

Fachgespräch, 9.5.2011, Berlin

Soll Atommüll rückholbar endgelagert werden?

Detlef Appel

PanGeo - Geowissenschaftliches Büro, Hannover

Geologische Aspekte der Endlagerung

mit Rückholbarkeit von Abfällen

Geologische Aspekte der Endlagerung

Inhalt

- Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen - Vorteile / Nachteile
- Status der Entsorgungsstrategie Endlagerung
- Endlagerkonzept Deutschland (BMU 2010: Sicherheitsanforderungen...)
- Argumente für Rückholbarkeit mit Bezug zur Geologie
- Gründe geologischer Skepsis gegenüber Rückholbarkeit
- Bezug und Bedeutung geologischer Aspekte der Rückholbarkeit
- Endlagerungsphasen und Rückholungsaspekte
- Rückholungsrelevante Eigenschaften von Granit / Steinsalz / Tonstein
- Beispiele Einlagerung / Rückholung bei Granit / Steinsalz / Tonstein
- Resumee Geologie und Rückholbarkeit

Endlagerung in tiefen geologischen Formationen - Vorteile

- Fähigkeit geologischer Barrieren, Radionuklide / andere **schädliche Stoffe einzuschließen / zurückzuhalten**
- **Abstand** zwischen Abfall und Biosphäre
- geologische Barrieren bieten **passive Sicherheit**; Nachsorge (Wartung und Reparatur) nicht erforderlich - was allerdings zu "beweisen" ist!
- passiver Zustand wird innerhalb "**kurzer**" **Zeit** erreicht
- Wirkung und Erhalt der **sicherheitsbezogenen Eigenschaften** geologischer Barrieren **aus Naturbeobachtungen bzw. Standortentwicklung** in der Vergangenheit **ableitbar**
- geringe **Kosten** (?)

⇒ **frühe Festlegung auf Endlagerung in tiefen geologischen Formationen (insbes. für HAA; D und CH: alle Arten radioaktiver Abfälle)**

Endlagerung in tiefen geologischen Formationen - Nachteile

- "Nachweis der Langzeitsicherheit" ist kein "Beweis", da **Prognosen** zur künftigen Entwicklung des Endlagersystems, insbesondere **zur dauerhaften Funktion** der Barrieren, **mit Unsicherheiten behaftet** sind
- **falsche Standortentscheidung** (sofern überhaupt erkennbar) nach Einlagerung praktisch nicht mehr korrigierbar ("**irreversibel**")
- **Überwachung / Nachsorge** über gesamten Nachweiszeitraum **nicht / nur eingeschränkt** möglich bzw. "**garantierbar**"
- **Reparaturmaßnahmen** nach Verschluss des Endlagers **nicht / nur für kurzen Zeitraum** möglich bzw. "**garantierbar**"
- **nicht nachhaltig** (insbesondere abgebrannte BE)

⇒ **Reduzierung von / sorgfältiger Umgang mit Unsicherheiten**

⇒ **Forderung nach Zwischenlösungen bzw. Alternativen mit "aktiver Sicherheitsgewährleistung", wie Rückholbarkeit von Abfällen, ...**

Status der Entsorgungsstrategie Endlagerung

International (aber länderspezifisch)

- breite Diskussion / Berücksichtigung ethischer Belange (insbesondere Gerechtigkeit, Nachhaltigkeit) und ihrer Konsequenzen
- Beteiligung von Betroffenen / der Öffentlichkeit an Entscheidungsprozessen
- Entsprechende Verfahrensregeln und Verfahrenstransparenz (unabhängige Verfahrenskontrolle, Vergleich von Alternativen, ...)
- Diskussion und - sofern sicherheitstechnische oder gesellschaftliche Vorteile gesehen werden - Umsetzung von Alternativen zur "reinen" Endlagerung, insbesondere **Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle**

⇒(behauptete) Praxis der Entscheidungsfindung und -umsetzung

Status der Entsorgungsstrategie Endlagerung

Deutschland

- In Deutschland gilt die internationale Praxis nur eingeschränkt.
- Die Fälle Asse und Morsleben zeigen, dass (technisch / politisch) zuständige Personen / Institutionen sicherheitstechnisch falsche Entscheidungen getroffen bzw. kritische sicherheitstechnische Verhältnisse - zumindest gegenüber der Öffentlichkeit - verschwiegen und verharmlost haben.
- Weite Teile der Öffentlichkeit sind daher überzeugt, dass die Option "Endlagerung in Steinsalz" sicherheitstechnisch gescheitert ist.
- Das Vertrauen weiter Teile der Öffentlichkeit in Fähigkeit und Bereitschaft der (technisch / politisch) verantwortlichen Institutionen, die radioaktiven Abfälle so dauerhaft sicher endzulagern, ist beschädigt.

⇒ **Forderungen nach Alternativen zur "reinen" Endlagerung, auch Endlagerung mit Rückholbarkeit der Abfälle**

Endlagerkonzept Deutschland

"Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle" (BMU 2009):

Schutzziele

- dauerhafter **Schutz von Mensch und Umwelt** vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen der Abfälle
- **Vermeidung unzumutbarer Lasten** und Verpflichtungen für zukünftige Generationen

Endlagerkonzept Deutschland

Sicherheitsprinzipien zum Schutz von Mensch und Umwelt

- **Einschlusswirksamer Gebirgsbereich** (Wirtsgestein) soll **Schadstoffe einschließen und** so möglichst lange **von Biosphäre fernhalten**
- **nur sehr geringe Erhöhung der natürlichen Strahlenexposition** durch Freisetzung radioaktiver Stoffe
- **keine Gefährdung der Artenvielfalt**
- **keine unnötige Einschränkung der anderweitigen Nutzung natürlicher Ressourcen**
- **Auswirkungen der Endlagerung außerhalb Deutschlands nicht größer als in Deutschland akzeptiert**

Endlagerkonzept Deutschland

Sicherheitstechnische Anforderungen zum Schutz von Mensch und Umwelt

- Formation mit hohem Einschlussvermögen (**einschlusswirksamer Gebirgsbereich**) ⇒ **keine / allenfalls geringfügige Freisetzung**
- Barrierensystem: robust, gestaffelt, **passiv, wartungsfrei**
- **Nachweiszeitraum 1 Mio Jahre**
- **Rückholung** der radioaktiven Abfälle **nicht beabsichtigt**

aber

- **Bergungsmöglichkeit** (Handhabbarkeit) der Behälter für 500 Jahre
- **Behälter-Rückholung** muss während **Betriebsphase** möglich sein
- **keine Beeinträchtigung der passiven Sicherheitsbarrieren und damit der Langzeitsicherheit durch Maßnahmen zur Sicherstellung der Rückholung oder Bergung**

Endlagerkonzept Deutschland

Sicherheitsprinzipien zur Vermeidung unzumutbarer Lasten

- nach Verschluss des Endlagers **keine Erfordernis von Eingriffen oder Wartungsarbeiten** zum Erhalt des Einschlusses
- möglichst **zügige Errichtung** des Endlagers
- **finanzielle Mittel** für Endlagererrichtung, -betrieb und -stilllegung bereit stellen

Argumente für Rückholbarkeit mit Bezug zur Geologie

Reaktionsmöglichkeit, falls sich der Endlagerstandort als ungeeignet erweist	?
durch In-situ-Untersuchung / Beobachtung Verständnis über Endlagersystem und damit Nachweisqualität verbessern	(!)
auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren	?
auf bessere Entsorgungsstrategie, insbesondere Abtrennung und Transmutation, warten	?
Gerechtigkeit: Handlungsspielraum künftiger Generationen	?
Nachhaltigkeit: Spätere Verwertung bestimmter Abfälle erleichtern	?
Demokratische Teilhabe an Entsorgungsentscheidungen	?
Akzeptanzförderung	!/?

