



Technische  
Universität  
Braunschweig



## **Endlagerung mit Rückholoption – gebirgsmechanische Erfordernisse und Konsequenzen**

J. Stahlmann

„Tage der Standortauswahl“, 3. Fachworkshop der BGE (12.-14.12.2019)

## Standortauswahlgesetz und Reversibilität

### Endlagerkommission (2016):

„Endlagerung mit *Reversibilität*“

- Reversibilität als Möglichkeit der *Fehlerkorrektur*
- Beobachtbarkeit (Monitoring) erforderlich
  - Freie Entscheidung über den Verbleib der Abfälle im Endlager
- Rückholbarkeit und Beobachtungsphase als technische Konsequenz



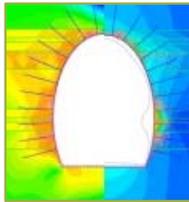
### Umsetzung im StandAG (2017):

- Anforderung: Rückholbarkeit während der Betriebsphase
- keine explizite Nennung einer Beobachtungsphase

### Entwurf Sicherheitsanforderungen BMU (2019):

„Maßnahmen, die [...] der Rückholbarkeit dienen, dürfen die Langzeitsicherheit [...] nicht erheblich und nicht mehr als unvermeidlich beeinträchtigen“

## Mögliche Gründe für eine Rückholung



### Technische Einflüsse

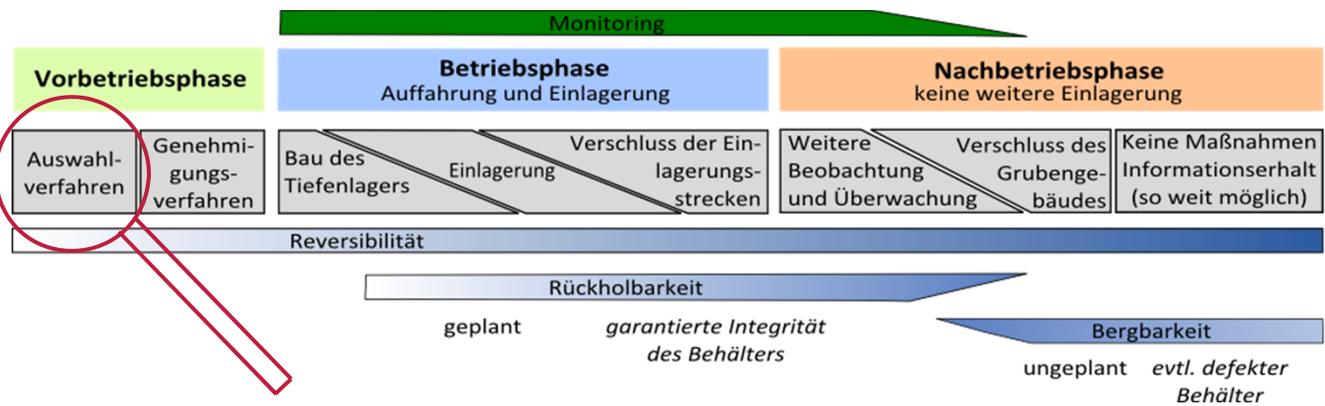
- Integritätsverluste der geologischen, geotechnischen und/oder technischen Barrieren infolge langer Offenhaltungsdauer, Überbeanspruchung und/oder Materialversagen
- Negative Entwicklung der Auflockerungszone hinsichtlich Ausdehnung und Permeabilität
- Unerwartete Wasserzutritte im Einlagerungsfeld
- Ausfall der Überwachungssysteme
- ...



### Gesellschaftliche Einflüsse

- Zweifel an der Sicherheit
- Wiederverwendung der radioaktiven Reststoffe
- Weiterentwicklung des Stands von Wissenschaft und Technik
- ...

# Lebensphasen eines Endlagers



dreistufiges Auswahlverfahren bis 2031 (StandAG)  
alle Wirtsgesteine sind zu berücksichtigen

Stahlmann et al., 2015a

## Welche Wirtsgesteine sind zu betrachten?

**Steinsalz**



**Ton**



**Tonstein**

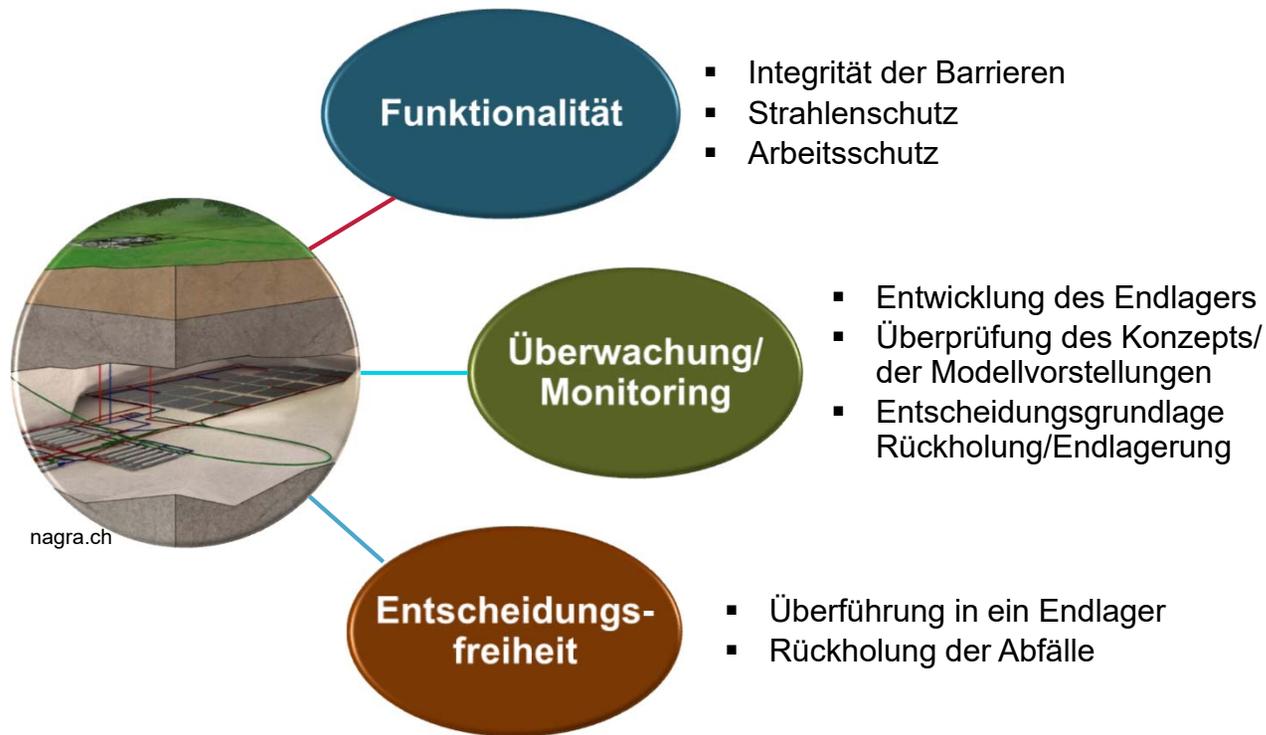


**Kristallines  
Hartgestein**

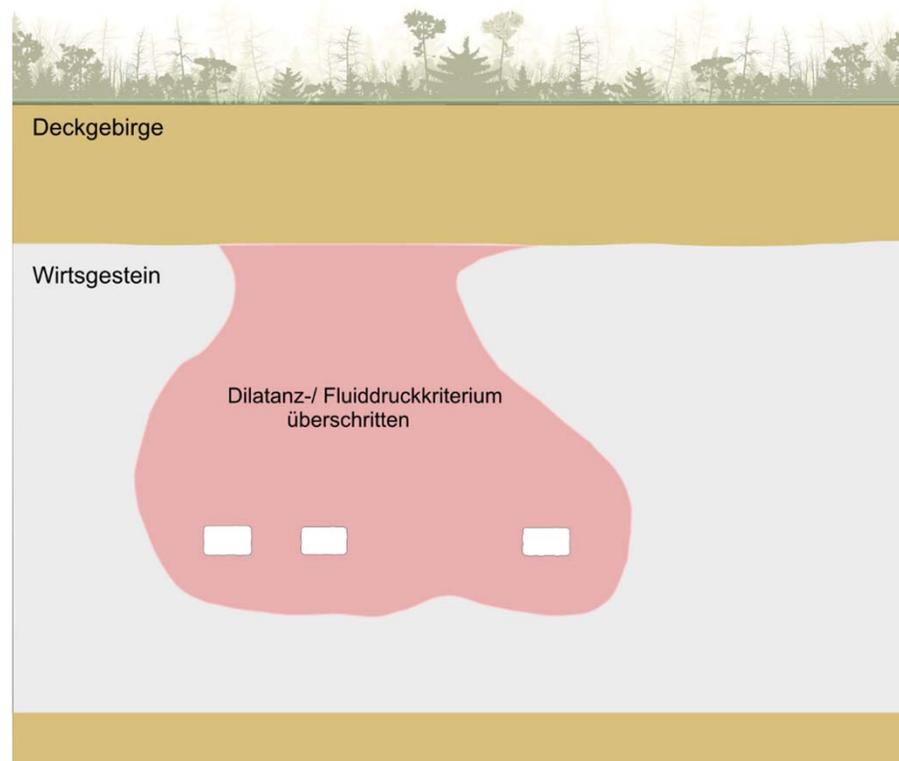


Verformungsverhalten	visko-plastisch	plastisch	plastisch-spröde	spröde
Trennflächen	hydraulisch nicht wirksam	latent, nicht wirksam	vorhanden, evtl. hydraulisch wirksam	Kluftgrundwasserleiter
Geologische Barriere	langfristig maßgebend	langfristig maßgebend	langfristig maßgebend	hydraulisch nicht zu belasten
Geotechnische Barriere	mittelfristig maßgebend	mittelfristig maßgebend	mittelfristig maßgebend	langfristig maßgebend
Technische Barriere	kurzfristig maßgebend	kurzfristig maßgebend	kurzfristig maßgebend	langfristig maßgebend

