Vortrag

ESK-Stellungnahme zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27 (4)

Prof. Dr. Barbara Reichert
Vorsitzende der Entsorgungskommission (ESK)

www.entsorgungskommission.de

Hintergrund

- Standortauswahlgesetz [1 § 27]:
  „Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen.“

- Widerspruch zu dem Abschlussbericht der Endlagerkommission (S. 326/327):
  „Festlegungen von wirtsgesteinsspezifisch oder gar allgemein gültigen Grenztemperaturen und ihre Anwendung zur zuverlässigen Vermeidung nachteiliger Konsequenzen für die Endlagersicherheit nur bedingt geeignet“ sind, da *„durch die Temperaturerhöhung in geotechnischen Barrieren und umgebendem Gebirge Prozesse mit unterschiedlichen negativen oder positiven Konsequenzen für die Endlagersicherheit ausgelöst, beschleunigt oder verstärkt werden können“*.

Hintergrund

- Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV):
  § 5 und § 6: „*Hinsichtlich der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren ist zu prüfen und darzustellen, dass durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die Sicherheitsfunktionen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigt*“ werden.
- Die technische Auslegung des Endlagers ist abzuleiten und **zu optimieren** (§ 11 EndlSiAnfV)
  Daher kommt der Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche bereits in Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens eine wesentliche Rolle, da in diesem Schritt Endlagerkonzepte entwickelt werden. Damit wird auch die Endlagergröße festgelegt und es werden die ersten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vorgenommen.

Hintergrund

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

„Grenztemperatur“ zur Gewährleistung des Erhalts der Sicherheitsfunktionen:

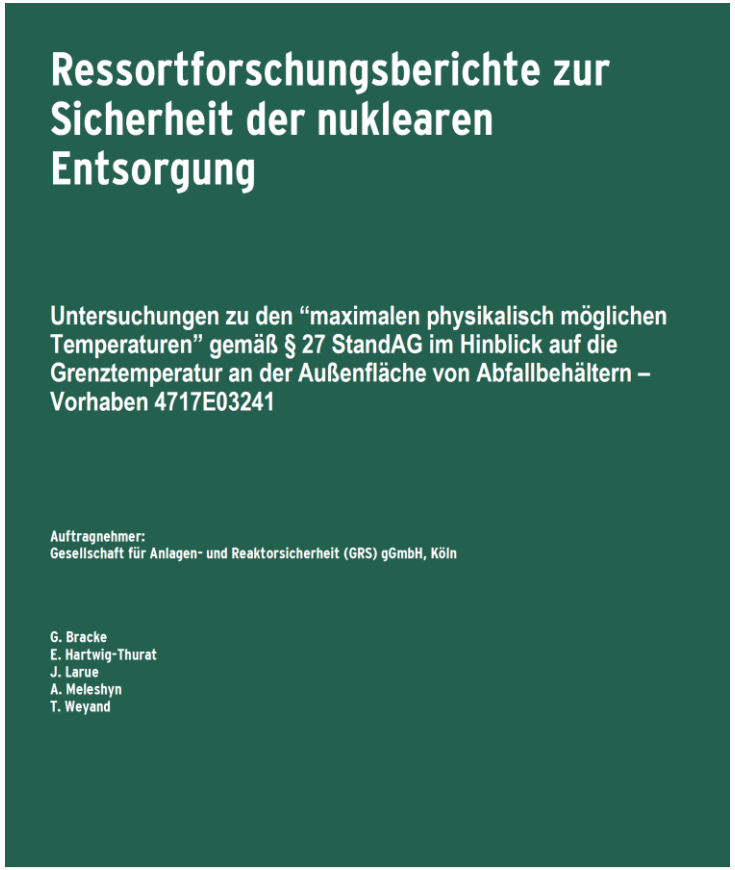
- Wesentlicher Aspekt sind temperaturabhängige gekoppelte **T**hermisch-**H**ydraulisch-**M**echanisch-**C**hemisch-**B**iologische Prozesse

➔ Konsequenzen für:

- Endlagerkonzept
- Sicherheitsuntersuchungen
- Standortauswahl (nach StandAG den Endlagerstandorts mit der „bestmöglichen Sicherheit“)