Oft genannte Argumente für Rückholbarkeit als Möglichkeit, die Nachteile der Endlagerung zu überwinden

Gründe geologischer Skepsis gegenüber Rückholbarkeit

- **Offenhalten** des Endlagerbergwerks, insbesondere über sehr langen Zeitraum, stellt **Sicherheitsrisiko** dar
 - ⇒ Zugangswege zu Abfällen sind **Wasserwegsamkeiten**
 - ⇒ Offene Hohlräume und gleichzeitiger Wärmeeintrag können sicherheitsrelevante **mechanische / hydraulische Auswirkungen** haben
- **Können** die zur Reduzierung der geologischen Prognoseunsicherheit hilfreichen **Informationen bei (teilweise) offenem Endlager überhaupt erhoben werden?**
 - ⇒ Einstellung des zu beurteilenden Langzeitzustands wird verzögert
- Der **Schutz von Mensch und Umwelt muss** u.U. für beträchtliche Zeiträume durch sicherheitsgerichtete Maßnahmen, also **aktiv gewährleistet werden**
 - ⇒ **Prognosen über die künftige Entwicklung der Gesellschaft mit größeren Unsicherheiten behaftet** als bei geologischen Systemen

Bezug und Bedeutung geologischer Aspekte der Rückholbarkeit

Geologische Aspekte der Rückholbarkeit von Abfällen

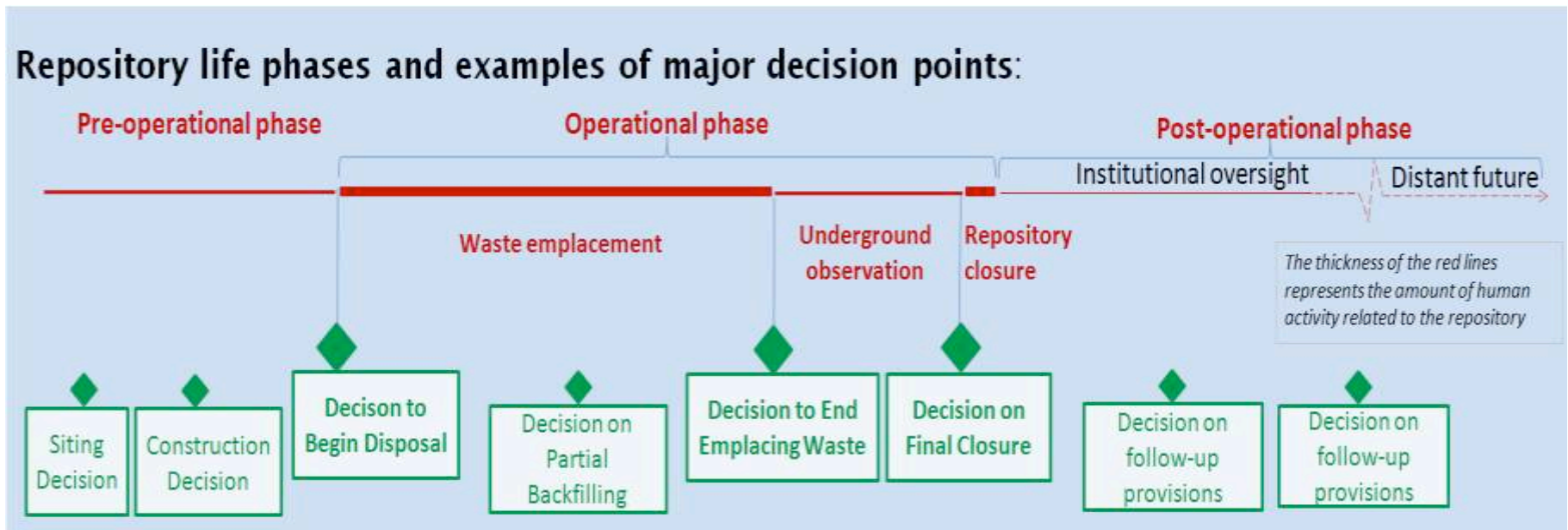
- resultieren im Wesentlichen aus
 - den **gesteinstypischen** bzw. **standortspezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins** (einschlusswirksamer Gebirgsbereich) des Endlagersystems und den durch sie gesteuerten bzw. beeinflussten Prozessen bzw. Entwicklungen im Endlagersystem
 - **Veränderungen der Eigenschaften** durch Errichtung und Betrieb des Endlagerbergwerks (z.B. Bewetterung) bzw. durch von den eingelagerten Abfällen ausgehende Einflüsse (z.B. Wärmeeintrag)

Bezug und Bedeutung geologischer Aspekte der Rückholbarkeit

Geologische Aspekte der Rückholbarkeit von Abfällen

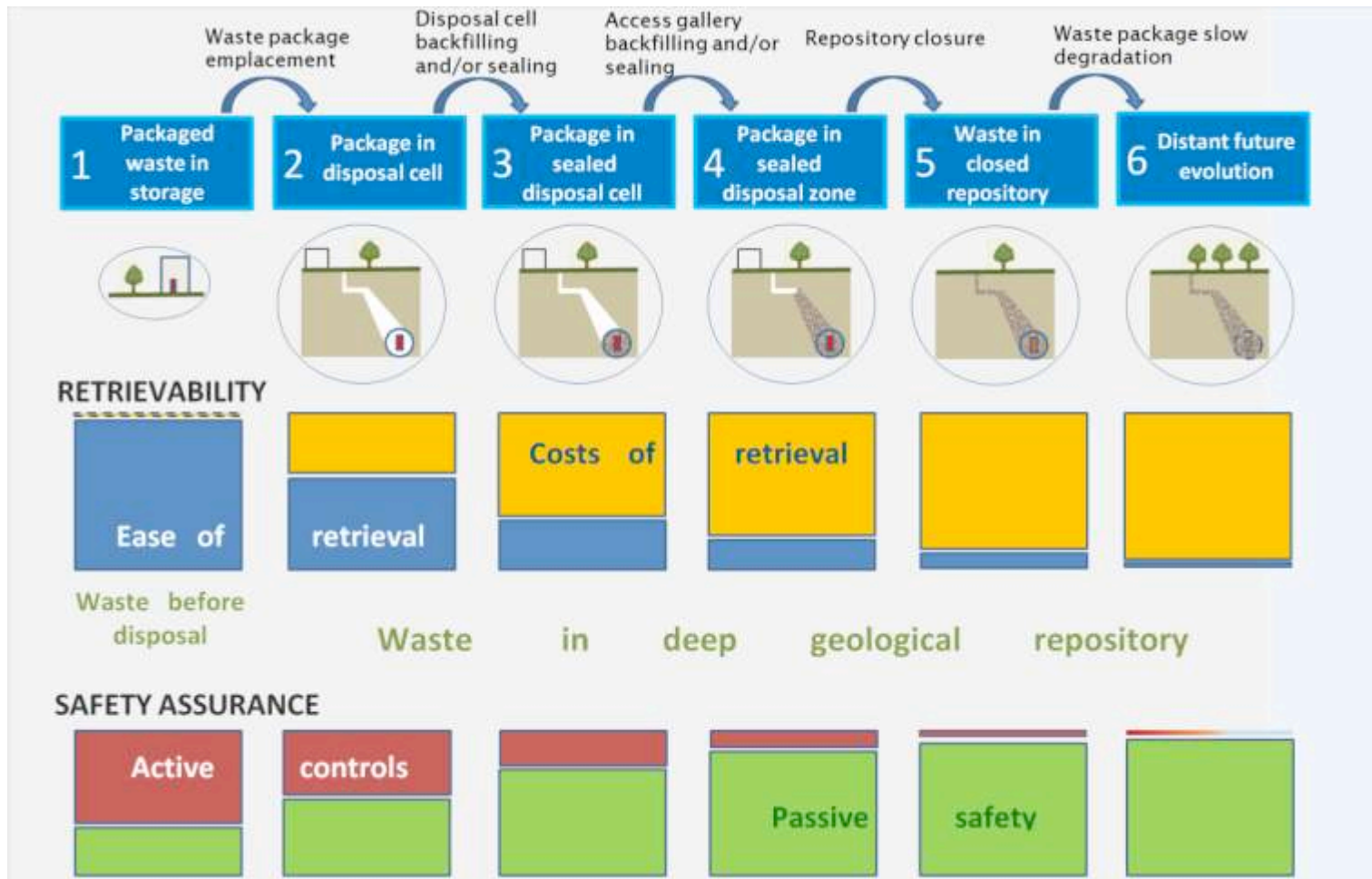
- betreffen direkt oder indirekt vor allem
 - die **dauerhafte Funktionstüchtigkeit** der geologischen / geotechnischen Barrieren
 - die **Zuverlässigkeit des entsprechenden Nachweises** (Langzeitsicherheit)
 - **Technik und Aufwand der Einlagerung / Rückholung** von Abfallgebinden
 - die Sicherung der Abfälle (safeguards)
- haben hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung **Bezug zu Entscheidungsschritten / Phasen der Endlagerentwicklung**

Endlagerungsphasen und Rückholbarkeitsaspekte



Endlager-Existenzphasen und wichtige Entscheidungspunkte (NEA 2011)

Endlagerungsphasen und Rückholbarkeitsaspekte



Abfallzyklusphasen, Entwicklung von Leichtigkeit / Kosten der Rückholung sowie der Bedeutung aktiver / passiver Sicherheitsgewährleistung (NEA 2011)

Endlagerungsphasen und Rückholbarkeitsaspekte

Stage and Location of the Waste		Ease of Retrieval	Specific Elements of Passive Safety	Specific Elements of Active Control
1	Waste Package in storage	Waste package retrievable by design	Waste form and its storage container	Active management of storage facility including security controlled area
2	Waste Package in disposal cell*	Waste package retrievable by reversing the emplacement operation	Waste form and disposal container Hundreds of meters of rock Engineered disposal cell	Active management (including monitoring) of disposal cells and disposal facility. Security controlled area
3	Waste Package in sealed disposal cell	Waste package retrievable after underground preparations	As in previous stage, plus backfill/sealing of disposal cell	Monitoring of disposal cells possible. Active management of access ways to disposal cell seals. Security controlled area
4	Waste Package in sealed disposal zone	Waste package retrievable after re-excavation of galleries	As in previous stage, plus backfill/sealing of cells and their access	Monitoring of disposal cells potentially possible. Security controlled area. Detailed records and institutional controls for a specified period, including international safeguards.
5	Waste Package in closed repository	Waste package retrievable after excavating new accesses from surface. Ad-hoc facilities to be built to support retrieval.	As in previous stage, plus sealing of shafts and access drifts to ensure long term confinement of the waste within the underground facility.	Maintaining records Regular oversight activities as long as possible (e.g. environmental monitoring, possibly remote monitoring, security controls and international safeguards).
6	Distant future evolution	Package degrading with time. Waste ultimately only recoverable by mining	Geology and man-made barriers Reduction in level of radioactivity.	Specific provisions for longer-term memory preservation, e.g. site markers.

Abfallzyklusphasen, Leichtigkeit der Rückholung sowie spezifische Elemente passiver Sicherheit und aktiver Systemkontrolle (NEA 2011)

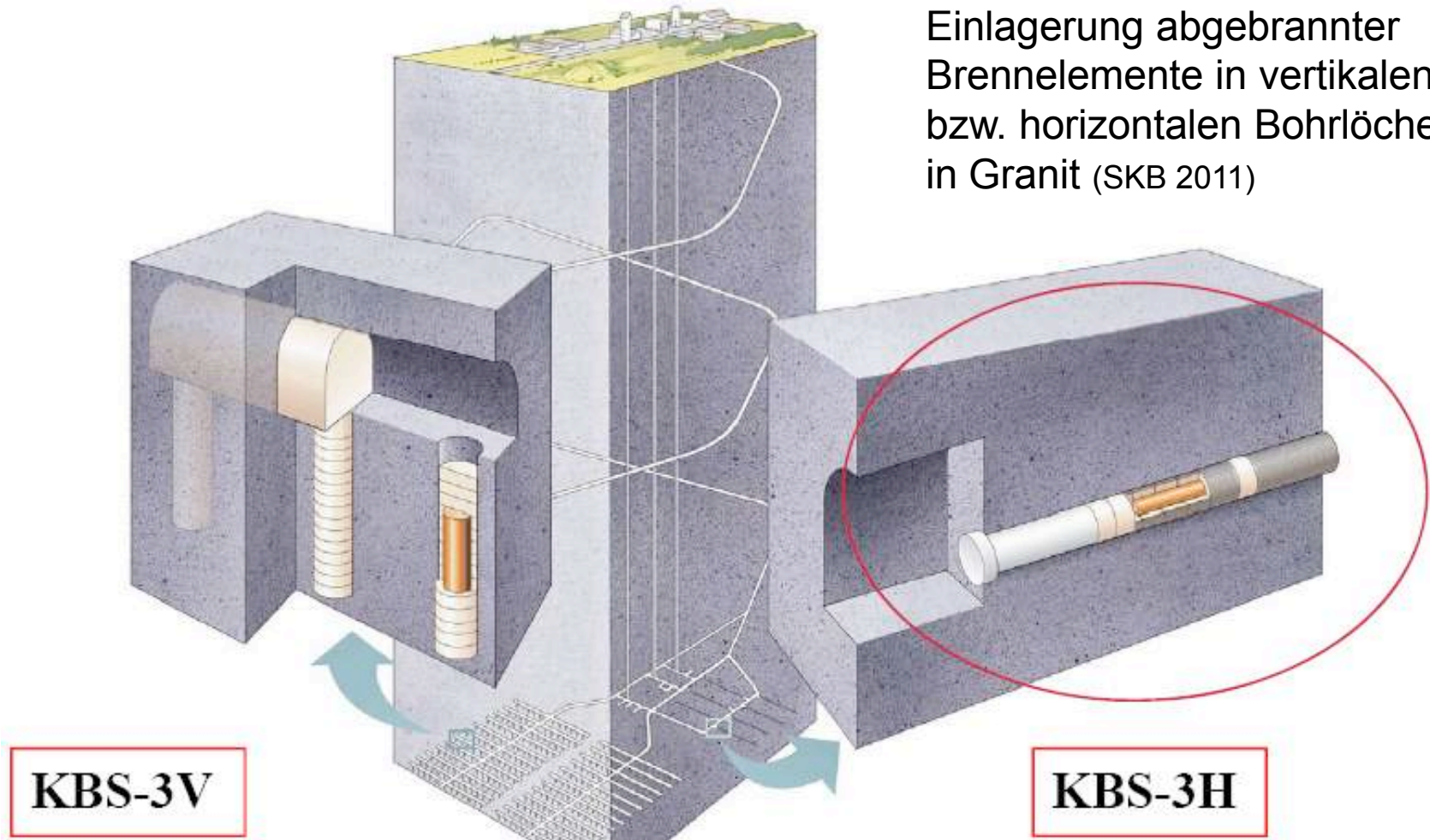
Rückholungsrelevante Eigenschaften von Granit

Kristalline Gesteine - Granit, Gneis

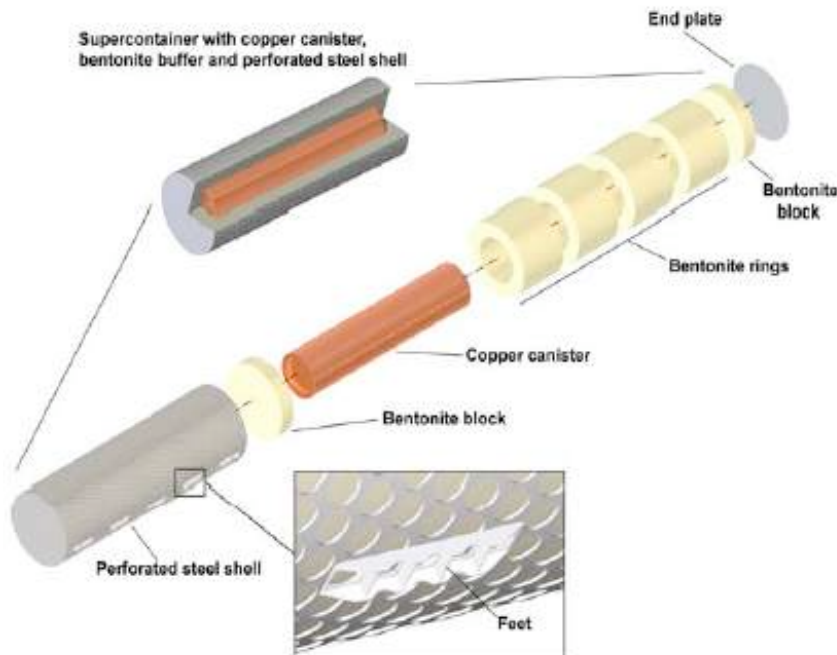
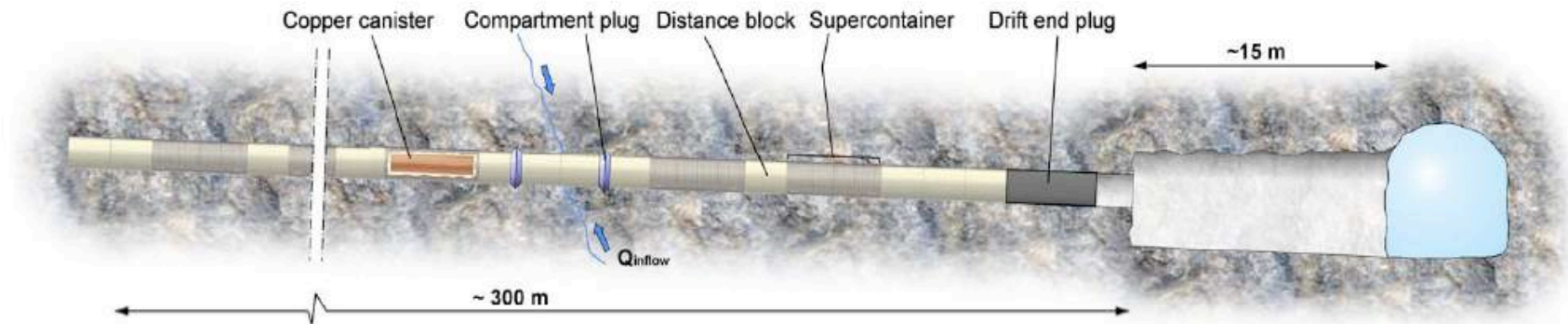
als **Wirtsgestein** vorgesehen u.a. in **Schweden**, Finnland, Kanada

- **relativ hohe Permeabilität** (wasserführende Klüfte und Fugen)
 - ⇒ Kupferbehälter trägt die Hauptlast der Langzeitsicherheit
 - ⇒ **Bentonitdichtungen** zum Schutz der Behälter gegen Wasserzutritt (Korrosion) und zum Verschluss von Bohrlöchern
 - ⇒ quellfähiges Material für Verschluss / Versatz von Strecken
- + **mechanisch fest** (falls nicht stark geklüftet)
 - ⇒ **Ausbau nicht** / nur in geringem Ausmaß **erforderlich**
 - ⇒ **Einlagerungshohlräume formstabil** für relativ lange Zeiträume
- ! **Rückholung von Behältern** nach Beseitigung von Bentonit (durch "Herausspülen") bis zum Verschluss der Zugangsstrecken **mit "umgekehrter Technik" wie Einlagerung** möglich

Einlagerung / Rückholung - Granit (Schweden)



Einlagerung / Rückholung - Granit (Schweden)



Einlagerung abgebrannter Brennelemente in horizontalen Bohrlöchern in Granit (SKB 2011)

Rückholungsrelevante Eigenschaften von Steinsalz

Steinsalz

als Wirtsgestein vorgesehen in **Deutschland**, evtl. Niederlande
als Wirtsgestein bereits genutzt in USA (WIPP)

- sehr geringe Permeabilität bzw. "dicht"
- Salzgrus (Verschluss- / Versatzmaterial für Einlagerungsbohrlöcher und Strecken) nimmt unter Konvergenzdruck Eigenschaften von ungestörtem Steinsalz an
- **visko-plastisches mechanisches Verhalten** (Konvergenz, Geschwindigkeit durch Wärmeeintrag erhöht)
 - ⇒ **Einlagerungshohlräume** standsicher, **aber nicht formstabil**
 - ⇒ **Ringraum** bei Einlagerungsbohrlochern wird **rasch geschlossen**
 - ⇒ in mit Salzgrus versetzten Strecken zu Einlagerungsbereichen **zusätzliche Dichtbauwerke** zur Verhinderung des Laugenzutritts an Behälter erforderlich

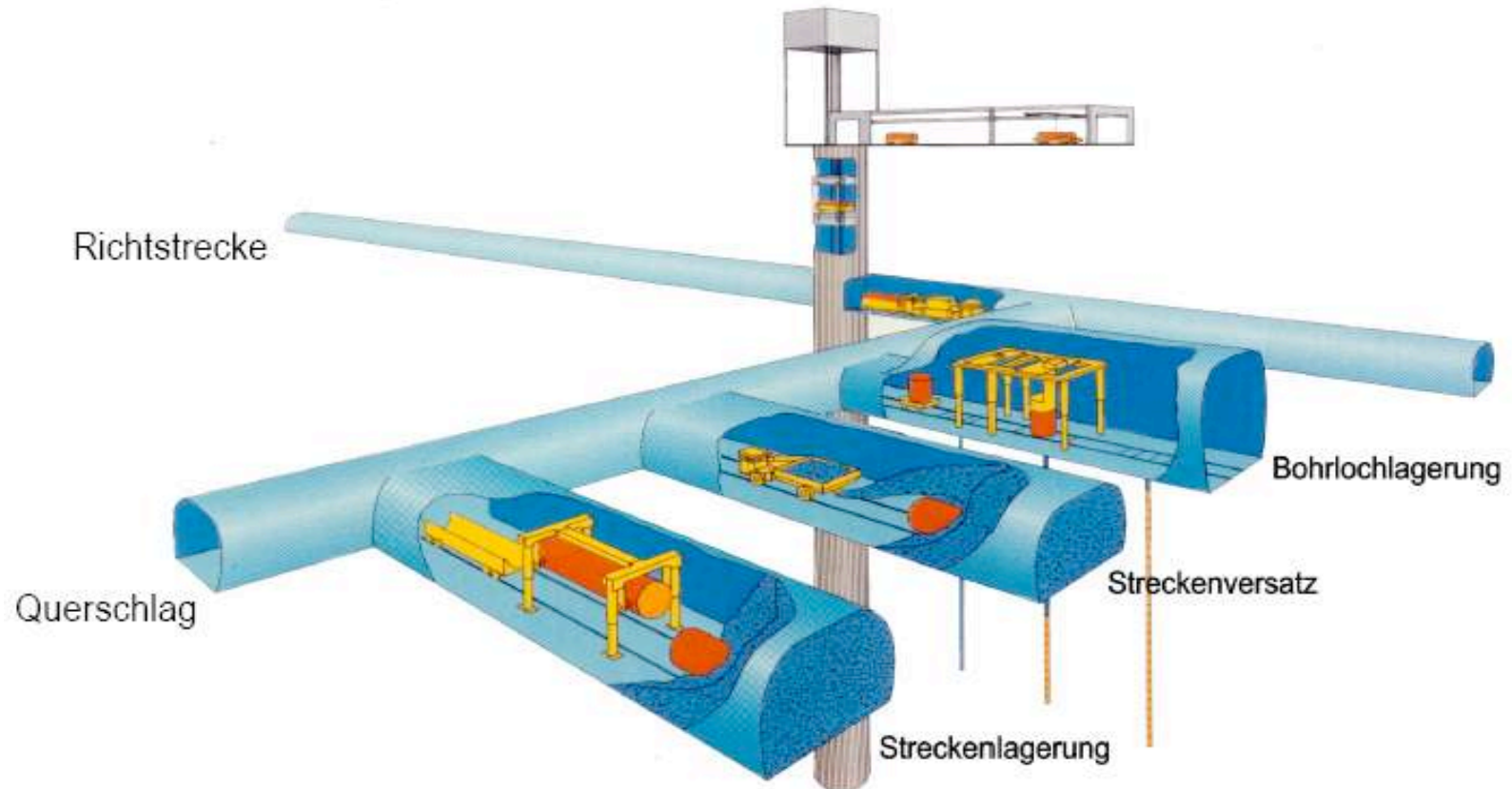
Rückholungsrelevante Eigenschaften von Steinsalz

Steinsalz

Rückholung von Gebinden

- ! **bei Streckenlagerung** in "umgekehrter Technik wie Einlagerung" nur solange Strecken offen, mindestens Salzgrus nicht verfestigt
- ! **bei Bohrlochlagerung ohne gezielte Maßnahmen** (z.B. Verrohrung) zur Aufrechterhaltung des "freien Zugriffs" auf Gebinde **nicht / nur sehr kurze Zeit möglich**, danach nur noch **bergmännische Rückholung**
- ! **Rückholung aus langen** (insbesondere) vertikalen **Einlagerungsbohrlöchern** praktisch **nicht möglich**
- ! **Rückholung in den ersten Jahren nach Einlagerung** wegen hoher **Temperatur aus bergbautechnischen Gründen** nur aus "kühlen" **Bereichen des Endlagers möglich**

Einlagerung / Rückholung - Steinsalz (Deutschland)



Einlagerungskonzept HAW in Steinsalz (Bollingerfehr 2009)

Rückholungsrelevante Eigenschaften von Tonstein

Tonstein

als Wirtsgestein vorgesehen in **Frankreich**, **Schweiz**, (Ton: Belgien)

- geringe bis sehr geringe Permeabilität,
- Verschluss bzw. Versatz der Einlagerungshohlräume und Zugangsstrecken mit **Bentonit** / tonhaltigem quellfähigem Material
- plastisches bis sprödes mechanische Verhalten, **geringe bis mittlere Festigkeit**
 - ⇒ Einlagerungshohlräume nur kurzzeitig standsicher / formstabil, bei Bohrlochlagerung daher "Einbauhülsen" erforderlich
 - ⇒ für größerer Einlagerungshohlräume (Streckenlagerung) bei längerer Standzeit Ausbau erforderlich Porenwasserchemismus
- **Betonausbau verändert Porenwasserchemismus**
 - ⇒ kann Radionuklidtransport erleichtern

Rückholungsrelevante Eigenschaften von Tonstein

Tonstein

- **Bewetterung führt zum Austrocknen** des Gesteins (Reduzierung Gebirgsfestigkeit Durchlässigkeitserhöhung!) und zeitweiligem Verlust etwaiger Quellfähigkeit

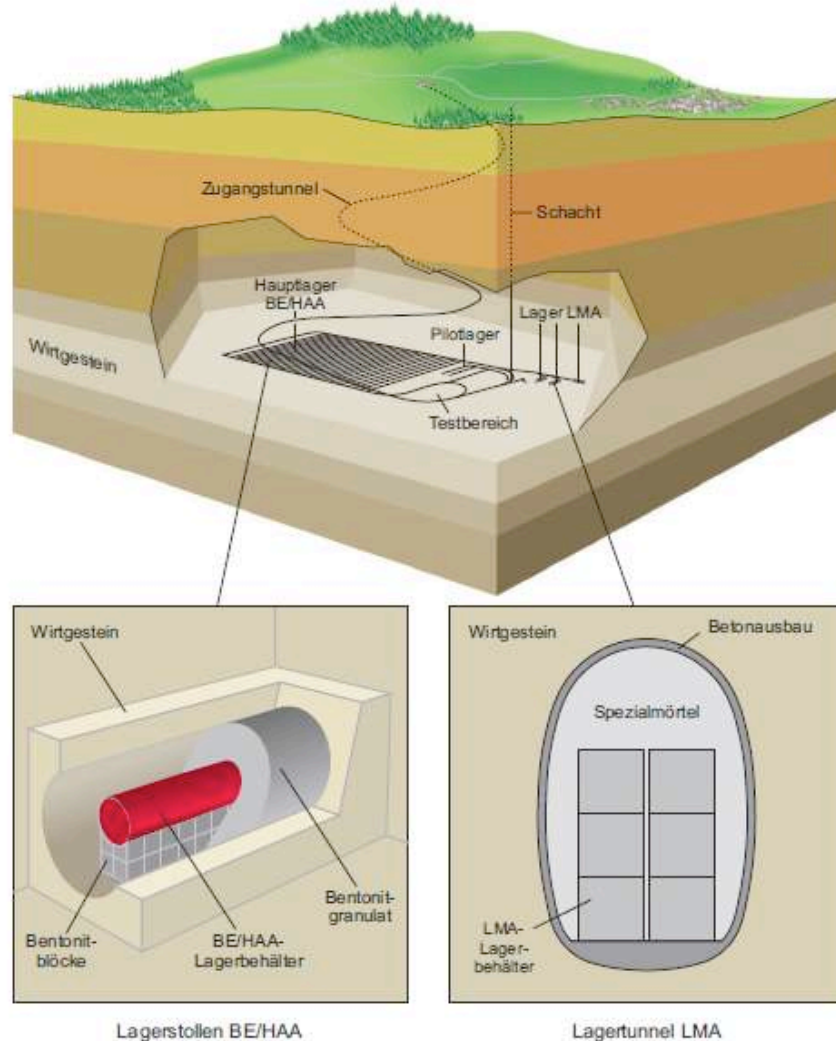
Rückholung von Gebinden in "umgekehrter Technik wie Einlagerung"

! bei **Streckenlagerung**: nur solange Strecke offen

! bei **Bohrlochlagerung**

- **ohne Ausbau** der Bohrlöcher: nur solange Bentonit noch nicht gequollen und nur aus kurzen Bohrlöchern
- **mit Ausbau** der Bohrlöcher zur Aufrechterhaltung des "freien Zugriffs" auf Gebinde: solange Zugangsstrecken offen

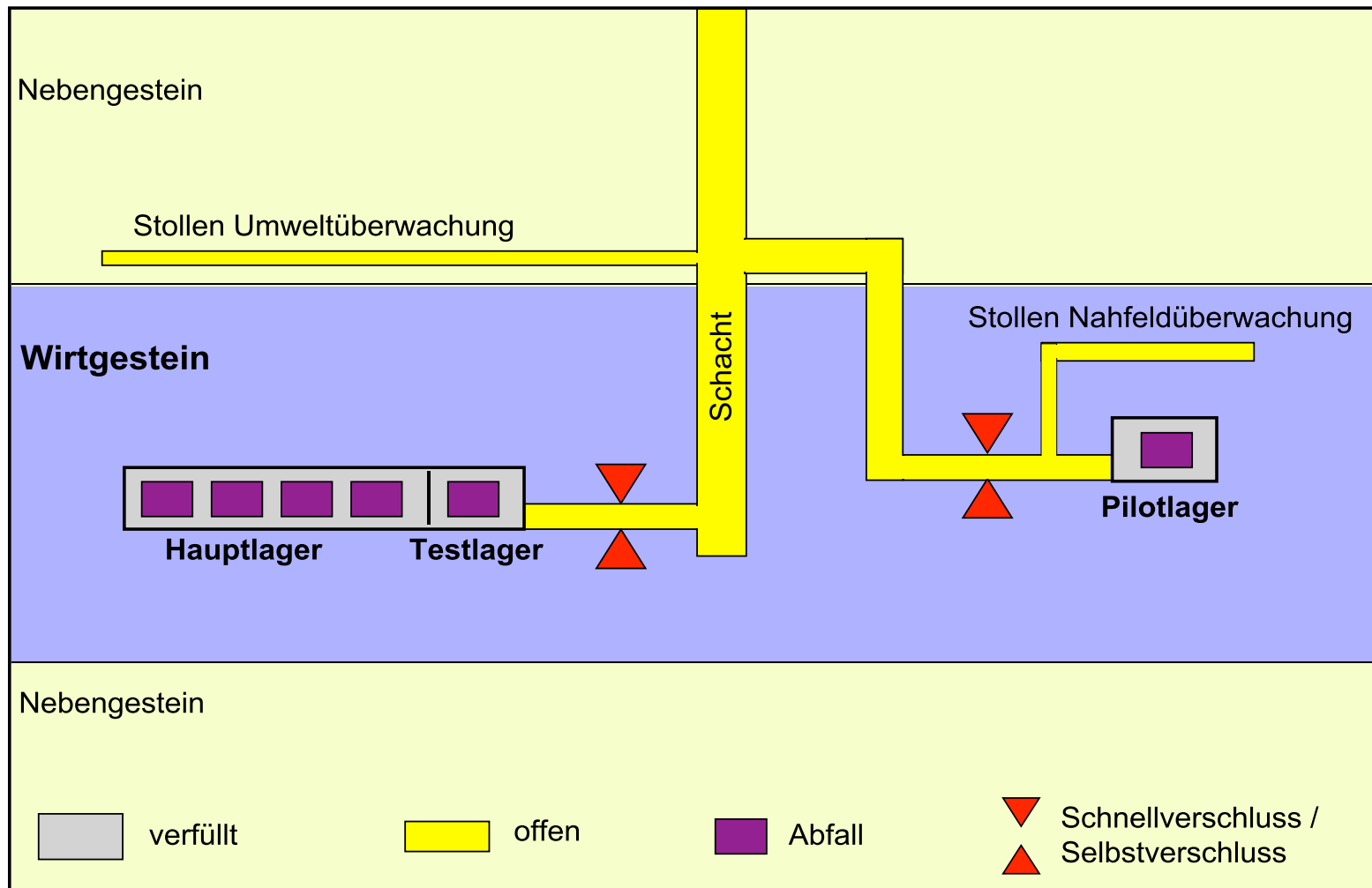
Einlagerung / Rückholung - Tonstein (Schweiz)



Konzeptuelle Auslegung eines geologischen Tiefenlagers für langlebige mittelaktive und hochaktive radioaktive Abfälle / abgebrannte Brennelemente in Tonstein

(NAGRA 2008)

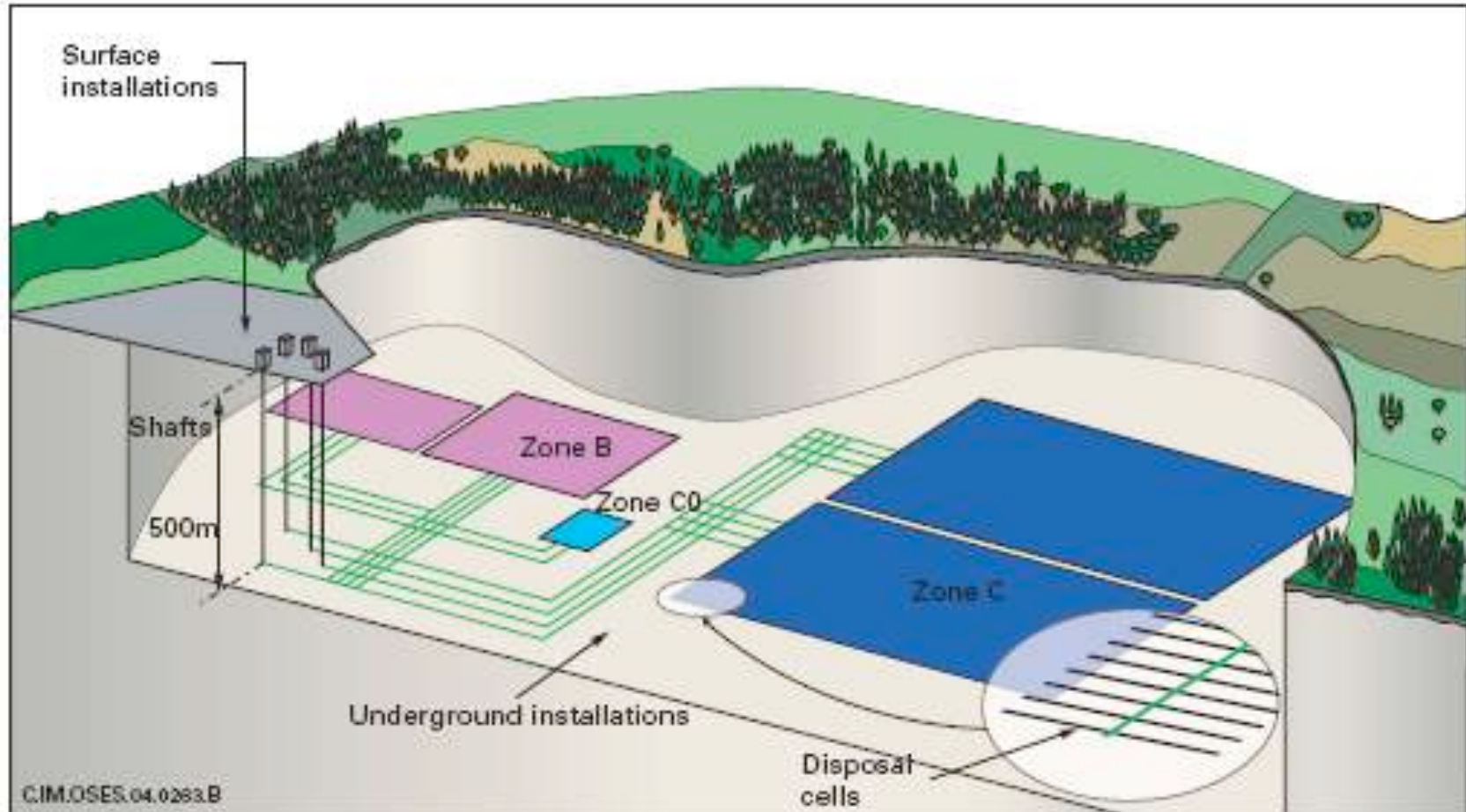
Einlagerung / Rückholung - Tonstein (Schweiz)



nach Hufschmied et al. (2002)

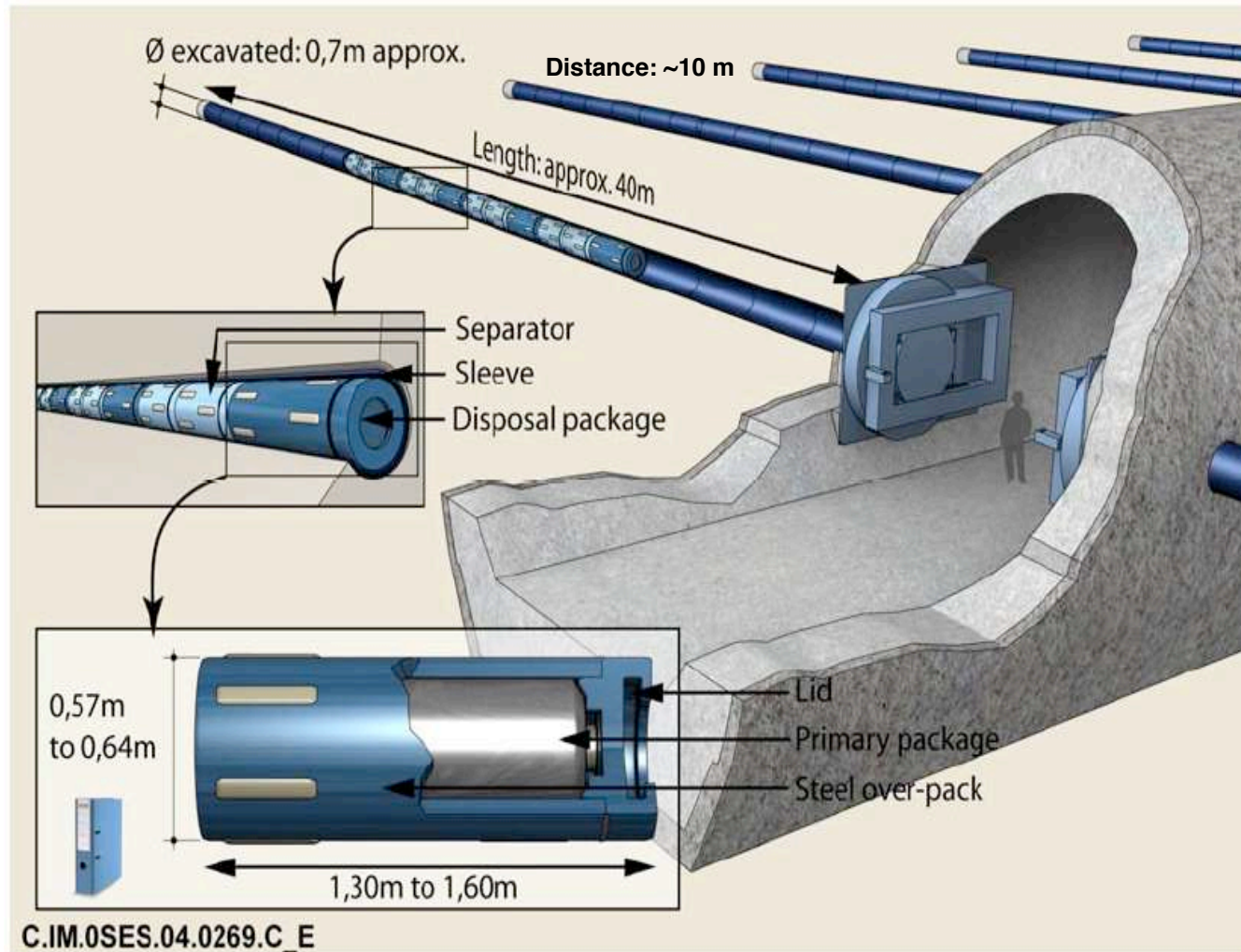
Systemelemente eines geologischen Tiefenlagers (Konzept)

Einlagerung / Rückholung - Tonstein (Frankreich)



Schematisches Design eines Endlagers in Tonstein (ANDRA 2005)

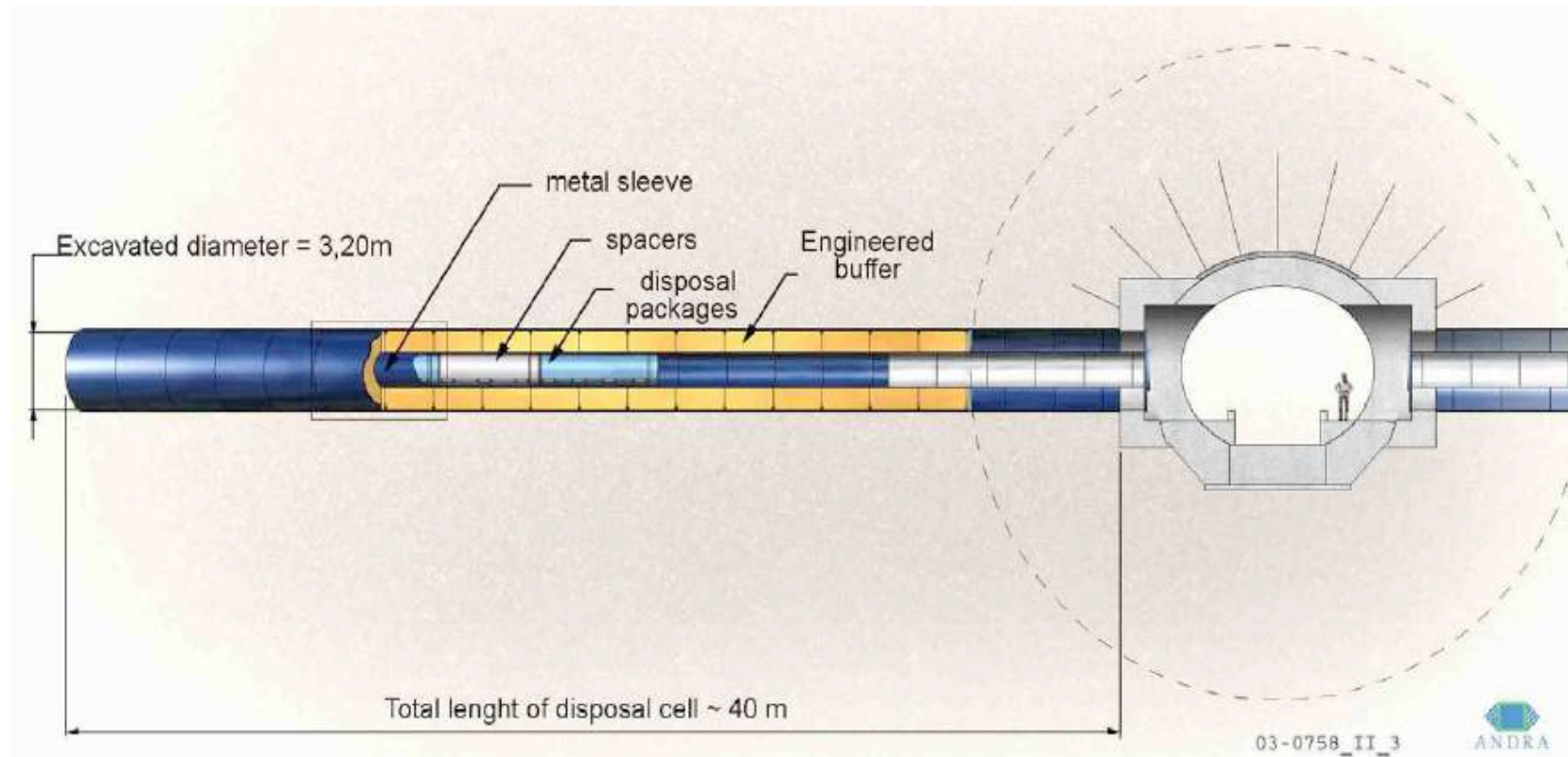
Einlagerung / Rückholung - Tonstein (Frankreich)



Einlagerungszelle für verglaste hochaktive Abfälle (Typ C)

(ANDRA 2005)

Einlagerung / Rückholung - Tonstein (Frankreich)



Einlagerungszelle für abgebrannte Brennelemente (Pettersson et al. 2008)

Resumee Rückholbarkeit und Geologie

Wenn Rückholbarkeit / Rückholung, dann ...

- Nachweis: **keine Sicherheitseinbußen** durch Favorisierung aktiver gegenüber passiven (geologischen / geotechnischen) Sicherheitselementen (Normalzustand, Störfälle)
⇒ "irgendwann" Überführung in Endlager
- Klar **definierte sicherheitstechnische Ziele** ⇒ Nachweis der Sinnhaftigkeit / Erreichbarkeit der angestrebten Ziele
- klare **zeitliche Perspektive** (nur ohnehin vorgesehener Betriebszeitraum?) ⇒ regelmäßige Prüfung, ob Ziele erreicht / erreichbar
- **verfügbare Technik** für Auslagerung
- **gezielte Auslegung** des Endlagers
- **nachweislich dauerhaft funktionierendes Überwachungssystem**
- institutionelle und finanzielle **Voraussetzungen für Überwachung und Rückholung**