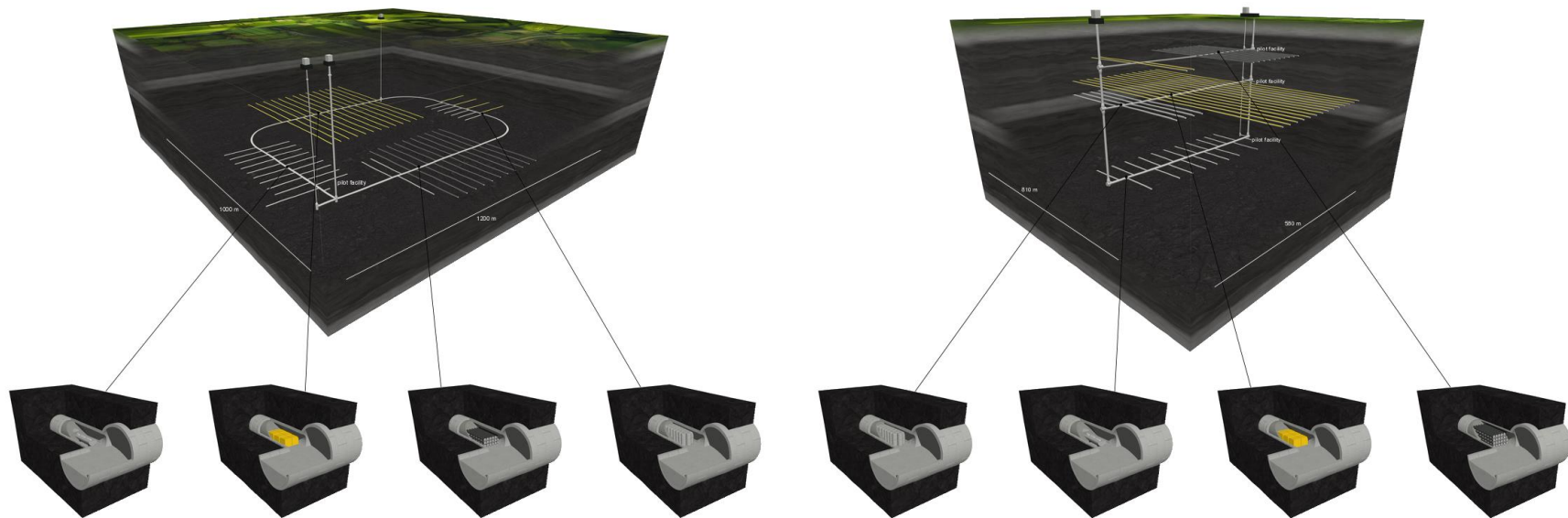




Eindberging in klei

INHOUD

- Waarom een eindberging in klei?
- Hoe gaan we een eindberging in klei ontwerpen?
- Hoe gaan we een eindbergingsfaciliteit in klei bouwen, opereren en sluiten?
- Wat kost een eindbergingsfaciliteit in klei?
- Hoe weten we dat een eindberging in klei veilig kan zijn voor meer dan 1 miljoen jaar?
- Wat hebben we nog nodig voor een eindberging in klei?

INHOUD

- Waarom een eindberging in klei?

GUNSTIGE EIGENSCHAPPEN VAN KLEI

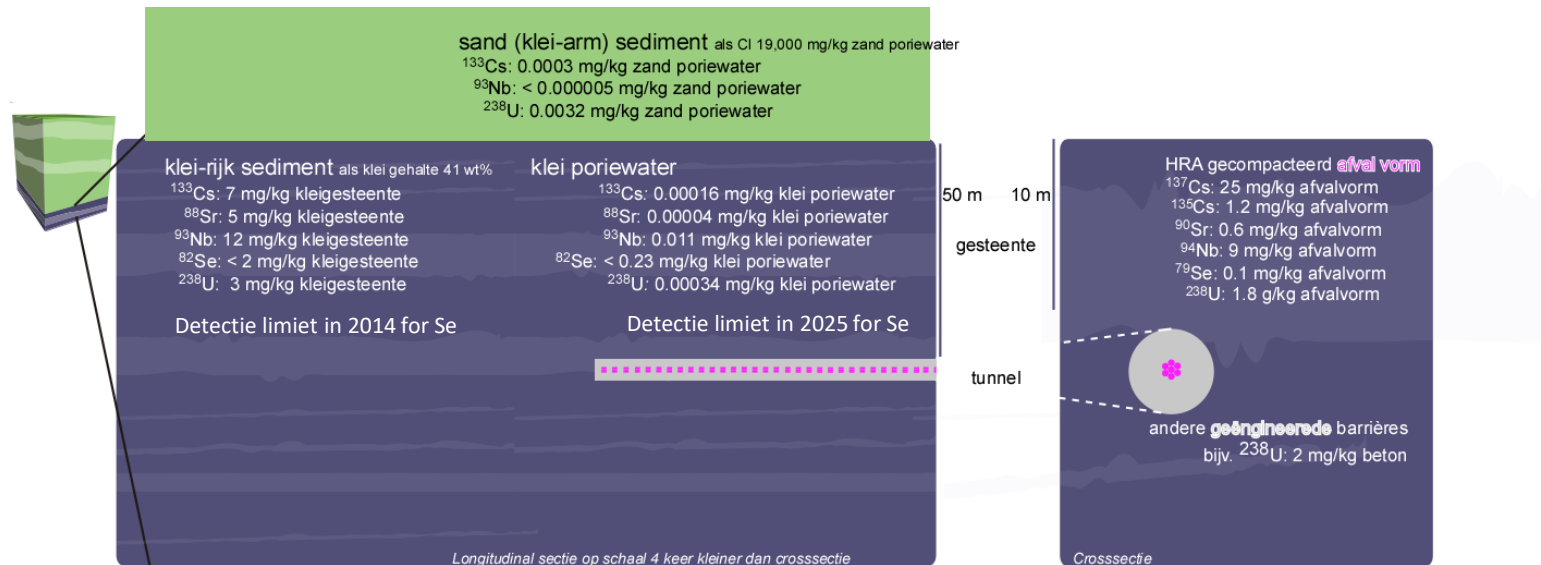
1. Vrijwel ondoordringbaar voor water;
2. Zelfhelend mechanisme indien breuken zijn ontstaan;
3. Chemische mechanismen die radionucliden vasthouden.