## Endlager mit Reversibilität

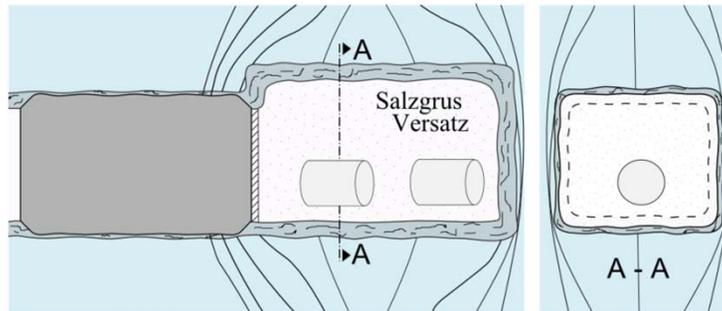


## Geologische Barriere: Integritätsverlust durch Überschreiten von Dilatanz/Fluiddruckkriterium



## Geotechnische Barriere Versatz: Welche Funktionalität wird dem Versatz zugeordnet?

### Steinsalz

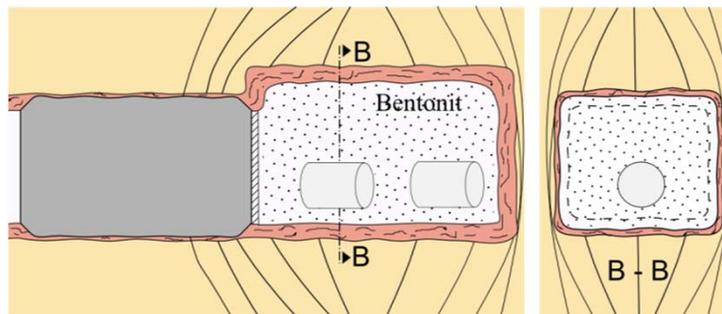


Stahlmann et al., 2016

Salzgrus-Versatz:  
Zunahme der Steifigkeit;  
Verringerung der Porosität

⇒ Verheilung der Auflockerungszone,  
Erhalt der Integrität der  
geologischen Barriere und dichter  
Einschluss der Abfälle

### Tonstein

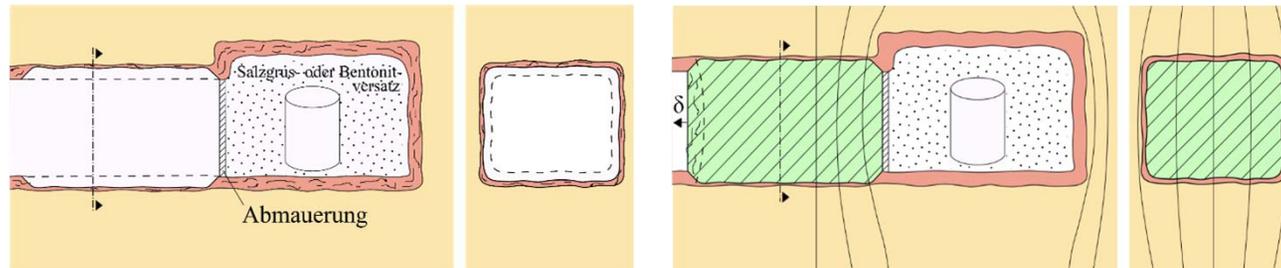


Stahlmann et al., 2016

Bentonit-Versatz:  
Entwicklung des Quellens; Quelldruck;  
Verringerung der Porosität

⇒ Verheilung der Auflockerungszone,  
Erhalt der Integrität der  
geologischen Barriere und dichter  
Einschluss der Abfälle

## Geotechnische Barriere Verschlussbauwerk: Welche Funktionalität wird dem Verschlussbauwerk zugeordnet?



Stahlmann et al., 2015b

### Steinsalz

Vergleichsweise hohe Steifigkeit und Festigkeit, geringes Porenvolumen

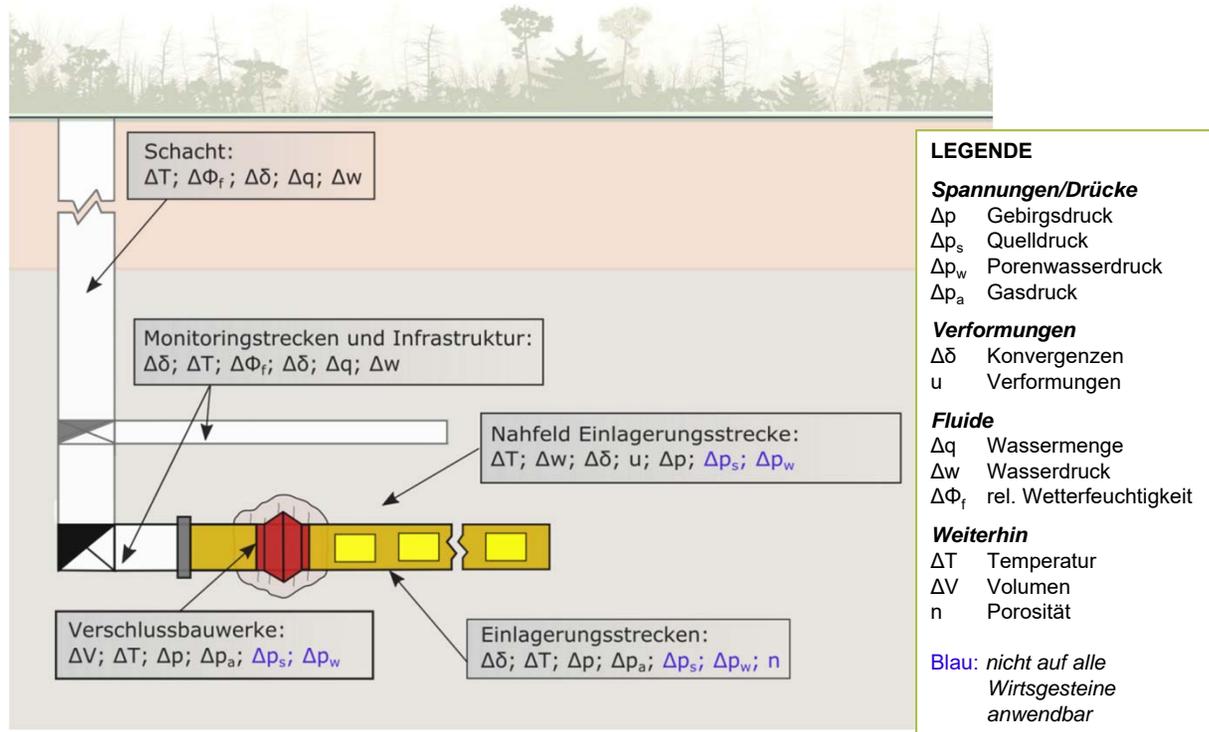
⇒ zügige Verheilung der Auflockerungszone, Verringerung der integralen Permeabilität,  
Erhalt der Integrität der geologischen Barriere