Hintergrund

- Bracke et al 2019:
- *„eine generelle „Grenztemperatur“* könnte *„den Standortauswahlprozess wegen der eingeschränkten Möglichkeiten einer Optimierung des Endlagers erschweren“*.
- *„Grenztemperaturen“ für die Außenfläche von Abfall-behältern“* sollten *„für das jeweilige Sicherheits-, Endlagerkonzept und Wirtsgestein abgeleitet werden“,*
- da *„sicherheitstechnisch belastbare und begründbare Temperaturbegrenzungen (z. B. an der Außenfläche der Behälter) sich nur auf der Grundlage eines (ggfs. vorläufigen oder generischen) Sicherheits- und Endlagerkonzepts und Sicherheitsuntersuchungen ableiten lassen“.*


Ressortforschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung

Untersuchungen zu den “maximalen physikalisch möglichen Temperaturen” gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern – Vorhaben 4717E03241

Auftragnehmer:
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Köln

G. Bracke
E. Hartwig-Thurat
J. Larue
A. Meleshyn
T. Weyand

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit

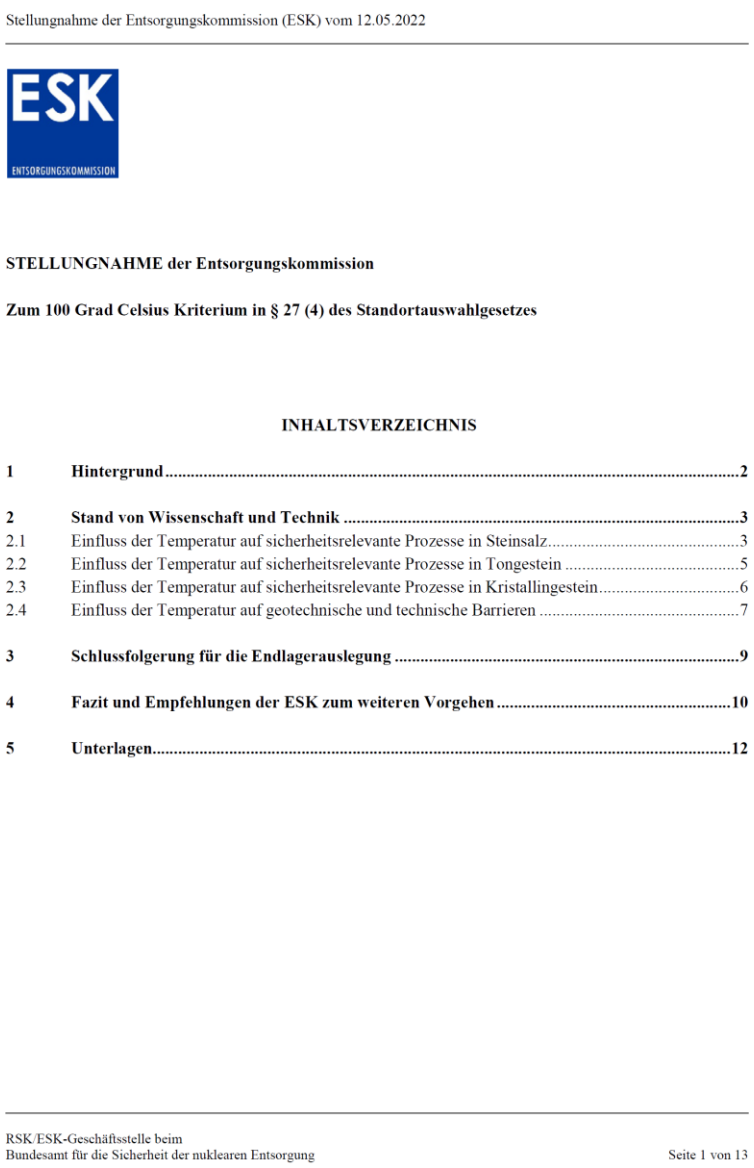
Forschungsprojekt im Auftrag von Base (Literaturrecherche mit 668 Literaturquellen)

Bracke G., E. Hartwig-Thurat, J. Larue, A. Meleshyn, T. Weyand (2019): Untersuchungen zu den “maximalen physikalisch möglichen Temperaturen” gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern - Vorhaben 4717E03241 urn:nbn:de:0221-2019111520402.

Zielsetzung

- Zusammenfassung von den Stand von Wissenschaft und Technik über den Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in den verschiedenen Wirtsgesteinen.

- Empfehlungen zur Berücksichtigung des Parameters Temperatur im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens.



Stellungnahme der Entsorgungskommission (ESK) vom 12.05.2022

STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission

Zum 100 Grad Celsius Kriterium in § 27 (4) des Standortauswahlgesetzes

INHALTSVERZEICHNIS

1 Hintergrund ... 2

2 Stand von Wissenschaft und Technik ... 3
2.1 Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Steinsalz ... 3
2.2 Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein ... 5
2.3 Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Kristallingestein ... 6
2.4 Einfluss der Temperatur auf geotechnische und technische Barrieren ... 7

3 Schlussfolgerung für die Endlagerauslegung ... 9

4 Fazit und Empfehlungen der ESK zum weiteren Vorgehen ... 10

5 Unterlagen ... 12

RSK/ESK-Geschäftsstelle beim
Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung

Seite 1 von 13

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Steinsalz

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Druckgetriebene Infiltration von Fluiden (Perkolation):**
  es ist keine Permeabilitätserhöhung in natürlichen Steinsalzproben unter den bei einem Endlager zu betrachtenden Drücken und Temperaturen zu erwarten.
- **Kompaktion von Salzgrusversatz:**
  Temperaturerhöhung erhöht Salzgruskompaktionsrate deutlich
  → schnellerer flüssigkeitsdichter Verschluss des Endlagers
  Temperaturen um 200 °C im Nahbereich haben somit einen deutlich positiven Effekt auf die Sicherheit.
- **Mikrobielle Prozesse:**
  können zu Zersetzungen von z. B. organischen Substanzen führen, damit verbunden können Gasbildung, Korrosion und Mineralumwandlungen auftreten.
  hyperthermo- und halophile Mikroorganismen bis 120 °C lebensfähig
  höhere Temperaturen minimieren potentielle mikrobiologische Aktivität
  (+ für die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs).

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Steinsalz

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Bildung von Sekundärpermeabilitäten durch thermische Degradation von Salz-, Doppelsalz- und Tripelsalzhydraten:**

Geschlossenes System

- unterhalb des Schmelzpunkts des Hydrates keine thermische Degradation
- Nur Carnallit schmilzt inkongruent bei etwa 167 °C

offenes System

- thermische Entwässerung der Hydrate setzt bereits bei niedrigeren Temperaturen ein
- Entscheidend: Gradient zwischen Gleichgewichts-wasserdampfdruck (temperaturabhängig) und Umgebungsdruck

Bildung von potenziellen Sekundärpermeabilitäten durch thermische Degradation: Ausschluss durch entsprechende Abstände zu Carnallitvorkommen.

Ggf. sehr geringe Beimengungen von Polyhalit und Kieserit (inkongruente Schmelzpunkte bei T > 200 °C) verursachen keine merklichen Sekundärpermeabilitäten.

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Stabilität der Tonminerale:**
  - zunehmende Temperatur kann zu zunehmender Illitisierung quellfähiger Smektit-Anteile führen (Tongestein verliert schrittweise an Quellfähigkeit und Plastizität), abhängig von:
    - thermischer Vorgeschichte des Gesteins (noch vorhandener Smektit-Gehalt)
    - Angebot an Kalium
    - Zeitdauer eines thermischen Pulses.
    - kritische Temperaturfenster von 50 °C bis 270 °C.
- **Auflösung und/oder Neubildung von weiteren Mineralen:**
  - Mit der Smektit-Illit-Umwandlung entstehen auch größere Mengen an Quarz, dadurch Abnahme von Plastizität und Quellbarkeit des Gesteins
  - Temperaturfenster von 60 °C bis 150 °C.

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Chemische Alteration der Organika:**
  - stufenweise Umwandlung von organischem Material in Tongestein bei höheren Temperaturen und dabei Freisetzung von CO_2 und H_2S
    ➔ (Erhöhung Fluiddruck).
  - Ablaufenden Prozesse abhängig von:
    - Art des im Tongestein eingelagerten organischen Materials
    - thermischer Vorgeschichte
      Boom-Clay (schwach konsolidierter Ton) bereits ab 80 °C , in anderen Tongesteinen erst ab 150 °C.
  - Führen zu Änderungen in der Zusammensetzung des Porenwassers
  - Können Mineralausfällungen oder -auflösungen begünstigen.

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Mikrobielle Prozesse:**
  - Aktivität einzelner Mikroorganismengruppen ist stark temperaturabhängig:
  - Erhöhte Temperaturen reduzieren die mikrobiellen Prozesse, bei einer Temperatur um ca. 120 °C kommt die mikrobielle Aktivität nach derzeitigem Kenntnisstand zum Erliegen.
- **Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen**:
  - Bei Erwärmung geht gebundenes Wasser wieder in freies Porenwasser über und erhöht die kinematische Porosität.
  - Quellen und Schrumpfen sind temperaturabhängige Prozesse, die schon unterhalb von 100 °C beginnen.