Klei gekozen als gastgesteente voor hoog radioactief afval
(HRA) in
België, Frankrijk, Zwitserland en Hongarije



CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN

Mechanismen waardoor concentratie opgeloste radionucliden heel erg klein zal zijn



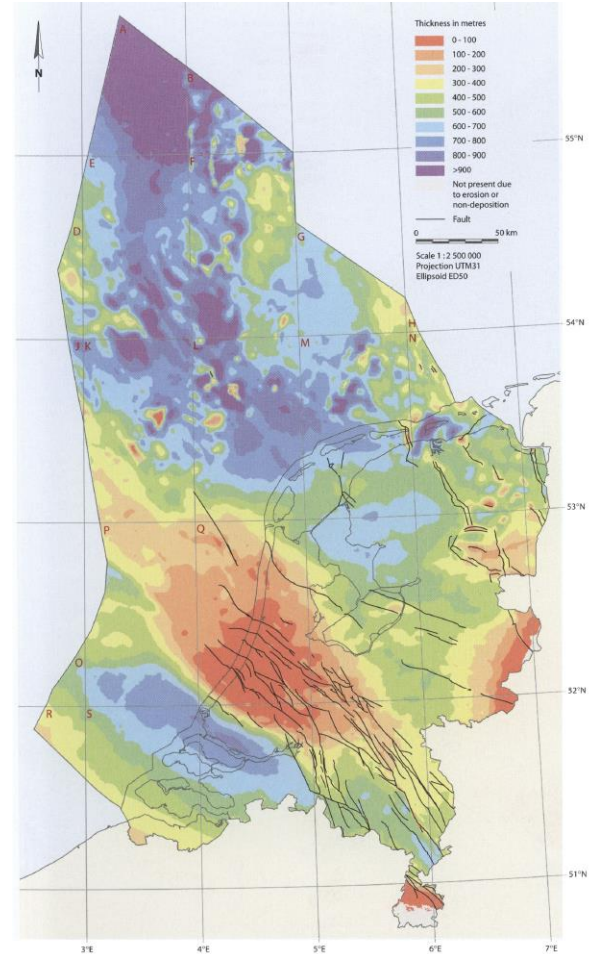
Koenen, M. and Griffioen, J. 2014. Mineralogical and geochemical characterization of the Boom Clay in the Netherlands. OPERA-PU-TN0521-1.

De Craen, M., Wang, L., Van Geet, M. and Moors, H. 2004. Geochemistry of Boom Clay pore water at the Mol site. Scientific report SCK•CEN-BLG-990.

Ma, M. and Behrends, T., to be published in 2025. Determining the trace element composition in pore water of clay-rich sediments from the Paleocene and Eocene.