### Tonstein

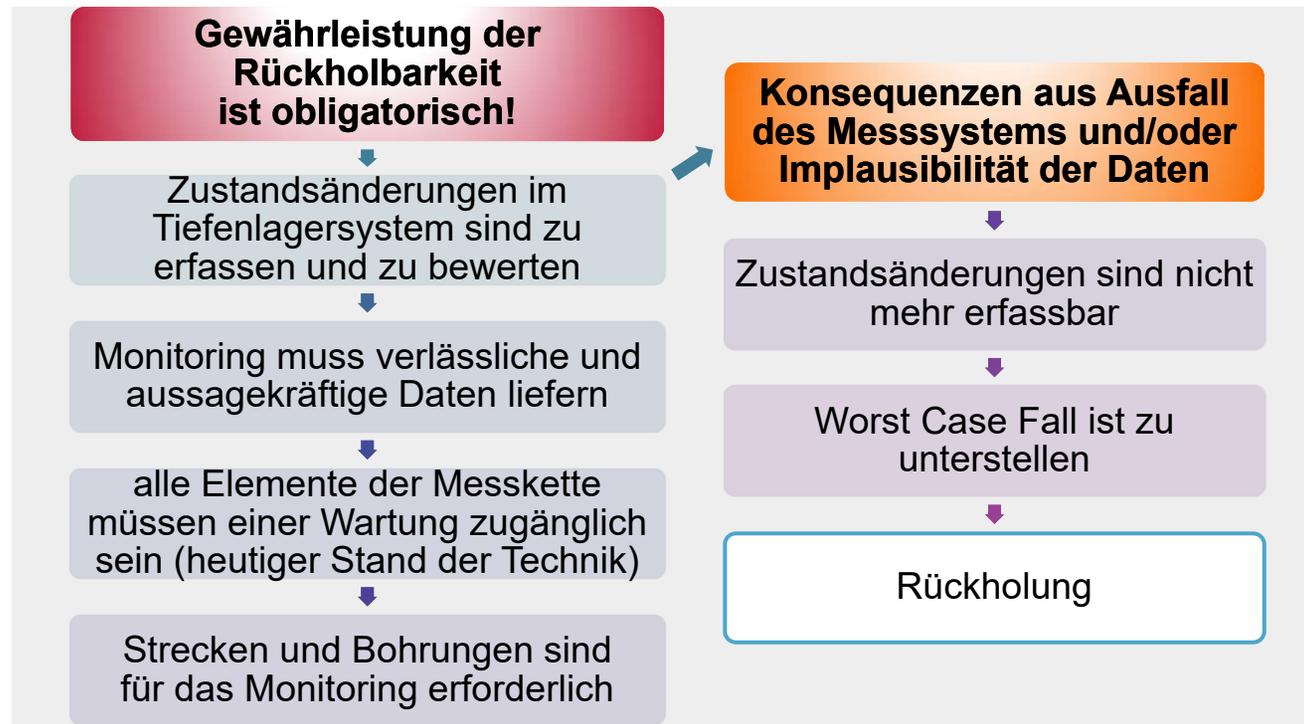
Vergleichsweise hohe Steifigkeit und Festigkeit, geringes Porenvolumen

⇒ Verheilung der Auflockerungszone, Verringerung der integralen Permeabilität,  
Gewährleistung der Funktionalität des Versatzes durch Behinderung der Quelldehnung,  
Erhalt der geologischen Barriere

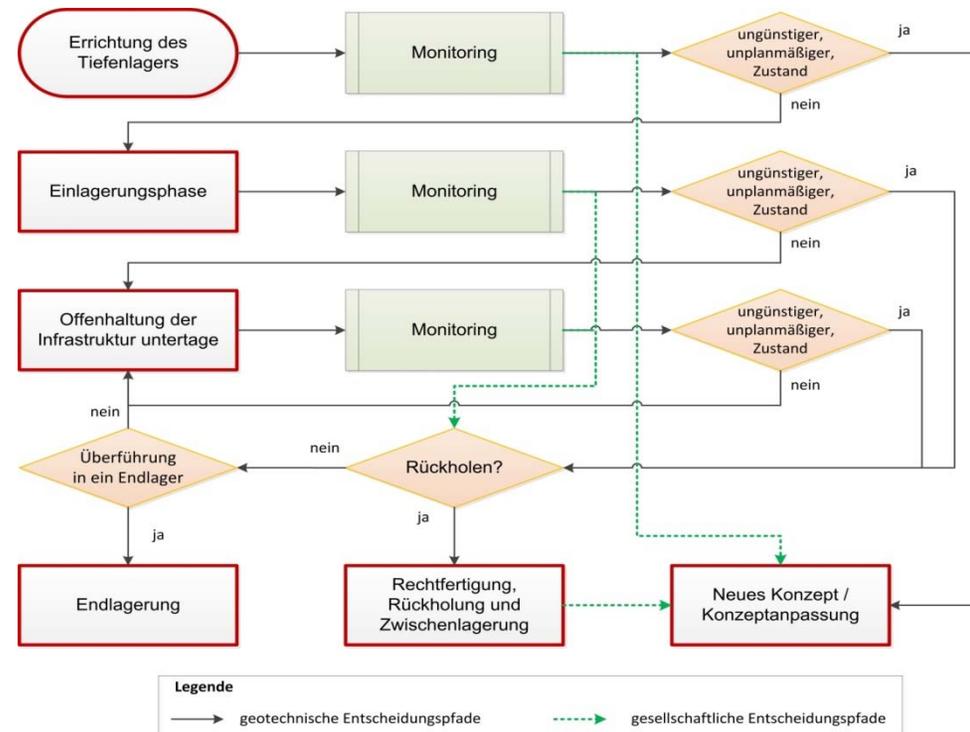
## Aus der Funktionalität abgeleitete mögliche Messgrößen zur Beobachtung der Zustandsänderungen



## Bedeutung des Monitorings

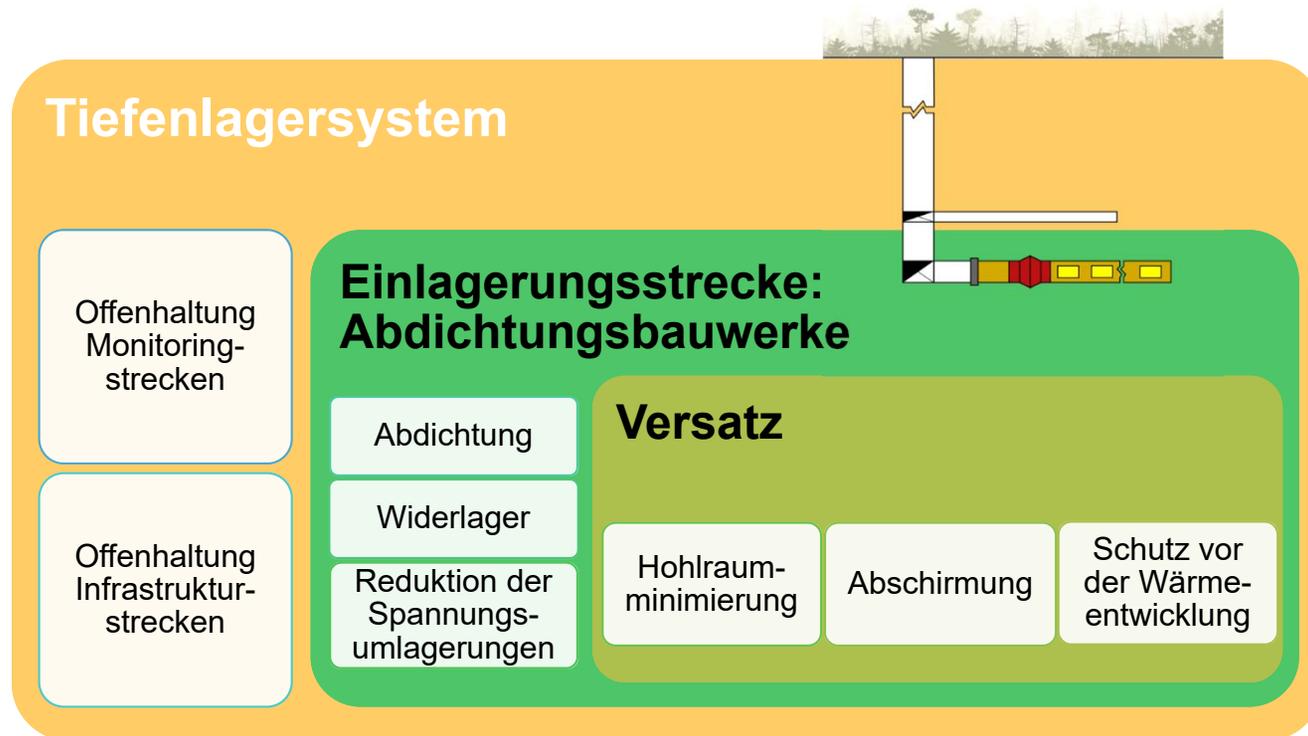


# Ablauf des Monitorings und Entscheidungen im Kontext zu den Lebensphasen eines Tiefenlagers



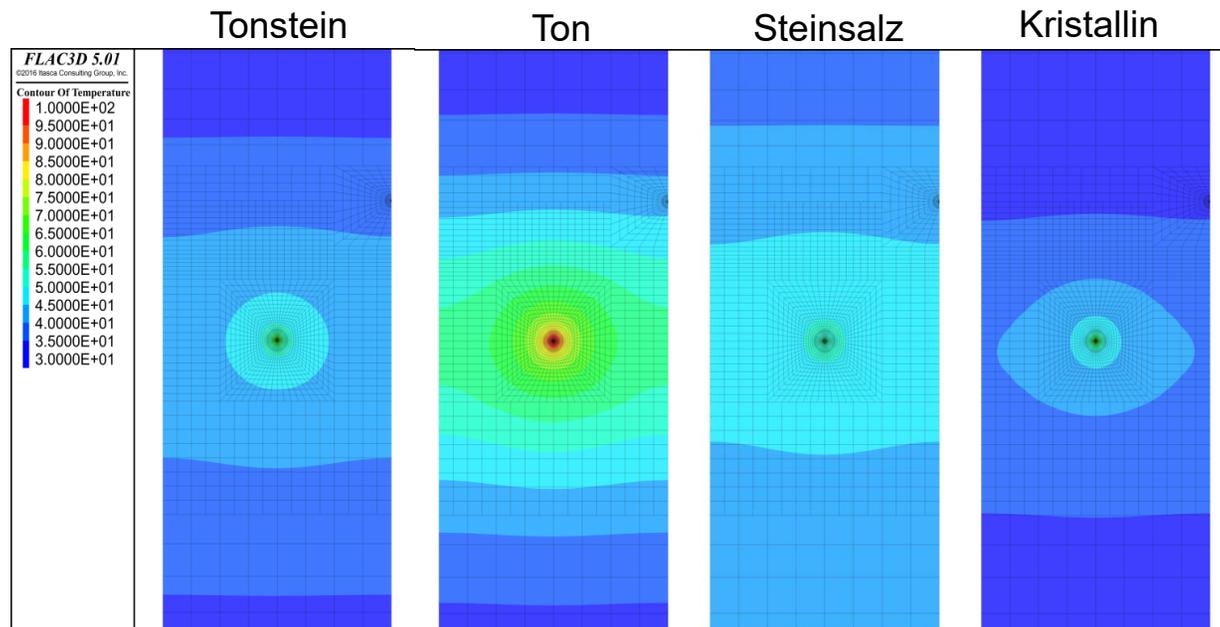
Stahlmann et al., 2018

## Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit



## Wie verteilt sich die Temperatur?

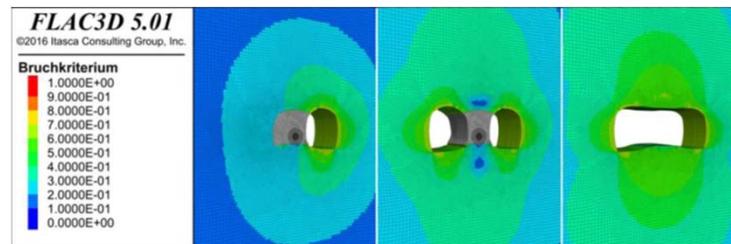
Temperaturentwicklung nach 100 Jahren in verschiedenen Wirtsgesteinen:  
Pollux-5, 40 Jahre Zwischenlagerung und 70 m Streckenabstand



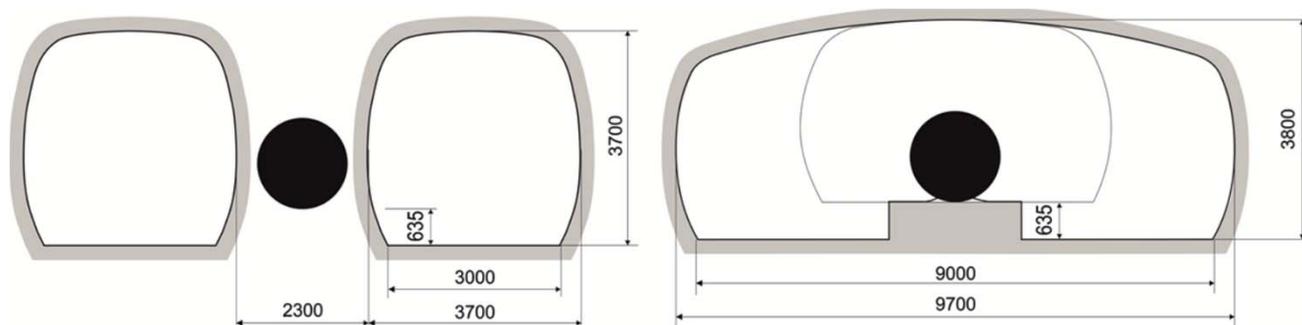
León Vargas et al., 2017

## Spannungsumlagerungen bei der Rückholung

- Benötigte Querschnitte?
- Auswirkung der Auffahrung auf benachbarte Einlagerungsstrecken & Infrastruktur?
- Sicherung des Gebirges?
- Begleitendes Monitoring?



Herold et al., 2018



Herold et al., 2018

## Gebirgsmechanische Konsequenzen der Rückholbarkeit

### Auslegung des Endlagers:

- Größere Abmessungen infolge der Temperaturfelder und der Spannungumlagerungen durch die Auffahrung der Aufwältigungsstrecken
- Zusätzliche Hohlräume und Bohrungen für die Beobachtung der Zustandsentwicklung