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Sorption und Desorption:**
  - Je höher die Temperatur ist, desto weniger verfügbare experimentelle Daten zur Sorptionsfähigkeit von Radionukliden an verschiedenen Tonmineralen liegen vor
  - Generell keine einheitliche Temperaturabhängigkeit des Sorptionsverhalten.
  - Mit zunehmender Temperatur kann gleichzeitig vorgängig adsorbiertes CO_2 freigesetzt werden (Desorption).

- **Thermische Expansion oder Kontraktion:**
  - Erwärmungen im Tongestein wirken sich bei niedrigen Temperaturen nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften des Tongesteins aus,
  - oberhalb von etwa 150 °C : positive Wirkung auf die Wärmeleitfähigkeit, die Festigkeit, die Steifigkeit und die Permeabilität des Tongesteins.
  - Expansion bei tiefen Temperaturen vermutlich reversibel,
    Kontraktion bei hohen Temperaturen vermutlich irreversibel.

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Tongestein

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- je nach betrachtetem Prozess können sich sowohl eine Temperaturzunahme als auch eine Temperaturabnahme negativ auf die Sicherheit eines Endlagers in einem Tongestein auswirken
- Ein Teil der Prozesse kann bereits bei Temperaturen unterhalb von 100 °C relevant sein und daher die Wahl eines Wirtsgesteins und der Materialien der geotechnischen und technischen Barrieren, d. h. die Gesamtauslegung eines Endlagers beeinflussen.
- Die tongesteinspezifische Temperaturabhängigkeit der Prozesse ist jedoch von einer Vielzahl von Parametern und Wechselwirkungen abhängig. Bei diversen Literaturdaten sollte die Übertragbarkeit auf ein konkretes Tongestein geklärt werden.
- Bracke et al (2019) kommen zum Schluss, dass die Festlegung einer pauschalen Temperaturbegrenzung ohne Berücksichtigung eines Endlagerkonzepts in Tongestein ***„sicherheitstechnisch unzureichend begründbar“*** ist.

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in Kristallingestein

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- Kristallingestein als Wirtsgestein ist entstehungsbedingt temperaturunempfindlich.
- **Sicherheitskonzeptionelle Temperaturlimitierungen** ergeben sich aus
  - den (geo)technischen Barrieren (z. B. Bentonit als Buffer, Behälter),
  - den Fluiden (geochemisches Milieu)
  - und ggf. tonigen Kluftfüllungen (sicherheitsrelevante Barrierefunktion).
  - Prozesse, die berücksichtigt werden müssen sind
    - temperaturabhängige Umwandlungen von Tonmineralen,
    - Auflösung und/oder Neubildung von weiteren Mineralen,
    - mikrobielle Prozesse,
    - Quellen und Schrumpfen von Tonmineralen und
    - Sorption und Desorption.

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in den wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Bentonitstabilität:**
  Quelleigenschaften von Bentonit sind temperaturabhängig, ab 150 °C sinkt der Quelldruck und die hydraulische Leitfähigkeit nimmt zu.

- **Eigenschaften der Bentonitbarriere:**
  Quelldruck von kompaktiertem Bentonit nimmt mit steigender Temperatur ab. Die Wärmeleitfähigkeit von Bentonit hängt deutlich vom Sättigungsgrad ab (Modellierung der thermischen Eigenschaften insbesondere für Spitzentemperaturen im Nahbereich der eingelagerten radioaktiven Abfälle während der ungesättigten Phase)

- **Mineralogische Veränderungen in Bentonit**
  T > 100 °C: Umwandlung von Montmorillonit in Beidellit → Abnahme der Kationenaustauschkapazität, der spezifischen Oberfläche und der Wasserdampfadsorption.

- **Behälterkorrosion:**
  höhere Temperaturen führen in Kontakt mit Grund- oder Porenwasser generell zu höheren Korrosionsraten von Endlagerbehältern (Behälterauslegung).

Einfluss der Temperatur auf sicherheitsrelevante Prozesse in den wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- **Stabilität der hochaktiven Abfallprodukte:**
  Endlagerbehälter als technische Barriere der Abfallprodukten gegen Grund- oder Porenwässer
  - Stabilität der verglasten Abfälle:
    Anfängliche Korrosionsraten erhöhen sich mit einer von der Glaszusammensetzung abhängigen bekannten Aktivierungsenergie, nimmt jedoch nach Sättigung des Porenwassers mit aufgelöstem Silizium schnell um mehrere Größenordnungen ab
    Einfluss der Temperatur auf Kopplung zwischen Glaskorrosionsraten und Behälterkorrosions-produkten nicht bekannt
  - Stabilität des abgebrannten Kernbrennstoffes:
    Temperaturabhängigkeit der Brennstoffkorrosion im Porenwasser und Höhe der instantanen Freisetzung einiger Nuklide (z.B. ^{129}I) sehr gering
- **Mobilität der Radionuklide:**
  thermo-dynamische Konstanten sind für Schlüsselnuklide in allen Gesteinsformationstypen weitgehend bekannt, Datendichte nimmt mit zunehmender Temperatur ab
  Mobilität einiger Radionuklide kann sich mit zunehmender Temperatur erhöhen

Fazit und Empfehlungen der ESK zum weiteren Vorgehen

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- Die Festlegung jeglicher Grenzwerte kann nur dann durch das Vorsorgeprinzip gerechtfertigt werden, wenn eine Einhaltung der Grenzwerte eindeutig risikomindernd wirkt (https://www.juraforum.de/lexikon/vorsorgeprinzip).
  Dies ist jedoch wegen der **„unterschiedlichen negativen oder positiven Konsequenzen für die Endlagersicherheit“** im vorliegenden Fall nicht gegeben. Eine isolierte Betrachtung einzelner Effekte ist in diesem Zusammenhang nicht zielführend.

- Bei der Endlagerauslegung kann eine solche Festlegung zu potentiell hohem Platzbedarf führen
  ➔ Wahrscheinlich größere Ausdehnung des Endlagers engverbunden mit größerer Variabilität der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs im Vergleich zu einem Endlager mit kleineren Abmessungen.
  ➔ Dies führt, insbesondere vor dem Beginn von Erkundungen, zu höheren Ungewissheiten.

Fazit und Empfehlungen der ESK zum weiteren Vorgehen

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

- Die im StandAG [1, § 27 (4)] als „ausstehend“ bezeichneten Forschungsergebnisse liegen vor, so dass nicht mehr von einer für alle Wirtsgesteine einheitlichen „Grenztemperatur“ ausgegangen werden sollte.
- Forschung und Entwicklung – auch hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Auswirkungen des Wärmeeintrags in ein Endlager – entwickeln sich weiter, die wesentlichen Effekte sind aber seit Langem bekannt.
- Forschungs- und Entwicklungsbedarfe wären ggf. konzeptspezifisch, wirtsgesteinsspezifisch und standortspezifisch, nicht jedoch allgemein verbindlich generisch abzuleiten.

Fazit

- Die Festlegung einer wirtsgesteinsunabhängigen “Grenztemperatur” ist durch das Vorsorgeprinzip nicht gerechtfertigt.
- Die […] Forschungsergebnisse liegen vor.
- Forschungs- und Entwicklungsbedarfe wären ggf. konzeptspezifisch, wirtsgesteinsspezifisch und standortspezifische, nicht jedoch allgemein verbindlich generisch abzuleiten
- Den rvSU sollte keine einheitliche “Grenztemperatur” zu Grunde gelegt werden. Temperatur sollte als Auslegungsparameter eingesetzt werden.
- Anforderungen hinsichtlich der Temperaturverteilung und -entwicklung im Endlagersystem müssen wirtsgesteinsspezifisch bzw. standortspezifisch formuliert und das Endlager entsprechend ausgelegt werden.

Ihre offenen Fragen

Ihre offenen Fragen

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

Sind die erforderlichen Kenntnisse und Daten bereits verfügbar, um die physikalisch maximal möglichen Temperaturen an der Außenfläche Abfallgebinde zu Wirtsgestein und Buffer neu zu bewerten?

Würde eine Aufhebung der derzeit gültigen Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter die Endlagersuche im Steinsalz bevorzugen?

Welcher zusätzliche Forschungsbedarf besteht für flach lagernde Steinsalze?

Ihre offenen Fragen

ESK
ENTSORGUNGSKOMMISSION

Schränkt eine konzept- und standortunabhängige Vorabfestlegung einer maximalen Temperatur die Optimierung von Endlagerkonzepten ein?

Wenn ja, welchen Einfluss hat diese Einschränkung auf die zu erwartende Sicherheit des Endlagers?

Kann eine Rückholung bzw. Bergung bei höheren maximal möglichen Temperaturen tatsächlich realisiert werden? Welche Aspekte sind dabei kritisch?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit