

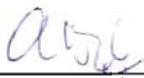
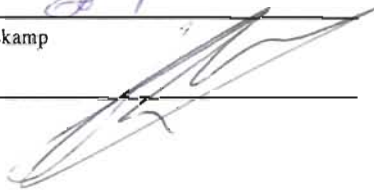
**Concept ontwerp
terughaalbare opslag van
radioactief afval in diepe boorgaten
in steenzout (Torad-B)**

A.D. Poley

Petten, 19 mei 2000

21514/00.31223/C

In opdracht van het Ministerie van Economische Zaken

auteur : A.D. Poley 	beoordeeld: J.B. Grupa 
21514/00.31223/C RE/AP/LQ	goedgekeurd : R. Huiskamp 

© NRG 1999

Behoudens hetgeen met de opdrachtgever is overeengekomen, mag in dit rapport vervatte informatie niet aan derden worden bekendgemaakt en is NRG niet aansprakelijk voor schade door het gebruik van deze informatie.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	7
1.1	Terughaalbaarheid	7
1.2	Internationaal kader	8
1.3	Projectopzet en indeling van het rapport	9
2	Eisen en randvoorwaarden	11
2.1	Definitie van terughaalbaarheid	11
2.2	Hoeveelheid afval	13
3	Detail concept opberging	15
3.1	De opbergholten	15
3.2	Boorgatverbuizing	16
3.2.1	Belastingen van de verbuizing	16
3.2.2	Ontwerp van de verbuizing	17
3.3	Container overpack	18
3.3.1	'One-pack' overpack	19
3.3.2	'Two-pack' overpack	21
3.3.3	'Open' overpack	22
3.3.4	Conclusie	22
3.4	Afschermingsberekeningen voor de mijngangen	23
3.4.1	Berekening van de nuclideinventaris in het KSA	23
3.4.2	Bepaling van de benodigde dikte van de zoutplug	23
3.4.3	Conclusie	25
3.5	Temperatuurberekeningen	25
3.5.1	Een enkel boorgat	26
3.5.2	Cluster van boorgaten	27
3.5.3	Conclusies	29
3.6	Thermomechanische stabiliteit	29
3.6.1	Geometrie en FE-model	30
3.6.2	Thermische analyse	31
3.6.3	Mechanische analyse	32
3.6.4	Conclusies	34
4	De constructieve uitvoering	35
4.1	De schachten	35
4.2	De ondergrondse ruimten	35
4.3	Het boren van de gaten	36
4.4	Het gereedmaken van de opbergfaciliteit	36
4.4.1	Een enkel boorgat	36
4.4.2	Cluster van boorgaten	39
4.5	Alternatieve grijper- en remmechanismen	40
4.5.1	Grijpermechanismen	40
4.5.2	Remmechanismen	41

5	Het bedrijven van de faciliteit	45
5.1	De beladingsfase	45
5.2	De afsluitfase	47
5.3	De interim-opslagfase	48
5.4	De terughaalfase	48
6	Discussie	49
6.1	Overwegingen bij het ontwerp	49
6.2	Aandachtspunten	50
6.2.1	Ontwerpongeval	50
6.2.2	Corrosie van de verbuizing	51
6.2.3	Convectief warmtetransport	52
	Referenties	53

Samenvatting

Het project Torad-B (“Terughaalbaar opslaan van radioactief afval in diepe boorgaten”) had tot doel om, als alternatief voor het in de METRO-studie ontwikkelde opslagconcept gebaseerd op terughaalbare opslag in korte horizontale boorgaten, een opslagconcept te ontwikkelen gebaseerd op terughaalbare opslag in diepe verticale verbuisde boorgaten. Een dergelijk concept beoogt optimaal gebruik te maken van de algemene verticale geologische geaardheid van een zoutpijler. Uitgangspunt hierbij was de in de METRO-studie ontwikkelde werkbare definitie voor het begrip “terughaalbare opslag”.

Dit rapport geeft een overzicht van de resultaten van het Torad-B project op basis van de topical rapportages die in de loop van het project zijn gemaakt:

- het conceptuele ontwerp van de opslagfaciliteit op basis van “proven technology”;
- de effectiviteit van de afscherming van het opgeslagen hoogactief afval;
- de temperatuursontwikkeling van het opgeslagen hoogactief afval;
- de benodigde sterkte van de overpacks van COGEMA-containers; en
- de thermo-mechanische stabiliteit van een cluster van boorgaten.

In hoeverre de voorgestelde afsluitconstructies van de beladen boorgaten adequaat zijn, moet aan de hand van een veiligheidsstudie vastgesteld worden. Dit viel echter buiten de horizon van het Torad-B project.

1 Inleiding

Op allerlei plaatsen in ons land ontstaat radioactief afval: in ziekenhuizen, sommige laboratoria, kerncentrales en onderzoeksreactoren. Een in volume gering deel hiervan (~5%, voornamelijk geproduceerd in reactoren) bestaat uit hoograadioactief afval, dat echter wel het grootste deel van het (vaak langlevende) radioactief materiaal bevat (99%). Omdat dit radioactieve afval gedurende een zeer lange tijd, langer dan duizenden jaren, een potentieel risico voor mens en milieu vormt, moet dit afval uiteindelijk zorgvuldig geïsoleerd worden. Aangezien een door de mens aangelegde constructie de gewenste isolatie slechts kan geven voor een beperkte periode, enige honderden jaren, is voor deze langdurige isolatie een andere oplossing nodig. Een van de mogelijkheden voor de opberging van het langlevende radioactieve afval dat in reactoren wordt gevormd, is ondergrondse opslag in bepaalde diepe geologische formaties (steenzout, klei of - voor Nederland minder relevant - graniet); daarbij moet de langdurige isolatie door de geologische eigenschappen van het gastgesteente geleverd worden.

1.1 Terughaalbaarheid

In Nederland is door de overheid het standpunt geformuleerd dat opberging van (radioactief) afval alleen is geoorloofd als het afval goed beheerd en gecontroleerd blijft en beschikbaar is voor, bijvoorbeeld, hergebruik of andersoortige bewerkingen [1]. Dit impliceert dat het opgeborgen afval terughaalbaar moet zijn. Een werkbare invulling van het begrip “terughaalbaarheid” is uitgewerkt in het METRO-project [2] als interim-opslag waarvoor periodiek kan worden besloten tot afsluiting dan wel een volgende interim-opslagperiode op basis van de ‘rolling present’. Dit proces wordt tegenwoordig ook wel aangeduid met ‘staged decision’. Voor de volledigheid is een weergave van de nationale en internationale standpunten die tot deze invulling hebben geleid opgenomen in hoofdstuk 2 van dit rapport.

De in het verleden beschouwde opbergconcepten voldoen niet zonder meer aan de terughaalbaarheids-eis, zodat er dus nader onderzoek nodig is naar technische oplossingen die terughaalbare opslag in zout of klei mogelijk maken. Hierbij moet vooral de mogelijke risico's (kansen op doses) van een dergelijke terughaalbare opslag en de kosten ervan bekeken worden.

De risico's verbonden met opslag van radioactief afval in de diepe ondergrond worden bepaald door de betrouwbaarheid van de barrières die geconstrueerd worden dan wel ontstaan door geologische processen tussen het afval en de biosfeer. Bij terughaalbare opslag van afval moet - zeker gedurende de terugneembaarheidsperiode - deze isolatie geheel door geconstrueerde barrières geleverd worden. Bij het gastgesteente steenzout zijn hierbij vooral de kruip-eigenschappen en compactie van als vulmateriaal gebruikt zoutgruis van belang, bij het gastgesteente klei wordt meer op de isolerende werking van speciale overpack containers gerekend.

1.2 Internationaal kader

Een essentieel probleem voor opberging van langlevend radioactief afval is de lange-termijn veiligheid. Gezien de lengte van de te beschouwen periode van de opberging moet de veiligheid van de opslagfaciliteit met rekenprogramma's worden geanalyseerd. Ter verhoging van de betrouwbaarheid van de veiligheidsanalyses moeten deze programma's worden gevalideerd met experimenten onder condities die relevant zijn voor de te verwachten opberg-omstandigheden.

De laatste jaren is middels in-situ experimenten in het EU-project BAMBUS (Backfill and Material Behaviour of Underground Salt Repositories, 1996 - 1998) [3] veel kennis vergaard over het kruipgedrag van steenzout en het compactiegedrag van zoutgruis. Tijdens de loop van het BAMBUS-project vormde het langlopende (vanaf ca. 1990) TSDE-experiment ("Thermal Simulation of Drift Emplacement") een belangrijk onderdeel. Dit experiment, uitgevoerd in de Assemijn, heeft tot doel de isolerende werking van compacterend zoutgruis rond verhitte dummy POLLUX-opslagcontainers te bestuderen. In de komende jaren zal het TSDE-experiment worden beëindigd. Eind 1998 zijn de heaters van dit experiment uitgeschakeld en, na een voldoende lange afkoeltijd, zal een relevant deel van het experiment worden blootgelegd om de meetgegevens van de afgelopen jaren te checken aan directe waarnemingen. De gegevens die hierbij beschikbaar komen bieden een unieke gelegenheid de ontwikkelde fysische modellen voor kruip en compactie van zoutgruis op hun merites te beoordelen. De ervaringen die bij deze fase van het TSDE-experiment zullen worden opgedaan zijn direct van belang voor de verdere ontwikkeling van de technieken voor het terughalen van containers met radioactief afval uit een galerij-opslag en, naar verwachting, indirect ook voor het terughalen van containers opgeslagen in boorgaten.

Mede vanwege de internationale belangstelling voor data voortkomend uit het TSDE-experiment, is dit experiment ingebracht als onderdeel van het BAMBUS-II projectvoorstel voor het EU 5^{de} kaderprogramma. Daarbij mikken de beoogde niet-Duitse partners op een voortzetting van de benchmark-exercitie voor modellering van het zoutgruisgedrag uit het BAMBUS-project (CS²-benchmark) [3] door toepassing van de modellen op het TSDE-experiment. Mede vanwege het feit dat de EC het item "terughaalbaarheid" expliciet in de beoordeling van "afvalprojecten" in het 5^{de} kaderprogramma heeft opgenomen en de bestaande Nederlandse expertise op dit gebied, bestond er bij de BAMBUS-II partners behoefte aan een expliciet Nederlandse bijdrage op dit punt. Deze bijdrage zou (minimaal) kunnen bestaan uit een kritische review van de bijdragen van de andere partners op dit punt, al zou een Nederlandse bijdrage in de vorm van een ontwerp-ontwikkeling de kans op een positieve beoordeling van het BAMBUS-II zeker verhogen. Daarom werd besloten, in aansluiting op het nog immer bestaande Duitse concept voor de opberging van verglaasd afval in diepe boorgaten, een variant op dit concept te ontwikkelen waarbij dit afval terughaalbaar wordt opgeslagen: het Torad-B ontwerp.

1.3 Projectopzet en indeling van het rapport

De ontwikkeling van het Torad-B ontwerp is uitgevoerd in het gelijknamige project. In dit project is uitgebreid onderzoek gedaan naar relevante zaken zoals:

- stralingsbeschermende werking van boorgat-afsluitingen,
- de temperatuurontwikkeling in en rond met HLW containers gevulde boorgaten,
- de vervorming van overpack's onder invloed van mechanische en thermische belasting, en
- de ontwikkeling van de spanningsopbouw in het zout rond de boorgaten met de daardoor mogelijk op te treden vervormingen van de verbuizing in verband met de technische limitering van terughaalbaarheid in de tijd.

Daarnaast is aandacht gegeven aan de mogelijkheden tot monitoring van de conditie van het opgeslagen radioactief afval en de eventuele maatregelen die daaruit kunnen voortvloeien.

Het Torad-B project beperkte zich tot de ontwikkeling van het Torad-B ontwerp, welke berust op de in Nederland ter beschikking komende hoeveelheid verglaasd radioactief afval (OPLA strategie A [4]), gelijk aan die voor het METRO-I ontwerp.

Het uitvoeren van een veiligheidsanalyse van het Torad-B opbergconcept (of een opgeschaalde variant daarvan) zal mogelijk deel uitmaken van het BAMBUS-II project als onderdeel van het EU 5^{de} kaderprogramma.

In het kader van het Torad-B project zijn een viertal topical rapporten geschreven, één voor elk der onderscheiden activiteiten in de ontwikkeling van het Torad-B ontwerp:

- conceptuele ontwerp van het Torad-B concept
- stralingsafscherming van een boorgat-afsluiting en temperatuursontwikkeling rond een boorgat
- bepaling van de benodigde sterkte van verbuizing en overpacks
- thermo-mechanische stabiliteit van een cluster boorgaten

Het huidige rapport geeft een overzicht van deze vier topical reports. Na een beschrijving van de in het kader van het METRO-project ontwikkelde invulling van het begrip “terughaalbaarheid” [2] in hoofdstuk 2, wordt in de hoofdstukken 3 tot 5 het Torad-B ontwerp en de daarin voorziene operaties beschreven, inclusief de controleerbaarheid (monitoring) van het afval. Hoofdstuk 6 besluit dit rapport met een korte discussie van verschillende aspecten van het Torad-B ontwerp.

2 Eisen en randvoorwaarden

Naast de functionele eisen waaraan een ontwerp van een opslagfaciliteit moet voldoen, zullen er ook altijd randvoorwaarden zijn die de keuzevrijheid in het ontwerpproces beperken en waarbinnen een ontwerper oplossingen moet vinden. Daarnaast zullen er tijdens het ontwerp aannamen gedaan moeten worden ten aanzien van eisen en randvoorwaarden die (nog) niet bekend zijn die eventueel later door berekeningen of modelstudies getoetst kunnen worden, die mogelijk een bijstelling van het ontwerp noodzakelijk maken.

Dit hoofdstuk vermeldt de belangrijkste eisen en randvoorwaarden die als uitgangspunt dienen voor het ontwerpen van een faciliteit voor terughaalbare opslag van radioactieve stoffen.

2.1 Definitie van terughaalbaarheid

Bij het opstellen van een nadere omschrijving van het begrip terughaalbaarheid is naast het kabinetsstandpunt [1] gebruik gemaakt van de NEA publicatie NEA/NE(95)4 “Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee on the Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal” [5].

Het kabinetsstandpunt:

In 1993 heeft het kabinet gesteld [1] dat opslag van hoog-toxisch afval zodanig moet gebeuren dat het afval voor een lange periode terughaalbaar is. Daarvoor werden twee redenen genoemd:

- De opbergingsfaciliteit moet voldoen aan de IBC-eisen (Isoleren, Beheren en Controleren) zoals vastgelegd in de Nota Radioactief Afval [6]. In het verleden lag de nadruk van het onderzoek voor een opslagfaciliteit vooral op het onderbouwen van de lange-termijn isolatie van het afval. Omdat het accent in de discussies over afvalbeheer verschoven is van technisch/geologische naar milieu/maatschappelijke eisen moet meer aandacht gegeven worden aan de aspecten van beheer en controle.
- Het afval moet beschikbaar zijn voor ‘hergebruik’ in de splijtstofcyclus als de daarvoor benodigde technologie zich ontwikkelt.

Het kabinet vindt dat de voordelen van de terughaalbaarheids-eis meer dan opwegen tegen de nadelen van de zorgplicht voor toekomstige generaties. Er is nog geen beleid geformuleerd met betrekking tot ontwerpcriteria voor een opslagfaciliteit, noch is vastgelegd binnen welke tijd terughaalbaar opgeslagen afval moet kunnen worden teruggenomen.

Het NEA RWMC standpunt:

Onlangs heeft het Radioactive Waste Management Committee van de NEA een stuk gepubliceerd waarin het de milieu aspecten en de ethische basis voor de opslag van radioactief afval in de diepe ondergrond beschrijft [5]. Met betrekking tot de zorgplicht van toekomstige generaties vinden de Committee-leden:

- “dat vanuit een ethisch standpunt bezien, inclusief de lange-termijn veiligheidsaspecten, onze verantwoordelijkheid ten opzichte van toekomstige generaties beter wordt gediend door een eindbergingsstrategie dan door een strategie die uitgaat van toezicht eisende opslag, laat staan lange-termijn zorgplicht, die door toekomstige generaties, waarvoor de maatschappelijke stabiliteit niet vaststaat, gemakkelijk verwaarloosd kan worden.”

Met betrekking tot terughaalbaarheid vinden de Committee-leden echter:

- “dat terughaalbaarheid een belangrijke ethische overweging is omdat diepe geologische berging niet noodzakelijkerwijs als een onomkeerbaar proces moet worden beschouwd, waarmee elke toekomstige beleidsverandering wordt uitgesloten. Daarbij moet worden opgemerkt dat het afsluiten van een faciliteit steeds een specifieke beslissing vereist, en dat zo’n beslissing uitgesteld kan worden tot ruim na het plaatsen van het afval, waarmee zo nodig omkeerbaarheid en flexibiliteit van de opslag mogelijk blijft. Onder zulke omstandigheden omvat de uitvoering van een strategie voor geologische afvalopslag de voordelen van een door sommigen voorgestane eindige interim-opslagperiode.”

Tenslotte concluderen zij:

- “dat stapsgewijze implementatie van plannen voor geologische opslag over een periode van enkele tientallen jaren de weg open laat voor aanpassingen in het licht van wetenschappelijke en maatschappelijke ontwikkelingen, en niet de mogelijkheid uitsluit dat in een later stadium andere opties ontwikkeld kunnen worden.”

Een wezenlijke oplossing die voldoet aan bovenstaande ogenschijnlijk tegengestelde eisen is gevonden in het feit dat het ondergronds opbergen van afval een langdurige operatie is welke in fasen plaatsvindt. De ontwikkeling van de opslagfaciliteit omvat de volgende fasen:

- constructie van de opslagfaciliteit
- het plaatsen van de afvalcontainers in de opslagfaciliteit
- het bedrijven van de opslagfaciliteit als ‘ondergrondse interim-opslagfaciliteit’
- het afsluiten van de opslagfaciliteit

Het ontwerp voorziet erin dat de opslagfaciliteit voor een periode tot enkele honderden jaren als ‘ondergrondse interim-opslagfaciliteit’ zou kunnen fungeren, vergelijkbaar met een bovengrondse opslagfaciliteit. Het is echter onrealistisch aan te nemen dat expliciete terughaalbaarheid voor een langere periode gegarandeerd kan worden. Ook bij definitieve afsluiting van de mijn is het in beginsel niet onmogelijk het afval terug te halen. Door het aanleggen van een volledig nieuwe mijn kan in vrijwel alle gevallen het afval weer beschikbaar gemaakt worden. In [7] is aangetoond dat het aanleggen van een nieuwe mijn al na een periode variërend van 40 tot 100 jaar goedkoper

kan zijn dan het in bedrijf houden van een faciliteit. Dit geeft een economische indicatie voor de lengte van de terughaalbaarheidsperiode.

Het belangrijkste ontwerpcriterium is het 'fail safe' principe: het concept moet voldoende veiligheid bieden ingeval van onverwachte situaties zoals het onderlopen of verwaarlozen van de mijn. Daarbij moeten alle voorziene operaties, inclusief het terughalen van het afval, gebaseerd zijn op 'proven technology'. Tenslotte moet gedurende de interim-opslagperiode de temperatuur- en stralingsniveaus in de faciliteit zodanig zijn dat het noodzakelijke onderhoud en monitoring uitgevoerd kunnen worden.

De periode waarin de faciliteit fungeert als 'ondergrondse interim-opslagfaciliteit' is gebaseerd op de 'staged decision' filosofie: er wordt vanuit gegaan dat regelmatig besloten moet worden of de opslagfaciliteit 'open' dan wel 'gesloten' gaat worden. De tijdsduur tussen elk beslissingsmoment zal afhangen van de maatschappelijke en economische ontwikkelingen, de te verwachten levensduur van de installaties en de kosten voor onderhoud en monitoring. Voor dit ontwerp is een periode van 25 jaar aangenomen: uiterlijk aan het eind van elke 25-jaars periode moet besloten worden of de interim-opslagfase voor een periode van 25 jaar verlengd wordt of dat de mijn wordt afgesloten.

2.2 Hoeveelheid afval

Bij de bepaling van de hoeveelheid op te bergen afval wordt uitgegaan van het afval van de huidige centrales (OPLA Strategie A [4]). Er wordt ervan uitgegaan dat de centrales hun huidige contracten voor opwerking van de bestraalde splijtstof handhaven. Dit houdt in dat het afval van de huidige centrales als verglaasd opwerkingsafval ter beschikking komt. De nuclide-inventaris en de warmteproductie zijn gebaseerd op de aanname dat de brandstof drie jaar na ontladen wordt opgewerkt en dat vervolgens het verglaasde afval 50 jaar bovengronds in een interim-opslagfaciliteit blijft.

In deze studie wordt de eis van terughaalbaarheid alleen voor het kernsplijttingsafval uitgewerkt. Het overige niet-"hoog-toxisch" afval wordt gedacht (definitief of terughaalbaar) te worden opgeslagen in een andere mijn (of ander mijngedeelte) dan wel in een ondiepe opberging te land.

3 Detail concept opberging

Bij het gekozen concept van een interim-opslagperiode waarin de mijn in (passief) bedrijf blijft en de opberggalerijen toegankelijk blijven, is de manier van opbergen van de container in de galerij bepalend voor de mate van terughaalbaarheid. In [8] worden een aantal alternatieven gegeven voor terughaalbare opslag, zoals opslag in de galerij en opslag in de wanden en vloeren van de galerijen. In die studie werd al aangegeven dat opslag in diepe boorgaten de mate van terughaalbaarheid beperkt. In [2] is dan ook gekozen voor de opslag van het afval in korte horizontale boorgaten, waarbij de *individuele* terughaalbaarheid van de afvalcontainers doorslaggevend was. Bij de hier beschouwde opslag in diepe boorgaten moet rekening worden gehouden met het terughalen van *series* afvalcontainers (300 bij een boorgatdiepte van 500 m).

3.1 De opbergholten

Bij de studie naar het terughaalbaar opbergen van kernsplijtingsafval (KSA) staan er in beginsel twee mogelijkheden ter beschikking:

1. Het opbergen van een al of niet van een omhulling (overpack) voorziene KSA-container direct in het steenzout;
2. Het opbergen van een al of niet van een omhulling voorziene (overpack) KSA-container in een buis die voordien in het steenzout is aangebracht.

De eerste oplossing is in het project METRO-1 door het ECN bestudeerd en gerapporteerd [2]. In die studie is er terecht vanuit gegaan per locatie slechts één KSA-container te plaatsen (zie [2, figuur 3.1]) en wel op grond van de overweging dat bij de terughaaloperatie het overboren van de KSA-container een gecompliceerde operatie is. Het op deze wijze terughalen van meerdere containers uit één gat zal de operatie complexer maken. Een nadeel bij deze methode is echter dat een groot oppervlak in de mijn ter beschikking moet zijn om de 300 COGEMA-containers op te bergen, namelijk een lengte van 2300 m galerijen [2, blz. 21].

In de huidige studie worden de mogelijkheden van de tweede optie onderzocht. Bij het terughaalbaar opbergen van KSA-containers in diepe verbuisde verticale boorgaten in een steenzoutformatie wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van bestaande technieken. Bij deze uitvoeringsvorm van het opbergen van KSA-containers in diepe boorgaten is het noodzakelijk dat deze gaten in het steenzout worden verbuisd om de convergentie van het steenzout te onderdrukken. Met deze oplossing kunnen diepteniveaus bereikt worden die met reguliere mijnbouwactiviteiten (schachten, galerijen, kamers, enzovoorts) niet gerealiseerd kunnen worden in verband met de gesteentetemperatuur aldaar. Omdat bij deze optie een groot aantal containers in één boorgat worden opgeslagen, wordt de terughaalbaarheid van individuele containers bemoeilijkt.

Er is gekozen voor verticale boorgaten omdat er vanuit gegaan wordt dat, evenals in OPLA, het terughaalbaar opslaan van het afval in zoutpijlers zal geschieden, waarin, zoals bekend, het voor opberging geschikte steenzout voor het merendeel een verticale geaardheid heeft.

3.2 Boorgatverbuizing

Om de terughaalbaarheid van opgeslagen afvalcontainers te waarborgen zullen de boorgaten verbuisd moeten worden om de convergentie van het omringende steenzout tegen te gaan. Deze verbuizing moet bestand zijn tegen de gesteentedruk (statisch zo'n 30 MPa op 1300 m diepte).

3.2.1 Belastingen van de verbuizing

In de olie-industrie is ruime ervaring met verbuizing van diepe boorgaten. Bij de beoordeling van de geschiktheid van een verbuizing wordt daarbij gecheckt op de drie belangrijkste belastinggevallen [9]:

- **Trekbelasting**
Bij het inbrengen van een verbuizing moet elke verbinding het volledige gewicht kunnen dragen van de reeds geplaatste buisdelen. Wegens de onvermijdelijke afwijkingen van de hartlijn van het boorgat van de verticaal zal het gewicht van de buis tijdens het inbrengen op vele punten deels op de boorgatwand afgesteund worden. Hierdoor worden de buissegmenten nauwelijks op trek belast.
- **Uitwendige belasting**
Wanneer de uitwendige belasting de sterkte van de verbuizing overschrijdt zal de buis bezwijken. Het meest ongunstige belastinggeval is dat van een lege buis onder inwendige atmosferische druk, die uitwendig onder een hydrostatische druk staat. Daar de gesteentedruk toeneemt met de diepte moet het buissegment onder in het boorgat het sterkst zijn.
- **Scheurbelasting**
De verbuizing kan scheuren wanneer de inwendige druk groter is dan de uitwendige druk. Dit kan het geval zijn wanneer een formatie wordt aangeboord waarin natuurlijk gas onder hoge druk staat. Bij de ontwerpberekeningen van diepe boorgaten in steenzoutformaties is dit belastinggeval niet van belang omdat door verkenning van de zoutformaties het voorkomen van dergelijke onder hoge druk staande gasinsluitingen uitgesloten mag worden.

Het bezwijken onder uitwendige belasting is dus het belangrijkste ontwerpcriterium voor de verbuizing van diepe boorgaten in steenzout. De lengte van een buissegment wordt vooral bepaald door de galerijhoogte en het hefvermogen van de voor het plaatsen benodigde bovenloopkraan. Zonodig is een beduidende reductie in buisgewicht te bereiken als stapsgewijs de wanddikte van de buis van onder naar boven wordt aangepast aan de ter plekke heersende maximale uitwendige belasting (hydrostatische druk).

3.2.2 *Ontwerp van de verbuizing*

Voor de sterkteberekening op drukbelasting van de verbuizing is het over het algemeen voldoende om met de hydrostatische druk van het steenzout te rekenen. Initieel zijn de boorgaten spanningsvrij, vanwege de annulaire ruimte (spleet) tussen de verbuizing en de boorgatwand. Ten gevolge van kruip van het omringende steenzout wordt in de loop van de tijd de uitwendige hydrostatische druk op de buis opgebouwd. Bij het bepalen van een 'veilige dikte' van de verbuizing is uitgegaan van een boorgat met een diameter van 700 mm en diepte van 500 meter geboord vanaf een galerij op 800 meter diepte. In een maagdelijk stuk zoutformatie varieert de hydrostatische druk over deze diepte van ca. 19 MPa tot 30 MPa. In de analyse is uitgegaan van een gelijkmatig verdeelde uitwendige belasting, waarbij een veiligheidsfactor van 1.5 is gebruikt om het effect te verdisconteren van een ongelijkmatig verdeelde belasting, die hogere eisen aan het buismateriaal stelt. Bij de analyse is de bodem van de verbuizing beschouwd als een massief ronde plaat waarvan de randen zijn ingeklemd.

Uit de ontwerpberekening bleek dat de minimale wanddikte van de buis ca. 49 mm moet bedragen om de maximale ontwerpdruk te weerstaan. Een wanddikte van 60 mm zoals afgeleid werd in [10] is hiertoe dus ruim voldoende. De toeslag op de wanddikte kan gezien worden als een veiligheidsmarge voor corrosie gedurende meerdere interim-opslagperioden (zie §4.4) en ook als extra veiligheid voor het geval dat er een lichte afwijkingen in de gelijkmatig veronderstelde hydrostatische spanningstoestand ontstaat.

Een wanddikte van 60 mm bleek ook uitstekend bestand tegen knik, mits de drukverdeling redelijk gelijkmatig is. Om de gesteentedruk gelijkmatig over de buisomtrek te verdelen is het opvullen van de annulaire ruimte (spleet) tussen de verbuizing en de boorgatwand een goede mogelijkheid. Een opvulmateriaal kan een bituum materiaal of zand zijn (zie ook §6.2.2).

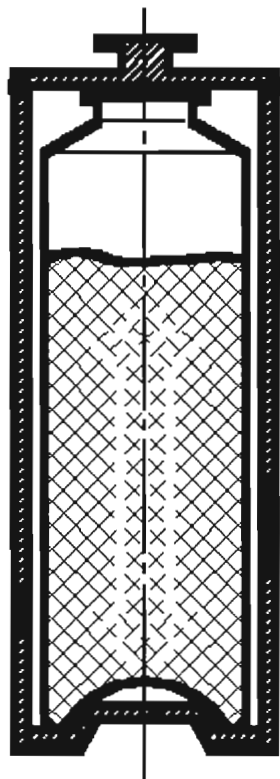
Voor de massief vlakke bodem blijven de spanningen ruim onder de toelaatbare waarden wanneer de dikte daarvan ca. 100 mm bedraagt. Er is dan rekening gehouden met een veiligheidsfactor van 1.8 voor het geval er tijdelijke extra belastingen optreden. Een vlakke bodem is technisch goed uitvoerbaar, al moet er bij het uiteindelijke ontwerp zorg besteed worden aan de overgang van de buis naar de bodem. Op galerijhoogte moet de buis in axiale richting gefixeerd worden om de verticale uitdrijfkraft op de buis op te vangen.

Ontwerpafmetingen van de buis :

uitwendige diameter	700 mm
wanddikte	60 mm
dikte bodemplaat	100 mm

3.3 Container overpack

In deze studie wordt er vanuit gegaan dat er 300 COGEMA-containers, afkomstig uit het opgewerkte afval van de Nederlandse kerncentrales, terughaalbaar opslagen moeten worden. Een COGEMA-container (zie Figuur 1) bestaat uit cilindervormige dunwandige roestvaststalen vat waarin ongeveer 150 liter (ca. 400 kg) verglaasd afval is gegoten. Na het vullen van het vat wordt het deksel, met een knop waaraan de container opgehesen kan worden, eraan gelast. In de bodem van de container is een holte uitgespaard, waarin de hijsknop past, zodat de containers in beginsel gestapeld kunnen worden. Gezien de relatieve dunwandigheid van de COGEMA-container is de stapelbaarheid ervan beperkt (ongeveer 10 stuks) omdat het gewicht van de containerstapel de onderste container - in verband met de terughaaloperatie - niet mag vervormen. Daarom zullen de vaten verstevigd moeten worden met een overpack..



Figuur 1 COGEMA-container in overpack

Bij het ontwerp van een overpack is zowel gekeken worden naar de *statische* belasting - de overpack van de onderste container moet het gewicht van de stapel containers met overpack kunnen dragen - als de *dynamische* belasting - de onderste overpack moet bestand zijn tegen een botsing met een vallende container met overpack (ontwerpongeval).

Statische belastingen van een overpack

Het gedrag van constructies onder statische belastingen wordt meestal beoordeeld aan de hand van toelaatbare verplaatsingen en spanningen, waarbij het toelaatbare spanningsniveau vaak de vloeigrens van het toegepaste materiaal is. De onderste overpack zal worden blootgesteld aan de maximale mechanische belasting: het gewicht van de hele kolom COGEMA-containers inclusief overpack. Deze belasting wordt gedurende de vuloperatie opgebouwd. Doordat de overpack's voor COGEMA-containers in verbuisde boorgaten worden opgeslagen hoeft voor het ontwerp van de overpack geen rekening te worden gehouden met de hydrostatische belasting ten gevolge van het steenzout op de containers; deze zal door de verbuizing moeten worden opgevangen.

De faalmodes die in dit geval voor de overpack moeten worden beschouwd zijn 'knikken' en 'plooien'. Beide modes geven een theoretische maximale kracht (knikkracht en plooi-kracht) waarboven de overpack zal falen. Bij het ontwerp is vervolgens nog rekening gehouden met een veiligheidsfactor ter verdiscontering van materiaal- of uitvoeringsfouten.

Dynamische belasting van een overpack

Naast de overwegend statische belasting ten gevolge van het eigengewicht van een stapel containers met overpack zal een overpack ook bestand moeten zijn tegen de dynamische belastingen veroorzaakt door de botsing met een vallende container met overpack, het voor deze wijze van opslag beschouwde ontwerpgeval. Onder invloed van de zwaartekracht zal de vallende massa met de valdiepte in snelheid toenemen. Uiteindelijk zal de massa in het boorgat tot stilstand komen (botsen) op de eerder gestapelde containers. Tijdens de botsing werkt er gedurende zeer korte tijd een grote kracht op beide overpack's. Deze kracht wordt aangeduid met de impuls- of stootkracht. Deze kracht is recht evenredig met de vallende massa en omgekeerd evenredig met de tijdsduur waarin de vallende massa tot stilstand komt.

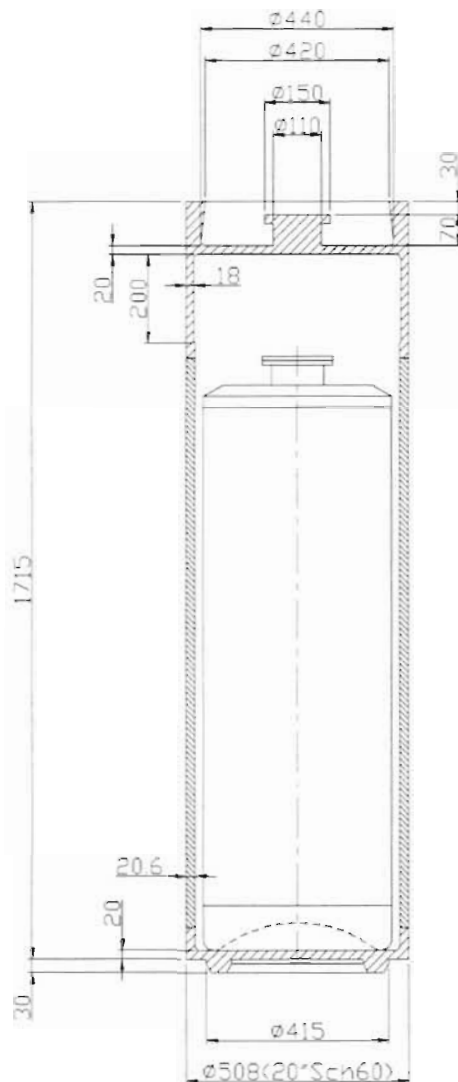
De sterkte van een overpack hangt onder andere samen met de wanddikte en de materiaal-eigenschappen van het gekozen materiaal. Met het oog op de corrosie-eigenschappen (zie §4.4) is hier gekozen voor een laag-gelegeerd staal. Dit constructiestaal heeft een vloeigrens van 335 MPa en een dichtheid van 7800 kg/m³. Voor de ontwikkeling van de overpack zijn drie configuraties onderzocht:

- 'one-pack' overpack
- 'two-pack' overpack
- 'open' overpack

3.3.1 'One-pack' overpack

Bij een 'one-pack' overpack wordt elke COGEMA-container afzonderlijk verpakt. Voor de ontwerpberekeningen werd uitgegaan van maximaal 300 te stapelen containers. Dit betekent dat er voor de 'one-pack' overpack uitvoering 300 overpack's in het verticale boorgat van 500 meter zullen worden gestapeld.

Figuur 2 toont een uitgewerkt ontwerp voor een 'one-pack' overpack. De overpack bestaat uit een cilinder (body), deksel, bodem, hijspunt en een centreerrand. Tijdens het vullen van het boorgat zal de bodem van de te stapelen overpack automatisch de centreerrand van de laatst geplaatste overpack zoeken waardoor een goede stapeling mogelijk is. Onder het deksel, ter aansluiting met de cilinder, is de overpack uitgevoerd met een kreukelzone die tot doel heeft bij een botsing van een vallende container (het ontwerpongeval) de krachten in axiaalrichting op te vangen. Na het stapelen van de containers, maar ook na een ongeval, blijft het hijspunt vrij van de bodem van de laatst gestapelde container.



Figuur 2 Ontwerp van een 'one-pack' overpack met container

Uitgaande van enige speling tussen container en overpack is voor een uitwendige diameter van de overpack van 508 mm gekozen. Uit tabellen voor ronde buisprofielen volgt dat voor deze diameters de minimale buisdikte 20.6 mm bedraagt. De totale massa van één overpack, inclusief container, bedraagt dan ongeveer 985 kg.

Statische belasting

Uit ontwerpberekeningen is gebleken dat voor het gekozen buisprofiel de spanning in axiaal-richting ten gevolge van het totale eigengewicht (ca. 92 MPa) ver beneden de vloeigrens van het gekozen materiaal blijft. De overpack blijkt statisch ook goed bestand tegen knik- en plooiverschijnselen. De maximale belasting ten gevolge van het totale eigengewicht van 300 gestapelde overpack's ligt ruim beneden de kritieke knik- en plooielastingen.

Uit de ontwerpberekeningen bleek dat het deksel - beschouwd als een aan de randen belaste cirkelvormige vlakke plaat - minimaal 3 mm dik moet zijn om bestand te zijn tegen de spanningen die kunnen optreden als de overpack in de hijsinrichting hangt. Om een goede lasaansluiting van het deksel met de cilinder te verkrijgen werd de dikte van het deksel gelijk gekozen aan de dikte van de cilinder, 20 mm. Daarmee blijft, als de overpack in het grijpermechanisme hangt, de trekspanning in de doorsnede van het hijspunt/aansluiting deksel ruim beneden de vloeigrens.

Dynamische belasting

Bij verwaarlozing van luchtwrijving bedraagt de snelheid van een overpack (inclusief container) na een val diepte van 500 meter ca. 100 m/s. De invloed van luchtwrijving is klein: na een val van 500 meter kan de luchtweerstand - op basis van de hoeveelheid te versnellen lucht - maximaal 34% van de zwaartekracht bedragen. In werkelijkheid bevindt er zich een spleet tussen de overpack en de verhuizing en is de visceuze wrijving in deze spleet te verwaarlozen. Daarom is in de praktijk de snelheidsvermindering ten gevolge van de luchtweerstand zo klein dat er bij het ontwerp geen rekening mee werd gehouden.

De dynamische belasting is sterk afhankelijk van de tijd waarin de te botsen overpack tot stilstand wordt gebracht. Om de botsingsenergie te absorberen is er in het conceptontwerp van de overpack een kreukelzone van 20 cm opgenomen. Botst de overpack met een snelheid van 100 m/s dan komt de overpack, rekening houdende met de kreukelzone, in ongeveer 2 ms tot stilstand. De bijbehorende impulskracht bedraagt dan zo'n 50 MN. Deze dynamische belasting ligt ruim onder de kritieke knikbelasting maar overschrijdt de kritieke plooielasting, zodat de overpack ten gevolge van deze dynamische belasting zal gaan plooien.

3.3.2 'Two-pack' overpack

In een 'two-pack' overpack uitvoering worden steeds twee COGEMA-containers tezamen verpakt. Dit betekent dat er 150 overpack's in een verticaal boorgat van 500 meter zullen worden gestapeld. Voor een 'two-pack' overpack vergelijkbaar met de 'one-pack' overpack in §3.3.1 bedraagt de totale massa van één overpack, inclusief twee containers, ongeveer 1800 kg.

Statische belasting

Volgens de ontwerpberekeningen liggen ook voor dit ontwerp de axiaalspanning ten gevolge van het totale eigengewicht van 300 COGEMA-containers met overpack onder de vloeigrens van het materiaal. De belasting ten gevolge van het totale eigengewicht ligt ook ruim onder de kritieke knik- en plooielastingen.

Dynamische belasting

Voor het hier beschouwde ontwerpgeval zal ook voor een 'two-pack' uitvoering op een valdiepte van 500 m de maximale snelheid ca. 100 m/s bedragen. In vergelijking met het 'one-pack' ontwerp is de totale massa echter ca. 80% groter. Dit heeft tot gevolg dat voor het ontwerpgeval de impulskracht ook navenant is toegenomen.

Vanwege het verschil in dynamische belasting geniet een 'one-pack' overpack de voorkeur boven een 'two-pack' uitvoering. Daarnaast bemoeilijkt de totale lengte van een 'two-pack' uitvoering van zo'n 3 meter ook zijn hanteerbaarheid op de galerijvloer en vergt deze, door zijn grotere massa, een groter hefvermogen van de bovenloopkraan voor de hijsinstallatie.

3.3.3 'Open' overpack

Als derde optie is een 'open' overpack beschouwd, een variant op de 'one-pack' overpack. Bij een 'open' overpack werd gepoogd de verticale cilinder (body) van een 'one-pack' overpack te vervangen door een viertal standaardprofielen zodat de containers als het ware zijn opgesloten in een open constructie. Het voordeel hiervan is met name de materiaal- en gewichtsreductie, relevant voor vermindering van de dynamische belasting. De beperkende factor voor dit ontwerp is de ruimte tussen de container en de buitenzijde van de overpack, waarbinnen de profielen moeten passen. De buitenafmeting van het profiel kan daardoor maximaal 65 mm bedragen. Binnen deze grenzen kon echter geen geschikt profiel gevonden worden dat de totale belasting ten gevolge van het totale eigengewicht van 300 containers zou kunnen dragen: de constructie is hoe dan ook niet bestand tegen de statische belastingen en de daarbij behorende knik- en plooiverschijnselen. Daarom is een 'open' overpack voor deze opslagwijze niet geschikt.

3.3.4 Conclusie

Van de drie beschouwde overpackontwerpen blijkt de 'open' overpack statisch niet bestand tegen knikken en plooiën. Beide andere configuraties, de 'one-pack' en 'two-pack' overpack, zijn dat wel. Wegens de geringere massa van een 'one-pack' overpack is in het Torad-B concept gekozen voor dit overpackontwerp om COGEMA-containers in op te slaan. Deze uitvoering is zowel bestand tegen de maximaal optredende statische belastingen en het lichtst qua gewicht, de bepalende factor voor de grootte van de dynamische belasting. Voor een 'one-pack' overpack is de maximaal toelaatbare valsnelheid ca. 18.5 m/s. Bij deze of lagere snelheid zal de cilinder van de overpack ten gevolge van een botsing niet blijvend vervormen.

Ruwweg bestaat het conceptontwerp van de overpack uit de volgende onderdelen (zie Figuur 2):

Cilinder	Ø uitw. = 508 mm; wanddikte = 20.6 mm; inw. lengte = 1375 mm
Deksel/bodem	Ø uitw. = 508 mm; gem. dikte = 20 mm
Hijspunt	Ø uitw. = 150 mm; hoogte = 70 mm (vanaf deksel)
Centreerrand	Ø uitw. = 508 mm; gem. dikte = 30 mm; hoogte = 100 mm (vanaf deksel)
Kreukelzone	lengte = 200 mm; wanddikte = 18 mm (verjonging = 2 mm)

3.4 Afschermingsberekeningen voor de mijngangen

Teneinde terughaalbaarheid van het afval te garanderen moeten de galerijen open blijven waarvoor onderhoud gepleegd moet worden omdat anders door de voortschrijdende convergentie de galerij onbruikbaar zou worden. Daarnaast is ook van tijd tot tijd vanwege inspectie de aanwezigheid van personeel in de galerijen noodzakelijk. Om de stralingsbelasting van het personeel binnen de daarvoor gestelde normen te houden moet het steenzout waarmee de boorgaten zijn afgeplugd voldoende afscherming bieden. Gebaseerd op conservatieve aannamen is een minimale dikte bepaald die nodig is om deze afscherming te bewerkstelligen.

3.4.1 *Berekening van de nuclideinventaris in het KSA*

Bij de fabricage van het verglaasde kernsplijtingsafval wordt glasfrit gevoegd bij het KSA, dat veelal bestaat uit de oxides van de splijtingsproducten, minor actiniden en van het restje uranium en plutonium dat overblijft na opwerking. De uiteindelijke samenstelling van deze smelt is overgenomen van [11] met als mengverhouding dat het afval van 1.33 ton aanvankelijk uraan met een versplijtingsgraad of opbrand¹ van 33 GWd/T_U terechtkomt in één container, dus 150 liter verglaasd afval. Dit glas heeft een dichtheid van 2.73 g/cm³.

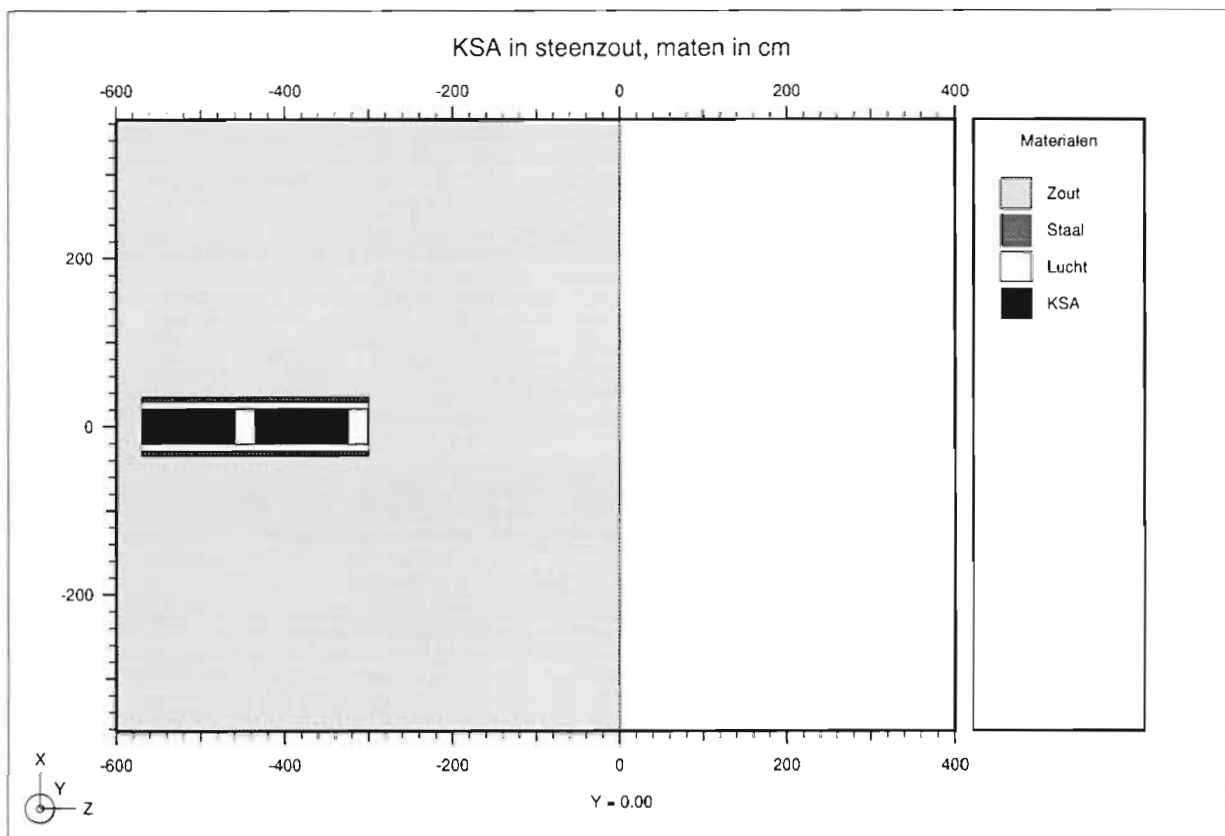
Ter bepaling van de bronsterkte van een container werden opbrand berekeningen gedaan met de code ORIGEN-S [12] om de inhoud aan splijtingsproducten en actiniden te berekenen voor een LWR-splijststof, aanvankelijk verrijkt tot 3.3% in ²³⁵U met een versplijting van 33 GWd/T_U en in een neutronenspectrum dat typisch is voor een LWR. Drie jaar na het tijdstip van ontladen uit de reactor wordt deze splijststof opgewerkt waarna nog 0.5% van het dan aanwezige uranium en plutonium in de rest van het afval achterblijft. Na verglazing en afvullen in de afvalcontainers worden deze containers nog eens 50 jaar, ter afkoeling, weggezet in een interimopslag. De radioactieve bronsterkte in het glas is berekend voor het eind van deze opslagperiode.

3.4.2 *Bepaling van de benodigde dikte van de zoutplug*

Voor de opbergconfiguratie zoals gegeven in Figuur 3 zijn, met behulp van de afschermingscode MARMER [13], de dosistempi berekend op verschillende plaatsen in de mijngalerij. Omdat in geen van de dosispunten de bijdrage van de tweede, dieper gelegen container groter is dan 0.5% van de bijdrage van de bovenste container kan de, in principe, zeer diepe stapel containers worden benaderd door twee containers.

Voor de gevallen dat de top van de containerstapel zich bevindt op een diepte van respectievelijk 1, 3 en 5 meter onder de vloer van de mijngalerij, zijn de dosistempi berekend op vier punten omhoog langs de as van de stapel boven de galerijvloer en zes punten vlak langs de vloer van de galerij weg van de as. De resultaten staan vermeld in Tabel 1.

¹ De opbrand, de geleverde energie per hoeveelheid Uraan, bepaalt de hoeveelheid splijtingsproducten die daarin ontstaan zijn.



Figuur 3 Geometrie voor de afschermingsberekening

Tabel 1 Resultaten van de afschermingsberekening

Dosispunt	Dosistempo in $\mu\text{Sv/h}$		
	Diepte 1.0 m	Diepte 3.0 m	Diepte 5.0 m
Afstand <i>boven</i> de vloer in cm:			
1.0	1.8 E+01	2.5 E-09	4 E-16
100	6.3 E+00	1.5 E-09	-
200	3.0 E+00	9.8 E-10	-
400	1.2 E+00	5.2 E-10	-
Afstand <i>langs</i> de vloer in cm:			
50	5.3 E+00	1.7 E-09	3 E-16
100	1.6 E-01	6.6 E-10	-
150	1.2 E-03	1.3 E-10	-
200	7.4 E-06	1.5 E-11	-
250	6.2 E-08	1.2 E-12	-
300	8.3 E-10	9.1 E-14	-

Bij een diepteligging van 1.0 m is de hoofdcomponent van de gammadosis afkomstig van het verval van ^{137}Cs en de dochter $^{137}\text{Ba}^m$, terwijl de gammadosis voor een diepteligging van 3.0 m gedomineerd wordt door ^{90}Sr met dochter ^{90}Y .

In de MARMER-code wordt geen rekening gehouden met de remstraling die ontstaat door het afremmen van een β -deeltje in zijn omgeving. Ook wordt daarin de vorming van vangstgamma's ten gevolge van het invangen van een neutron in de omgeving van de containers niet verdisconteerd. Deze neutronen zijn ofwel afkomstig van spontane splijting van de in het afval aanwezige actiniden, ofwel afkomstig van (α, n) -reacties veroorzaakt door bij verval van de actiniden vrijkomende α -deeltjes die botsen op zuurstofkernen in het glas. Beide bijdragen zijn daarom apart afgeschat:

- De remstraling geeft een extra bijdrage aan de dosis van ongeveer 10% in het hogere dosistempogebied (rond 1 $\mu\text{Sv/h}$) tot 50% in het lagere gebied (minder dan 10^{-3} $\mu\text{Sv/h}$).
- De extra component van de vangstgamma's vormt ook een belangrijke bijdrage in het lage dosistempogebied. Naar schatting is deze bijdrage in het gebied rond 1 $\mu\text{Sv/h}$ minder dan 1%, in het gebied rond 10^{-3} $\mu\text{Sv/h}$ minder dan 10% en rond 10^{-6} $\mu\text{Sv/h}$ minder dan 100%.

3.4.3 Conclusie

Op plaatsen waar met radioactieve stoffen gewerkt wordt is een omgevingsdosistempo 10 $\mu\text{Sv/uur}$ nog net acceptabel. De resultaten van de berekeningen gepresenteerd in Tabel 1 laten zien dat een plug met een lengte van 3 m voldoende afscherming geeft van de straling uit de COGEMA-containers in het boorgat. Een plug van 10 m lengte geeft praktisch volledige afscherming. Bij een plug van 1 m dikte is het dosistempo vlak boven de plug iets groter dan 10 $\mu\text{Sv/uur}$.

3.5 Temperatuurberekeningen

De temperatuurverhoging ten gevolge van de vervalwarmte van het afval moet beperkt blijven om verblijf in de galerijen mogelijk te maken en de terughaalbaarheid te garanderen. Bovendien kan bij hogere temperaturen de stabiliteit van de galerijen verminderen en kunnen chemische omzettingen in het steenzout optreden.

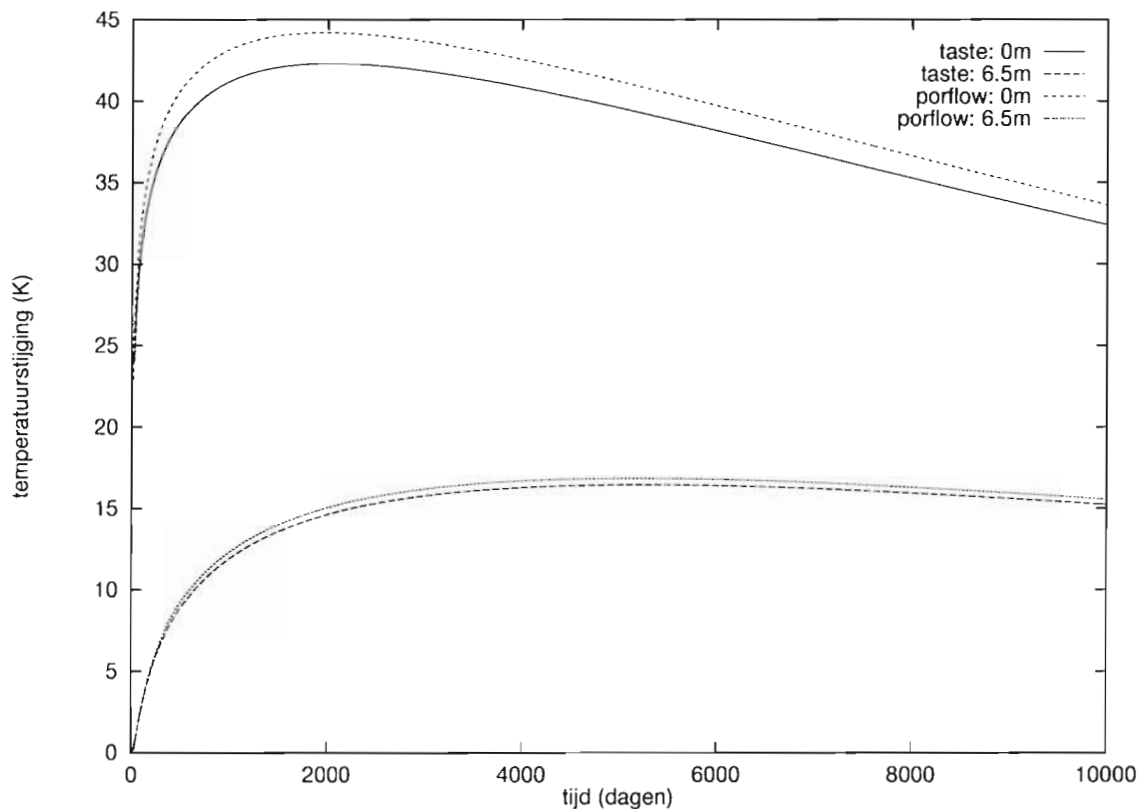
Gebaseerd op het Torad-B concept is een aantal berekeningen gemaakt van de te verwachten temperatuurstijging in de nabijheid van een boorgat met afvalcontainers en in de galerij vlak boven een boorgat. Een boorgat bevat 300 containers en is dan, inclusief de afsluitende plug van 10 m, 514 m lang. Bij de berekening van de warmteproductie in de afvalcontainers is er van uitgegaan dat de containers na 50 jaar interimopslag in het boorgat geplaatst worden.

Er zijn drie configuraties beschouwd:

- één enkel boorgat met 300 containers
- drie boorgaten met elk 300 containers in één galerij
- zes boorgaten met elk 300 containers in twee parallelle galerijen

3.5.1 Een enkel boorgat

Met behulp van de programma's TASTE [14] en PORFLOW [15] is de temperatuurstijging berekend bij een enkel boorgat. Figuur 4 toont de berekende temperatuurstijging op twee posities halverwege het boorgat, respectievelijk op de as van het boorgat, en op 6.5 m afstand tot deze as.

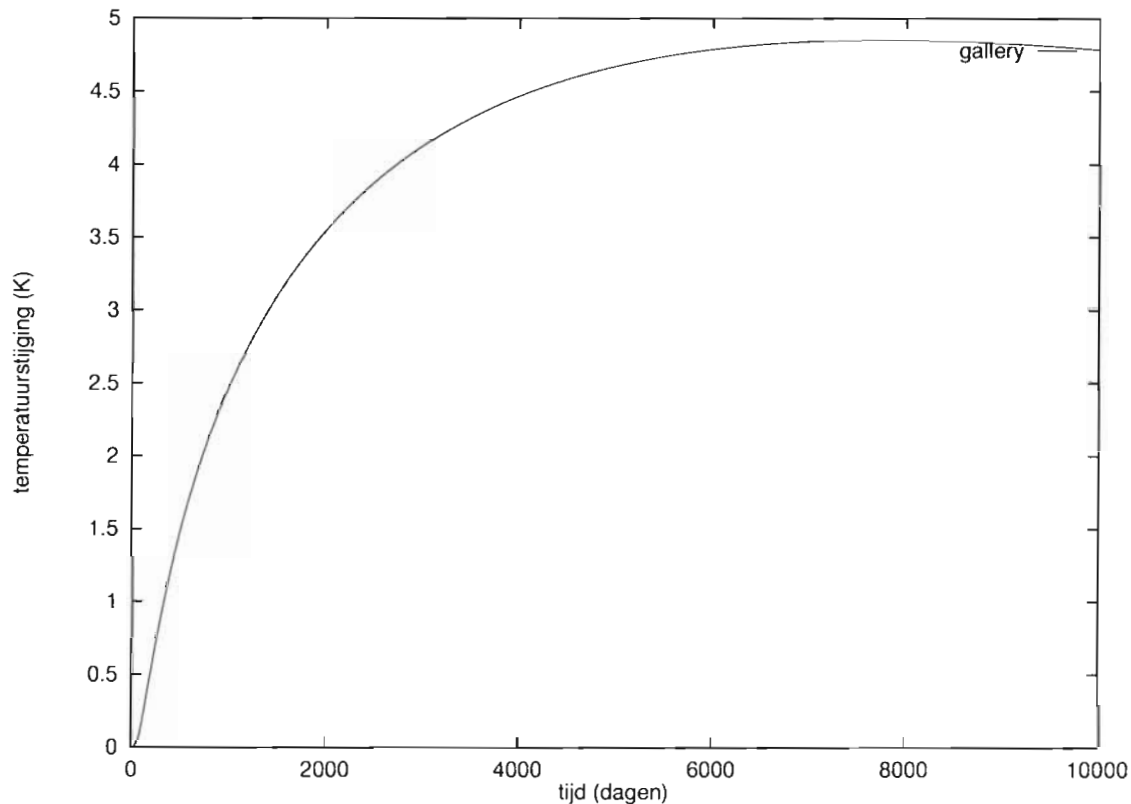


Figuur 4 Temperatuurstijging als functie van de tijd op 260 m diepte, op de as van het boorgat en op 6.5 m afstand van deze as, berekend met TASTE en PORFLOW

De maximale temperatuurstijging bedraagt bijna 45 K op ongeveer 2000 dagen (ca. 5.5 jaar) na plaatsing van het afval. Er is een klein verschil tussen het resultaat van PORFLOW en dat van TASTE. Dit wordt veroorzaakt door de wijze van discretisatie van een warmteproducerende container door TASTE, waarbij de volumebron wordt gemodelleerd als een serie puntbronnen op de as van de container. Nadere analyse met PORFLOW om de invloed van dit verschijnsel te onderzoeken heeft laten zien dat de temperatuur op de wand van de verbuizing op enkele procenten nauwkeurig met TASTE berekend kan worden.

Tussen de 'overpacked' containers en de verbuizing bevindt zich een luchtspleet van enkele centimeters. De warmtegeleiding is dan mogelijk slecht, wat erin kan resulteren dat de temperatuur van het verglaasde afval relevanter wordt dan die van het omliggende zout. Dit effect is echter niet nader onderzocht.

Ook de temperatuurstijging in de galerij boven het boorgat is berekend. Hierbij is aangenomen dat er geen ventilatie of circulatie in de galerij is, zodat de warmte alleen weg kan diffunderen door de omliggende zoutformatie. Het resultaat van de TASTE berekening is gegeven in Figuur 5. De maximale temperatuurstijging bedraagt 5 K op ca. 8000 dagen (22 jaar) na plaatsing van het afval.



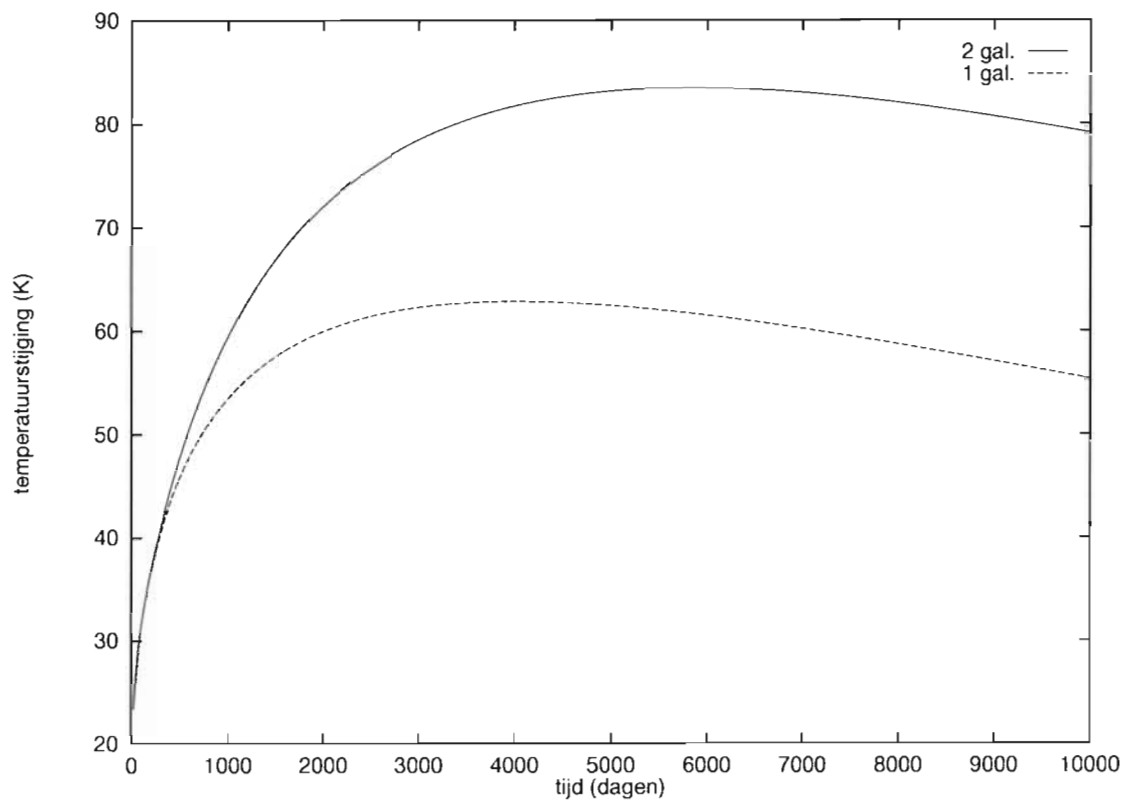
Figuur 5 Temperatuurstijging in de galerij, 10 m boven de bovenste container in het boorgat

3.5.2 Cluster van boorgaten

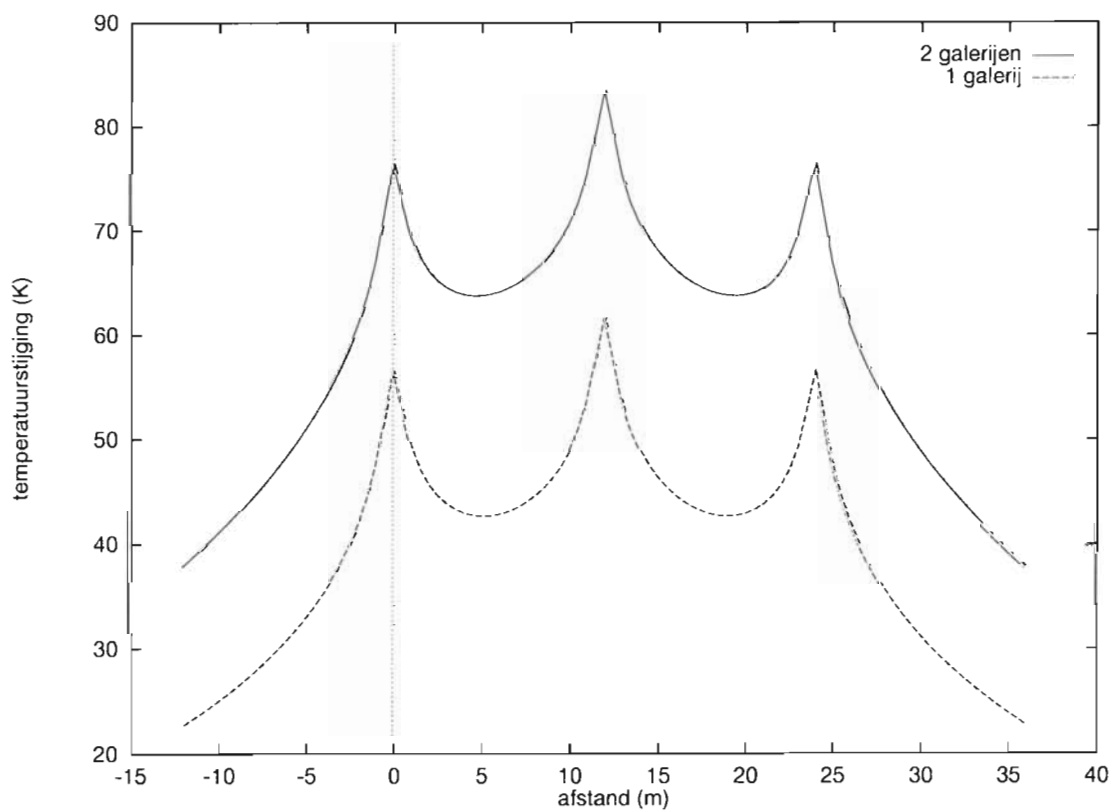
De temperatuurstijging is ook voor twee configuraties met meerdere boorgaten berekend:

- Configuratie 1:
Eén galerij met drie boorgaten, onderlinge afstand 12 m, 514 m diep, 300 containers per boorgat. Totaal aantal containers: 900.
- Configuratie 2:
Twee galerijen, 20 m afstand tussen de galerijen, elke galerij als in 1. Totaal aantal containers: 1800.

De temperatuurstijging is onder andere berekend in het 'centrale boorgat' in de galerij (configuratie 2 heeft twee centrale boorgaten - met gelijke temperatuur vanwege de symmetrie). Het resultaat is weergegeven in Figuur 6. De maximale temperatuur voor configuratie 2 treedt op na 5835 dagen (16 jaar). Het temperatuurverloop op de lijn parallel aan de galerij, maar 260 m dieper is weergegeven in Figuur 7.



Figuur 6 Temperatuurstijging in het centrale boorgat op 260 m diepte



Figuur 7 Temperatuurprofiel na 5835 dagen (16 jaar) op 260 m diepte

3.5.3 Conclusies

De maximale temperatuurstijging in het zout bij de boorgaten bedraagt:

1. ongeveer 44 K voor één boorgat met 300 containers;
2. ongeveer 60 K voor één galerij met drie boorgaten met elk 300 containers;
3. ongeveer 85 K voor twee galerijen met elk drie boorgaten met 300 containers.

Op basis van deze maximale temperatuurstijging in het zout en de berekende maximale temperatuurstijging in de galerij voor een enkel boorgat met warmteproducerend afval van minder dan 5 K, zal de temperatuurstijging in de galerij boven een boorgat beperkt blijven tot minder dan 10 K.

De absolute temperaturen kunnen bepaald worden door de berekende temperatuurstijging op te tellen bij de natuurlijke temperatuur van het steenzout. De natuurlijke thermische gradiënt in de aardbodem bedraagt ongeveer 3 K per 100 m. De gemiddelde temperatuur op 800 m diepte is ongeveer 34 °C, zodat de natuurlijke temperatuur op 1050 m diepte (250 m onder de galerij) ongeveer 42 °C en op 1300 m diepte (500 m onder de galerij) ongeveer 49 °C zal bedragen.

- De temperatuur van het steenzout zal niet hoger worden dan ongeveer 130 °C, ruim lager is dan de maximaal toelaatbare temperatuur van 180 °C.
- De temperatuur in de galerij boven de boorgaten zal niet hoger worden dan ongeveer 45 °C, laag genoeg om onderhoud en inspectie goed mogelijk te maken.

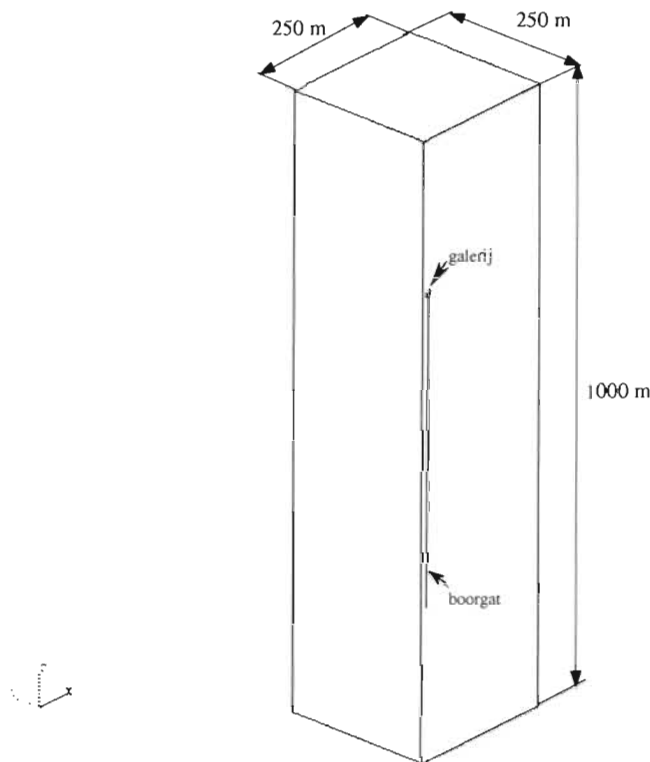
3.6 Thermomechanische stabiliteit

Het belangrijkste ontwerpcriteria voor de verbuizing van diepe boorgaten in steenzoutformaties is het bezwijken onder uitwendige druk (zie §3.2.1). In verband met de gewenste terughaalbaarheid van het afval is de te verwachte technische levensduur dan wel sterkte van de verbuizing in de boorgaten van groot belang. Om deze sterkte te bepalen is, onder aanname van de thermische input van het verglaasd afval in het boorgat, een 3-dimensionale thermo-mechanische berekening van een cluster verbuisde boorgaten uitgevoerd. Deze analyse had tot doel om vast te stellen of de spanningen in de verbuizing beneden de vloeispanning van het voorgestelde roestvast staal (335 MPa) blijft, en om vast te stellen of de vervorming van de verbuizing klein genoeg blijft om het terughalen van de afvalcontainers niet te belemmeren.

De geanalyseerde configuratie is gelijk aan ‘configuratie 2’ in §3.5.2. Deze bestaat uit 2 galerijen, op een onderlinge afstand van 20 meter. Elke galerij bevat 3 boorgaten, op een onderlinge afstand van 12 meter, met een diepte van 500 meter, elk gevuld met 300 containers. De galerijen bevinden zich op een diepte van 800 meter vanaf het maaiveld en elke galerij heeft een totale lengte van 60 meter. De thermische en mechanische 3D-analyses werden separaat van elkaar uitgevoerd met het general purpose eindige-elementenprogramma ANSYS, versie 5.5 [16]. Dit betekent dat er eerst een thermische analyse werd uitgevoerd om de temperatuurontwikkeling in elk van de elementen te berekenen, gevolgd door een mechanische analyse, waarbij de tijdsafhankelijke output van de thermische analyse als input diende.

3.6.1 Geometrie en FE-model

Voor de modellering is aangenomen dat de configuratie van galerijen en boorgaten zich bevindt in een blok steenzout ter grootte van 2000 x 500 x 500 meter. Vanwege symmetrie randvoorwaarden behoeft daarvan slechts 1/4 gemodelleerd te worden. De globale geometrie, inclusief afmetingen, is gegeven in Figuur 8.



Figuur 8 Globale geometrie van het model

De gemodelleerde galerijen zijn 60 m lang, 10.5 m breed en 8 m hoog. De 500 m diepe boorgaten voor het opbergen van COGEMA-containers hebben een doorsnede van 700 mm. In verband met de terughaalbaarheid van het verglaasde afval zijn de boorgaten verbuisd met een stalen buisprofiel met een buitendiameter van 700 mm en een wanddikte van 49 mm. In deze wanddikte is rekening gehouden met 100 jaar corrosie van de verbuizing met 0.11 mm/jaar (zie §4.4). Boven in de boorgaten, ter hoogte van de galerijvloer, bevindt zich ter afdichting van het boorgat een zoutplug van 10 m lengte.

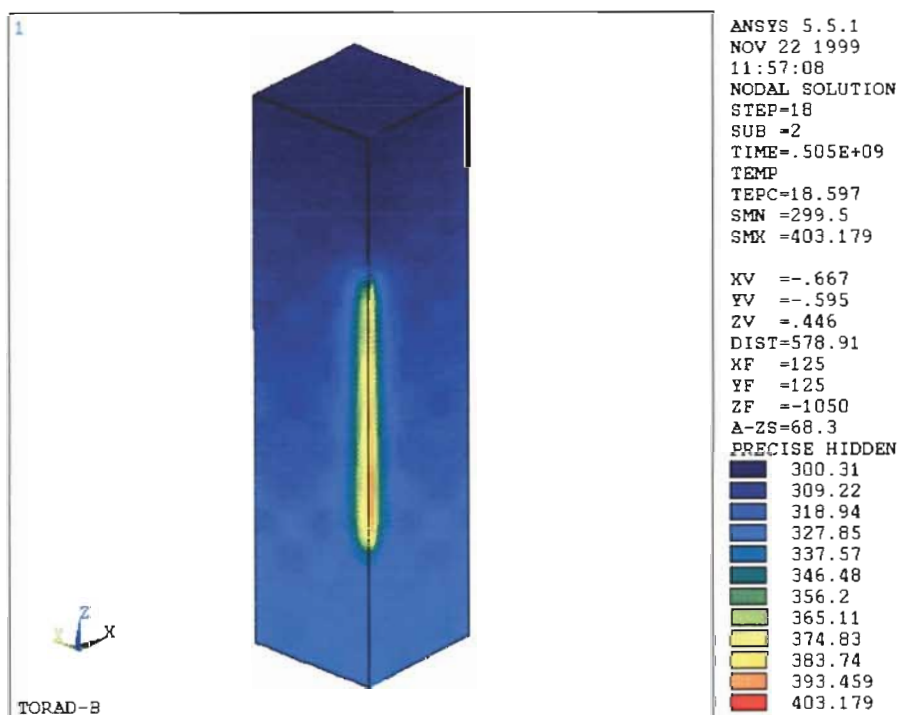
Voor zowel de thermische als mechanische analyse werd een driedimensionale eindig-elementenmodel (FE-model) gebruikt bestaande uit 37205 elementen en 41928 knooppunten.

3.6.2 Thermische analyse

Bij de thermische berekeningen aan verbuisde boorgaten in een steenzoutformatie is zowel rekening gehouden met de aardwarmte als de vervalwarmte geproduceerd door het verglaasde afval in de verbuisde boorgaten. Bij de berekeningen is expliciet rekening gehouden met de specifieke thermische eigenschappen van beide materialen in het model: steenzout (ook voor de afsluitpluggen) en het roestvast stalen buisprofiel.

De beginsituatie voor de thermische berekening was de natuurlijke diepteafhankelijke temperatuur van het blok steenzout. Daarmee werd een transiënte thermische berekening uitgevoerd voor een periode van 50 jaar, waarbij de warmteproductie van het verglaasde afval als gelijkmatig verdeelde warmteflux aan de binnenzijde van de stalen verbuizing als randconditie werd opgelegd. Afgezien van de symmetrie-vlakken en het boven- en ondervlak, werden voor de vrije vlakken, op 250 meter van de containers, adiabatische randvoorwaarden aangenomen.

De maximale temperatuurstijging, veroorzaakt door de warmteafgifte van het afval, treedt op bij het centrale boorgat in de galerij na zo'n 16 jaar opslag. De temperatuurverdeling na 16 jaar in het totale model is in Figuur 9 te zien. De maximaal berekende temperatuurstijging bedroeg ca. 83 K. Het temperatuurverloop op 1070 m komt goed overeen met het door TASTE berekende temperatuursverloop op die diepte (zie §3.5.2, Figuur 6). De met dit model berekende temperatuurverdeling is weer gebruikt als (opgelegde) thermische belasting voor de mechanische berekeningen, zie §3.6.3.



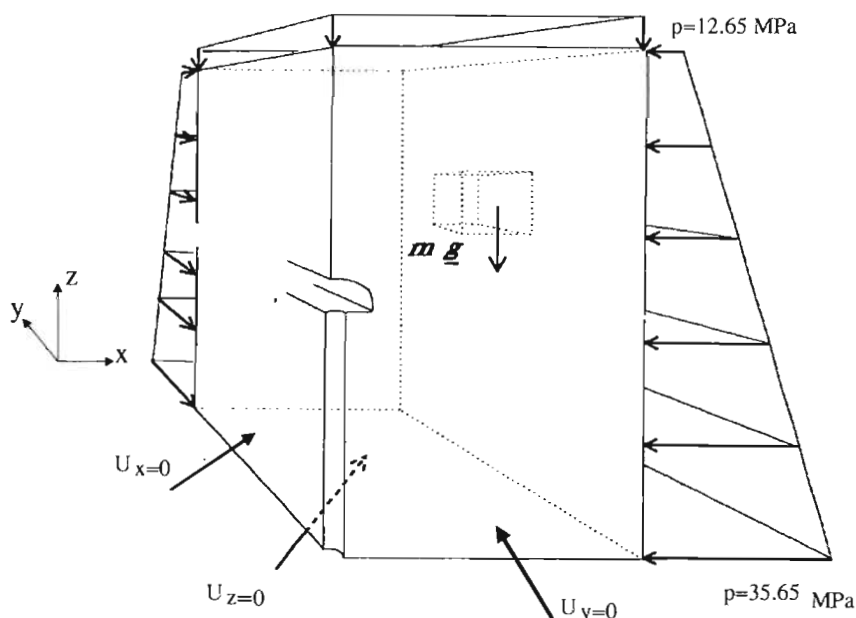
Figuur 9 Temperatuurverdeling na 16 jaar

Tot op 50 jaar na opslag van het afval in de boorgaten is de temperatuurstijging buiten een gebied tot op een afstand van ca. 200 meter vanaf het centrum van het model minder dan 1 K. Daarmee is de grootte van het rekenmodel dus voldoende voor de uitgevoerde thermische analyse.

3.6.3 Mechanische analyse

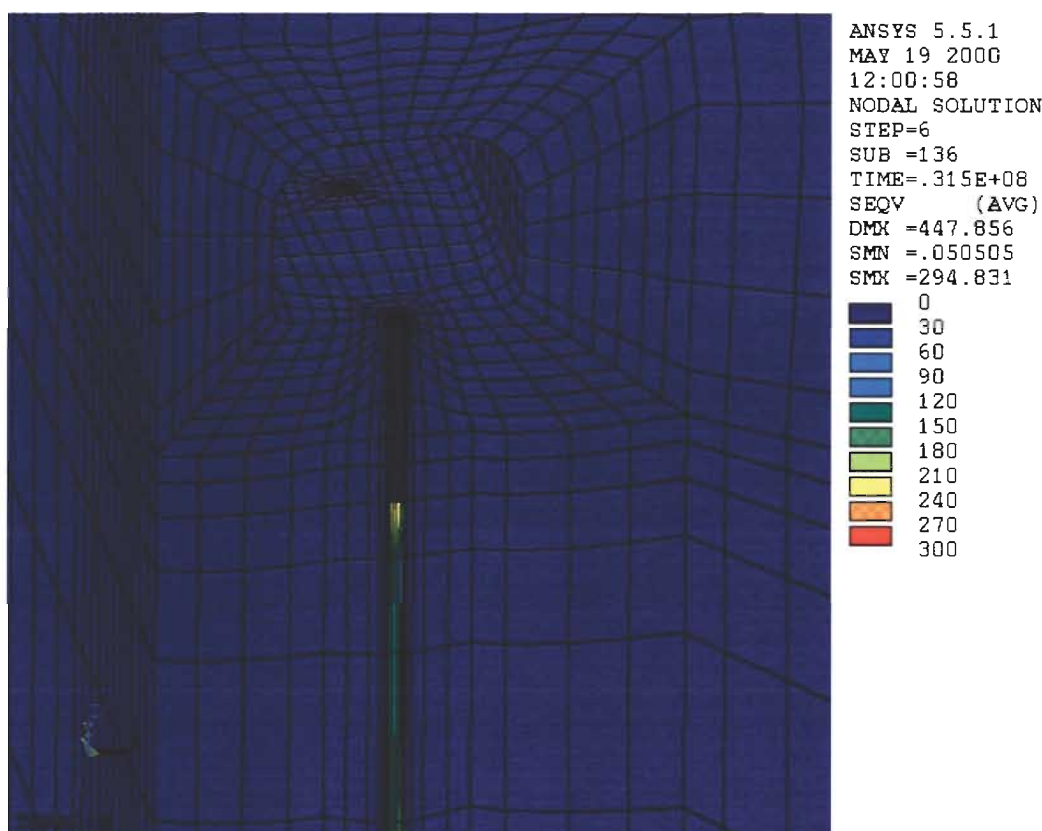
Als beginconditie voor de mechanische berekeningen werd aangenomen dat tussen het steenzout en de verbuizing geen spleet aanwezig was en dat de buis spanningsvrij was. Omdat de buis ten opzichte van het omringende steenzout kan bewegen werden de buitenste elementen van de verbuizing en de binnenste elementen van het steenzout rond een boorgat slechts in radiale richting gekoppeld. Bij de berekeningen is expliciet rekening gehouden met de specifieke mechanische eigenschappen van beide materialen in het model: steenzout (ook voor de afsluitpluggen) en het roestvast stalen buisprofiel. De verschillen in thermische uitzetting en stijfheid tussen het roestvast staal van de verbuizing en het omringende steenzout leiden met name tot spanningen in de verbuizing en in het steenzout rond de uiteinden van de boorgaten.

De hydrostatische druk in het steenzout neemt toe met zo'n 0.023 MPa per meter. Aan de bovenzijde van het model (550 m diepte) werd een druk van 12.65 MPa voorgeschreven. Vanwege de symmetrierandvoorwaarden werden in de analyse de loodrechte verplaatsingen in de symmetrievlakken onderdrukt. Voor de zijvlakken van het model werd de gesteentedruk als functie van de diepte voorgeschreven. In verticale richting heerst de zwaartekracht. De mechanische randvoorwaarden op het totale model zijn schematisch weergegeven in Figuur 10. De thermische belasting als functie van de tijd zoals omschreven in §3.6.2 werd tijdens de mechanische analyse ingelezen.



Figuur 10 Schematische voorstelling mechanische randvoorwaarden

Het uitboren van galerijen en boorgaten in een steenzoutformatie leidt tot lokale verstoringen. Rond de galerij treden verstoringen tot op een afstand van zo'n 10 m; het verstoorde gebied rond de boorgaten is kleiner. Kruip van het steenzout reduceert deze spanningen echter binnen korte tijd. Na plaatsing van het warmteproducerend afval in de boorgaten neemt ten gevolge van de thermische expansie de spanningsopbouw in het steenzout snel toe. Na ongeveer een jaar bereikt de equivalente von Mises spanning in de verbuizing in het centrale boorgat een maximum van zo'n 295 MPa, ca. 10% onder de vloeigrens van roestvast staal (zie Figuur 11). De maximale equivalente von Mises spanning in de vlakke bodem van de verbuizing blijft kleiner dan de spanning in de buiswand vanwege de grotere stijfheid in de vlakke bodem.



Figuur 11 Equivalente von Mises spanning in verbuizing en steenzout na 1 jaar verhitting

De vervormingen van de verbuizing door de thermische uitzetting van het steenzout blijven relatief klein. De grootste afwijkingen van de initieel cirkelvormige omtrek treden op in de centrale boorgaten. Deze afwijking is echter ten allen tijde kleiner dan 1 mm. De verbuizingen gaan ook een beetje krom staan met de bolling gericht vanaf het centrum van het model. De grootste afwijking van de verticaal wordt gevonden voor het decentrale boorgat, al is de afwijking in het centrale boorgat van dezelfde orde. De maximale afwijking van de verticaal loopt op tot zo'n 10 cm rond het midden van het boorgat op – naar schatting – 10 jaar na het plaatsen van het afval. Deze afwijkingen staan een eventuele terughaaloperatie niet in de weg.

3.6.4 *Conclusies*

Ten gevolge van de thermische uitzetting van het steenzout zal de equivalente von Mises spanning in de verbuizing oplopen tot maximaal 295 MPa (centrale boorgat, na 1 jaar), wat ongeveer 10% kleiner is dan de vloeispanning van roestvast staal. Dit betekent dat een verbuizing met een wanddikte van 49 mm mogelijk iets aan de krappe kant zou zijn. Omdat echter op dat tijdstip de werkelijke wanddikte door corrosie pas zal zijn afgenomen tot net iets minder dan 60 mm, zal de spanning in de buis op dat moment zeker ruim lager zijn dan de vloeispanning.

De grootste afwijkingen van de initieel cirkelvormige omtrek van de boorgaten blijven kleiner dan 1 mm. In een boorgat kan de maximale afwijking van de verticaal oplopen op tot zo'n 10 cm. Daarmee blijven de vervormingen van de verbuizing klein genoeg om een terughaaloperatie van het in de boorgaten opgeslagen afval ten allen tijde mogelijk maken.

4 De constructieve uitvoering

De aanleg van de mijn komt in grote lijnen overeen met de beschrijving die te vinden is in [2], wat een latere vergelijking tussen beide opties vereenvoudigt. Ten behoeve van de zelfstandig leesbaarheid van dit rapport zijn de daarvoor te gebruiken technieken in de eerste twee paragrafen van dit hoofdstuk kort beschreven. De overige paragrafen hebben betrekking op de technieken die beoogd zijn voor de opslag in diepe verbuisde boorgaten.

4.1 De schachten

Evenals in [2] is gekozen voor conventionele schachten die met behulp van de vriesmethode afgediept zullen worden. In [7] is een uitgebreide beschrijving te vinden van het afdiepen en bekleden van de schachten voor een opbergfaciliteit in steenzout. In dat rapport wordt ervan uitgegaan dat de top van het zout minimaal op een diepte van 300 m beneden het maaiveld ligt en dat de schacht wordt afgediept met behulp van boren en schieten. Bij het afzinken wordt de stabiliteit van de schacht gewaarborgd door een ondersteuningsconstructie van beton-elementen welke op regelmatige afstanden afgesteund worden in de schachtwand. Bij het bereiken van de top van de zoutkoepel wordt een fundatie gebouwd waarop een schachtvoering van staal en gewapend beton wordt opgetrokken. Daarna wordt de schacht verder door boren en schieten afgediept in het zout en worden de aanzetten op verdiepingsniveaus gemaakt. Na verwijdering van de tijdelijke hijsinstallaties wordt de definitieve ophaalinstallatie geplaatst en kan met de aanleg van de ondergrondse ruimten begonnen worden.

4.2 De ondergrondse ruimten

De uitvoering van de ondergrondse ruimten is gebaseerd op [9]. Hierin is beschreven hoe vanuit een infrastructuur-zone rond de schachten twee parallelle hoofdgalerijen worden gedreven die weer verbonden zijn door een aantal dwarsgalerijen waarin de feitelijke opberging plaatsvindt.

In de infrastructuur-zone bevinden zich de werkplaatsen, opstelruimten voor uitrusting en voertuigen, dieselopslag en de elektriciteitsdistributie. Rond de schachten en de infrastructuur bevindt zich een veiligheidszone waarbinnen geen afval zal worden opgeslagen.

De ondergrondse ruimten worden aangelegd door middel van freesmachines of “roadheaders” omdat boren en schieten een te grote kans op scheuren en breuk veroorzaakt. Het transport van het gemijnde zout zal met laadschop en truck gebeuren. De dimensies van de opberggalerijen worden vooral bepaald door de afmetingen van de boormachines voor de verticale boorgaten en de hijsinstallatie voor het plaatsen en later eventueel terughalen van de afvalcontainers. Gezien de

relatief geringe omvang van de mijn zal geen rail-infrastructuur aangelegd worden maar zal alle transport met wiel- en zonodig rupsvoertuigen plaatsvinden.

4.3 Het boren van de gaten

Sinds 1979 doet ECN onderzoek aan diepe drooggeboorde gaten in de Assemijn. Aanvankelijk werd gebruik gemaakt van aangepaste standaard-boormachines die in de mijnbouw werden gebruikt. Later is de GSF ertoe overgegaan speciale boormachines te ontwikkelen voor het droogboren van gaten. Het boorapparaat bestaat in beginsel uit een bestuurbare boortol met aan de onderzijde de beitels die het steenzout vermalen, waarna dit grove boorsel in een breker, ingebouwd in de boortol wordt verkleind en aansluitend met perslucht door pijpen omhoog wordt geblazen. Boorgaten met een diameter van 600 mm en van 1000 mm zijn tot diepten van 500 m respectievelijk 200 m geboord. De eerste categorie is bedoeld voor al of niet verpakte COGEMA-containers; de tweede is bedoeld voor containers met ander afval. Vastgesteld kan worden, dat de droogboor-techniek in steenzout tot de categorie 'proven technology' behoort [17].

4.4 Het gereedmaken van de opbergfaciliteit

Bij het ontwerp van de opbergfaciliteit is gebruik gemaakt van de jarenlange ervaring die het ECN tezamen met de GSF heeft opgedaan met experimenten in de Assemijn. Met name is hier gebruik gemaakt van de experimenten en analyses met verwarmde verbuisde gaten.

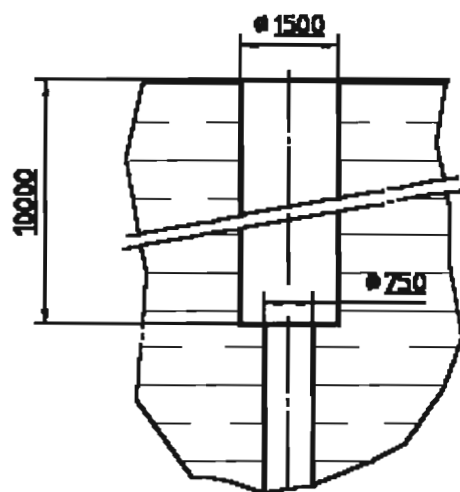
Er is vanuit gegaan dat de opberging plaatsvindt vanaf het 800 m-niveau van de mijn. In beginsel zijn dan twee oplossingen mogelijk:

1. Eén diep gat waarin alle 300 COGEMA-containers worden geplaatst.
2. Een cluster van een aantal wat ondiepere gaten waarin de 300 COGEMA-containers worden geplaatst.

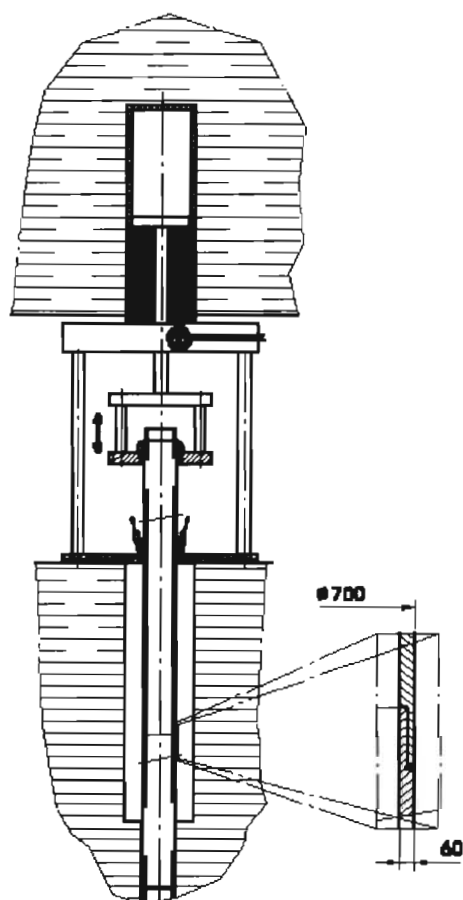
4.4.1 Een enkel boorgat

In het eerste geval moet een gat van ongeveer 500 m diep en een diameter van ca. 750 mm droog geboord worden. De bovenzijde van het boorgatgat, met een lengte van ongeveer 10 m, zal een grotere diameter moeten hebben (zie Figuur 12).

De verbuizing heeft een uitwendige diameter van 700 mm en een wanddikte van 60 mm. Als materiaal is het goed lasbare laag-gelegeerd staal (Fe-52) gekozen, dat voor deze toepassing goed geschikt is (zie §3.2.2 en §3.6.4). Bij deze materiaalkeuze is ook rekening gehouden met corrosie-effecten die het gevolg zijn van pekelmigratie in het omringende steenzout onder invloed van de geproduceerde vervalwarmte van het afval. Uit jarenlange in-situ corrosietesten is gebleken dat de gekozen staalsoort een regelmatig corrosiepatroon vertoont. De corrosiesnelheid van dit materiaal bedraagt afhankelijk van de omstandigheden tussen de 0.02 mm (pekeldamp) en 0.2 mm (vloeibare pek) per jaar [3, 18,19].

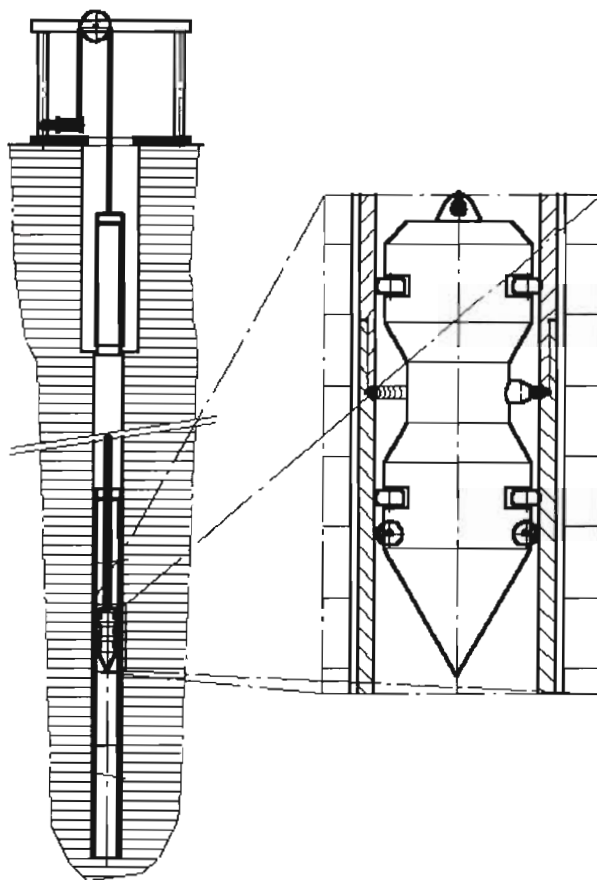


Figuur 12 Drooggeboord gat met opboring voor zoutplug



Figuur 13 Het inbrengen van de verbuizing

De verbuizing wordt in segmenten in het gat aangebracht (zie Figuur 13). De segmenten worden onderling gekoppeld met behulp van een schroefdraadverbinding met een dichtingslas². Deze las moet ervoor zorgen dat de geringe hoeveelheid pek, die gedreven door de warmte van het afval, uit het omringende steenzout naar het boorgat migreert, buiten de verbuizing blijft. Met behulp van een hydraulisch systeem worden de segmenten, na aan elkaar geschroefd en gelast te zijn, in het boorgat neergelaten. Dit betekent dat, voordat het laatste segment aan de kolom is bevestigd, het totale gewicht (zo'n 500 ton) aan het hydraulische systeem hangt, voordat de onderzijde van de verbuizing op de bodem van het gat wordt neergezet. De constructieve consequenties hiervan voor het hydraulische systeem etc. zijn nagegaan, waarbij is gebleken dat één en ander binnen de huidige werktuigbouwkundige praktijk kan worden gerealiseerd. De hydraulische installatie kan uiteraard ook voor meerdere boorgaten worden gebruikt.



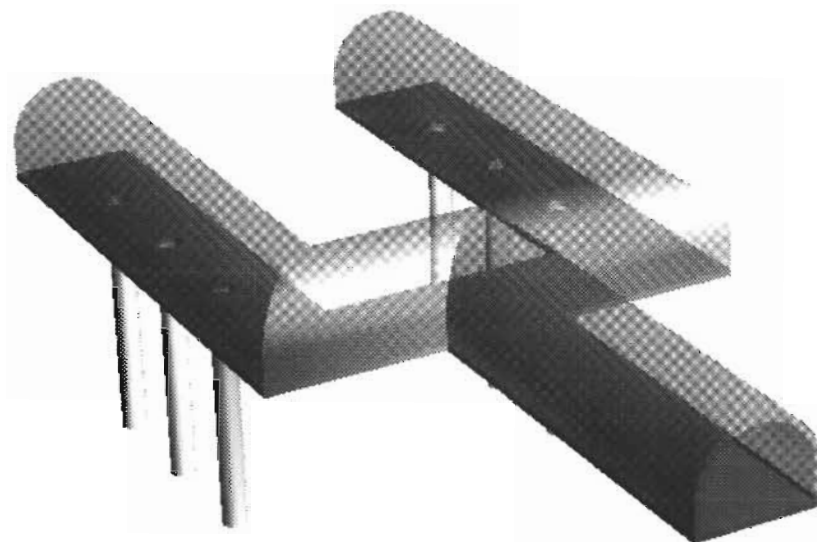
Figuur 14 Lokaal aanéénlassen van buissegmenten met een lasrobot

² Gezien de lage warmteproductie van het afval in verband met de relatief lange bovengrondse interim-opslagperiode van 50 jaar - bijna twee halfwaardetijden van ^{90}Sr (~ 30 jaar) - zal de pek migratie in dit geval gering zijn. Op grond hiervan zou bijvoorbeeld een oplossing gekozen kunnen worden zonder dichtingslas. Om echter elke toetreding van pek in de buis uit te sluiten, met waterstofvorming ten gevolge van de γ -straling van $^{137}\text{Ba}^m$ (dochter van ^{137}Cs) als gevolg, wordt veiligheidshalve gekozen voor de optie van een dichtingslas.

Een andere, wat meer futuristische mogelijkheid is de segmenten in het boorgat neer te laten en ter plekke met een lasrobot aan de binnenzijde de segmenten aan elkaar te lassen (zie Figuur 14). Na het aanbrengen van een geleidingsconstructie (trechter) aan de bovenzijde van de buis kunnen de containers geplaatst worden.

4.4.2 Cluster van boorgaten

Het tweede geval onderscheidt zich van het eerste doordat meerdere kortere boorgaten beladen en afgesloten worden. De techniek van het opbergen blijft dezelfde. Een mogelijke configuratie is in Figuur 15 aangegeven (vergelijk met 'configuratie 2' in §3.5.2). Een wezenlijk verschil is wel dat in het eerste geval thermisch gezien sprake is van lijnsymmetrie, waardoor ook de vervormingen een symmetrisch karakter hebben. In het clusterconcept zal de verbuizing van de boorgaten, ten gevolge van de thermische interactie, in beginsel gekromd worden, hetgeen de terughaalbaarheid mogelijk negatief kan beïnvloeden. Dit effect kan gereduceerd worden door de boorgaten verder uit elkaar te plaatsen. In §3.5.2 zijn dimensies voor een dergelijke configuratie beschreven (boorgaten 12 m en galerijen 20 m uiteen) waarvoor is nagegaan dat de spanningen en vervormingen in de verbuizingen binnen de toleranties blijven (zie §3.6).



Figuur 15 Cluster van opbergboorgaten

4.5 Alternatieve grijper- en remmechanismen

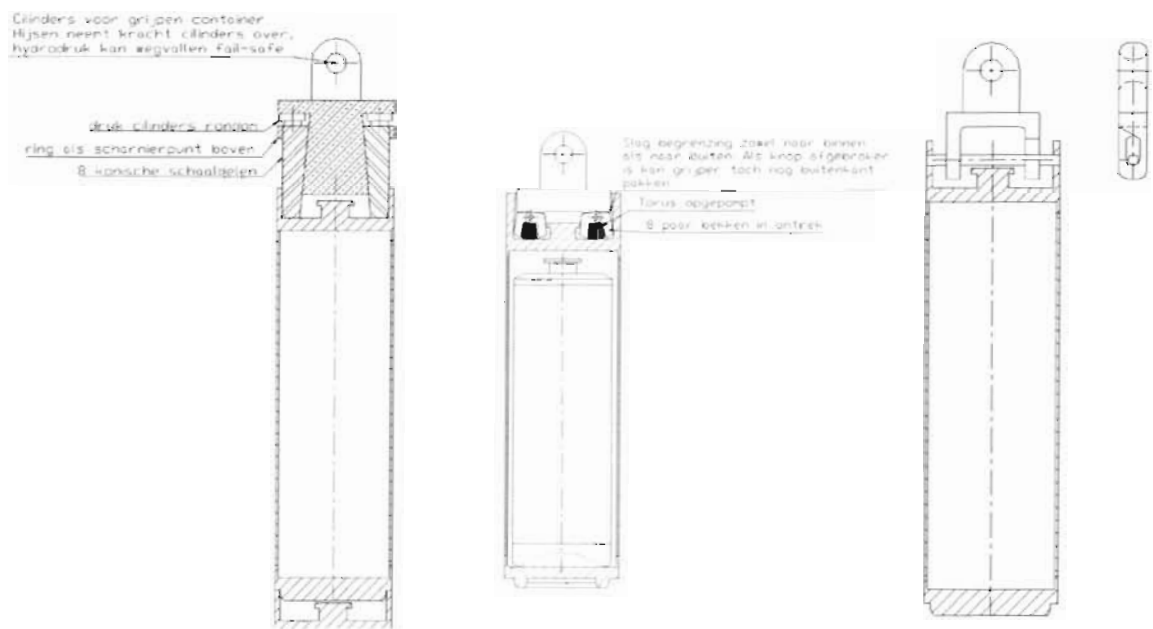
Het ontwerp ongeval van een vallende container is het meest in het oog springende ongeval bij de hier beschouwde wijze van opslag. De grootte van de kans dat zo'n ongeval plaatsvindt en de mogelijkheden de gevolgen daarvan te herstellen zullen een belangrijke rol spelen in het acceptatieproces van een dergelijke opslag. Daarom is onderzoek gedaan naar mogelijkheden om de botsingsnelheid te verlagen (schade voorkomen) en naar alternatieve grijpermechanismen voor het terughalen van beschadigde containers (schade herstel). Deze paragraaf beschrijft een aantal alternatieve grijper- en remmechanismen met hun voor- en nadelen.

4.5.1 Grijpermechanismen

In deze paragraaf zijn twee combinaties met enkele alternatieve grijpermogelijkheden beschreven. Voor elke combinatie zijn weer twee hijsmogelijkheden in het ontwerp opgenomen, waarmee beschadigde containers op een of andere manier teruggeshaald kunnen worden. De geschetste mogelijkheden zijn ook goed afzonderlijk toe te passen.

Keilboutprincipe + luchtkussens

In Figuur 16 (a) is een alternatief grijpermechanisme geschetst dat gebruikt kan worden als de hijsknop van de overpack onbruikbaar is, maar de centreerrand nog redelijk intact. Dit grijpermechanisme werkt volgens het keilboutprincipe, waarbij een aantal conische schaaldelen tegen de binnenzijde van de centreerrand worden gedrukt. Door middel van hydraulische cilinders wordt de druk tegen de centreerrand verder opgevoerd. De conische binnencilinder, met daaraan het hijs oog, neemt tijdens het hijsen de kracht van de hydraulische cilinders over, zodat een eventueel wegvallen van de hydraulische druk geen directe gevolgen heeft op de klemkracht ('fail-safe').



(a) Keilboutmechanisme

(b) Opblaasbare torus met bekken

(c) Draaigrijper

Figuur 16 Alternatieve grijpermechanismen

Mocht de centreerrand toch zodanig vervormd zijn dat het keilboutmechanisme niet meer inzetbaar is, dan biedt een grijper met een opblaasbare torus mogelijk uitkomst. Dit principe is in het Figuur 16 (b) schematisch weergegeven. In omtreksrichting zijn 8 paar bekken aangebracht. Door oppompen van de torus worden de bekken op de centreerrand en/of de hijsknop geklemd. Een nadeel van het gebruik van een opblaasbare torus is dat bij wegvallen van de luchtdruk de grip op de overpack verloren gaat (niet 'fail-safe').

Als om welke reden dan ook de grijper met opblaasbare torus niet is toe te passen, dan biedt mogelijk een grijper met een luchtkussen (zonder bekken) nog uitkomst. Het voordeel van zo'n luchtkussen is dat het zich aanpast aan de vorm van de constructie en daardoor de druk over een zo groot mogelijk oppervlak verdeelt. Een nadeel van het luchtkussen is echter opnieuw dat bij wegvallen van de luchtdruk de grip op de overpack verloren gaat (niet 'fail-safe').

Draaigrijper om as + hijsogen in centreerrand.

In Figuur 16 (c) is een alternatief grijpermechanisme geschetst waarbij de overpack kan worden gehesen aan een buisprofiel, bevestigd tussen de centreerrand. De draaigrijper bestaat uit twee grijpers die 180 graden ten opzichte van elkaar zijn gedraaid en die in horizontale richting star zijn verbonden. Door draaiing van het hijsmechanisme zullen de twee grijpers om het buisprofiel grijpen. Een nadeel van dit mechanisme is dat er door middel van 'trial and error' geprobeerd moet worden de container aan de 'haak te slaan'. Een ander nadeel is de onzekerheid of het buisprofiel bij het terughalen nog op de overpack aanwezig is. Als de conventionele hijsknop voor het terughalen onbruikbaar is, is waarschijnlijk ook het buisprofiel onbruikbaar. Als aanvulling hierop kunnen hijsogen in de centreerrand worden aangebracht waarmee door middel van 'haken' de containers alsnog zijn te bergen.

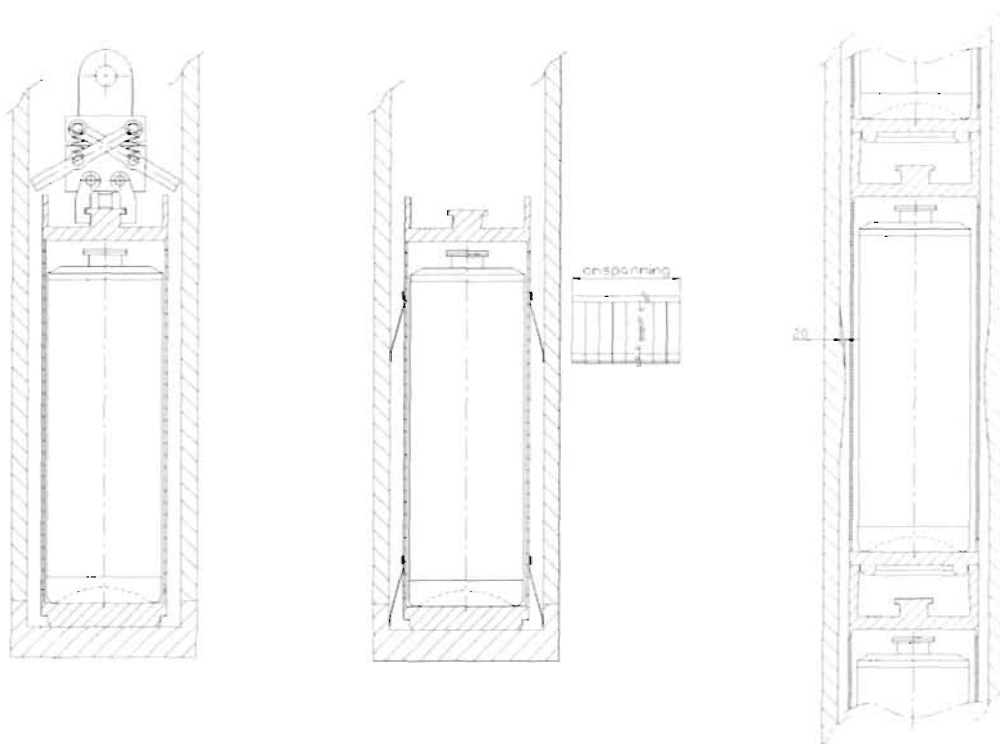
Als laatste redmiddel is het altijd nog mogelijk om ter plaatse op een aantal punten het deksel te doorboren en tegelijkertijd het gat te vullen met een twee componenten hars. Dit 'chemische anker' is een extra mogelijkheid om ervoor te zorgen dat de containers terughaalbaar blijven.

4.5.2 Remmechanismen

Uit de ontwerpberekeningen is gebleken dat de dynamische belasting ten gevolge van de botsingssnelheid bepalend is voor het ontwerp van de overpack. Door remmechanismen is deze valsnelheid te reduceren. In deze paragraaf zijn enkele mogelijkheden van zulke remmechanismen beschreven.

Draadbreukbeveiliging

Als extra veiligheid is het hijsmechanisme met een draadbreukbeveiliging uit te voeren. In Figuur 17 (a) is zo'n draadbreukbeveiliging geschetst. Als de kracht in de hijskabels zou wegvallen zorgt een veermechanisme voor een constante kracht op twee starre beugels waardoor de overpack tot stilstand komt.



(a) Draadbreekbeveiliging (b) Mechanische 'parachute' (c) Vernauwing van de buis

Figuur 17 Remmechanismen

Mechanische rem

Bij de mechanische rem is het de bedoeling om via wrijving met de wand de snelheid van een vallende container af te remmen. Figuur 17 (b) toont zo'n remmechanisme, waarbij aan de onder- en bovenzijde van de overpack in omtreksrichting een 'stalen parachute' is bevestigd bestaande uit losse plaatstalen stroken, aan de bovenkant bijgehouden door een strook van datzelfde plaatmateriaal. De wrijvingskracht tussen 'parachute' en buiswand is afhankelijk van de wrijvingscoëfficiënt en de normaalkracht op de wand, die bij een geschikte materiaalkeuze als functie van de snelheid uit te drukken moet zijn. Een nadeel van zo'n 'stalen parachute' is echter dat deze na een aantal interim opslagperioden aan de wand vast gecorrodeerd zou kunnen zitten.

Een alternatief op de mechanische rem is het aanbrengen van vernauwingen in omtreksrichting aan de binnenkant van de buis, zie Figuur 17 (c). Hierdoor zal een vallende overpack telkens voor een deel worden afgeremd. Ervan uitgaande dat de valsnelheid steeds voor 50% wordt gereduceerd zal, als deze vernauwingen op een afstand van zo'n 20-25 meter van elkaar worden aangebracht, de snelheid van een vallende overpack maximaal ca. 30 m/s bedragen. Een nadeel van zulke vernauwingen is dat bij het beladen de onderkant van de overpack de verdikking zodanig kan raken dat de spankracht in de hijskabels afneemt, waardoor het grijpermechanisme los zou kunnen geraken. Hierdoor neemt dus de faalkans van het hijsmechanisme toe.

Vloeistofrem

De werking van dit mechanisme is eenvoudig. Het verbuisde boorgat kan tijdens het beladen en/of terughalen gevuld worden met een vloeistof. Hierdoor zal tijdens een ontwerp ongeval de weerstand die een overpack ondervindt drastisch toenemen, waardoor de maximale botsingsnelheid zodanig afneemt dat dit geen problemen meer oplevert voor de sterkte (dynamisch) van eerder geplaatste containers. Vloeistoffen die hiervoor in aanmerking komen zijn bijvoorbeeld water en ruwe olie. Als de buis bijvoorbeeld gevuld wordt met water dan neemt de weerstand die een vallende container ondervindt drastisch toe en bereikt de snelheid op een valdiepte van 500 meter maximaal ca. 8 m/s, ruim beneden de toelaatbare snelheid van 18.5 m/s.

Water heeft als nadeel dat het de corrosiebestendigheid van de stalen buis niet ten goede komt. Olie biedt daarentegen juist een beschermende werking tegen corrosie, maar heeft tot nadeel dat er zich bij een temperatuursverhoging brandbare gassen zullen ontwikkelen.

Een optie zou kunnen zijn om tijdens het beladen van een boorgat geen vloeistofrem toe te passen omdat dan de kans op een eventueel ongeval zeer klein is (alles is 'nieuw'). Naarmate de jaren van opslag verstrijken zal de kans op een hijsongeval echter toenemen, bijvoorbeeld ten gevolge van veranderde materiaaleigenschappen (straling). Daarom zou bij het terughalen van containers uit een boorgat wel een vloeistofrem kunnen worden toegepast. De ontwerp overpack is overigens goed bestand tegen de uitwendige druk van de waterkolom van maximaal 5 MPa die bij deze optie kan worden opgebouwd.

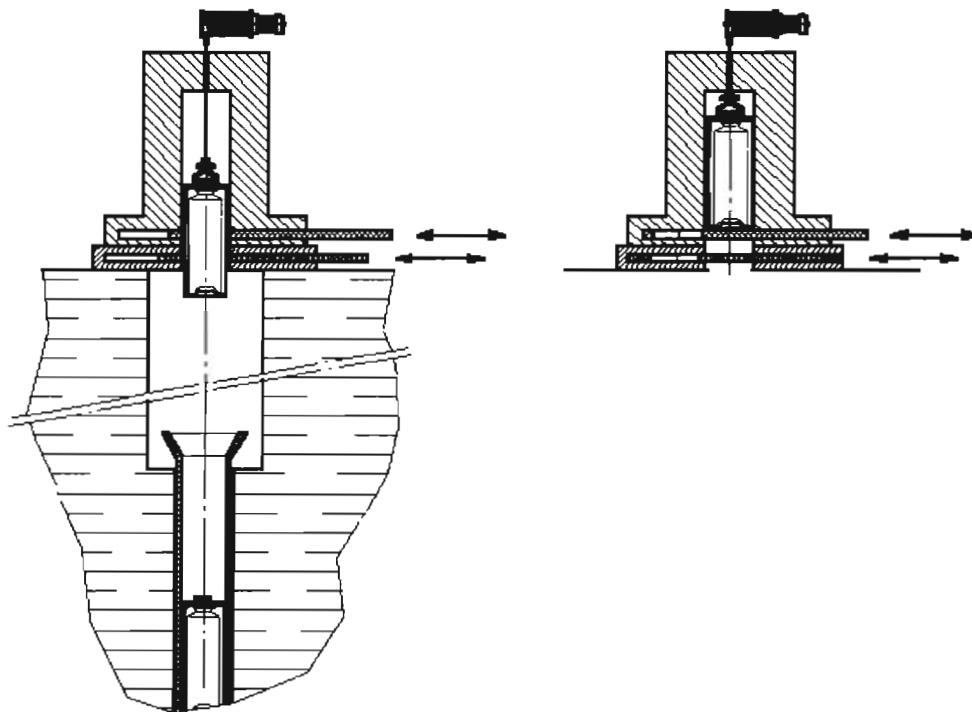
5 Het bedienen van de faciliteit

Voor het bedienen van de faciliteit kunnen verschillende fasen onderscheiden worden:

- de beladingsfase, waarin het afval in de opberggaten wordt gebracht;
 - de afsluitfase, waarin de opberggaten successievelijk worden afgesloten;
 - de interim-opslagfase, waarin de faciliteit slechts wordt onderhouden en gecontroleerd met het oog op een eventueel terugnemen van het opgeslagen afval;
- en, mocht daartoe besloten worden:
- de terughaaifase, waarin het eerder opgeslagen afval uit de opberggaten wordt gehaald om hergebruikt dan wel anders opgeslagen te worden.

5.1 De beladingsfase

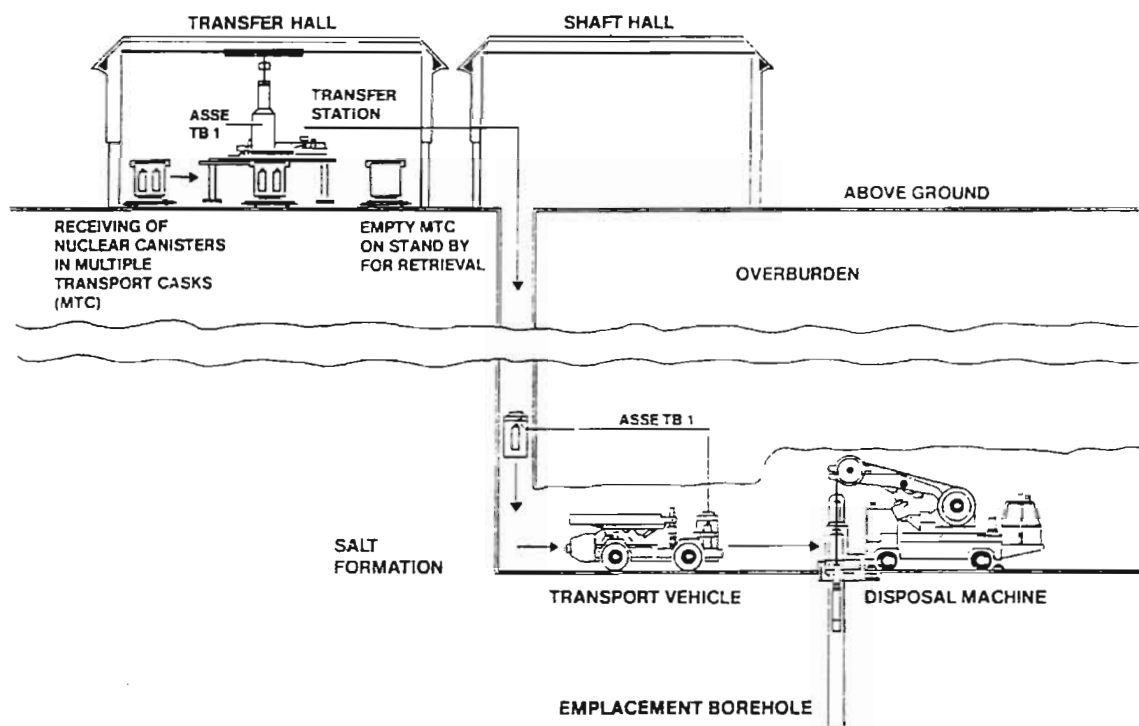
Op de vloer van de galerij wordt een schuifconstructie geplaatst, die het mogelijk maakt, in geopende toestand, de container uit de transportcontainer te laten passeren (zie Figuur 18). Aan de onderzijde van de schuifconstructie is een schort (skirt) bevestigd. Deze dient als stralingsafscherming, wanneer de container het bovenste deel van het gat passeert en er nog onvoldoende steenzoutdikte aanwezig is om de γ -straling te reduceren voor personen die op de galerij aanwezig zijn.



Figuur 18 Belading van de opslagboorgaten

De containers worden via een kabel, waaraan een grijperconstructie is bevestigd die om de knop van de overpack grijpt, neergelaten in het verbuisde boorgat en op de bodem van de verbuizing of op een kolom eerder geplaatste containers gezet. De grijper wordt automatisch geopend wanneer “touch down” is vastgesteld en weer kan worden opgehaald. Een volledige beschrijving van zo’n systeem is te vinden in [20].

Tenslotte geeft Figuur 19 een overzicht van de beladingsprocedure die door de GSF voor een experiment in de Assemijn is ontworpen en die in principe ook voor dit Torad-B opslagconcept wordt toegepast. De hiervoor benodigde techniek kan dus als ‘proven technology’ worden aangemerkt.

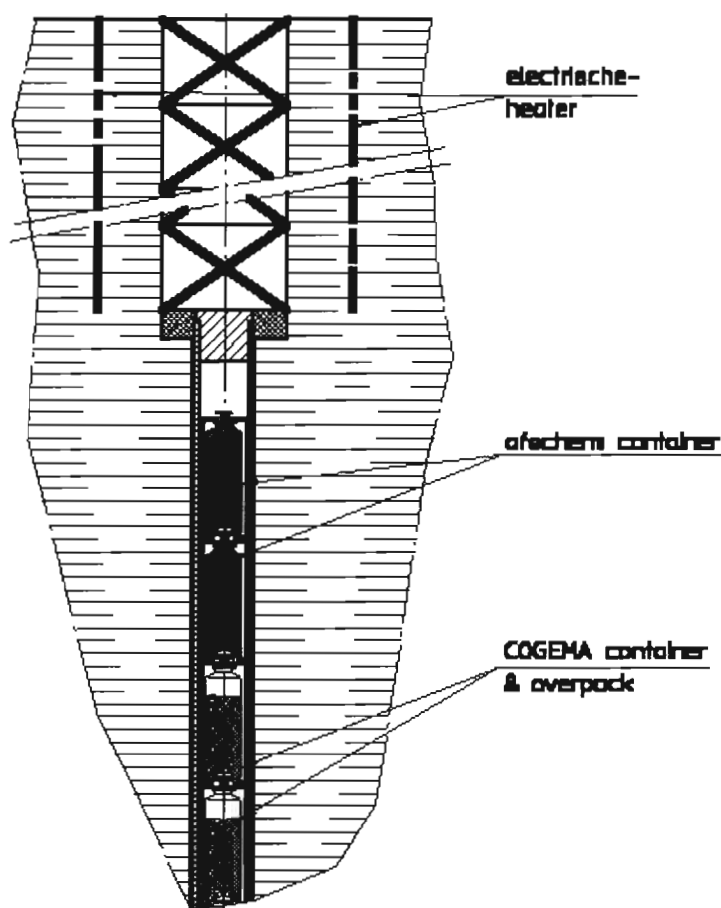


Figuur 19 De beladingsprocedure

Wanneer alle containers zijn geplaatst, worden op de kolom een of meerdere afschermcontainers van staal geplaatst volgens dezelfde methode, teneinde de γ -straling op het galerijniveau te minimaliseren. Aansluitend wordt, nadat de trechter en de schuifconstructie zijn weggehaald, een dikwandig deksel in de bovenzijde van de pijp geplaatst en op afstand afgelast.

5.2 De afsluitfase

De afsluiting van een opberggat is weergegeven in Figuur 20. Allereerst wordt zoutgruis of bentoniet in het gat gestort, zodat de oneffenheden worden bedekt. Op deze ondergrond worden uit massief steenzout vervaardigde pluggen geplaatst waarvan de radiale spleten zo goed mogelijk met zoutgruis worden opgevuld.



Figuur 20 Afsluiting van een opslagboorgat

Door de gesteentedruk en de warmteontwikkeling van het afval zal de spleet tussen de verbuizing en de wand van het boorgat dichtkruipen. Ten gevolge van de hogere gesteentedruk zal dit proces aan de onderzijde van het boorgat het snelst verlopen. Aan de bovenzijde van het boorgat zal dit proces langzamer verlopen, vooral rond de afsluiting aan de bovenzijde, omdat daar zowel de gesteentedruk en de invloed van warmte minder is.

Eventueel kan door het plaatsen van elektrisch verhitte heaters rondom de pluggen het ontbreken van voldoende warmte om de spleten tussen de pluggen en het gat dicht te doen vloeien, worden gecompenseerd. Het afschakelen van zulke heaters moet niet te snel worden gedaan omdat dit kan

resulteren in excessieve scheurvorming in het steenzout rond de heaters, zoals werd waargenomen in de directe omgeving van de elektrisch verhitte gaten uit het beoogde HAW-experiment.

Wanneer de veiligheidsanalyse daartoe aanleiding geeft, wordt daarna de galerij, waarin het boorgat zich bevindt, teruggevuld met steenzoutgruis en afgesloten met een dam.

5.3 De interim-opslagfase

Een belangrijk element dat tijdens de interim-opslagfase gewaarborgd moet worden, is de stabiliteit van de verbuizing in de tijd. Op basis van de jarenlange ervaring met instrumentatie van ondergrondse experimenten, is het illusoir ervan uit te gaan dat het bewaken van de stabiliteit van de verbuizing door middel van instrumentatie een oplossing biedt, mede gelet op de noodzakelijke lange duur dat deze bewaking moet blijven functioneren en de hoge mate van ontoegankelijkheid van een dergelijk meetsysteem.

Een mogelijke oplossing voor dit probleem is het aanleggen van een “schaduwboorgat”, evenwel van veel kortere lengte, met elektrische verhitte instrumentatie en een verbuizing met een wanddikte die geringer is dan die van de werkelijke boorgaten. De metingen die aan dit schaduwboorgat worden verricht, dragen dus een conservatief karakter. Mocht in de loop der tijd de instrumentatie in dit schaduwboorgat uitvallen dan kan deze zonder grote problemen worden vervangen, zodat een continue bewaking kan worden gerealiseerd.

5.4 De terughaalfase

Het terughalen van reeds opgeborgen afval kan op meerdere manieren gebeuren:

1. De oorspronkelijke toegang tot de opbergplaats wordt opnieuw opengelegd, waarbij de dam wordt weggefreest of, wanneer dit bezwaarlijk is, kan de dam intact worden gelaten en een galerij er omheen worden aangelegd. Vervolgens wordt op 10 m diepte door boren het deksel van de verbuizing blootgelegd. De las waarmee het deksel aan de buis is bevestigd, wordt op afstand doorgeslepen, waarna het deksel wordt verwijderd. Het terughalen van de containers gebeurt nu op dezelfde manier en met dezelfde equipment ('proven technology') zoals voor de opbergfase is beschreven, maar dan in omgekeerde volgorde uiteraard.
2. Een andere methode om de bovenzijde van het gat bloot te leggen is om een geheel nieuwe toegang te frezen, die onder of gedeeltelijk onder de oorspronkelijke toegangsgalerij ligt. Hierbij kan het boren en het op afstand doorslijpen van de deksellas worden vermeden.

Wanneer uit de veiligheidsstudie mocht blijken, dat dammen en navulling met steenzoutgruis van de galerij niet noodzakelijk zijn, verdient de eerstgenoemde methode de voorkeur.

6 Discussie

In dit rapport is gekozen voor een vorm van ondergrondse opberging van radioactief afval waarbij de mijn gedurende een zekere periode in bedrijf blijft als ondergrondse interim-opslag. Teneinde een optimaal gebruik te maken van de algemene verticale geologische geaardheid van een zoutpijler, zijn op basis van 'proven technology' technieken ontwikkeld om hoogactief afval terughaalbaar te kunnen opbergen in verticale boorgaten.

6.1 Overwegingen bij het ontwerp

De belangrijkste overwegingen voor de keuze van het in dit rapport beschreven concept zijn het feit dat de mijn naar een veilige toestand moet evolueren ook als toekomstige generaties geen zorg meer aan de mijn zouden kunnen of willen besteden, en de mogelijkheid om de mijn op eenvoudige wijze af te sluiten als besloten wordt om het afval niet terug te nemen. Bij een terughaloop van het afval is het uiteraard van essentieel belang dat, gedurende de periode dat de terughaalbaarheid gewaarborgd moet worden, het terughaalbaarheidsconcept blijft functioneren. De in dit rapport geschetste aanpak, waarbij gebruik gemaakt wordt van 'proven technology', is een eerste stap om tot een waarborg van het systeem te geraken. Tijdens de interim-opslagperiode kan het afval relatief eenvoudig teruggehaald worden, in het hier beschreven concept door het verwijderen, of via de aanleg van een speciale galerij passeren van de afsluitende dam en het opnieuw openleggen van de verbuizing. In hoeverre de voorgestelde afsluitconstructies van de beladen opberggaten adequaat zijn, moet aan de hand van een veiligheidsstudie vastgesteld worden.

Lengte interim-opslagperiode

Bij de keuze voor de lengte van de periode van ondergrondse interim-opslag moet rekening gehouden worden met:

- de maatschappelijke en economische ontwikkelingen,
- de economische levensduur van apparatuur en installaties in de mijn, en
- de kosten van het lopende onderhoud.

Op basis van deze overwegingen is een interim-opslagperiode van 25 jaar voorgesteld. Tijdens deze periode, of uiterlijk aan het eind daarvan, moet gekozen worden tussen het definitief afsluiten van de mijn of het aanpassen van de mijn en de installaties voor een volgende periode van interim-opslag.

Terugmijnen versus openhouden van de faciliteit

Ook na het definitief afsluiten van de mijn is het niet onmogelijk het afval terug te halen. Met moderne mijnbouwmethoden kunnen tot op grote diepten, bij hoge temperaturen en onder zeer extreme omstandigheden delfstoffen worden gewonnen. Het aanleggen van een nieuwe mijn en

het terughalen van de afvalcontainers moet geacht worden met de bestaande technologie mogelijk te zijn. Het is zelfs waarschijnlijk dat een terughaalbare optie niet veel extra voorzieningen noodzakelijk maakt bij de aanleg van de opbergfaciliteit.

Verkenning van het gastgesteente en monitoring van het afval

Als voor een optie van meerdere boorgaten voor opberging van het afval wordt gekozen, dan kunnen vóór het plaatsen van het afval de geologische condities in de nabijheid van de boorgaten door middel van niet-destructieve technieken (bijvoorbeeld radar en ultrasoon) uitstekend in kaart worden gebracht. Ter verbetering van directe monitoring van het afval zouden bij zo'n configuratie één of meer smalle boorgaten (afhankelijk van te gebruiken apparatuur) toegevoegd kunnen worden die ook na afsluiting van de opberggaten toegankelijk blijven; zo nodig kunnen deze later eenvoudig opgeboord worden. Deze gaten zouden dan bijvoorbeeld gebruikt kunnen worden voor periodieke controle van het afval middels radar of ultrasone technieken: in elk geval moet zo eenvoudig kunnen worden vastgesteld of de verbuizing van de opberggaten nog intact is. Onderzoek naar de huidige beschikbare of te ontwikkelen technieken voor een dergelijke controle maakte echter geen deel uit van het Torad-B project.

6.2 Aandachtspunten

De omvang en doelstelling van het Torad-B project laten niet toe in extenso over het waarborgen van het systeem te rapporteren; hier worden alleen enkele in het oog springende zaken vermeld die bij een eventuele realisering aan de orde moeten komen. In de eerste plaats moet van het totale transport een risicoanalyse gemaakt worden, teneinde eventuele ontoelaatbaarheden en zwakke punten op te sporen.

6.2.1 Ontwerpongeval

Het meest in het oog springend mogelijk ongeval bij de hier onderzochte opslagwijze is een falen van het hijssysteem, waardoor een container losraakt van de grijper en neerstort op de eerder geplaatste exemplaren, die daardoor bijvoorbeeld ontoelaatbaar vervormd worden. Een dergelijk potentieel ongeval kan aanleiding geven tot een keuze van kortere boorgaten.

De beperking van de dynamische belasting samenhangend met dit ontwerpongeval bepaalde ook de keuze van een 'one-pack' overpack voor de container-overpack (zie §3.3). De toepassing van een roestvast staal met een duplex structuur (2-fasen structuur) als constructiemateriaal in plaats van het voorgestelde laag-gelegeerde staal (St-52) levert voor de corrosie- en mechanische eigenschappen nog betere prestaties. Doordat de vloeigrens zo'n 25% (maximaal) hoger ligt kan er lichter mee geconstrueerd worden. Deze gewichtsbesparing leidt dan tot een lagere impulskracht bij het ontwerpongeval. Samen met een hogere vloeigrens betekent dit dat een grotere valsnelheid dan ca. 18.5 m/s toelaatbaar is. Een mogelijk nadeel van een duplex roestvast staal is dat het slechts bruikbaar is tot een temperatuur van ca. 300 °C.

Uiteraard spelen ook de grootte van de kans dat een dergelijke gebeurtenis plaatsvindt en de mogelijkheden de gevolgen ervan te herstellen een rol in het acceptatieproces. Daarom is er binnen het project ook uitgebreid gekeken naar mogelijkheden om de botsingsnelheid van een vallende container te beperken als ook naar alternatieve grijpermechanismen om beschadigde containers te lichten (zie §4.5). Gesuggereerd wordt om bij een eventuele terughaaloperatie van de afvalcontainers het boorgat te vullen met water dat, werkend als een vloeistofrem, de maximale botsingsnelheid zou verlagen tot ca. 8 m/s, ver onder de toelaatbare botsingsnelheid van 18.5 m/s.

6.2.2 *Corrosie van de verbuizing*

In de schachtenbouw is het gebruikelijk om de annulaire ruimte tussen de verbuizing en de boorgatwand op te vullen met bituum materiaal. Het voordeel van bitumen is dat dit materiaal ook na langere tijd enigszins vloeibaar blijft en zo de optredende gesteentedruk gelijkmatig over de buisomtrek zal verdelen. Een bijkomstig voordeel is dat de verbuizing tevens een betere bescherming tegen corrosie ondervindt. Voor de huidige toepassing zou het bitumen echter worden blootgesteld aan relatief hoge temperaturen (tot zo'n 130 °C) en een sterk stralingsveld, hetgeen door dissociatie van het bitumen zou kunnen leiden tot ongewenste gasvorming.

Ter voorkoming van snelle corrosie van de verbuizing kan ook overwogen worden de annulus rond de verbuizing te vullen met een dunne laag niet-compacterend vulmateriaal, bijvoorbeeld fijn zand. Daarmee zou het oplopen van de druk in de (porie)ruimte rond de verbuizing effectief worden tegengegaan, waardoor uit het omringende steenzout migrerende pekels door de warmteontwikkeling van het afval verdampt en de corrosiesnelheid van de verbuizing met een grootteorde afneemt (zie §4.4.1). Dit werkt echter alleen als de warmte-afgifte van het opgeslagen afval hoog genoeg is: als de warmteproductie van het afval zo laag wordt dat de temperatuur aan de verbuizing onder het kookpunt daalt, dan kan er door condensatie in het onderste deel van de opberggaten vloeibare pekels komen te staan, waardoor aldaar de corrosiesnelheid sterk toeneemt. Voor een enkel boorgat blijft de temperatuur altijd beneden de 100 °C, voor een cluster met 6 boorgaten gebeurt dit onderaan de verbuizing na zo'n 75 jaar (zie §3.5).

Een andere maatregel die de corrosie van de verbuizing sterk kan vertragen is oplassen van roestvast staal, zoals ook standaard gebeurt voor delen van het primaire circuit van lichtwaterreactoren. Tegen meerkosten kan daarmee de corrosiesnelheid bij blootstelling aan vloeibare pekels worden verlaagd tot waarschijnlijk minder dan 0.02 mm/jaar (gebaseerd op de waarde uit [3] - die betrekking heeft op blootstelling aan pekeldamp - vermenigvuldigd met de ratio tussen de corrosiesnelheden bij blootstelling aan vloeibare of dampvormige pekels - typisch een factor 10). Ook de toepassing van een roestvast staal met een duplex structuur (2-fasen structuur) kan net als voor de overpack de corrosiebestendigheid van de verbuizing sterk verbeteren (zie 6.2.1).

Met behulp van driedimensionale thermo-mechanische berekeningen is aangetoond dat, rekening houdend met een corrosietempo van 0,11 mm/jaar, met de voorgestelde materiaalkeuze de verbuizing de eerste 100 jaar bestand is tegen de uitwendige belastingen in de zoutformatie (zie §3.6).

6.2.3 *Convectief warmtetransport*

Zowel tijdens de uitvoering van het HAW-project [20] en het DEBORA-I experiment in het BAMBUS-project [3] - beide representatief voor opslag van warmteproducerend afval in diepe boorgaten in steenzout - is geconstateerd dat ongeveer 20% van de warmte, die in de - afvalcontainers representerende - centrale heaters werd opgewekt, niet ter plekke aan het omringende steenzout werd afgegeven, maar waarschijnlijk door convectief transport met de lucht in de spleet tussen de heaters/containers en de verbuizing naar boven werd getransporteerd.

Beide experimenten werden echter uitgevoerd in relatief korte boorgaten van 15 meter diep. Omdat dit convectief transport wordt gedreven door de temperatuursgradient zal dit proces bij de in dit project beschouwde veel langere boorgaten waarschijnlijk geen grote rol spelen, afgezien dan van het bovenste deel van een boorgat uiteraard. Dit leidt dan tot een verhoging van de temperatuur in het steenzout rond het bovenste, door ontbreken van afval, niet-direct verhitte deel van het boorgat, dus tot een versnelde convergentie van het boorgat aldaar en daardoor snellere afname van de permeabiliteit. Mogelijk maakt dit effect het toepassen van lokale verhitting ter versnelling van het dichtkruipen van de boorgat-afsluitingen overbodig (zie §5.2). Het potentieel belang van dit fenomeen is echter in het Torad-B project niet nader onderzocht.

Referenties

- [1] *Kabinetsstandpunt over de vraag of de diepe ondergrond mag en kan worden gebruikt voor het opbergen van afval* (NMP-actie 62), 27 april 1993
- [2] J.J. Heijdra, J. Prij: *Concept ontwerp terughaaibare berging in steenzout*. Eindrapport 1996 METRO I. ECN-C-96-087, Maart 1997
- [3] W. Bechthold, T. Rothfuchs, A. Poley, M. Ghoreychi, S. Heusermann, A. Gens, S. Olivella: *Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project)*. Final report, EUR 19124 EN, 1999
- [4] OPLA: *Onderzoek naar geologische opberging van radioactief afval in Nederland*. Eindrapport Fase 1. Economische Zaken, mei 1989
- [5] Nuclear Energy Agency. *The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes. A Collective Opinion of the NEA Radioactive Waste Management Committee of the OECD Nuclear Energy Agency*. OECD, 1995
- [6] Nota Radioactief Afval, Kamerstuk 1983-1984, 18.343, nrs 5 & 6
- [7] J.J. Heijdra, J. Bekkering, J. v.d. Gaag, P.H. v.d. Kleyn, J. Prij: *Retrievability of radioactive waste from a deep underground disposal facility*. EUR 16197. European Commission, 1995
- [8] W.M.G.T. van de Broek e.a.: *Retrievability of radioactive waste. Final report OPLA project MIJBO-1A/54595*. TU Delft, April 1993
- [9] Van Hattum & Blankenvoort. *Locatie-onafhankelijke studie inzake de aanleg, bedrijfsvoering en afsluiting van mogelijke faciliteiten voor de definitieve opberging van radioactief afval in steenzoutformaties in Nederland*. Beverwijk, April 1986
- [10] J. Prij, C.J.J. Beemsterboer, G.M.A. Rutten: *Thermo-mechanical pre-test analysis for the HAW test field. Part 2: Sensitivity of the loading on the safety tube*. ECN-89-167, 1989
- [11] R.J. Heijboer, J.B.M. de Haas, A. van Dalen, P.B.J.M. Benneker: *Nuclide-inventaris, Warmteproductie en Gammastraling van Kernsplijtingsafval*. Veiligheidsevaluatie van opbergconcepten in steenzout (VEOS) - Eindrapportage, deelrapport 11. ECN-Petten, maart 1988
- [12] O.W. Hermann, R.M. Westfall: *ORIGEN-S - Scale System Module to calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Build-up and Decay and Associated Radiation Source Terms*. ORNL, October 1981
- [13] J.L. Kloosterman: *MARMER a Flexible Point-Kernel Shielding Code, User Manual, Version 2*. IRI-131-89-03/2, Delft, June 1990

- [14] C.T.J. Jong: *Temperatuurberekeningen*. Veiligheidsevaluatie van opbergconcepten in steenzout (VEOS) - Eindrapportage, deelrapport 4. ECN / RIVM, juli 1987
- [15] *PORFLOW User's Manual - Version 3.00*. ACRi, 1996
- [16] *ANSYS User's Manual for Revision 5.5, Volume I, II and III*. Swanson Analysis Systems Inc. P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, USA
- [17] L.F.M. Hamilton, J. Prij, N. Jockwer: *The 600 m borehole project of the CEC programme on management and storage of radioactive waste*. Final report Phase I. ECN-C—91-068, July 1991; òf daaraan gelijk:
L.F.M. Hamilton, J. Prij, N. Jockwer: *Drilling surveillance and geomechanical experiments in deep boreholes in salt*. Final report Phase I. EUR 14235 EN, 1993
- [18] E. Smailos, W. Schwarzkopf, B. Kienzler, R. Köster: *Corrosion of carbon-steel containers for heat-generating nuclear waste in brine environments relevant for a rock-salt repository*. Mat. Res. Soc. Symp. Proc., C.G. Sombret, ed., Vol. 257, p.399, 1992
- [19] E. Smailos: *Corrosion of high-level waste packaging materials in disposal relevant brines*. Nuclear Technology, Vol. 104, pp. 343-350, 1993
- [20] T. Rothfuchs, K.A. Duijves, I. Müller-Lyda: *The HAW project: Demonstration facility for the disposal of high-level waste in salt*. Report EUR 13399 EN, 1991