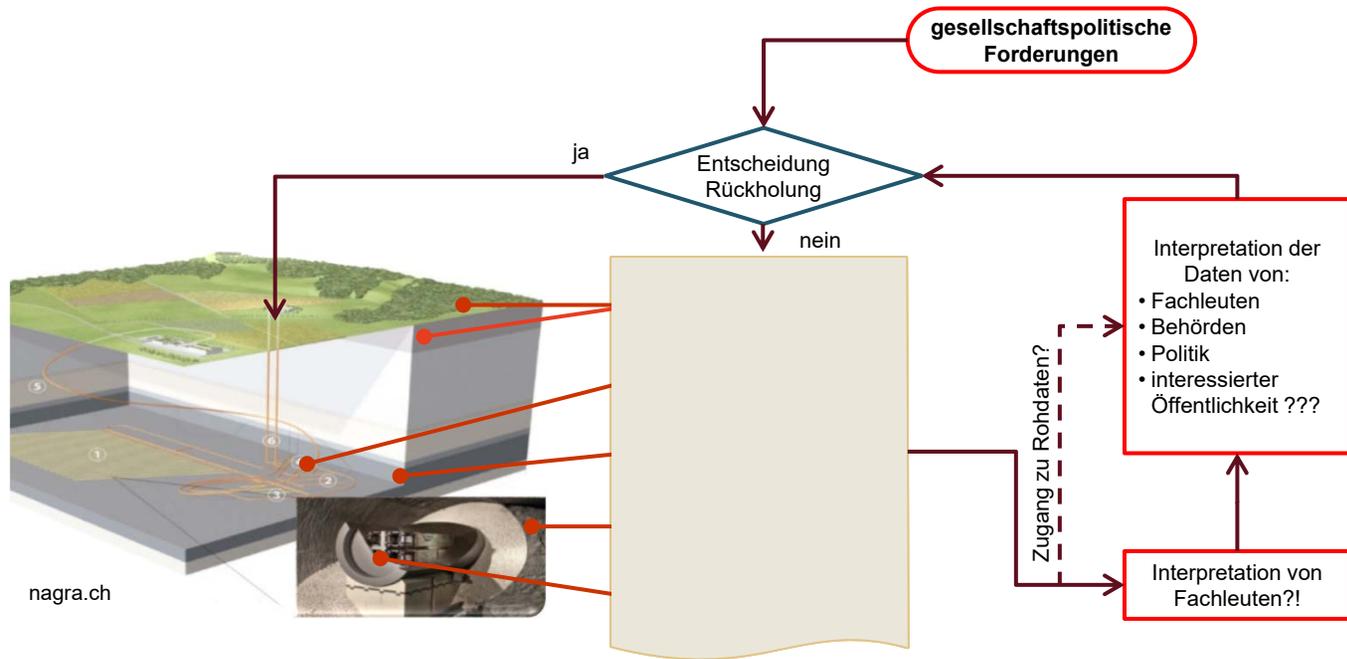
### Verlängerte Offenhaltung:

- Spannungumlagerungen um die Infrastruktur
- Alterung der Ausbausicherung
- Degradation der Integrität der Barrieren

### Rückholung:

- Erneute Veränderung des Spannungszustandes im Gebirge infolge der Auffahrung der Aufwältigungsstrecken
- Spannungumlagerungen auf andere Grubenfelder
- Ggf. erforderliche weitere Ausbausicherungen
- Weitere Degradation der Integrität der Barrieren

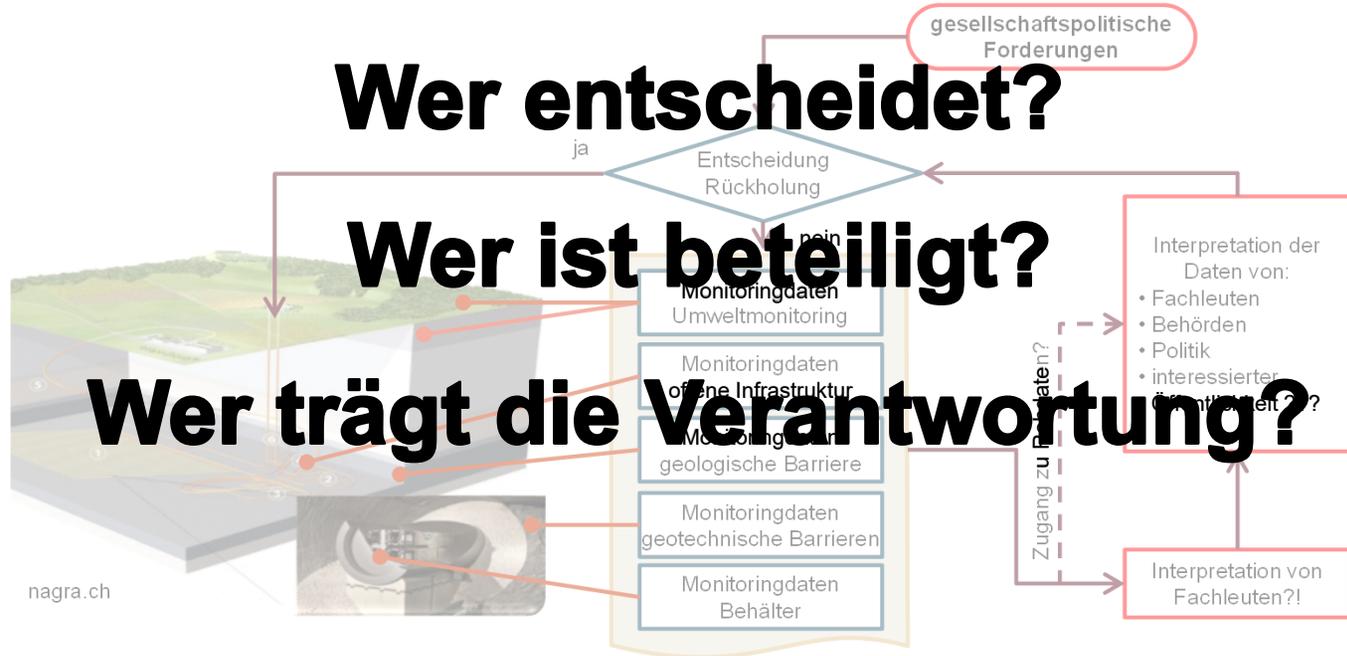
# Monitoringprozesse



Stahlmann et al., 2018

→ komplexe soziotechnische Fragestellung,  
Wechselwirkung Gesellschaft – Technik – Wissenschaft

## Monitoringprozesse



Stahlmann et al., 2018

→ komplexe soziotechnische Fragestellung,  
Wechselwirkung Gesellschaft – Technik – Wissenschaft

- Verbundvorhaben von
  - 8 Universitäten (16 Fachgebiete)
  - 2 private Forschungsorganisationen
  
- Einbindung interessierter Öffentlichkeit und anderer außerakademische Akteure innerhalb vier transdisziplinärer Arbeitspakete (TAPs) in Forschungskontexte:
  - HAFF: Handlungsfähigkeit und Flexibilität in einem reversiblen Verfahren
  - SAFE: Safety Case: Stakeholder-Perspektiven und Transdisziplinarität
  - TRUST: Technik, Unsicherheiten, Komplexität und Vertrauen
  - DIPRO: Dialoge und Prozessgestaltung in Wechselwirkung von Recht, Gerechtigkeit und Governance
  
- gefördert vom BMWi und dem NWK vorab
  
- Laufzeit: 10/2019 - 09/2024

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Niedersächsisches Ministerium  
für Wissenschaft und Kultur

Gefördert im  
Niedersächsischen Vorab  
der Volkswagenstiftung



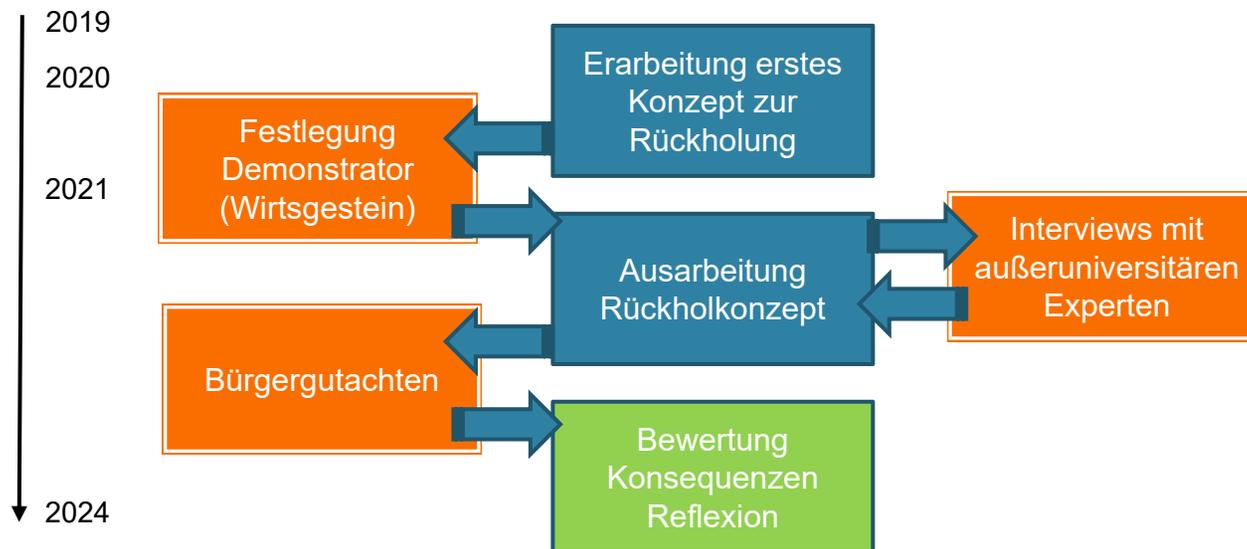
VolkswagenStiftung

Förderkennzeichen: 02E11849A-J

## Rückholung: Arbeitsprogramm IGB



- Eingebunden in TAP TRUST (Technik, Unsicherheiten, Komplexität und Vertrauen)
- Oberthema: Vertrauen im Kontext zu Unsicherheiten und Unbestimmbarkeiten
- Zusammenarbeit mit Arbeitsgruppe Bevölkerung (AGBe) und außeruniversitären Experten.



*„Das Geheimnis des Erfolges ist,  
den Standpunkt des anderen  
zu verstehen.“  
(Henry Ford)*

## Literatur

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).

Herold, P.; Prignitz, S.; Simo, E.; Filbert, W.; Bertrams, N. (2018): Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen (Abschlussbericht ERNESTA), BGE TEC 2018-11.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission) (2017): Abschlussbericht: Verantwortung für die Zukunft – Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, K-Drs. 268, Geschäftsstelle der Endlagerkommission, Deutscher Bundestag, Berlin.

Leon Vargas, R.; Stahlmann, J.; Mintzlaff, V. (2017): Thermal impact in the geometrical settings in deep geological repositories for HLW with retrievability and monitoring. 16th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWM 2017), Charlotte, NC, April 9-13, 2017.

Stahlmann, J.; León Vargas, R.P.; Mintzlaff, V. (2015a): Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung. Braunschweig.

Stahlmann, J.; Missal, C.; Gährken, A. (2015b): Interaktionen zwischen Abdichtungsbauwerk und Wirtsgestein im Steinsalz. Bautechnik 92 (2015), H. 5, S. 370–376, DOI:10.1002/bate.201500004, Ernst & Sohn, Berlin.

Stahlmann, J.; Leon Vargas, R.; Mintzlaff, V. (2016): Geotechnische und geologische Aspekte für Tiefenlagerkonzepte mit der Option der Rückholung der radioaktiven Reststoffe. Bautechnik, 93. Jahrgang, Heft 3, doi:10.1002/bate.201500068, Ernst & Sohn, Berlin.

Stahlmann, J.; Mintzlaff, V.; León Vargas, R.P.; Epkenhans, I. (2018): Normalszenarien und Monitoringkonzepte für Tiefenlager mit der Option Rückholung. Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe. ENTRIA-Arbeitsbericht-15. Braunschweig.

Bilderquellen:

[1] <https://imaggeo.egu.eu> – Neta Wechsler

[2] [de.wikipedia.org](https://de.wikipedia.org)

[nagra.ch](https://www.nagra.ch)