

CHRISTA-II

Matthias Beushausen
Victoria Burlaka
Judith Flügge
Britta Frenzel
Alireza Hassanzadegan
Michael Jobmann
Michael Krumbholz
Paola León Vargas
Andree Lommerzheim
Jobst Maßmann
Kim-Marisa Mayer
Artur Meleshyn
Sabine Mrugalla
Christian Müller
Ulrich Noseck
André Rübel
Jürgen Sönnke
Jan Thiedau
Axel Weitkamp
Jens Wolf

Sicherheits- und Nachweiskonzept für Endlager im Kristallin

Projektpartner:

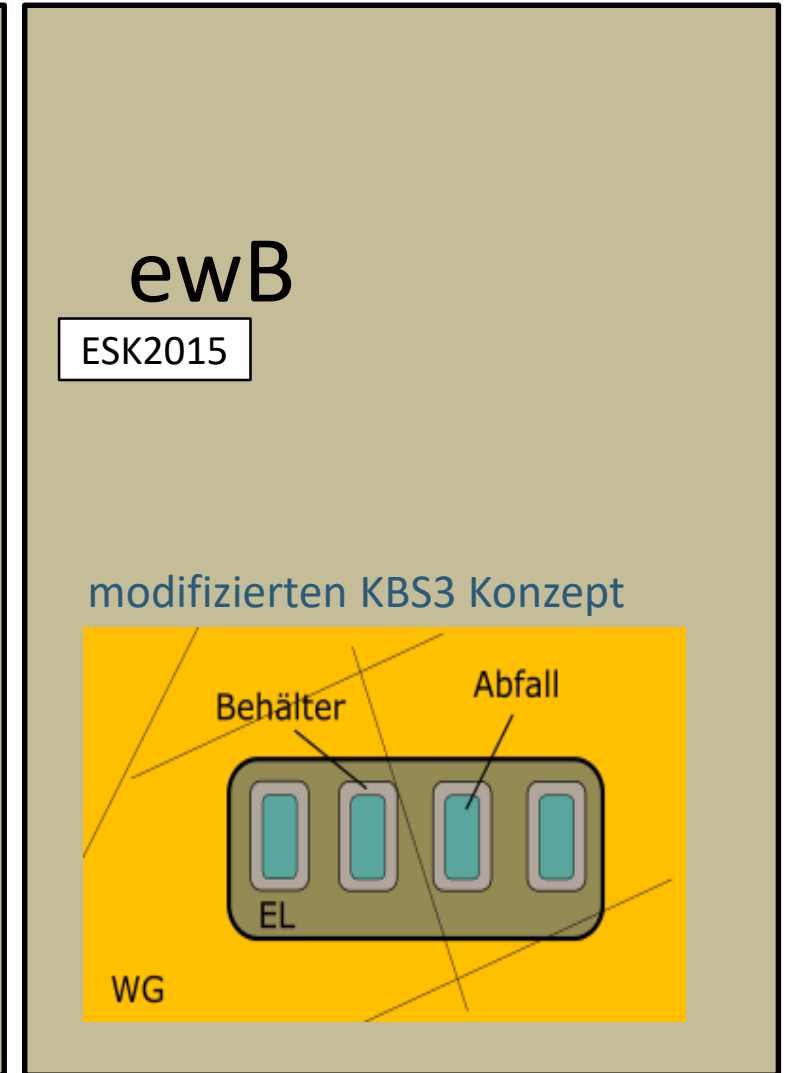
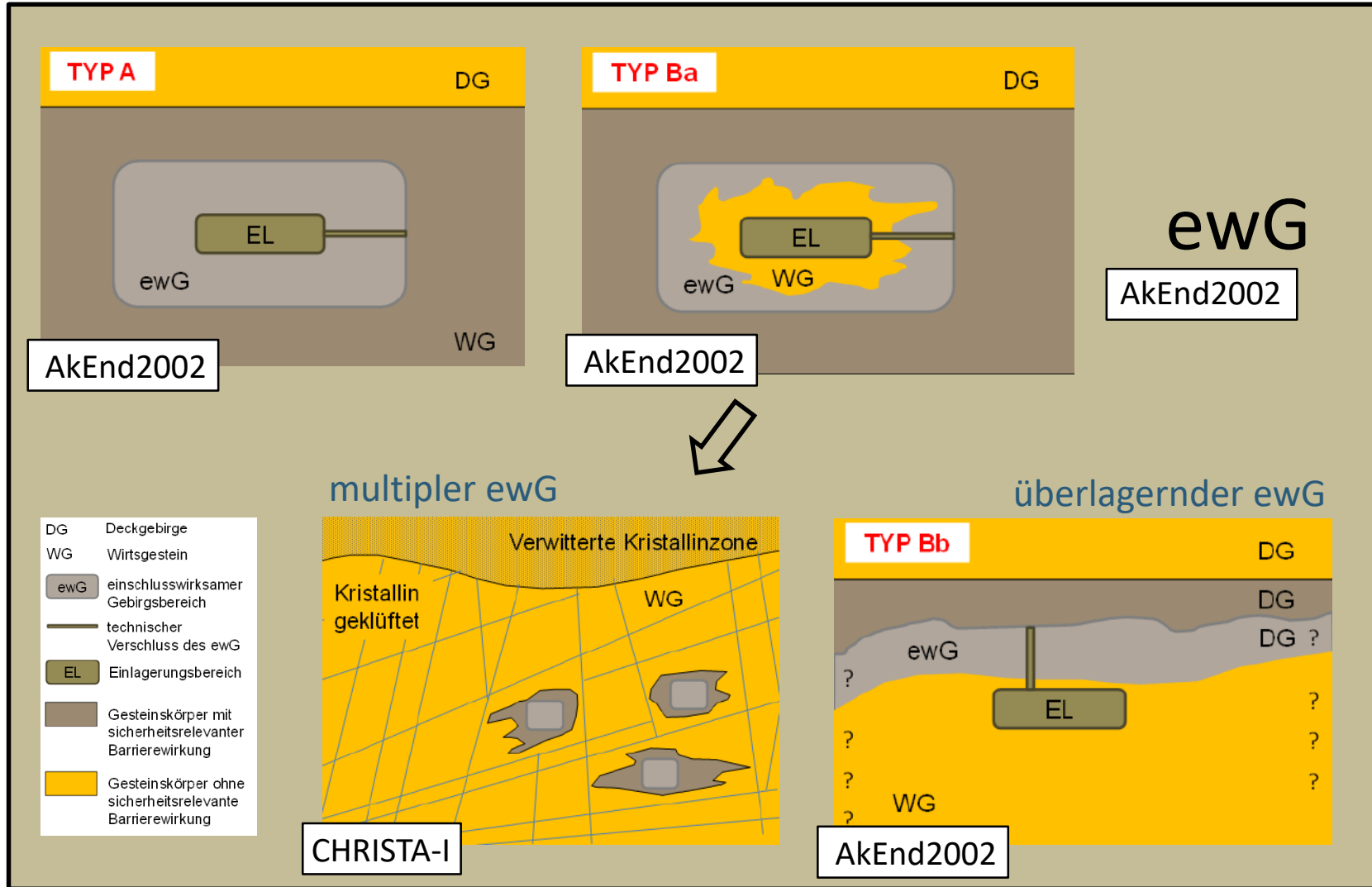
BGR, GRS, BGETEC

Laufzeit:

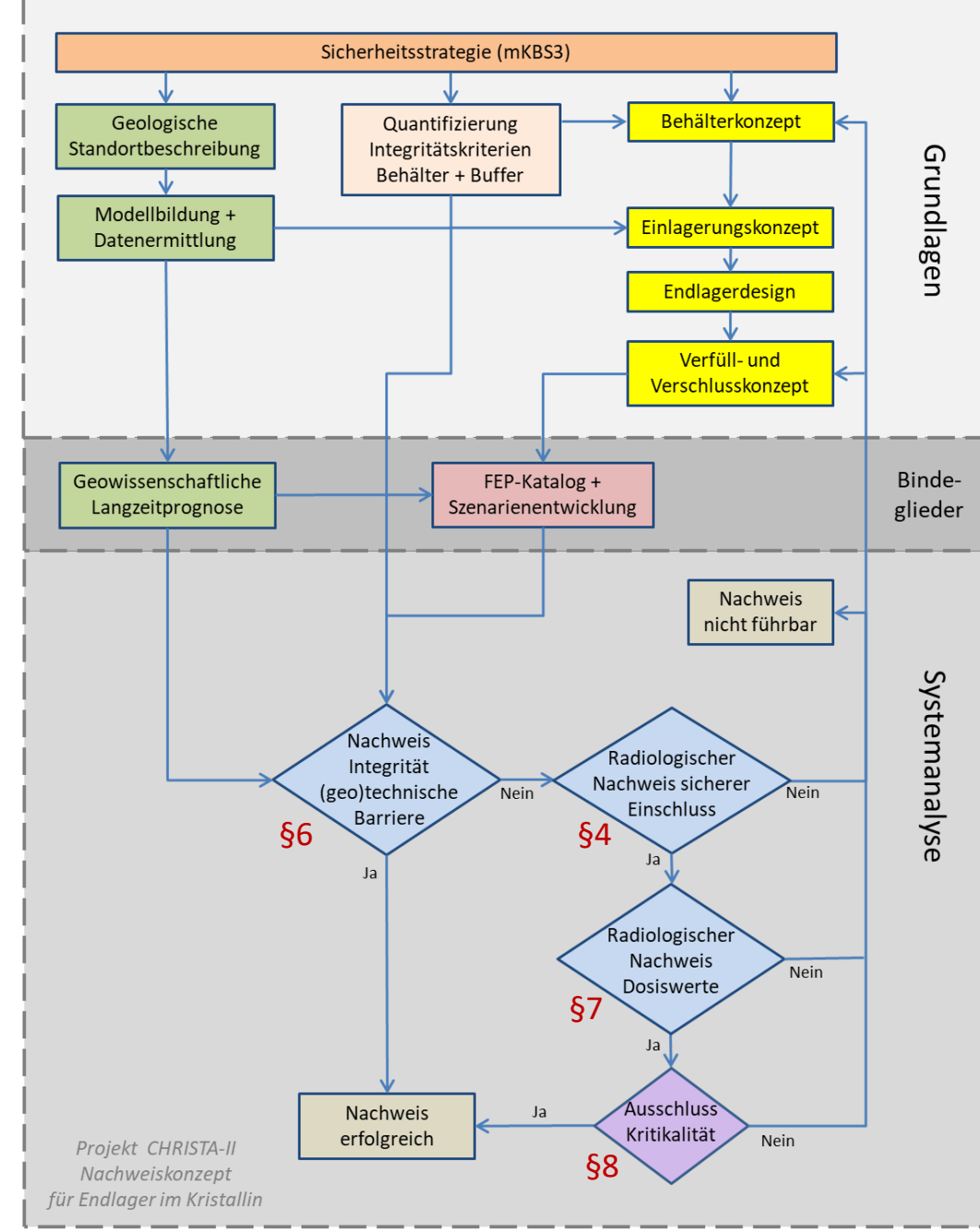
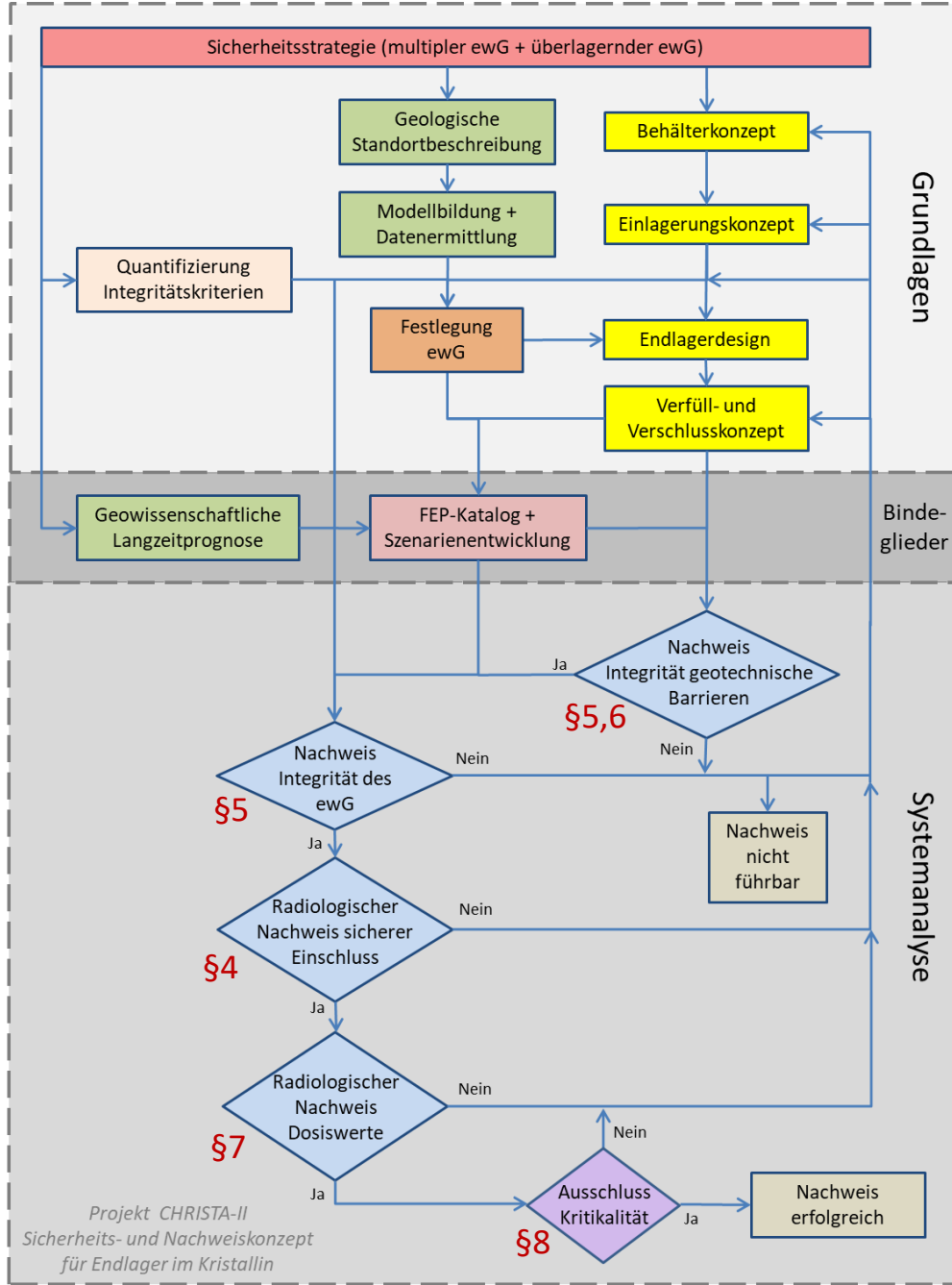
01.09.2017 – 30.11.2021



Optionen zur Einlagerung im Kristallin



Konzeptstrukturen

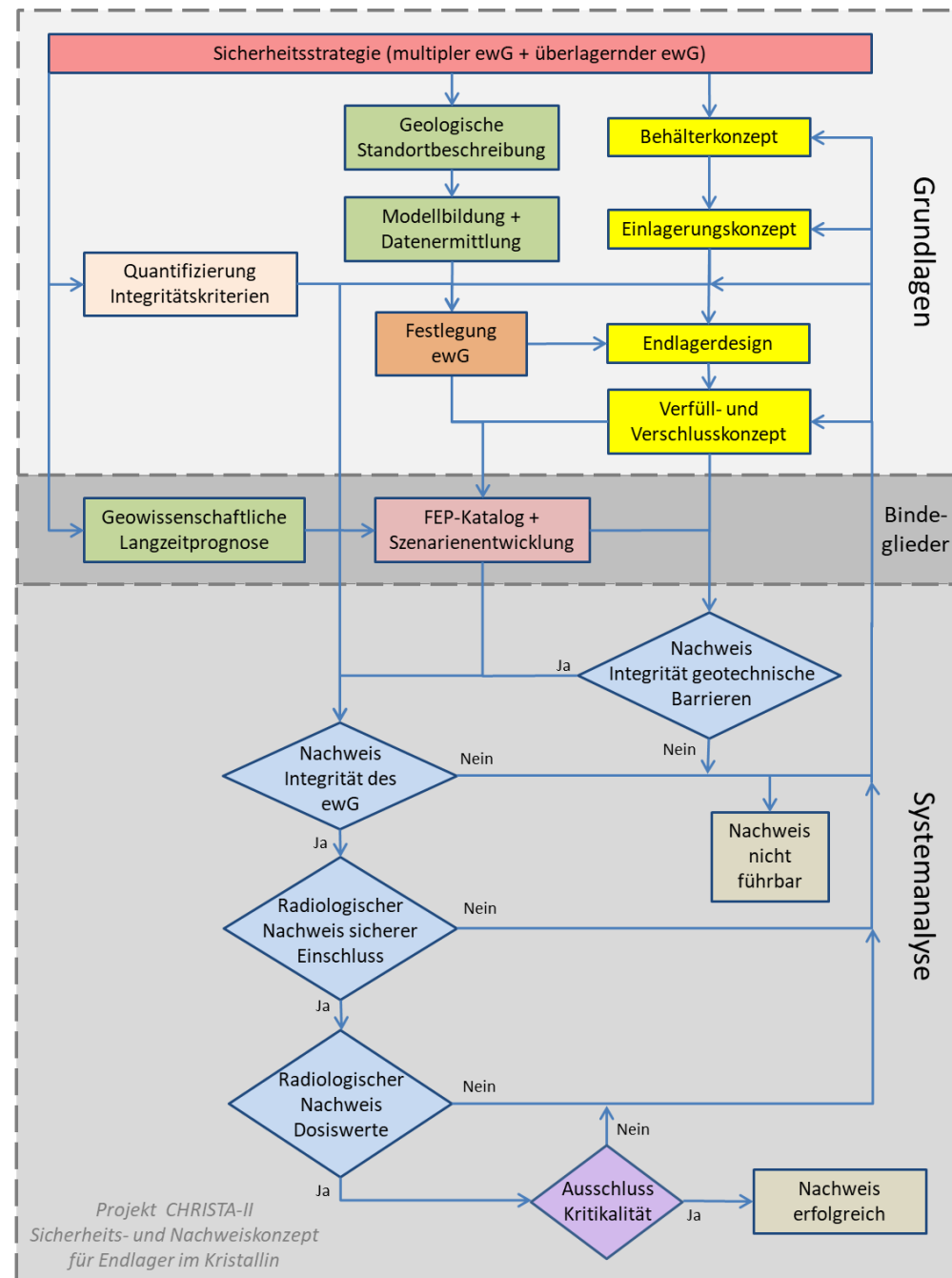


§10 Sicherheitskonzept (EndlSiAnfV)

- (1) Sicherheitsstrategie
- (2) Erwartete/abweichende Entwicklung
- (3) Berücksichtigung der UVS
- (4) abgeschlossene Optimierung
- (5) Darstellung aller Barrieren
- (6) Ablaufplan, Rückholbarkeit, Bergung
- (7) Einwirkungen Dritter, Überwach. Kernmaterial

§6 vorl. Sicherheitskonzept (EndlSiUntV)

- (1) vorl. Sicherheitskonzept auf Basis §10 EndlSiAnfV
- (2) vorläufige Auslegung nach §11 EndlSiAnfV
- (3) Optimierung nach §12 EndlSiAnfV
- (4) vorläufige Auslegung für RVS
 1. Beschreibung wesentlicher/weiterer Barrieren
 2. Größe Endlager und gepl. Tiefenlage
 3. Art der Einlagerung
 4. Rückholbarkeit
 5. Verschluss- und Versatzmaßnahmen
 6. Geringhaltung Schäden Barrieren bei Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung



§10 Sicherheitskonzept (EndlSiAnfV)

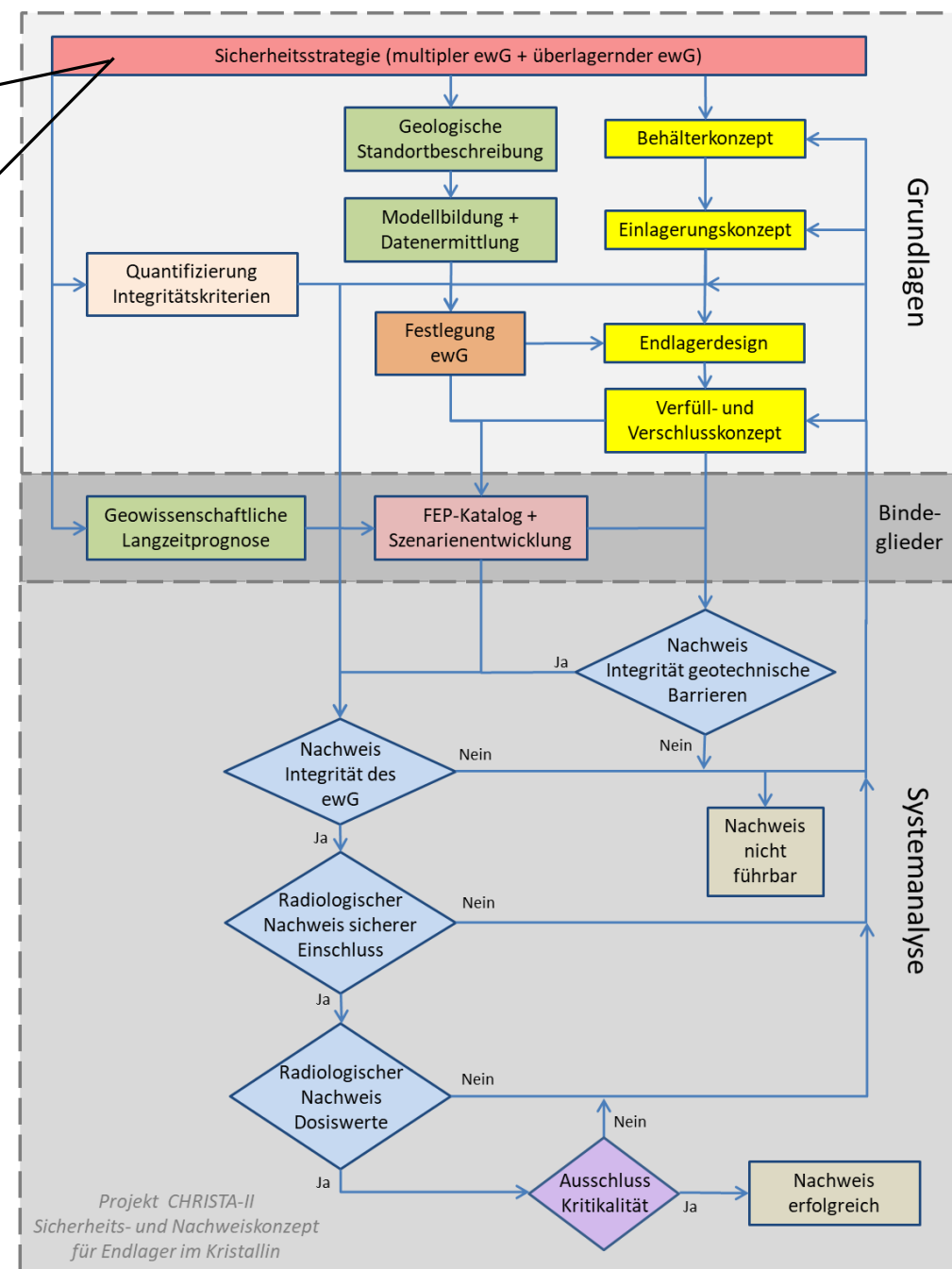
- (1) **Sicherheitsstrategie**
- (2) Erwartete/abweichende Entwicklung
- (3) Berücksichtigung der UVS
- (4) abgeschlossene Optimierung
- (5) Darstellung aller Barrieren
- (6) Ablaufplan, Rückholbarkeit, Bergung
- (7) Einwirkungen Dritter, Überwach. Kernmaterial

§6 vorl. Sicherheitskonzept (EndlSiUntV)

- (1) **vorl. Sicherheitskonzept auf Basis §10 EndlSiAnfV**
- (2) vorläufige Auslegung nach §11 EndlSiAnfV
- (3) Optimierung nach §12 EndlSiAnfV
- (4) vorläufige Auslegung für RVS
 1. Beschreibung wesentlicher/weiterer Barrieren
 2. Größe Endlager und gepl. Tiefenlage
 3. Art der Einlagerung
 4. Rückholbarkeit
 5. Verschluss- und Versatzmaßnahmen
 6. Geringhaltung Schäden Barrieren bei Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung

Zielsetzungen für die Sicherheit in der Nachverschlussphase

- Verfahrenstechnische Zielsetzungen (Fehlerkorrektur, Updates)
- Sicherheitstechnische Zielsetzungen
- Planerische Festlegungen und technische Maßnahmen



§10 Sicherheitskonzept (EndSiAnfV)

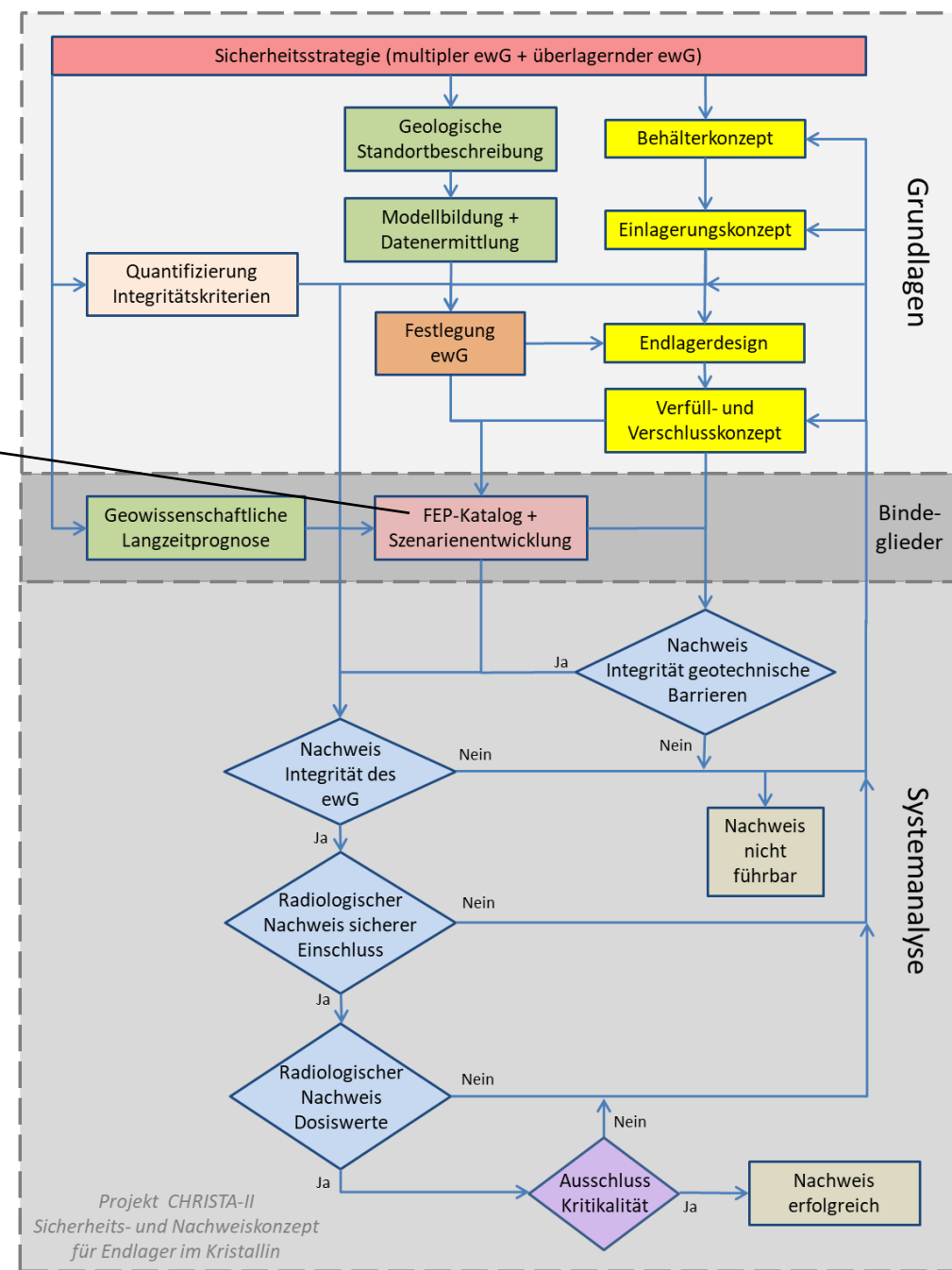
- (1) Sicherheitsstrategie
- (2) Erwartete/abweichende Entwicklung
- (3) Berücksichtigung der UVS
- (4) abgeschlossene Optimierung
- (5) Darstellung aller Barrieren
- (6) Ablaufplan, Rückholbarkeit, Bergung
- (7) Einwirkungen Dritter, Überwach. Kernmaterial

§6 vorl. Sicherheitskonzept (EndSiUntV)

- (1) vorl. Sicherheitskonzept auf Basis §10 EndSiAnfV
- (2) vorläufige Auslegung nach §11 EndSiAnfV
- (3) Optimierung nach §12 EndSiAnfV
- (4) vorläufige Auslegung für RVS
 1. Beschreibung wesentlicher/weiterer Barrieren
 2. Größe Endlager und gepl. Tiefenlage
 3. Art der Einlagerung
 4. Rückholbarkeit
 5. Verschluss- und Versatzmaßnahmen
 6. Geringhaltung Schäden Barrieren bei Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung

Für jede Einlagerungsoption wird ein generischer FEP-Katalog erstellt (3 Kataloge)

Szenarientwicklungen werden nicht durchgeführt



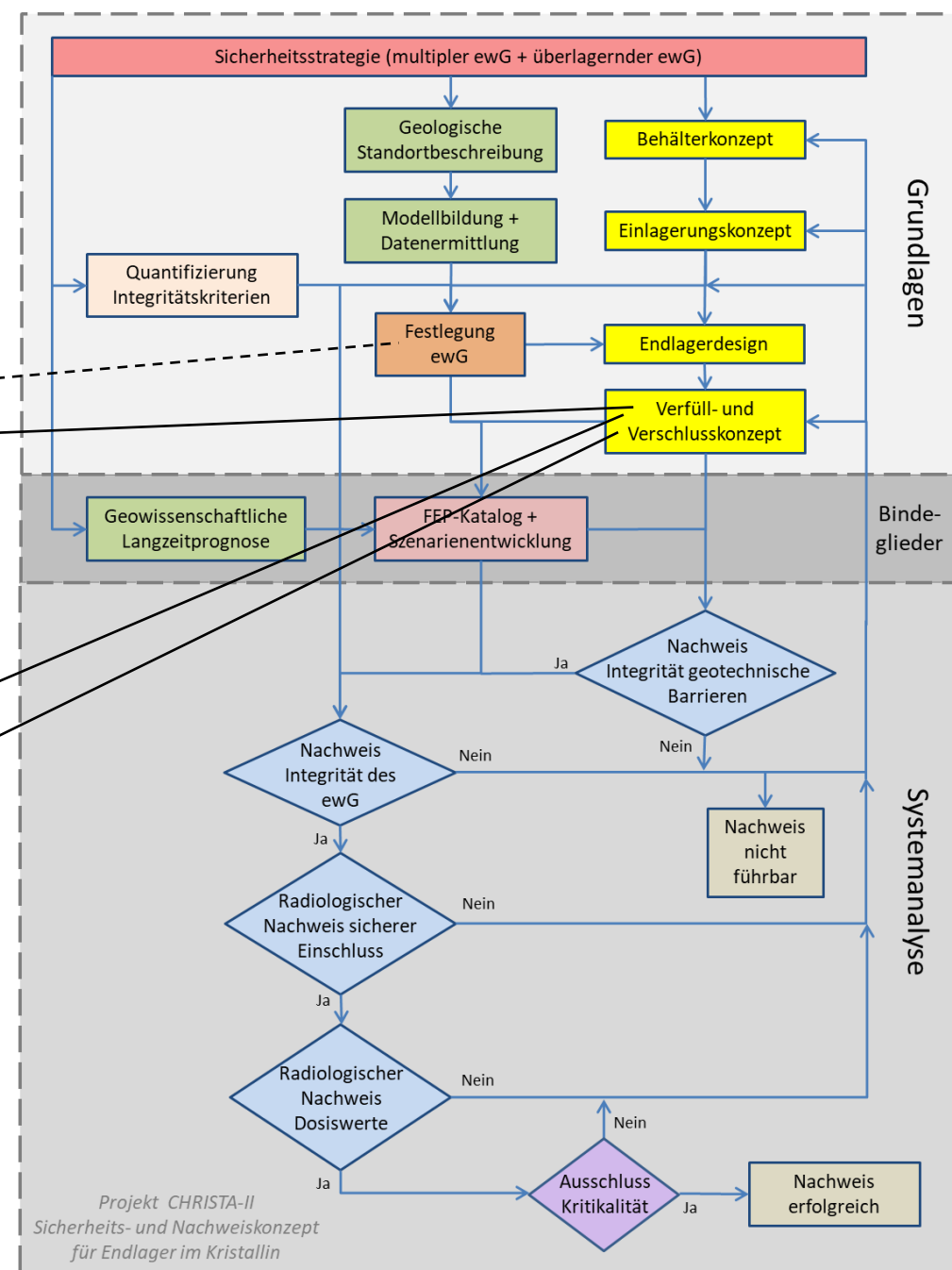
§10 Sicherheitskonzept (EndlSiAnfV)

- (1) Sicherheitsstrategie
- (2) Erwartete/abweichende Entwicklung
- (3) Berücksichtigung der UVS
- (4) abgeschlossene Optimierung
- (5) Darstellung aller Barrieren
- (6) Ablaufplan, Rückholbarkeit, Bergung
- (7) Einwirkungen Dritter, Überwach. Kernmaterial

§6 vorl. Sicherheitskonzept (EndlSiUntV)

- (1) vorl. Sicherheitskonzept auf Basis §10 EndlSiAnfV
- (2) vorläufige Auslegung nach §11 EndlSiAnfV
- (3) Optimierung nach §12 EndlSiAnfV
- (4) vorläufige Auslegung für RVS
 1. Beschreibung wesentlicher/weiterer Barrieren
 2. Größe Endlager und gepl. Tiefenlage
 3. Art der Einlagerung
 4. Rückholbarkeit
 5. Verschluss- und Versatzmaßnahmen
 6. Geringhaltung Schäden Barrieren bei Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung

Für jede Einlagerungsoption wird ein Verschlusskonzept erstellt (s. Vortrag)



§10 Sicherheitskonzept (EndlSiAnfV)

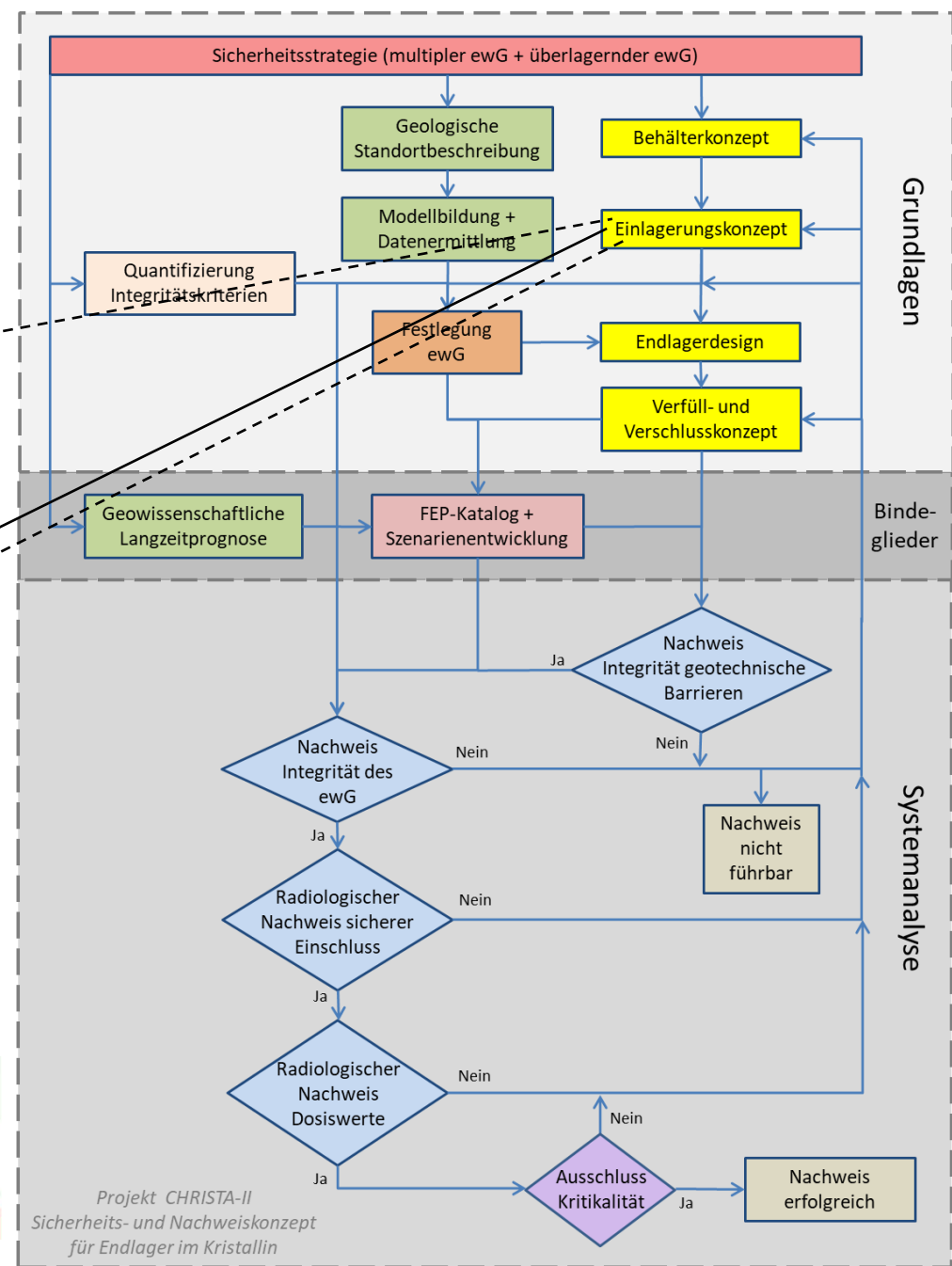
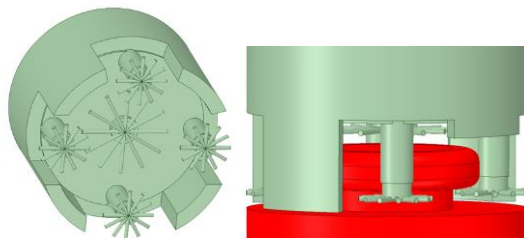
- (1) Sicherheitsstrategie
- (2) Erwartete/abweichende Entwicklung
- (3) Berücksichtigung der UVS
- (4) abgeschlossene Optimierung
- (5) Darstellung aller Barrieren
- (6) Ablaufplan, Rückholbarkeit, Bergung
- (7) Einwirkungen Dritter, Überwach. Kernmaterial

§6 vorl. Sicherheitskonzept (EndlSiUntV)

- (1) vorl. Sicherheitskonzept auf Basis §10 EndlSiAnfV
- (2) vorläufige Auslegung nach §11 EndlSiAnfV
- (3) Optimierung nach §12 EndlSiAnfV
- (4) vorläufige Auslegung für RVS
 1. Beschreibung wesentlicher/weiterer Barrieren
 2. Größe Endlager und gepl. Tiefenlage
 3. Art der Einlagerung
 4. Rückholbarkeit
 5. Verschluss- und Versatzmaßnahmen
 6. Geringhaltung Schäden Barrieren bei Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung

Das Einlagerungskonzept, speziell das des multiplen ewG, ist so gestaltet, dass eine einfache Rückholung möglich ist

Hinweis:
Rückholungskonzepte für alle 3 Einlagerungsoptionen:
➔ Vorhaben **KOREKT**



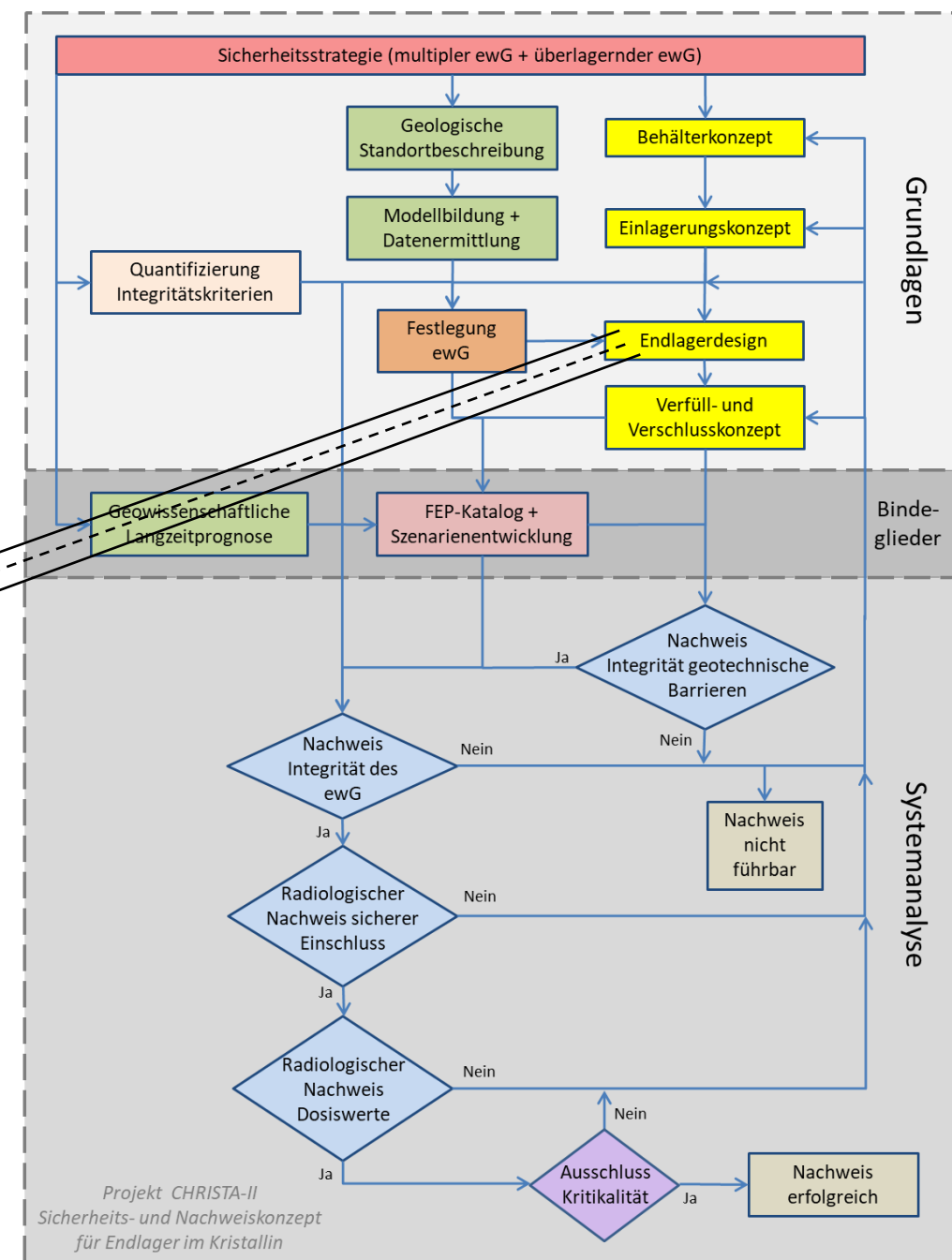
§10 Sicherheitskonzept (EndlSiAnfV)

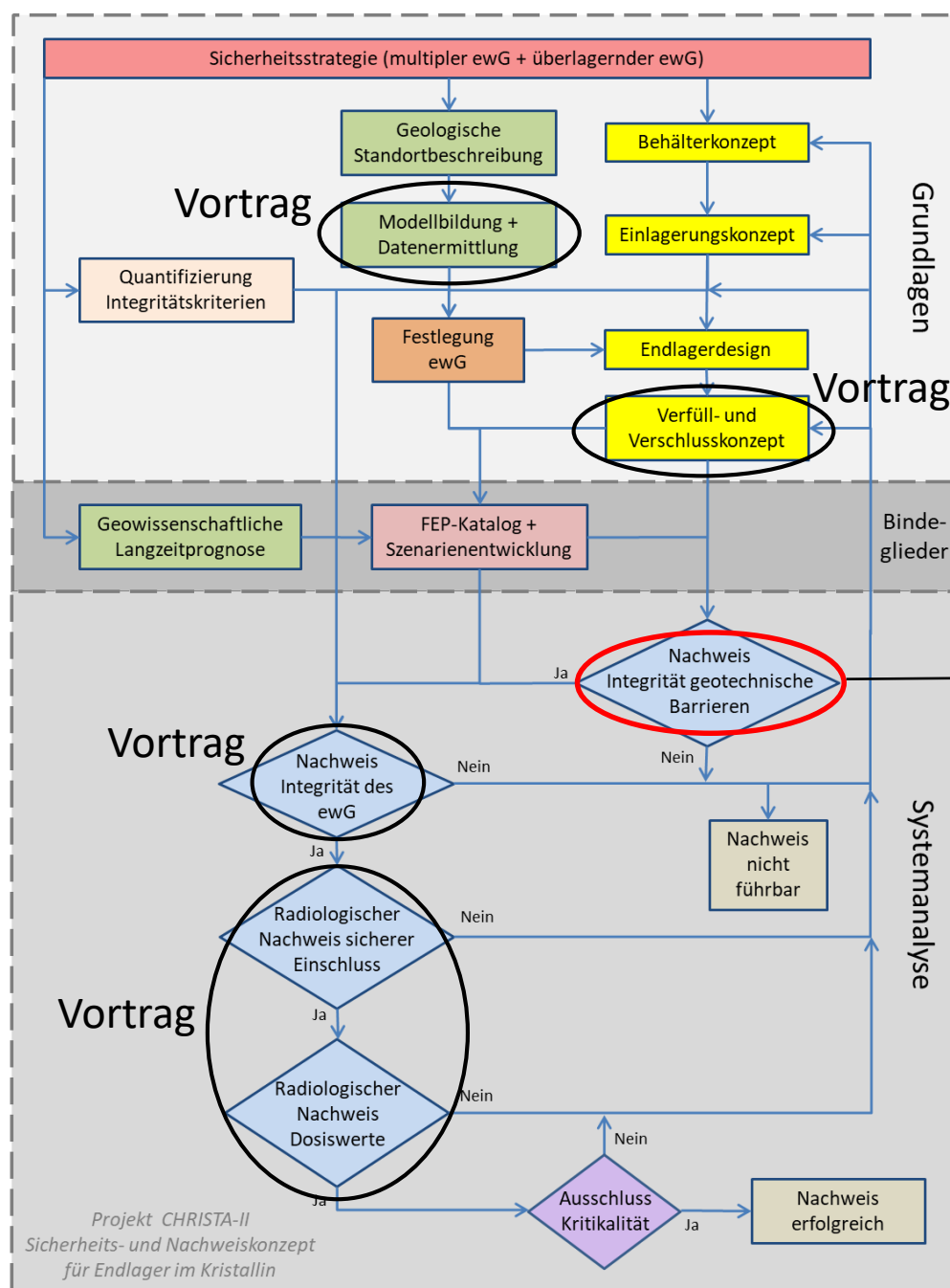
- (1) Sicherheitsstrategie
- (2) Erwartete/abweichende Entwicklung
- (3) Berücksichtigung der UVS
- (4) abgeschlossene Optimierung
- (5) Darstellung aller Barrieren
- (6) Ablaufplan, Rückholbarkeit, Bergung
- (7) Einwirkungen Dritter, Überwach. Kernmaterial

§6 vorl. Sicherheitskonzept (EndlSiUntV)

- (1) vorl. Sicherheitskonzept auf Basis §10 EndlSiAnfV
- (2) vorläufige Auslegung nach §11 EndlSiAnfV
- (3) Optimierung nach §12 EndlSiAnfV
- (4) vorläufige Auslegung für RVS
 1. Beschreibung wesentlicher/weiterer Barrieren
 2. Größe Endlager und gepl. Tiefenlage
 3. Art der Einlagerung
 4. Rückholbarkeit
 5. Verschluss- und Versatzmaßnahmen
 6. Geringhaltung Schäden Barrieren bei Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung

Hinweis:
Nutzung von Synergien mit dem
Projekt RESUS (BGE Finanzierung)

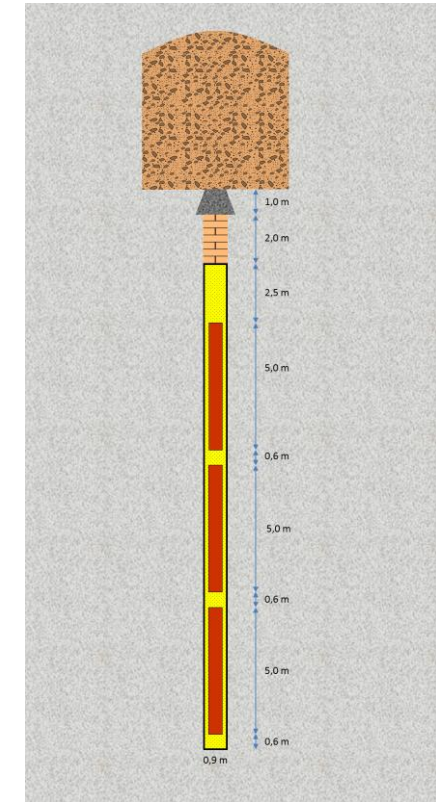
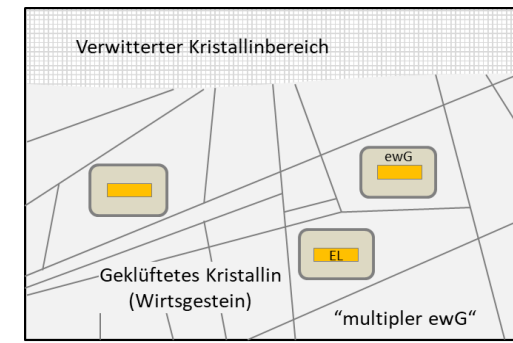
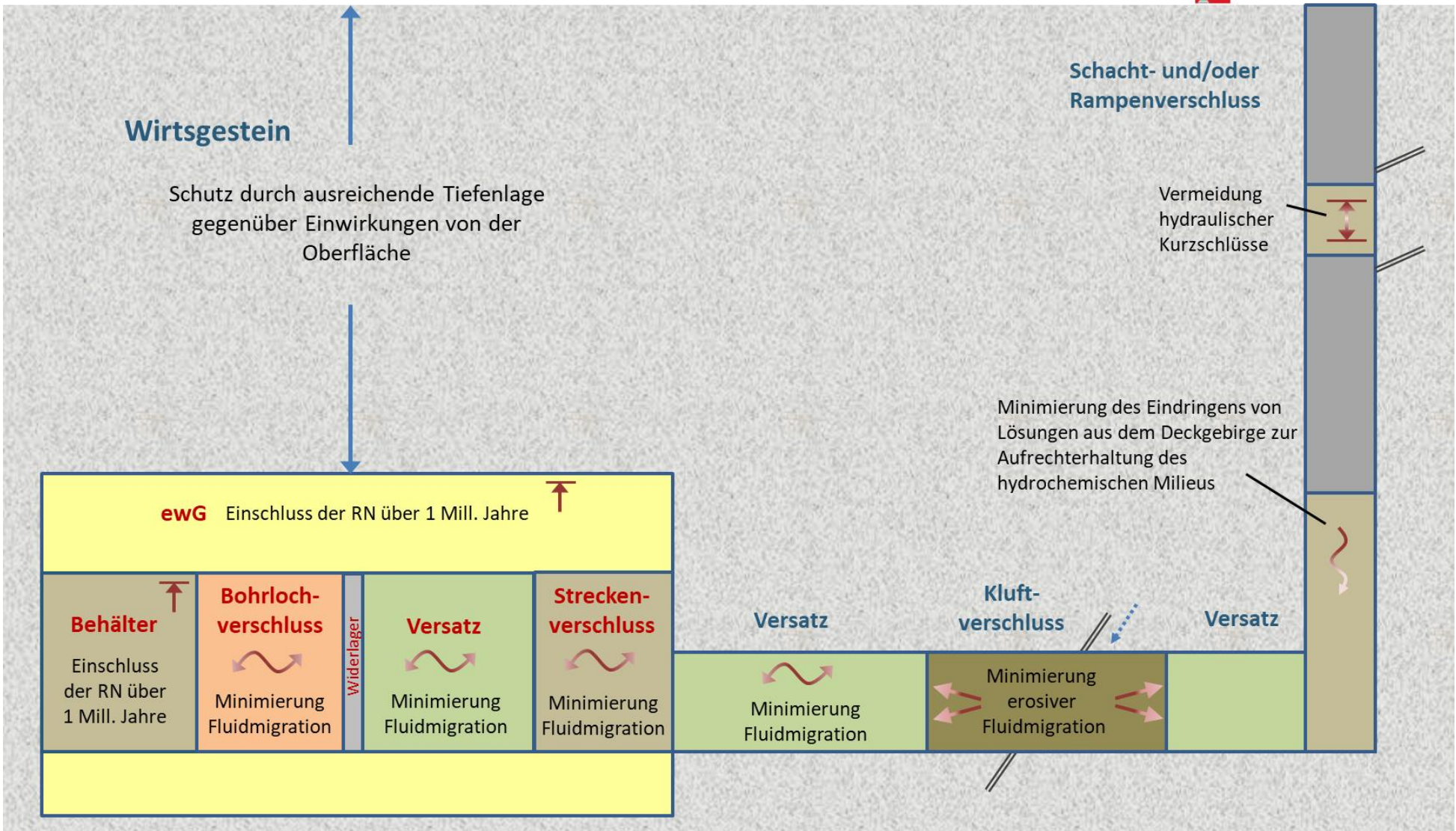




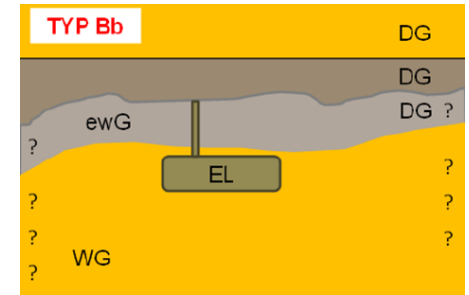
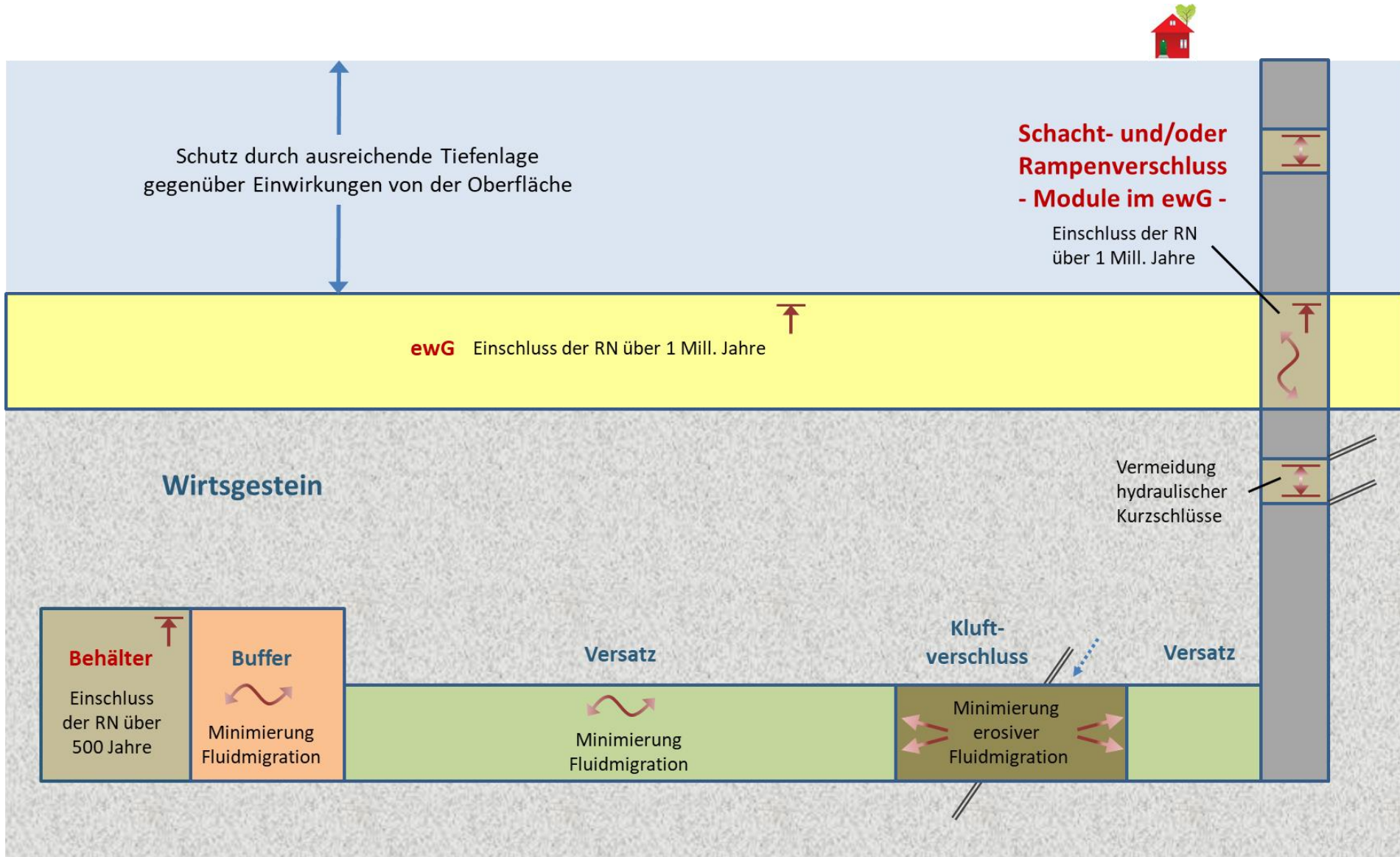
Wesentliche und weitere Barrieren ?

Wesentliche Barrieren:
 Alle (geo)technische Barrierenmodule
 innerhalb der ewG

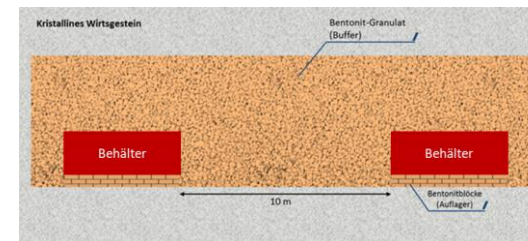
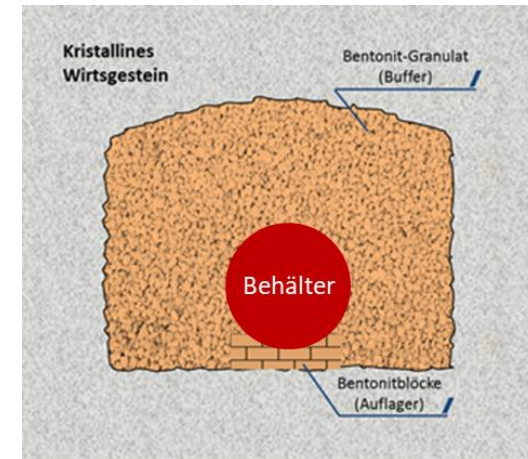
multipler ewG - **wesentliche** und **weitere** Barrieren



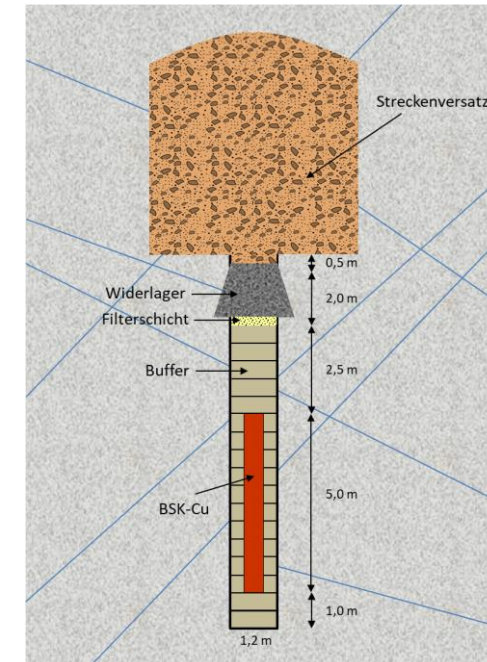
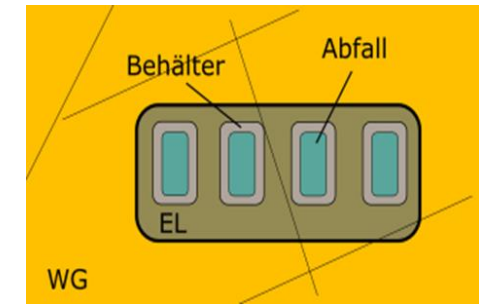
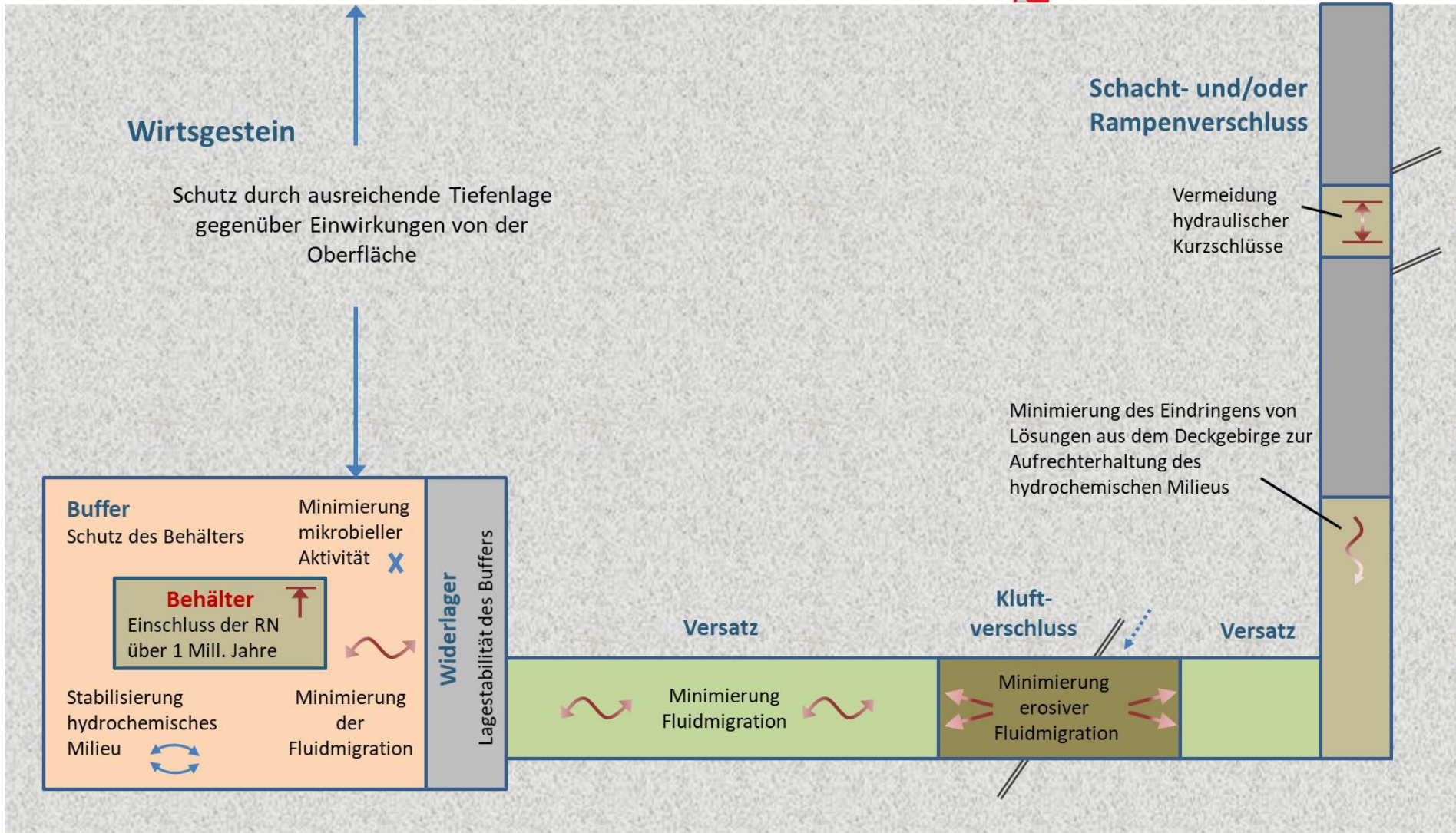
überlagernder ewG - **wesentliche** und **weitere** Barrieren



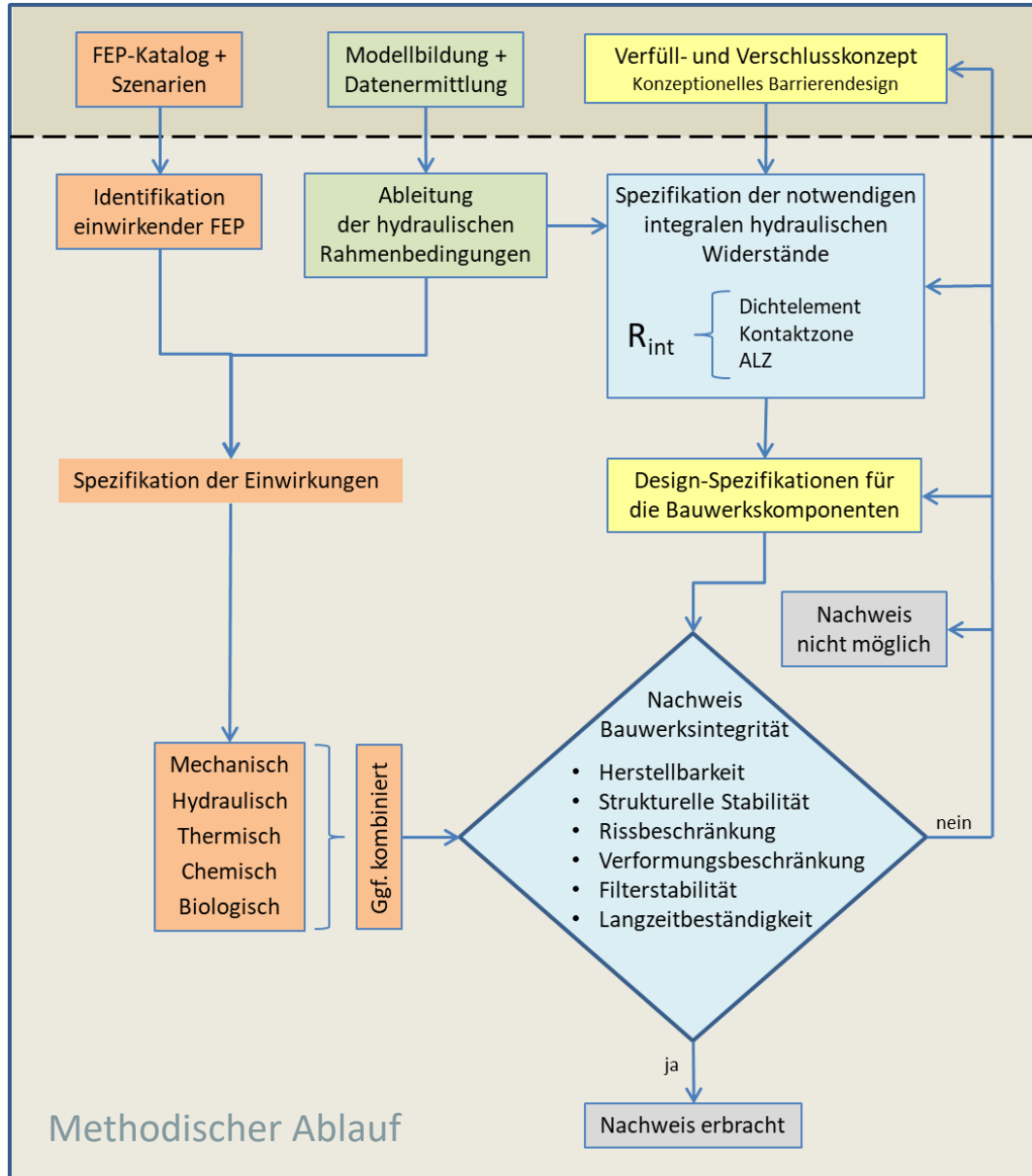
Streckenlagerung



mKBS3 - **wesentliche** und **weitere** Barrieren



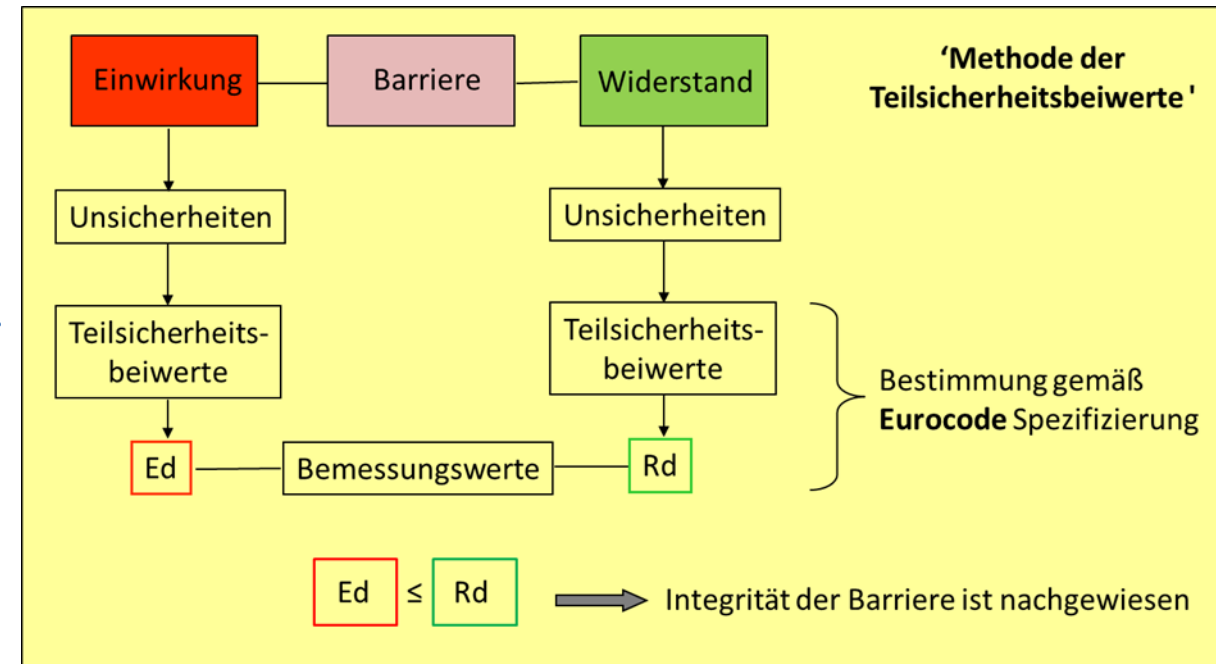
Prüfung zur Integrität der geotechnischen Barrieren (**wesentliche Barrieren**)



Forschungsprojekt ÜBERSICHT

Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine (Müller-Hoeppe & Ebert 2008).

Methode der Teilsicherheitsbeiwerte ist nicht wirtsgesteinsspezifisch sondern generell einsetzbar.



Kriterien zur Integritätsprüfung der **wesentlichen** geotechnischen Barrieren (Übersicht)

Behälter



Stabilität

„Schädigungs-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass im Funktionszeitraum keine signifikanten Schädigungen im Rahmen der Einwirkungsanalyse auftreten.

Für den rechnerischen Nachweis ist demnach die Einhaltung folgender Ungleichung zu zeigen:

$$A \cdot \frac{J_2}{f_{cd}^2} + \lambda \cdot \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cd}} + B \cdot \frac{I_1}{f_{cd}} \leq 1 \quad (4.7)$$

Filterstabilität

„Kontaktersions-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass der hydraulische Gradient an einem Dichtelement unterhalb des kritischen hydraulischen Gradienten für eine schichtnormale Anströmung liegt.

Für den rechnerischen Nachweis ist demnach die Einhaltung folgender Ungleichung zu zeigen:

$$i < \Delta p_{krit} = \frac{2 \cdot c' - \zeta \cdot p + \frac{\zeta_0}{\zeta_1} \cdot p \cdot \tan \varphi'}{r \cdot \gamma_w \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \zeta_0 \cdot \tan \varphi' \right)} \quad (4.9)$$

„Piping-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass der hydraulische Gradient über der Länge eines Dichtelementes unterhalb des kritischen Gradienten liegt.

Für den rechnerischen Nachweis ist demnach die Einhaltung folgender Ungleichung zu zeigen (Aubertin et al. 2002):

$$\frac{Q}{k_f \cdot H} \cdot a \leq i_{cr} \quad (4.10)$$

„Verformungsbeständigkeits-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass mögliche Verschiebungen des Widerlagers vom Bentonit-Dichtelement weg kleiner sind als 3% der Länge des anliegenden Bentonit-Dichtelementes.

Rissbeschränkung

„Fluiddruck-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass die effektive Hauptspannung σ'_3 keine negativen Werte annimmt.

Für den rechnerischen Nachweis ist demnach die Einhaltung folgender Ungleichung zu zeigen:

$$\sigma'_3 = \sigma_{3,ges} - p_{Fl} > 0 \quad (4.8)$$

wobei

$$\sigma_{3,ges} = \sigma_{3,E} + p_q + p_{Fl}$$

„Kriterium zur Herstellbarkeit“

Es ist nachzuweisen, dass die Verschlussbauwerke unter den lokalen Bedingungen des geplanten Dichtungsstandortes so errichtet werden können, dass die ihnen zugewiesenen Leistungsziele erreicht werden.

Beispiel



„Verformungsbeständigkeits-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass auftretende plastische Verformungen des Behälters über den gesamten Nachweiszeitraum unterhalb des Dehnungsgrenzwertes für das Material liegen, dem die Tragfunktion zugeordnet ist.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz

$$\epsilon_V \leq \epsilon_{Vzul} \quad (7.3)$$

mit

ϵ_V = Vergleichsdehnung

ϵ_{Vzul} = Zulässige materialspezifische Vergleichsdehnung (genereller Richtwert 5%, DIN EN 13445 und DIN EN 13480)

„Tragfähigkeits-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass die aus der Summe der auf den Behälter einwirkenden Belastungen entstehenden Spannungen für den gesamten Nachweiszeitraum unterhalb der zulässigen Werte für den Behälterwerkstoff liegen.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz

$$\sigma_{vorh} < \sigma_{zul} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad (7.1)$$

„Herstellbarkeits-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens und Nichterkennens von (Schweißnaht-) Defekten kleiner ist als die Versagenswahrscheinlichkeit für die Funktionsfähigkeit eines Bauwerkes gemäß EUROCODE.

Für den Berechnungsansatz heißt das:

$$p_f \leq 10^{-4} \quad (7.5)$$

„Beulsicherheit-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass die aus der Summe der auf den Behälter einwirkenden Belastungen entstehenden Membrannormalspannungen in Meridianrichtung und in Umfangrichtung sowie die relevanten Membranschubspannungen unterhalb der zulässigen Werte für den Behälterwerkstoff liegen.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_t \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta} + \left(\frac{\sigma_{x\theta,Ed}}{\sigma_{x\theta,Rd}} \right)^{k_\tau} \leq 1$$

Prüfung zur Integrität des Behälters (Langzeitbeständigkeit)

„Langzeitbeständigkeits-Kriterium“

Es ist nachzuweisen, dass der Korrosionswiderstand ausreichend groß ist, um unter den standortspezifischen Korrosionsbedingungen, sowohl durch elektrochemische als auch mikrobielle Korrosion, ein Durchkorrodieren des Kupfermantels im Funktionszeitraum zu verhindern.

Entsprechend gilt für den Berechnungsansatz

$$D_{Cu} > \frac{t \cdot Kor_{Cu}}{S} \quad (7.4)$$

mit

- D_{Cu} = Dicke der Kupferhülle
- Kor_{Cu} = Korrosionsrate von Kupfer
- S = Sicherheitsfaktor = 0,95

Wesentliche Korrosionsprozesse Kupfer

Durch Strahlung

- Radiolytische Oxidationsmittel durch Radiolyse von Wasser (begrenzt)

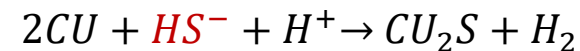
Durch Sauerstoff

- Im Buffer und Versatz eingeschlossener Sauerstoff (begrenzt)

Durch Sulfide

- Sulfide, die durch Auflösung von Pyrit im Buffer und im Versatz entstehen
- Sulfide, die durch Sulfat reduzierende Mikroben produziert werden
- Sulfide, die durch migrierende Grundwässer zum Behälter transportiert werden

Reaktionsgleichung



Hydrogensulfid

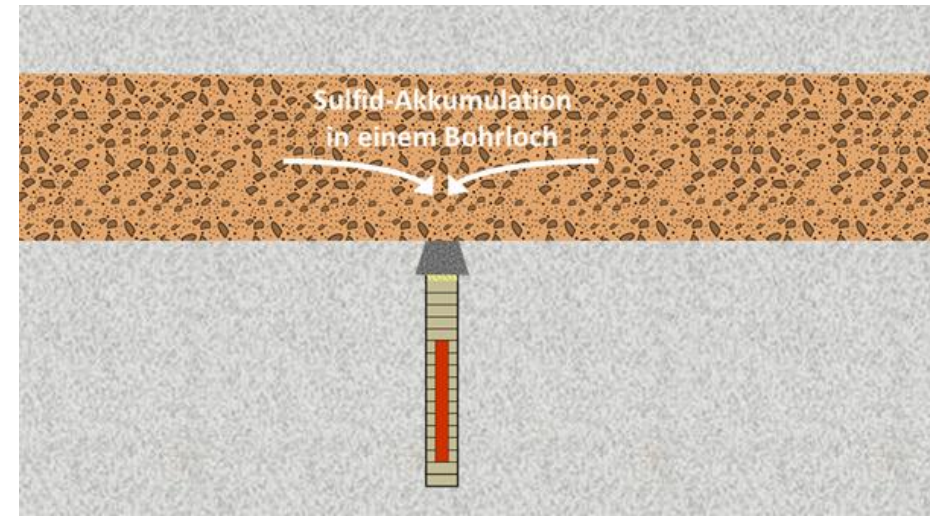
Prüfung zur Integrität des Behälters (Langzeitbeständigkeit)

1. Sulfide, die durch Auflösung von Pyrit im Buffer und im Versatz entstehen
2. Sulfide, die durch Sulfat reduzierende Mikroben produziert werden

Ansatz über Massenbilanz

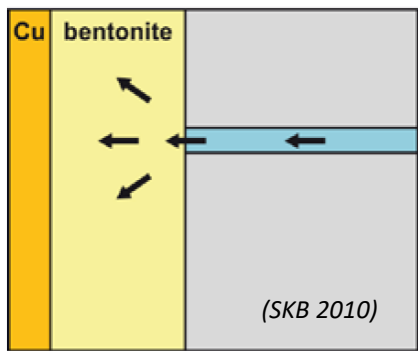
Annahme: Alles Sulfid aus einer Strecke akkumuliert in einem Bohrloch
 → konservative Abschätzung für N_{HS} und damit für

$$D_{CU}^{Korr} = \frac{N_{HS} \cdot v_{HS} \cdot M_{CU}}{A_{corr} \cdot Q_{CU}} \quad (SKB 2010)$$



3. Sulfide, die durch migrierende Grundwässer zum Behälter transportiert werden

1. Fall: Bentonit bleibt erhalten



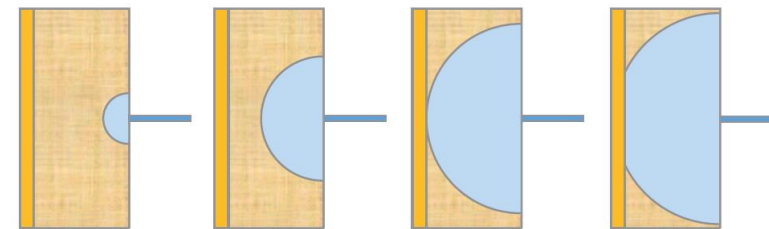
Über Diffusionsberechnungen
ermittelte äquivalente Fließrate
durch den Buffer *(Neretnieks et al. 2010)*

$$N_{HS} = Q_{eq} \cdot [HS^-] \cdot t$$

$[HS^-]$ = Konzentration der Sulfide im Grundwasser
 t = Bewertungszeitraum

← sulphide transport pathways

2. Fall: Bentonit wird erodiert



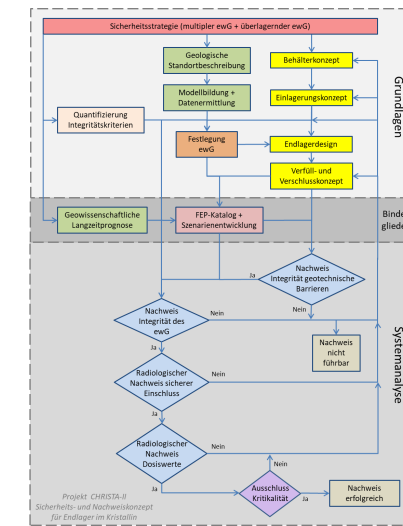
(SKB 2010)

Korrosionsrate: $Kor_{CU} = Q_{eq} \cdot [HS^-] \frac{v_{HS} \cdot M_{CU}}{A_{corr} \cdot Q_{CU}}$

Kriterium: $D_{Cu} > \frac{t \cdot Kor_{Cu}}{S}$

Zusammenfassung

- Konzeptionelles Vorgehen für eine Systemanalyse wurde erarbeitet.
- Grundlegende Informationen zur Erstellung eines (vorl.) Sicherheitskonzepts können vorgelegt werden.
- Erste Einteilung in wesentliche und weitere Barrieren ist erfolgt inklusive Zuweisung von Sicherheitsfunktionen.
- Methodische Vorgehensweise und Kriterien zur Prüfung der (geo)technischen Barrieren können größtenteils aus anderen Projekten übertragen werden.

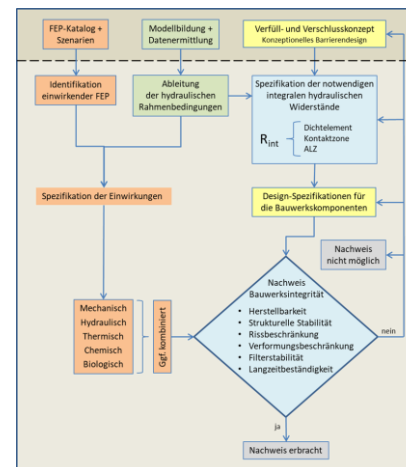


§10 Sicherheitskonzept (EndSiAnfV)

- (1) Sicherheitsstrategie
- (2) Erwartete/abweichende Entwicklung
- (3) Berücksichtigung der UVS
- (4) abgeschlossene Optimierung
- (5) Darstellung aller Barrieren
- (6) Ablaufplan, Rückholbarkeit, Bergung
- (7) Einwirkungen Dritter, Überwach. Kernmaterial

§6 vorl. Sicherheitskonzept (EndSiUntV)

- (1) vorl. Sicherheitskonzept auf Basis §10 EndSiAnfV
- (2) vorläufige Auslegung nach §11 EndSiAnfV
- (3) Optimierung nach §12 EndSiAnfV
- (4) vorläufige Auslegung für RVS
 1. Beschreibung wesentlicher/weiterer Barrieren
 2. Größe Endlager und gepl. Tiefenlage
 3. Art der Einlagerung
 4. Rückholbarkeit
 5. Verschluss- und Versatzmaßnahmen
 6. Geringhaltung Schäden Barrieren bei Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung



Vielen Dank !

Förderung:



Betreuung:

