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,30}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,31}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,32}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,33}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,34}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,35}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,36}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,37}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,38}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,39}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,40}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,41}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,42}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,43}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,44}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,45}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,46}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,47}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,48}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,49}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,50}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,51}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,52}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,53}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,54}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,55}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,56}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,57}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,58}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,59}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,60}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,61}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,62}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,63}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,64}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,65}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,66}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,67}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,68}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,69}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,70}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,71}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,72}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,73}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,74}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,75}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,76}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,77}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,78}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,79}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,80}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,81}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,82}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,83}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,84}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,85}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,86}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,87}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,88}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,89}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,90}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,91}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,92}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,93}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,94}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,95}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,96}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,97}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,98}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,99}$	0			
initial dilatation level $\delta_{i,100}$	0			

### Ziel

Nach dieser allgemeinen Information, wie im Rahmen des „Safety Cases“ die Analyse der Barrierenintegrität des Tiefen-/Endlagers erfolgen kann, interessiert uns Folgendes:

- Würden Sie grundsätzlich der Methodik, den Kriterien und den Ergebnissen der Barrierenmodellierung vertrauen?
- Welche Aspekte der Barrierenmodellierung sehen Sie kritisch?
- Was würden Sie besser machen bzw. ändern?



## Dosisabschätzung durch radioökologische Modellierung

### Was, wenn Radioaktivität aus dem Endlager austritt und zur Oberfläche gelangt?

- Ist jeder Austritt von Radioaktivität problematisch?

Es ist zu prüfen und darzustellen, dass Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen **geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition** sind.

§ 7 Abs. 1 EndlSiAnV

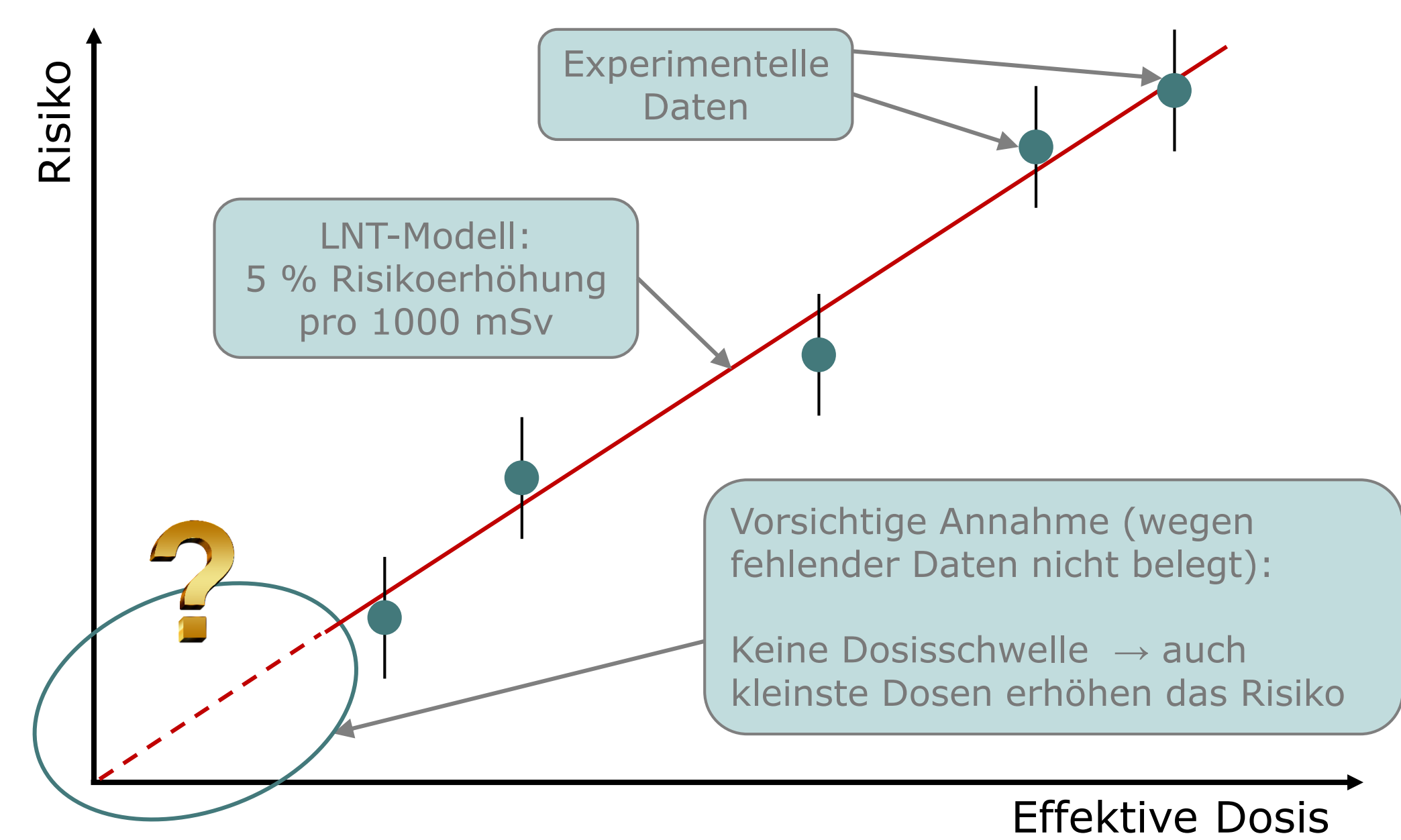
- Wie lässt sich die Exposition quantifizieren?

Es ist **als Indikator die zusätzliche jährliche effektive Dosis** für Einzelpersonen der Bevölkerung abzuschätzen, die während des Bewertungszeitraums [...] auftreten kann.

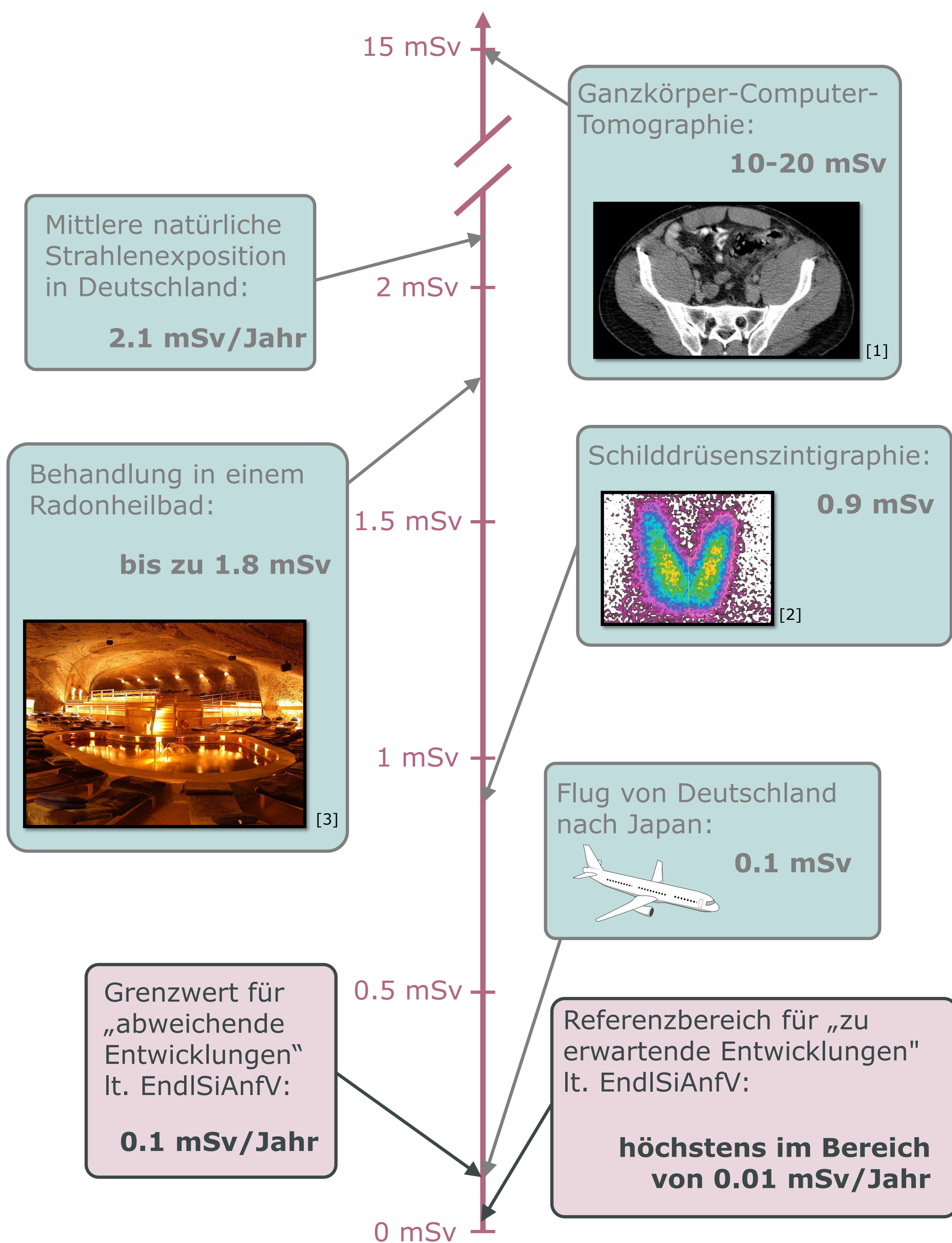
§ 7 Abs. 1 EndlSiAnV

### Was ist die effektive Dosis?

- Ein Maß für das Gesundheitsrisiko durch Radioaktivität  
→ Wie groß ist die zusätzliche Wahrscheinlichkeit für eine Krebserkrankung durch eine Exposition?
- Maßeinheit: Sievert (Sv) bzw. hier mSv (1 mSv = Ein Tausendstel Sv)
- Etabliertes Modell: Lineare Dosis-Risiko-Beziehung ohne Schwellwert (LNT-Modell)
- Das LNT-Modell ist nur für Dosiswerte oberhalb von ca. 100 mSv experimentell gut belegt. Für kleinere Dosen ist die Datenlage nicht ausreichend, um die Dosis-Risiko-Beziehung sicher quantifizieren zu können.



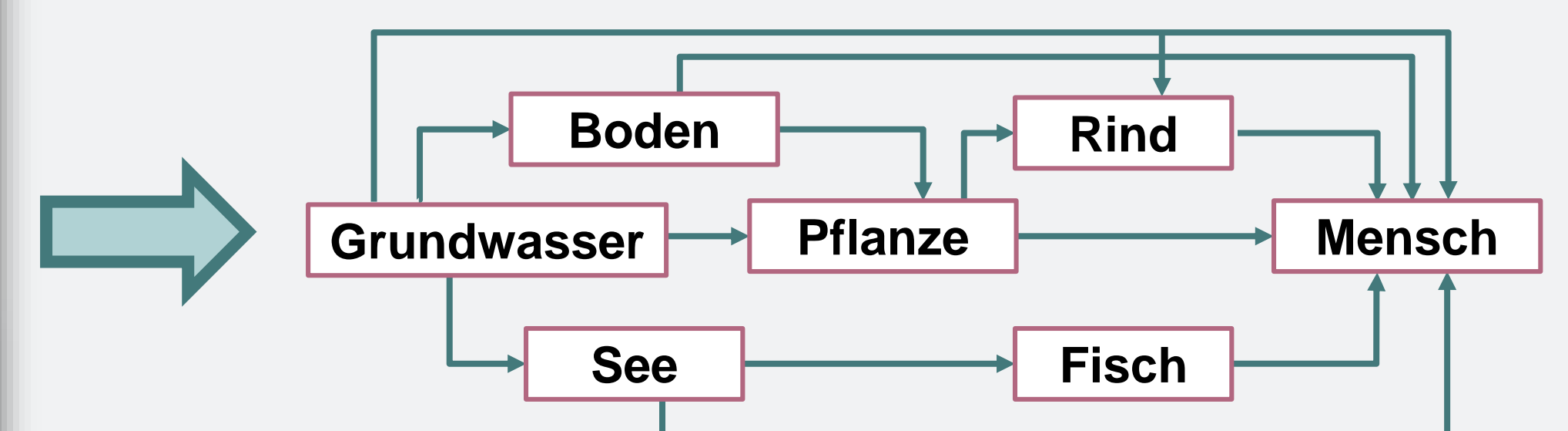
### Wann ist eine Exposition geringfügig?



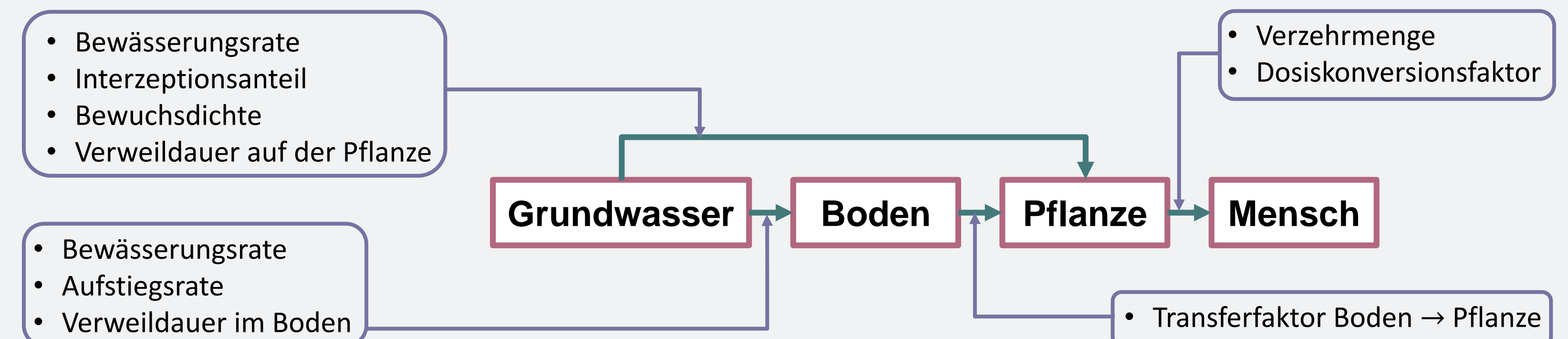
### Wie lässt sich die Dosis abschätzen?

- Problem:** Es geht um zukünftige Expositionen → keine Messungen möglich!
- Ansatz:** Barrieren- und Transportmodellierungen prognostizieren Konzentrationen von radioaktiven Stoffen im Grundwasser  
→ Wie verbreiten sich die Radionuklide von dort in der Umwelt?  
→ Wie viel kommt am Ende beim Menschen an und zu welcher Dosis führt das?
- Umsetzung:** Erstellung eines radioökologischen Modells:

#### 1. Reduktion des Systems auf die wichtigsten Umweltmedien



#### 2. Identifikation der relevanten Transportwege und Parameter



#### 3. Überführung der Transportwege in mathematische Formeln

### Ja, aber... Wir reden über eine Million Jahre?! → Umgang mit Ungewissheiten

- Konservativität: Für alle Parameter werden (im Rahmen der Ungewissheiten) eher ungünstige Werte angenommen
- Hohe Anforderungen: Festlegung von sehr geringen Grenz- und Referenzwerten
- Interpretation der Ergebnisse: Dosis nur als Indikator → keine Prognose tatsächlicher Gesundheitsrisiken!



# KI ?

## - Optimierungen möglich?

- Rechenzeit
- Berichte

## - Input in Modelle ist ausgeklügelt

- Leie kann das nicht durchdringen

## - Zugänglichkeit = Prinzipien, Bilder, ~~Transparenz~~ Transparenz

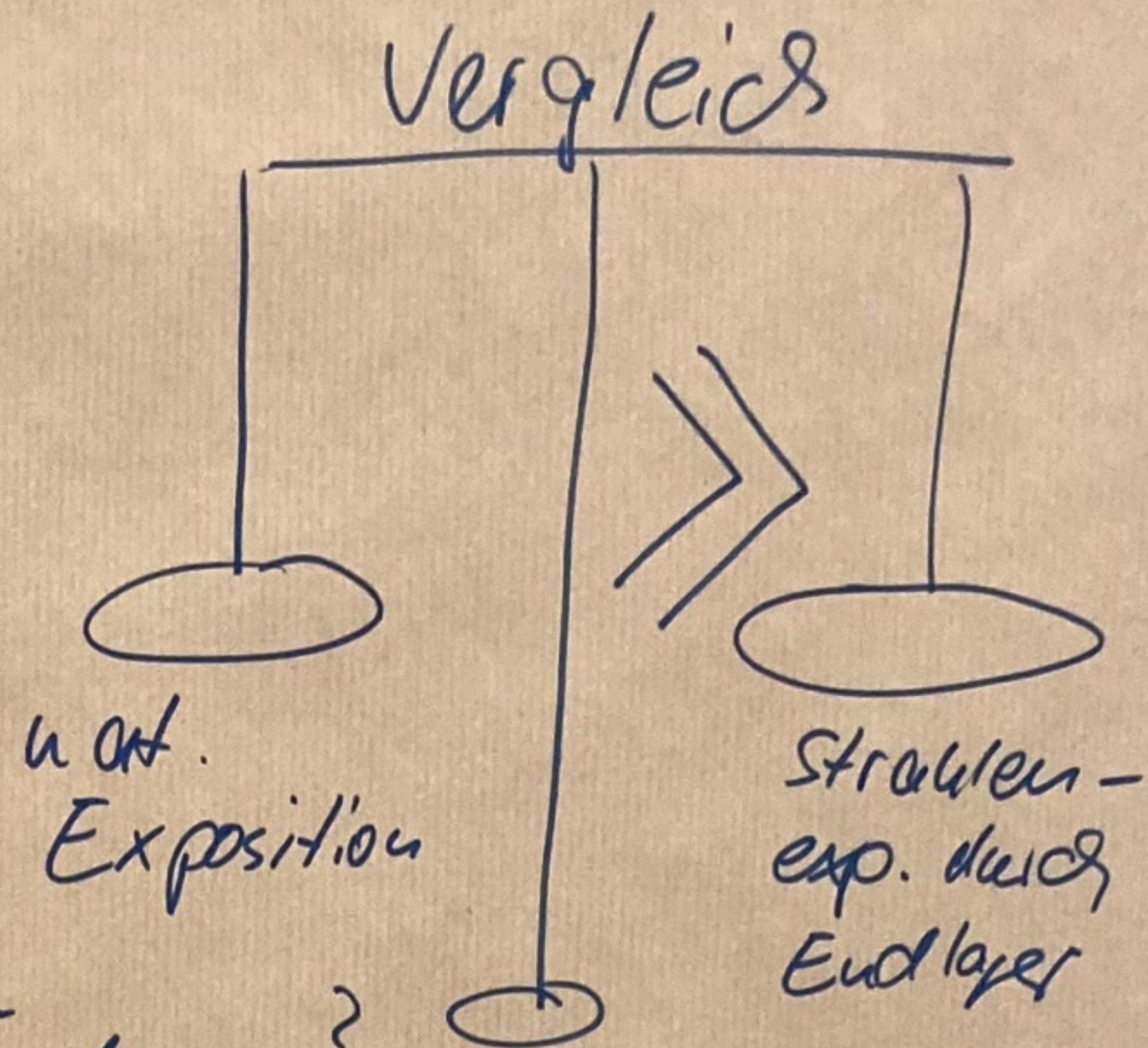
- Wie erobert man bei so vielen verschiedenen Modellen / Simulationen?

- Herausforderungen der Überprüfung von Modellen -> Kommunikation

- Wissensschaffung Kommunikation

- Prozess besser darstellen

- Metapher



- Veränderung?
- in welchem Bereich nat. Exp. (Radon)
- WER legt fest, welche Bezugsgröße genommen wird
- zeitl. Veränderung?
- Umkreis