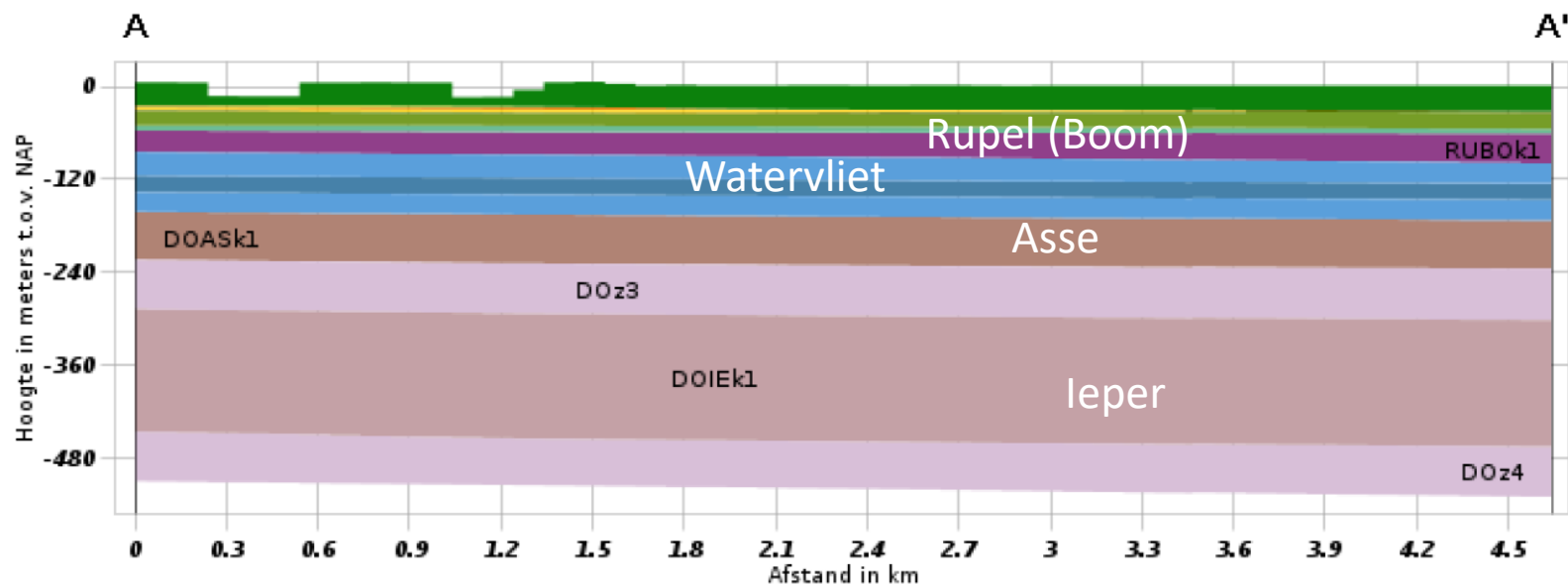
PALEOGENE KLEIEN

Paleogene kleien zijn bijna overal in Nederland aanwezig

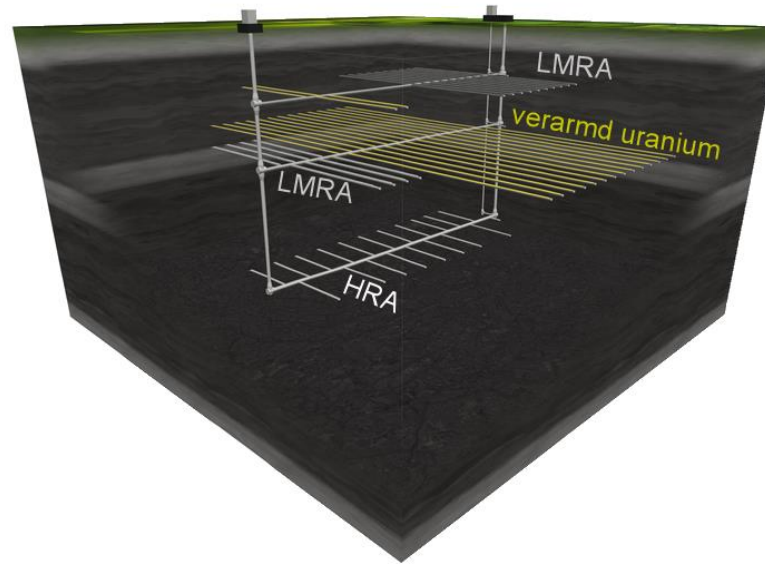


PALEOGENE KLEIEN

Verticale Doorsnede BRO REGIS II v2.2



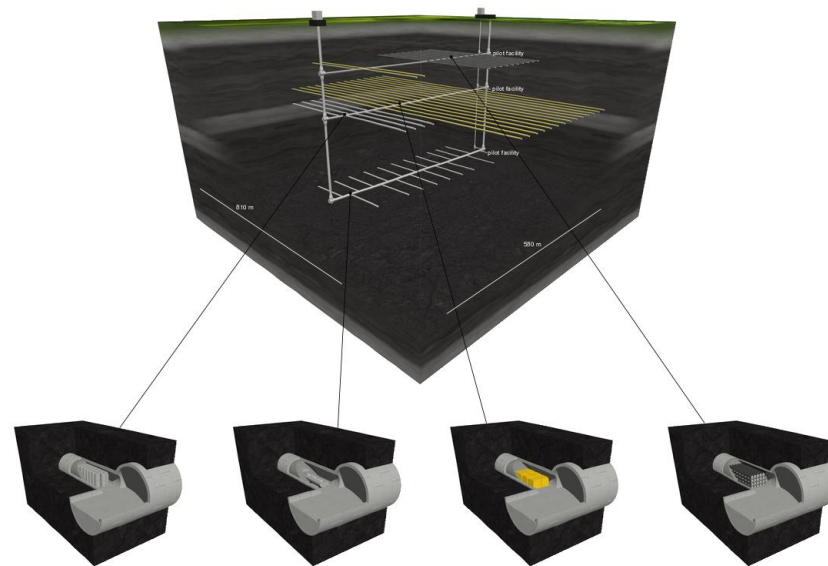
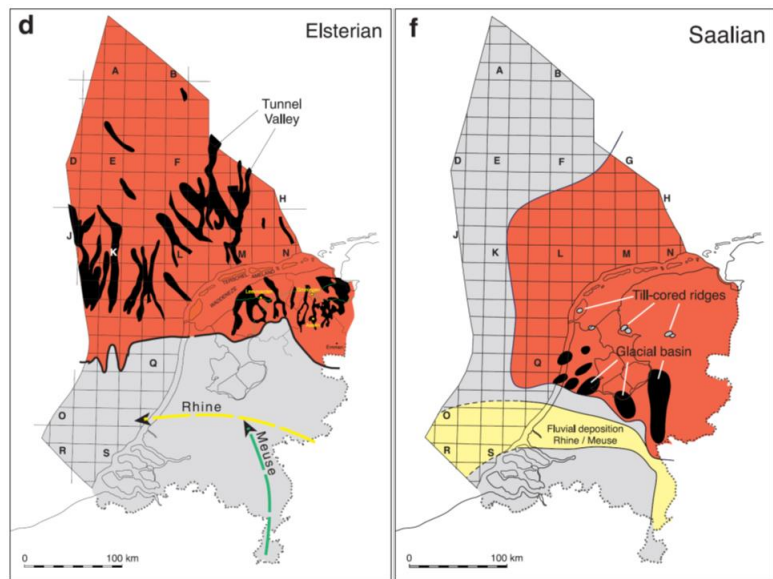
AANWEZIGHEID KLEIEN VOOR ONTWERP



INHOUD

- Hoe gaan we een eindberging in klei ontwerpen?

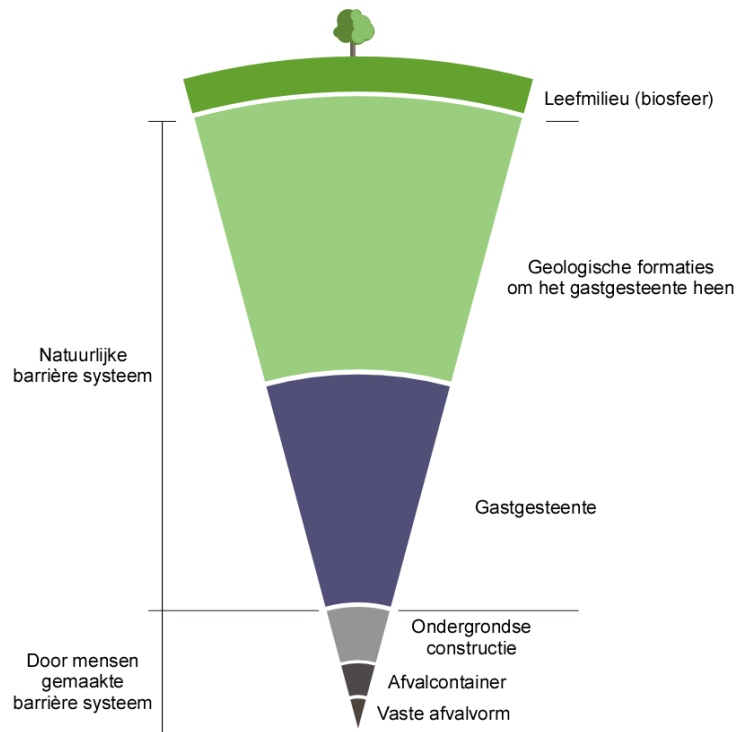
ONTWERP EISEN



Uit veiligheidsfuncties
diepte voor HRA
minimaal 200 m; maximaal 1000 m

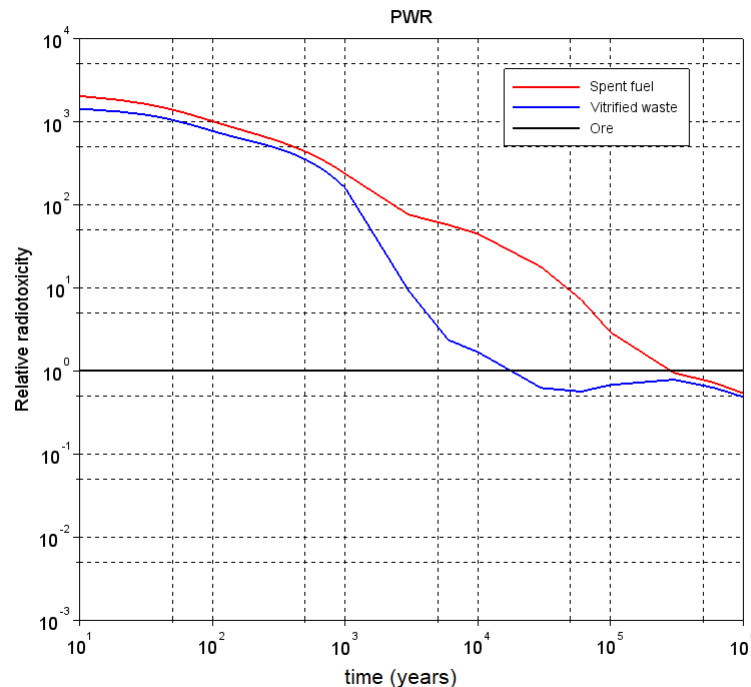
VEILIGHEID NA SLUITING FACILITEIT

Veiligheidsconcept voor
isoleren en insluiten voor
heel erg lang



HOE LANG INSLUITEN EN ISOLEREN?

verval

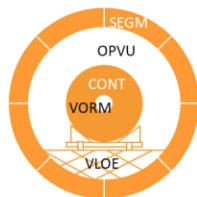


PASSIEVE VEILIGHEID

Natuurlijk
barrière systeem

Geëngineerde
barrière systeem
(EBS)

Vloer (VLOE) zelfde
functie als opvulling
(OPVU)



L4-KE-GEOL-ISOLA-01: De dikte van de lagen bovenop het kleigesteente zal de klei beschermen tegen geomorfologische processen zoals erosie tijdens ijstijden.

L4-KE-KLEI-INSLU-01: De lage permeabiliteit van de klei zal de toegang tot water naar het EBS beperken waardoor de veranderingssnelheden van componenten in het EBS beperkt zijn en het poriewater in de klei stilstaat waardoor radionucliden, als deze worden vrijgezet uit de afvalvorm, alleen via diffusie de klei kunnen verlaten.

L4-KE-KLEI-INSLU-02: De zuurstofloze condities in de klei zal de oplosbaarheid van redox gevoelige elementen beperken waardoor corrosiesnelheden van redoxgevoelige metalen beperkt zijn en de concentratie van opgeloste radionucliden die de klei kan verlaten beperkt is.

L4-KE-INSLU-03: Vaste en opgeloste immobiele fasen in de klei zal de concentratie van opgeloste radionucliden die de klei kan verlaten beperken door ionenuitwisseling en co-precipitatie.

L4-KE-SEGM-INSLU-01: De dikte en sterkte van de tunnelsegmenten zullen voldoende mechanische ondersteuning geven om mechanische verstoring van de klei te voorkomen totdat het afval door verval ongevaarlijk is.

L4-KE-SEGM-INSLU-02: De thermische eigenschappen van de segmenten zullen voldoende bijdragen aan de verspreiding van hitte totdat de klei niet meer verhit wordt door het afval.

L4-KE-OPVU-INSLU-01: De thermische eigenschappen van de opvulling zullen voldoende bijdragen aan de verspreiding van hitte totdat de klei niet meer verhit wordt door het afval.

L4-KE-OPVU-INSLU-02: De sterkte van opvulling zal voldoende mechanische ondersteuning geven om mechanische verstoring van de klei te voorkomen totdat het afval door verval ongevaarlijk is.

L4-KE-OPVU-INSLU-03: De lage permeabiliteit van de opvulling zal de toegang tot water naar de afvalcontainer beperken waardoor de veranderingssnelheid van de afvalverpakking beperkt is en radionucliden, als deze vrij worden gezet uit de afvalvorm, beperkt verder kunnen verspreiden naar de klei.

L4-KE-CONT-INSLU-01: De combinatie van de fysische en chemische eigenschappen van de materialen in de afvalcontainer zullen voorkomen dat de afvalvorm in contact komt met water zolang het afval de klei verhit.

L4-KE-CONT-INSLU-02: De lage permeabiliteit van minimaal één materiaal in de afvalverpakking zal de toegang tot water naar de afvalvorm beperken waardoor de veranderingssnelheid van de afvalvorm beperkt is en radionucliden, als deze vrij worden gezet uit de afvalvorm, beperkt verder kunnen verspreiden naar de opvulling.

L4-KE-VORM-INSLU-01: De lage oplosbaarheid van de afvalvorm beperkt de vrijzetting van radionucliden naar de afvalverpakking.

Ontwerpeisen alleen voor componenten in geëngineerde barrière systeem

OPERATIONELE VEILIGHEID

L4-KE-SEGM-BEHHE-01: De segmenten zullen voldoende mechanische ondersteuning geven tijdens de operationele fase van de eindbergingsfaciliteit.

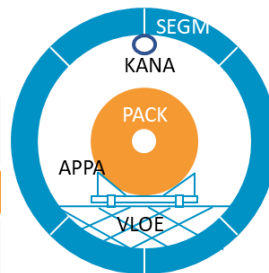
L4-KE-SEGM-BEHHE-01: De permeabiliteit van de segmenten zal de indringing van water in de tunnel beperken.

L4-KE-KANA-BEHHE-01: De lucht in de tunnel zal voldoende zuurstof aanleveren aan de werkers en koeling, indien nodig.

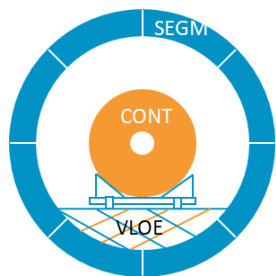
L4-KE-APPA-BEHHE-01: De afvalcontainer zal worden geplaatst onder menselijke controle. Indien nodig, kan de afvalcontainer worden teruggenomen tijdens de operationele periode van de eindbergingsfaciliteit.

L4-KE-VERP-AFSCH-01: Alleen afvalcontainers die je kunt aanraken zullen worden geplaatst in de eindbergingsfaciliteit.

L4-KE-VLOE-BEHHE-01: De vloer zal voldoende mechanische ondersteuning geven voor de afvalcontainer en het voertuig waarmee de afvalcontainer wordt getransporteerd. Indien nodig, zal de vloer worden afgewerkt.



ONTWERP EISEN



L5-KE-SEGM-BEHEE-01: Mechanische ondersteuning als functie van de straal van de tunnel en dikte en sterkte van de segmenten zal groter zijn dan de mechanische last van de klei op de diepte van de ondergrondse faciliteit.

L5-KE-SEGM-BEHEE-02: De segmenten zijn impermeabel in termen van engineering

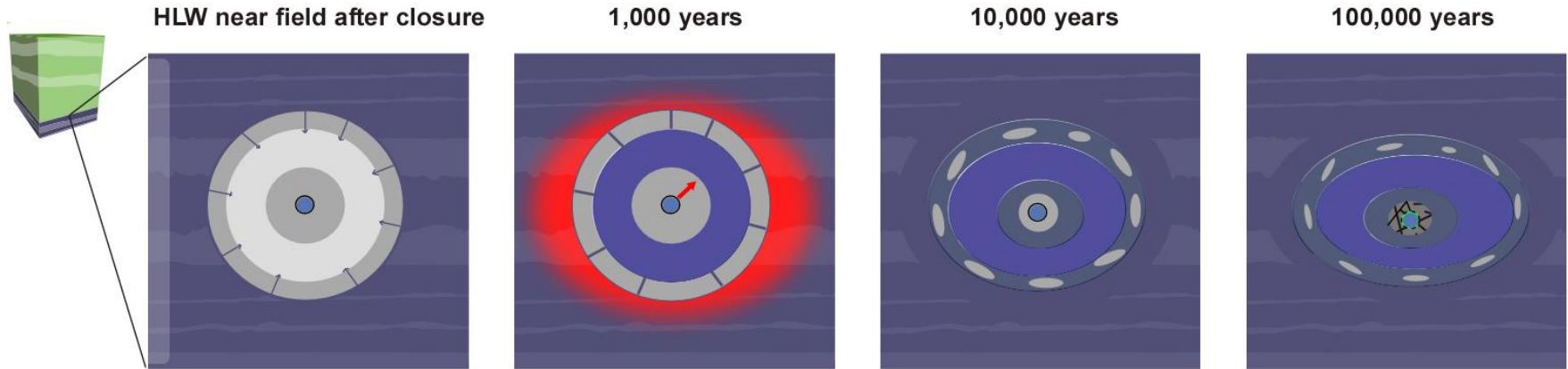
L5-KE-CONT-INSLU-01: De afvalcontainer kan een mechanische last aan van 10 MPa voor 1200 jaar, indien de diepte 500 m van de ondergrondse faciliteit is.

L5-KE-CONT-AFSCH-01: De gamma en neutronen dosistampi zal minder zijn dan 0.12 mSv per uur (max. 15 minute contact) en minder dan 0.0075 mSv per uur (max. 4 uur op één meter afstand).

L5-KE-VLOE-INSLU-03: Het materiaal waarmee de vloer wordt gemaakt heft een lager diffusiesnelheid voor water dan het kleigesteente.

L5-KE-VLOE-BEHEE-01: De vloer geeft voldoende mechanische ondersteuning voor de aslast van een beladen voertuig.

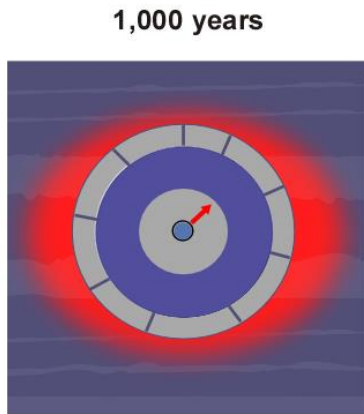
HOOFD PROCESSEN NA SLUITING



verval

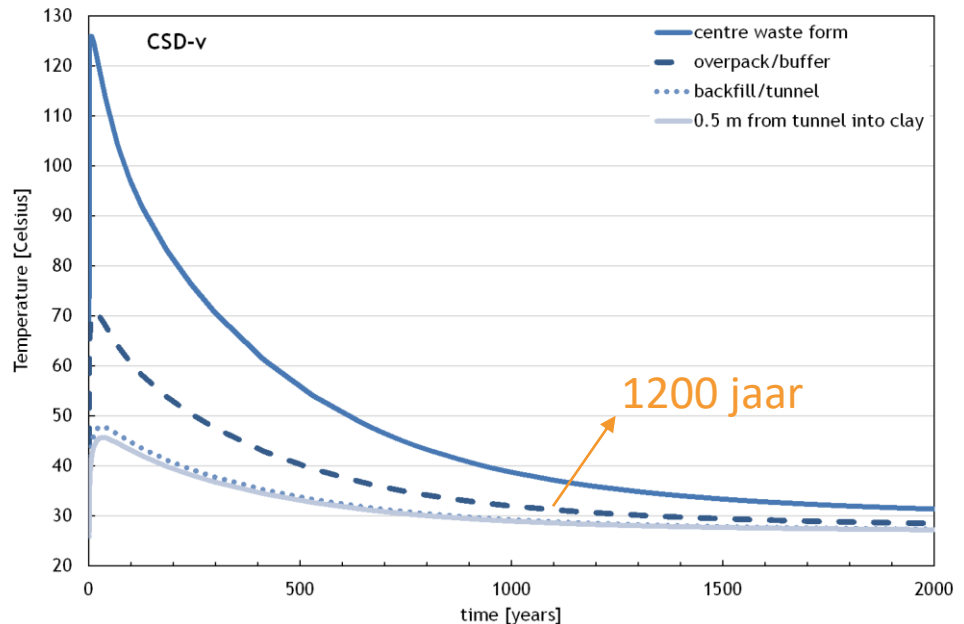
na 20,000 years:
Verglaasd HRA kleinere radiotoxiciteit
dan uranium erts

HOOFD PROCES NA SLUITING

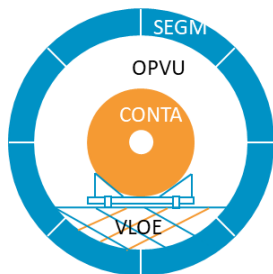


Thermische evolutie

Temperatuur van beton en klei lager dan 100°C
Verglaasd HRA met een periode van koeling van 130 jaar



ONTWERP SPECIFICATIES



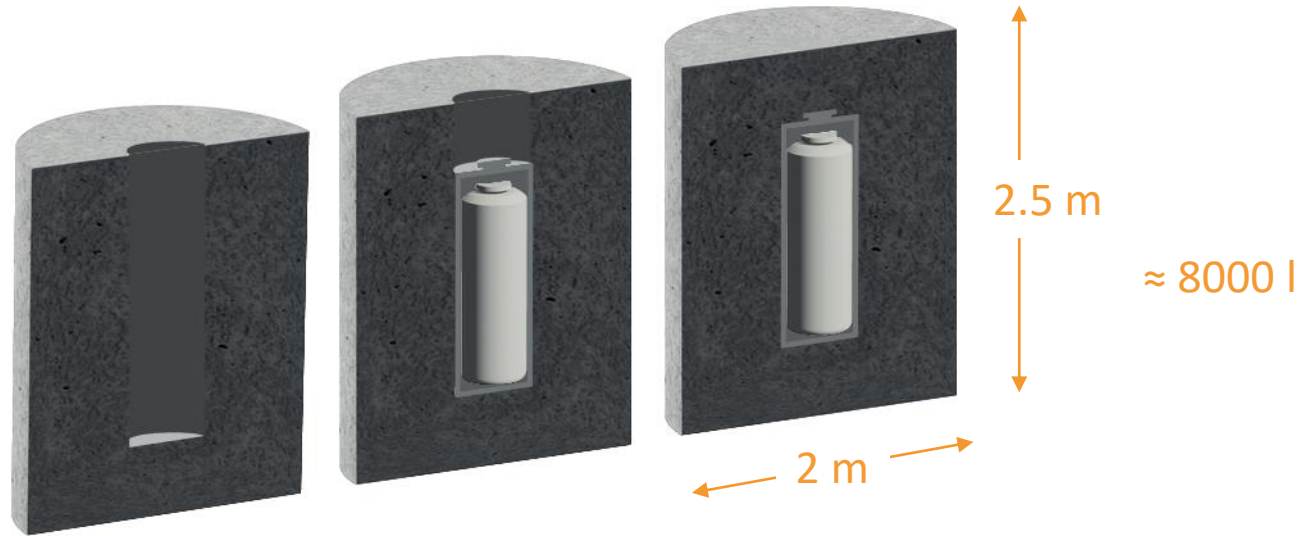
L6-KE-SEGM-BEHEE-01&2: Voor een interne diameter van 4 m en diepte van 500 m: een dikte van de betonnen segmenten van 0.5 m met een compressieve sterkte van minimaal 80 MPa na 28 dagen uitharding.

L6-KE-CONT-AFSCH-01&INSLU-01: Voor HRA gekoeld voor 130 jaar

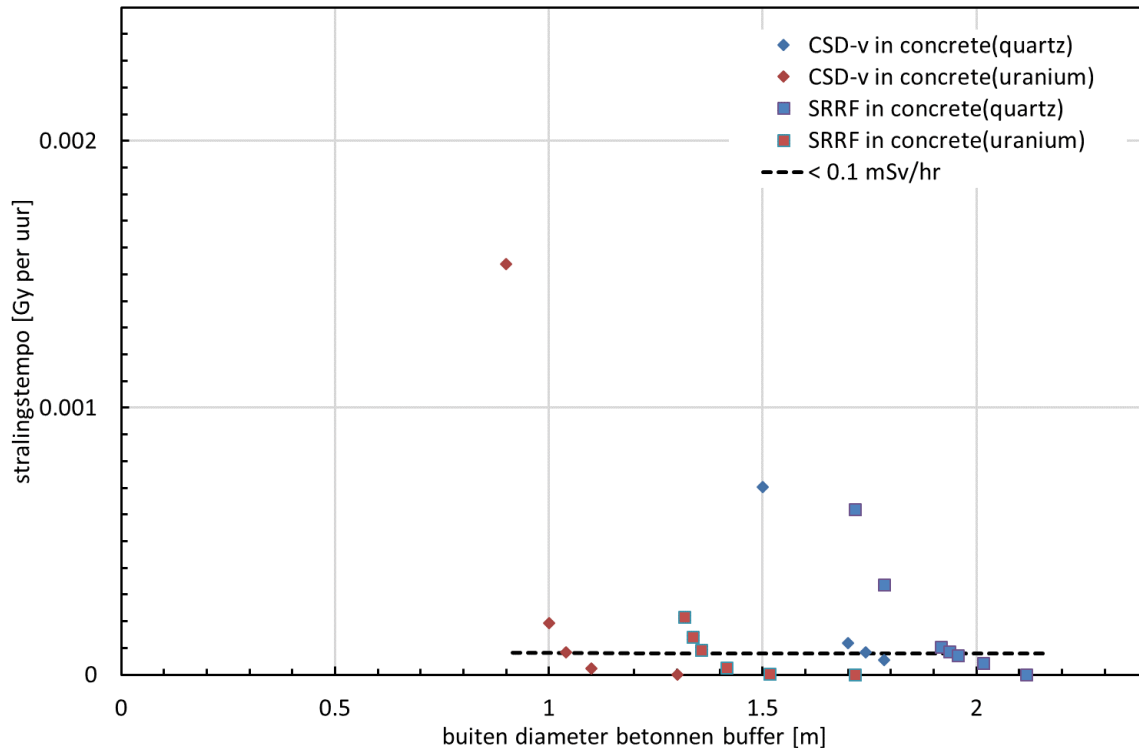
- 1) een carbon steel overpack zal een wanddikte hebben van 30 mm (dichtheid 7850 kg m^{-3} & yield strength 600 MPa & uniform corrosiesnelheid van $0.1 \text{ } \mu\text{m}$ per jaar)
- 2) de buitendiameter van de betonnen container zal 2 m zijn (thermische geleidbaarheid $> 0.1 \text{ W/mK}$, dichtheid 2350 kg m^{-3})

L6-KE-VLOE-BEHEE-01&INSLU-03: Een materiaal met een compressieve sterkte van minimaal 4 MPa (bijv. schuimbeton) en verzadigde diffusie waarde voor water van maximaal $20 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

FABRICAGE SPECIFICATIES



INVLOED TOESLAGMATERIAAL



Figuur 6-19 in COPERA CLAY 2024

INHOUD

- Hoe gaan we een eindbergingsfaciliteit in klei bouwen, opereren en sluiten?

BOUWEN VAN EEN FACILITEIT IN KLEI



Ondergronds onderzoekslaboratorium op 225 m diepte
Mol, België / EURIDICE

BOUWEN VAN EEN FACILITEIT IN KLEI

Film about the construction of HADES



Film about the construction of HADES

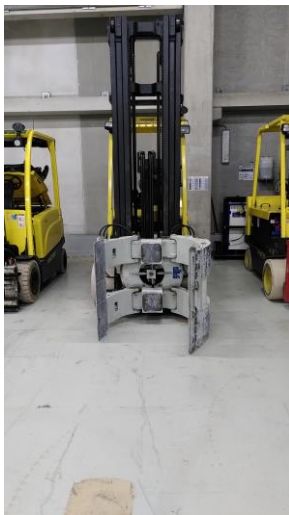


Bijna geen stof → arbeidsvriendelijke

OPEREREN = PLAATSEN VAN AFVAL



3 × 200 l



1000 l

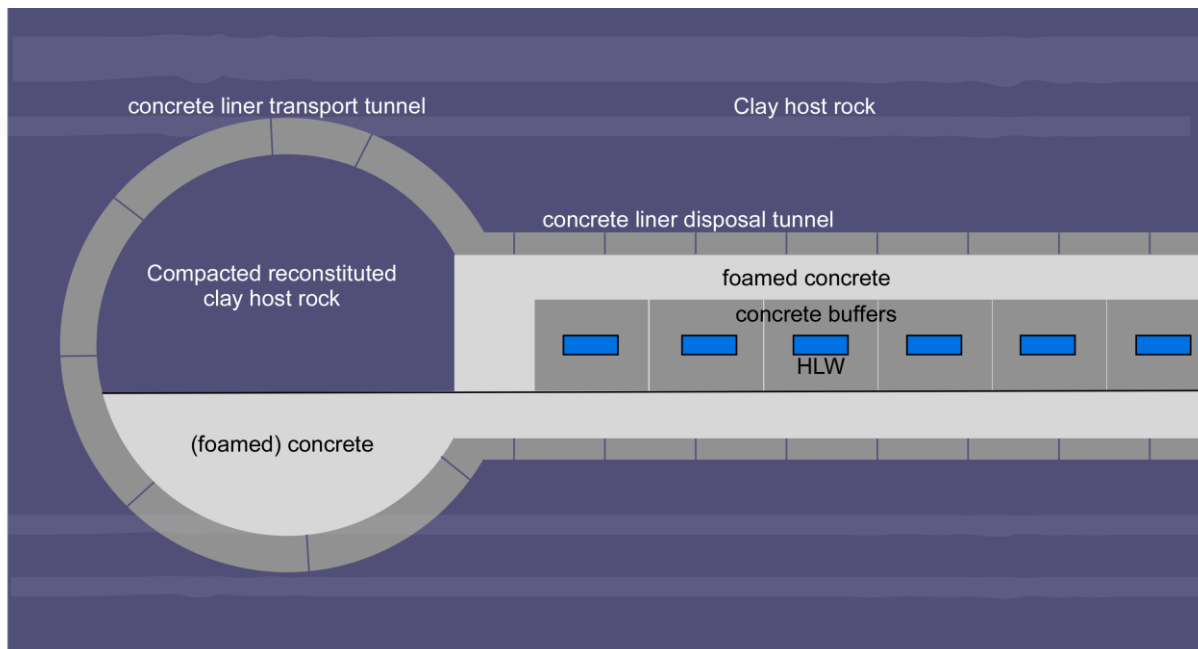


Ruim voldoende voor 8000 l

SLUITEN = OPVULLEN VAN LEGE RUIMTE



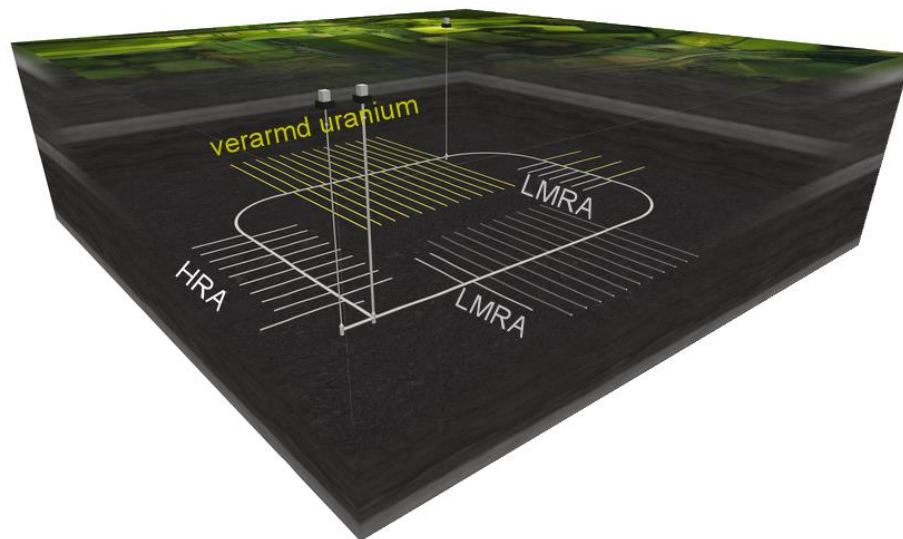
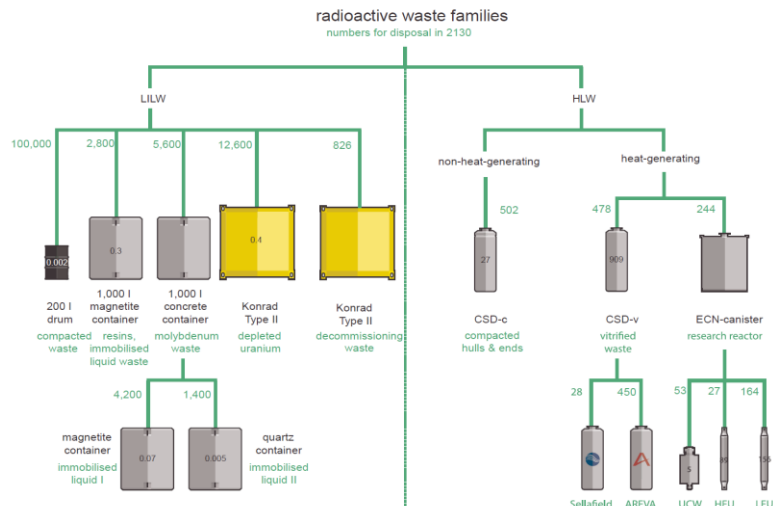
SLUITEN = OPVULLEN VAN LEGE RUIMTE



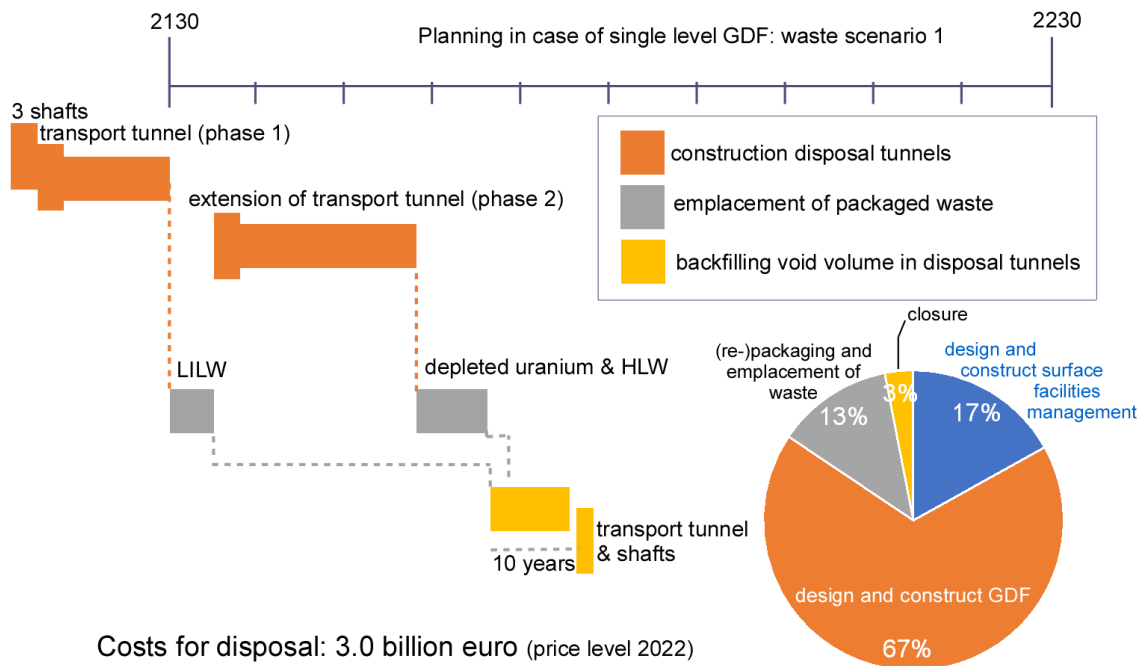
INHOUD

- Wat kost een eindbergingsfaciliteit in klei?

KOSTEN



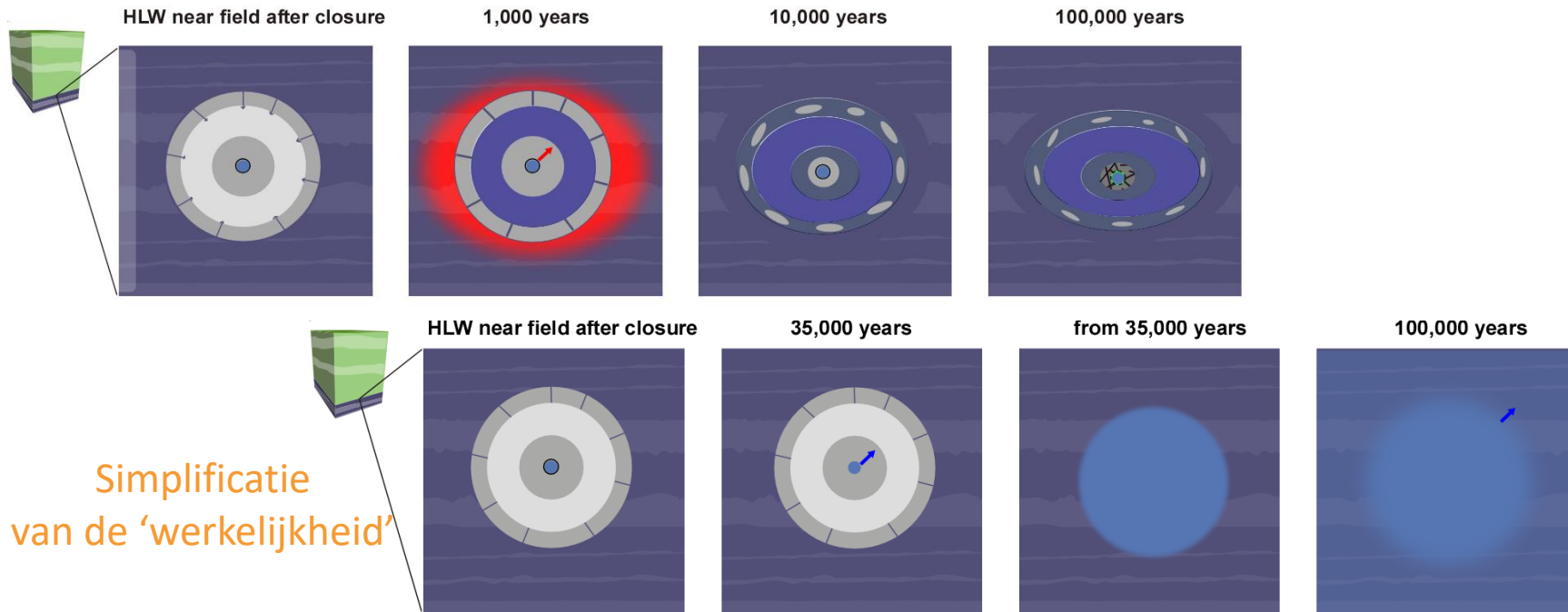
KOSTEN



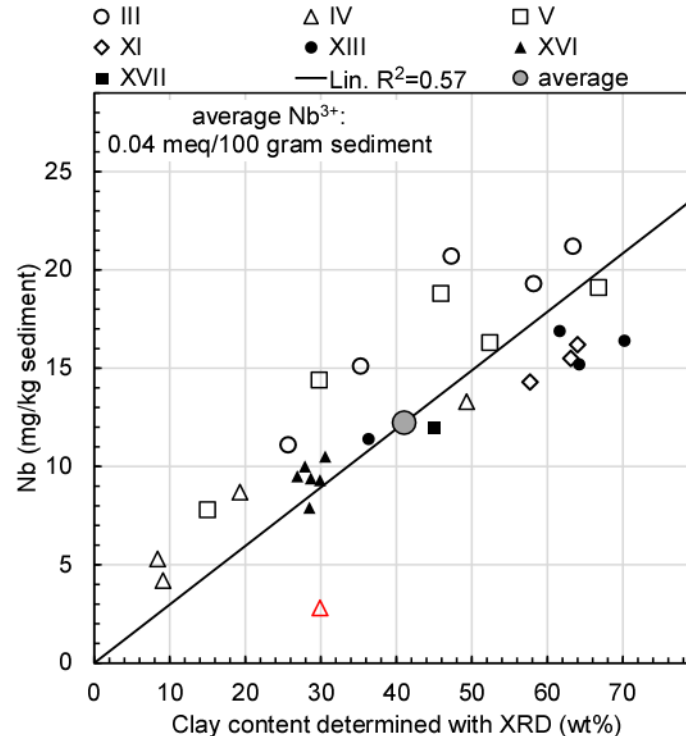
INHOUD

- Hoe weten we dat een eindberging in klei veilig kan zijn voor meer dan 1 miljoen jaar?

VELIGHEIDSBEREKENINGEN



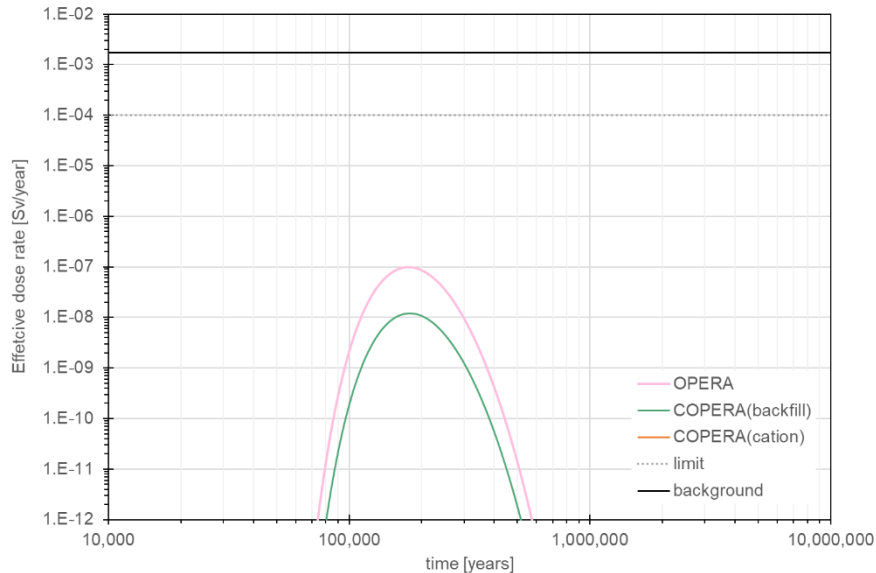
INPUT VEILIGHEIDSBEREKENING



Retentie in
klei

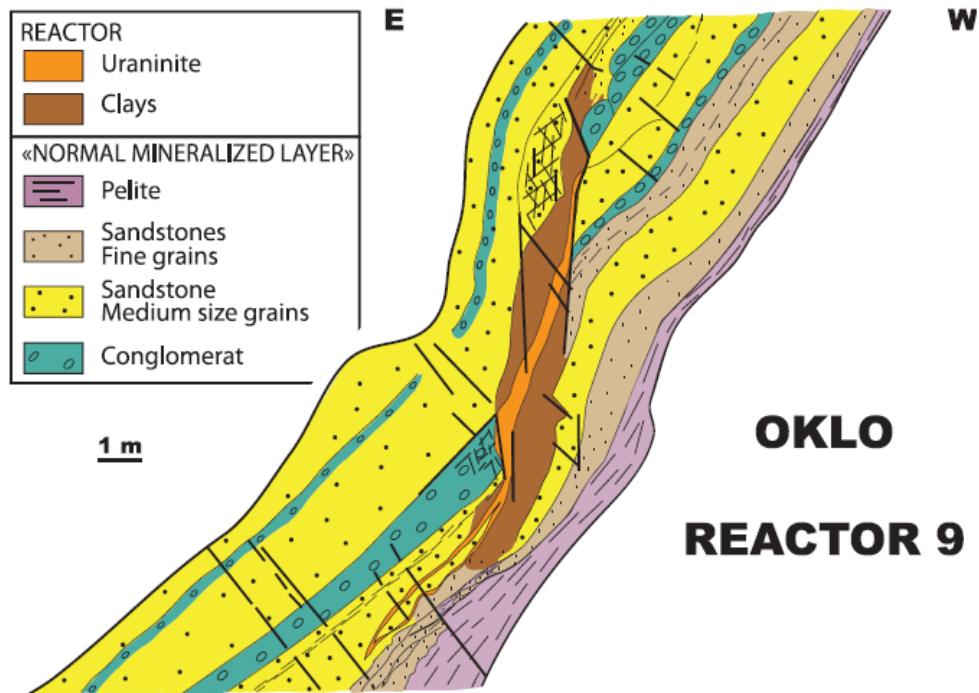
INVLOED VEILIGHEIDSBEREKENING

Retentie in OPERA alleen kationen



Uitkomst meer in lijn met internationale gegevens
NAGRA Technical Report 02-05 (2002):
radioactief niobium verlaat het kleigesteente niet.

HOE WETEN WE DAT HET SYSTEEM MET KLEI VEILIG IS?



INHOUD

- Wat hebben we nog nodig voor een eindberging in klei?

VAN AANNAMES NAAR ECHT

Geotechnische eigenschappen aangenomen
metingen in SECUUR (NWO – TU-Delft)

Steeds meer geochemische eigenschappen gemeten om aannames voor veiligheid
te verifiëren of te herzien (Middelburg, Utrecht en TNO)

EEN PILOT FACILITEIT

Vinden van een gemeente die een pilot faciliteit wil

- Geotechnische en geomechanische eigenschappen meten
- Constructietechniek toetsen en testen op ware grootte
- Operationele technieken toetsen en testen op ware grootte
- Opvultechnieken toetsen en testen op ware grootte

- Geochemische eigenschappen meten

Indien OK, pilot faciliteit wordt een locatie voor de eindberging van radioactief afval



Ondergronds laboratorium op 225 m diepte
Mol, België / EURIDICE

Nog vragen?

PUBLICATIES

CORA, OPERA and COPERA reports zijn verkrijgbaar bij:

<https://www.covra.nl/nl/downloads/onderzoeksprogramma/>

<https://www.covra.nl/nl/downloads/opera/>

<https://www.covra.nl/nl/downloads/cora/>

EURAD reports zijn verkrijgbaar bij:

<https://ejp-eurad.eu/publications>

Filter

Programme: EURAD-1

Document type: Project Deliverables

Project category: EURAD-1 Work Packages

Project name:

ACED / FUTURE / GAS / MAGIC

Zie Appendix 2 van COPERA CLAY 2024

https://www.covra.nl/app/uploads/2025/03/COPERA-CLAY-2024_web.pdf