

**VERKENNENDE STUDIE NAAR OPTIES VOOR
HET BEHEER VAN RADIOACTIEF AFVAL EN
VERBRUIKTE SPLIJTSTOFFEN OP DE LANGE
TERMIJN**

MINISTERIE VAN ECONOMISCHE ZAKEN

26 september 2014
077495211:F - Definitief
B02047.000139.0100



Inhoud

Samenvatting	3
Begrippen en afkortingen	10
Deel A	12
1 Introductie	13
1.1 Nationaal programma.....	13
1.2 Rapport verkenning opties voor het beheer op de lange termijn.....	15
1.3 Leeswijzer	16
2 Achtergrond	17
2.1 Radioactiefafval in Nederland	17
2.2 Beleid ten aanzien van het beheer radioactief afval.....	18
2.3 Onderzoeksprogramma's	19
3 Beheeropties	21
3.1 Afbakening beheeropties	21
3.2 Huidige situatie: 100 jaar bovengrondse opslag.....	22
3.3 Langdurige bovengrondse opslag.....	25
3.4 Oppervlakteberging	27
3.5 Geologische berging	31
3.5.1 Geologische berging in ondergrondse galerijen	31
3.5.2 Geologische berging in diepe boorgaten	36
3.6 Multinationale berging	39
3.7 Partitie en transmutatie.....	40
3.8 Afgevallen beheeropties	43
4 Afweging beheeropties	46
4.1 Methodiek en afbakening	46
4.2 Afwegingskader veiligheid	47
4.3 Afwegingskader geologie	49
4.4 Afwegingskader economie	54
4.5 Afwegingskader ethiek.....	57
5 Samenvatting beheeropties	62
Deel B	66
6 Langdurige bovengrondse opslag	67
6.1 Veiligheid.....	67
6.2 Geologie	69
6.3 Economie	69
6.4 Ethiek.....	70

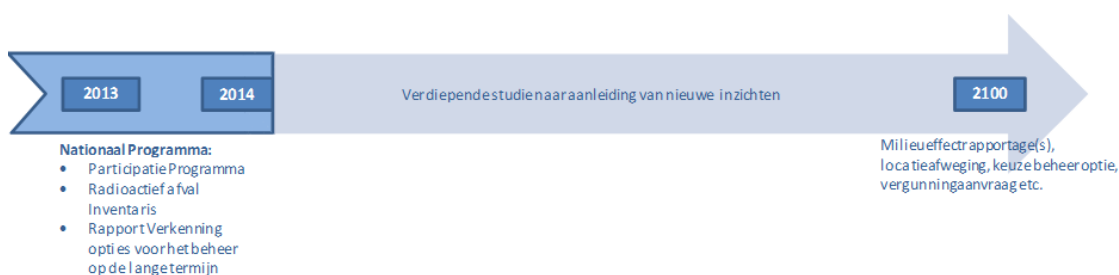
6.5	Conclusie.....	71
7	Oppervlakteberging.....	73
7.1	Veiligheid.....	73
7.2	Geologie.....	74
7.3	Economie.....	74
7.4	Ethiek.....	75
7.5	Conclusie.....	76
8	Geologische berging.....	77
8.1	Veiligheid.....	77
8.1.1	Ondergrondse galerijen.....	77
8.1.2	Diepe boorgaten.....	79
8.2	Geologie.....	81
8.2.1	Ondergrondse galerijen.....	81
8.2.2	Diepe boorgaten.....	83
8.3	Economie.....	83
8.3.1	Ondergrondse galerijen.....	83
8.3.2	Diepe boorgaten.....	84
8.4	Ethiek.....	85
8.4.1	Ondergrondse galerijen.....	85
8.4.2	Diepe boorgaten.....	86
8.5	Conclusie.....	87
8.5.1	Ondergrondse galerijen.....	87
8.5.2	Diepe boorgaten.....	88
9	Multinationale berging.....	89
9.1	Veiligheid.....	89
9.2	Geologie.....	90
9.3	Economie.....	91
9.4	Ethiek.....	91
9.5	Conclusie.....	92
10	Partitie en transmutatie.....	93
10.1	Veiligheid.....	93
10.2	Geologie.....	94
10.3	Economie.....	94
10.4	Ethiek.....	95
10.5	Conclusie.....	96
Bijlage 1	Referentielijst.....	98

Samenvatting

Vanuit de Europese Unie is de verplichting opgelegd om een nationaal programma op te stellen en daarin te beschrijven hoe radioactief afval, nu en in de toekomst, veilig en verantwoord wordt beheerd. Het ministerie van Economische Zaken stelt het nationale programma op. In het nationale programma wordt het huidige Nederlandse beleid over het beheer van radioactief afval, dat de afgelopen decennia ontwikkeld is, gebundeld en in één document beschreven. Onderdeel daarvan is het beheer van radioactief afval op de lange termijn. Beheer op de lange termijn gaat over de termijn na de 100 jaar (interim) opslag van radioactief afval die nu al gerealiseerd is in Nederland. Voorliggende studie is één van de onderzoeken die ten behoeve van het nationale programma is uitgevoerd en wordt als achtergrond gebruikt voor het nationale programma. Deze studie geeft een overzicht van de voor Nederland mogelijk geschikte beheeropties voor radioactief afval op de lange termijn en beschrijft de voor- en nadelen daarvan.

Nog geen keuze voor een beheeroptie of locatie

In het nationaal programma en in dit rapport wordt geen keuze gemaakt voor één van de beheeropties. Dit rapport is een stap in een reeks steeds concreter wordende stappen (zie ook het figuur hieronder) die de komende 100 jaar worden genomen om tot een definitieve keuze voor een beheeroptie en locatie daarvoor te komen.



Radioactief afval

In Nederland wordt voor zeer diverse toepassingen gebruik gemaakt van technologieën waarbij radioactief afval en verbruikte splijtstof ontstaat. Dit afval ontstaat voor het grootste deel bij de opwekking van elektriciteit in kerncentrales, maar ook bij de productie en het gebruik van medische radioactieve isotopen in ziekenhuizen, werkzaamheden in de olie- en gasindustrie en onderzoekstoepassingen.

Radioactief afval is te onderscheiden in:

- **Laag- en middelradioactief afval (LMRA).** Dit betreft bijvoorbeeld materiaal dat bij radiologisch medisch onderzoek wordt gebruikt (handschoenen, glaswerk, injectienaalden, dierlijk materiaal van proefdieronderzoek) en sloopmateriaal van laboratoria of andere gebouwen waar met radioactieve stoffen is gewerkt.

Een subcategorie van LMRA is NORM (Naturally Occuring Radioactive Material) afval, dat ontstaat bij processen waarbij grote hoeveelheden natuurlijke grondstoffen worden verwerkt en de natuurlijk aanwezig radioactiviteit in een van de reststromen wordt geconcentreerd. Het grootste gedeelte van het NORM heeft een dusdanig lage activiteit dat het veilig gestort kan worden op daarvoor speciaal aangewezen afvalstorten.

- **Hoogradioactief afval (HRA).** Hierbij gaat het onder meer om splijtstofelementen die zijn gebruikt in de twee onderzoeksreactoren die zich in Nederland bevinden: in Petten en Delft. De belangrijkste leverancier van hoogradioactief afval is de kernenergiecentrale in Borssele. Dit betreft verlaasde opgewerkte splijtstoffen.

Beheeropties

Op dit moment wordt radioactief afval conform het Nederlandse beleid ten minste 100 jaar bovengronds opgeslagen bij de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) in Zeeland. Na deze periode van interim-opslag wordt eindberging voor het afval voorzien.

In deze studie zijn voor verschillende mogelijk geschikte opties voor het beheer van het radioactief afval op de lange termijn de voor- en nadelen beschreven.

- Langdurige bovengrondse opslag.
- Oppervlakteberging.
- Geologische berging (in ondergrondse galerijen of in diepe boorgaten).
- Multinationale berging.
- Partitie en transmutatie (P&T).

Hierna wordt het afwegingskader voor de beheeropties gepresenteerd. Daarna volgt de beschrijving van de beheeropties en de bijbehorende voor- en nadelen. De opties zijn echter niet één op één vergelijkbaar, omdat ze bijvoorbeeld niet allemaal geschikt zijn voor alle typen radioactief afval (oppervlakteberging), omdat de optie van organisatorische aard is (multinationale berging) of omdat de optie aanvullend is op een andere optie (P&T). P&T heeft tot doel de levensduur van het afval te verkorten, maar er is daarna alsnog eindberging van het resterende afval noodzakelijk.

Verschil tussen opslag en berging van radioactief afval

In dit rapport wordt gesproken over zowel opslag als berging van radioactief afval. Opslag (bijvoorbeeld bovengrondse opslag) gaat er van uit dat het afval ooit uit de faciliteit wordt gehaald en is dan ook een tijdelijke manier om het afval te bewaren. Het plaatsen van afval in een berging (bijvoorbeeld geologische berging) gebeurt met de intentie om het afval er niet meer uit te halen.

Afwegingskader voor de beheeropties

De komende decennia is in Nederland nog geen definitieve keuze voor een beheeroptie en locatie voorzien. Daarom heeft dit rapport een abstract karakter, waarbij een kwalitatieve beschrijving van de beheeropties wordt gedaan aan de hand van vier aandachtsgebieden: veiligheid, geologie, economie en ethiek. Deze aandachtsgebieden, waarbij veiligheid de hoogste prioriteit heeft, zijn leidend in de vraag over de haalbaarheid en wenselijkheid van de beheeropties. Voor elk aandachtsgebied zijn criteria geformuleerd op basis waarvan de voor- en nadelen van de beheeropties geïnventariseerd zijn, zie Tabel 1 hierna.

Terugneembaarheid

Uit het oogpunt van mogelijk toekomstig hergebruik en integraal ketenbeheer heeft het kabinet aan een opbergfaciliteit voor afval de eis gesteld dat het radioactieve afval ook op langere termijn terugneembaar is¹.

¹ (Ministerie van VROM, 2002)

Tabel 1 Gebruikte afwegingscriteria

Aandachtsgebied	Afwegingscriteria
Veiligheid	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid ▪ Passieve veiligheidsfuncties ▪ Meervoudige veiligheidsfuncties ▪ Insluiting van het afval ▪ Isolatie van het afval ▪ Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geen of lage migratie grondwater en beperking verspreiding vrijgekomen radionucliden ▪ Homogene en goed te karakteriseren samenstelling laagpakket ▪ Voldoende verbreiding en dikte laagpakket ▪ Geen seismische of vulkanische activiteit ▪ Huidig en toekomstig medegebruik
Economie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten ▪ Ruimtelijke beperkingen
Ethiek	<p>Rechtvaardigheid:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Welzijn ▪ Autonomie ▪ Duurzaamheid

Actief en passief beheer/veiligheid

Regelmatig worden in dit rapport termen als 'actief/passief beheer' of 'actieve/passieve veiligheidsfuncties' genoemd. Actief refereert hierbij aan situaties waarbij menselijke invloed noodzakelijk is om een veiligheidsfunctie of beheer te blijven garanderen. Denk bijvoorbeeld aan een elektronisch ventilatiesysteem of alarm. Passief verwijst naar beheer of veiligheid dat zonder menselijke invloed ook gegarandeerd kan worden door altijd aanwezig zaken, zoals de zwaartekracht of een geologische formatie..

Langdurige bovengrondse opslag

Bovengrondse opslag is voor termijnen van decennia tot 100 jaar een bewezen en vaak toegepaste techniek en is geschikt voor zowel HRA als LMRA. Het langdurig verlengen van een bovengrondse opslag vergt een actief beheer van het afval, wat op de zeer lange termijn² niet is te garanderen. De terugneembaarheid van het afval (de mate waarin je het afval weer veilig terug kunt halen uit de opslag) is goed te realiseren.

Kenmerken langdurige bovengrondse opslag

- Geschikt voor HRA en LMRA
- Actief beheer nodig
- faciliteit dient elke 100 tot 300 jaar vernieuwd te worden

Voor- en nadelen langdurige bovengrondse opslag

Bovengrondse opslag heeft als voordeel dat dit een bewezen techniek is, waarbij het afval goed gemonitord kan worden. Daarnaast is terugneembaarheid makkelijk en tegen lage kosten te realiseren. Toekomstige generaties hebben daardoor de autonomie om het afval te hergebruiken of een andere oplossing voor het radioactief afval te kiezen, bijvoorbeeld door nieuwe technieken op het afval toe te passen. Nadeel van bovengrondse opslag is dat niet te garanderen is dat de keten van actief beheer, die

² Met 'zeer lange termijn' wordt in dit rapport een tijdsperiode van duizenden tot honderdduizenden jaren bedoeld.

noodzakelijk is bij deze opties om de veiligheid continue te waarborgen, ononderbroken blijft. Hierdoor is de veiligheid op de lange termijn niet te garanderen. Er is immers geen geologische laag die als passieve veiligheidsbarrière fungeert. Daarnaast moeten verpakkingen en gebouwen om de 100 tot 300 jaar vervangen worden. Dit levert veiligheidsrisico's op voor toekomstige generaties. Ook leidt dit ertoe dat doorlopende kosten gemaakt moeten blijven worden voor de opslag. Toekomstige generaties dragen de lasten van het afval waarvan ze niet de lusten hebben gehad.

Oppervlakte berging

Bij oppervlakteberging wordt radioactief afval aan of net onder het aardoppervlak geborgen. Het is alleen geschikt voor LMRA dat binnen enkele honderden jaren vervalst. Het is een bewezen en vaak toegepaste techniek, die, in tegenstelling tot bovengrondse opslag, uitgaat van passief beheer van het afval. De terugneembaarheid van het afval is te realiseren.

Kenmerken oppervlakte berging

- Geschikt voor LMRA dat binnen enkele honderden jaren vervalst
- Gaat uit van passief beheer
- Niet de bedoeling dat faciliteit vernieuwd wordt

Voor- en nadelen oppervlakteberging

Oppervlakteberging heeft als voordeel dat dit een bewezen techniek is, waarbij het afval goed gemonitord kan worden. Daarnaast is terugneembaarheid makkelijk en tegen lage kosten te realiseren. Voor LRMA worden geen lasten doorgeschoven naar toekomstige generaties. Nadeel van een oppervlakte berging is dat hier alleen LMRA dat binnen enkele honderden jaren vervalst kan worden opgeslagen en er dus nog een aparte oplossing moet worden gevonden voor het HRA en LMRA dat niet binnen enkele honderden jaren vervalst. Er kan niet gegarandeerd worden bij oppervlakte berging dat de veiligheidsbarrières langer dan enkele honderden jaren in stand blijven. Het is dan ook geen geschikte oplossing voor afval dat niet binnen deze tijd vervalst. Voor radioactief afval met lange halfwaardetijden is oppervlakte berging dan ook geen optie.

Geologische berging (in ondergrondse galerijen of in diepe boorgaten)

Bij geologische berging wordt gebruik gemaakt van een diepe geologische laag om radioactief afval voor zeer lange tijd buiten de levensruimte van de mens te houden. Deze laag biedt een extra veiligheidsfunctie bovenop de technische functies zoals de verpakking en de faciliteiten die bij langdurige bovengrondse opslag en bij oppervlakte berging ook aan de orde zijn.

In ondergrondse galerijen

Geologische berging in ondergrondse galerijen (ondergrondse ruimte met toegangsschacht) is een veel onderzochte en geplande, maar nog incidenteel toegepaste techniek. Terugneembaarheid van het afval is voor een zekere periode te realiseren.

Kenmerken geologische berging in ondergrondse galerijen

- Geschikt voor HRA en LMRA
- Gaat uit van passief beheer
- Niet de bedoeling dat faciliteit vernieuwd wordt

In diepe boorgaten

Geologische berging in diepe boorgaten is in een aantal studies onderzocht, maar nog niet toegepast. Terugneembaarheid is zeer lastig te realiseren.

Kenmerken geologische berging in diepe boorgaten

- Geschikt voor HRA en LMRA
- Gaat uit van passief beheer
- Niet de bedoeling dat faciliteit vernieuwd dient te worden

Voor- en nadelen geologische berging

Voordeel van geologische berging is dat de geologische formatie waar het afval in geborgen wordt een extra veiligheidsbarrière oplevert boven op de technische barrières die bovengrondse opslag en oppervlakteberging ook kennen. Nederland kent hiervoor geschikte geologische formaties (voor zover nu bekend Tertiaire kleilagen en Zechstein steenzout lagen). Er is praktijkervaring met een geologische berging in ondergrondse galerijen (in de VS) en het is een veel onderzochte techniek, die internationaal als veilig wordt beschouwd. Geologische berging in diepe boorgaten is technisch minder ver ontwikkeld en ook nog nergens ter wereld toegepast. Het lijkt vooral geschikt voor kleine hoeveelheden radioactief afval

Na sluiting van een geologische berging is in principe geen actief beheer meer nodig, waardoor daarna geen lasten worden doorgegeven aan toekomstige generaties. De initiële kosten voor geologische berging zijn hoog vergeleken met bovengrondse opslag en oppervlakteberging. Daar staat tegenover dat er, in tegenstelling tot bij bovengrondse opslag, waarschijnlijk beperkter kosten doorgeschoven naar toekomstige generaties. Bij geologische berging in ondergrondse galerijen is terugneembaarheid voor een bepaalde periode goed te realiseren, hoewel dit wel duurder is dan bij bovengrondse opslag en oppervlakteberging. Bij geologische berging in diepe boorgaten is terugneembaarheid zeer lastig te realiseren, als het al mogelijk is.

Multinationale berging

Wanneer verschillende landen samen een eindberging realiseren heet dat multinationale berging. Dit is een manier om de eindberging te organiseren en is geen technische oplossing. Er moet alsnog gekozen worden voor één van de beheeropties die hiervoor genoemd zijn. Er bestaat nog geen intensieve internationale samenwerking voor het realiseren van een eindberging. Wel wordt samengewerkt aan onderzoek naar multinationale oplossingen, waaronder een strategie voor een gezamenlijke afvalbeheersorganisatie.

Kenmerken multinationale berging

- Organisatorische maatregel
- Keuze voor een beheeroptie moet alsnog genomen worden

Voor- en nadelen multinationale berging

Multinationale berging is geen uitwerking van een technische oplossing maar een organisatorische oplossing rond een beheeroptie. Deze heeft als voordeel dat landen hun kennis kunnen bundelen en een bredere keuze aan locaties beschikbaar is. Omdat het aantal eindbergingen afneemt, is daarmee ook het totale veiligheidsrisico kleiner, hoewel het risico in de directe omgeving van de multinationale berging door de grotere hoeveelheid afval kan toenemen. Ander voordeel is dat de kosten voor de eindberging gedeeld worden. Nadeel is dat afval over langere afstanden getransporteerd moet worden en dat landen onderling goede afspraken moeten maken over de overdracht van verantwoordelijkheden op de lange termijn. Multinationale berging kan leiden tot het beperken van de autonomie van zowel de huidige als van toekomstige generaties.

Partitie en transmutatie (P&T)

Partitie en transmutatie is een techniek die tot doel heeft om de levensduur van radioactief afval te verkorten. Partitie en transmutatie maakt integraal deel uit van de brandstofcyclus van kernenergie. Partitie is het scheiden van herbruikbare en niet-herbruikbare elementen uit gebruikte splijtstof (brandstof). Transmutatie is het bewerken van de niet-herbruikbare elementen, waardoor deze vervallen tot stoffen met een kortere levensduur. Deze techniek is op laboratorium schaal toegepast. Naar verwachting is er nog enkele decennia onderzoek nodig om deze op grote schaal te kunnen toepassen. Na P&T is nog steeds eindberging van het resterende radioactief afval noodzakelijk. De levensduur is echter voor een deel van het afval aanzienlijk verkort. In potentie zo'n vijfhonderd tot duizend jaar. Partitie wordt op beperkte schaal al toegepast op het radioactieve afval uit de kerncentrale in Borssele. Het uranium en plutonium (circa 95% van het totale afval) uit het afval wordt gescheiden en hergebruikt en de rest wordt verglaasd en afgevoerd als afval. Dit verglaasde afval zou in de toekomst alleen tegen hoge kosten in aanmerking komen voor verdere transmutatie door de manier waarop het verpakt is.

Kenmerken Partitie en Transmutatie

- Technieken die mogelijk de levensduur van het radioactief afval kunnen verkorten
- Keuze voor een beheeroptie moet alsnog genomen worden

Voor- en nadelen partitie en transmutatie

Partitie en transmutatie is een techniek die nog in ontwikkeling is en naar verwachting nog vele decennia onderzoek vergt voordat het op grote schaal kan worden toegepast. Groot nadeel is dat nog niet met zekerheid gesteld kan worden dat P&T in de toekomst op industriële schaal toegepast kan worden. Partitie en transmutatie leidt tot een kortere levensduur van HRA. Voordeel is dat dit HRA daardoor met minder risico's voor de verre toekomst in een eindberging kan worden geborgen. Nadeel is dat bij het toepassen van partitie en transmutatie ook weer LMRA wordt geproduceerd en dat de verbruikte splijtstoffen die momenteel verglaasd worden opgeslagen alleen tegen hoge kosten nog geschikt zijn voor P&T. Daarnaast vereist P&T een continue splijtstofcyclus. Door de huidige praktijk van het verglazen van verbruikte splijtstoffen en door het lange ontwikkeltraject van P&T is veruit het grootste deel van het in Nederland voorziene radioactieve afval niet geschikt voor deze optie.

Samenvatting voor- en nadelen van de beheeropties

De tabel hierna geeft systematisch en in trefwoorden de voor- en nadelen per beheeroptie en vanuit de verschillende aandachtsgebieden weer. Multinationale berging en partitie en transmutatie zijn in zichzelf geen beheeropties, maar kunnen wel invloed hebben op de fysieke beheeropties. Daarom wordt in de tabel de invloed van een keuze voor deze opties op de fysieke opties gegeven.

Tabel 2 Samenvatting voor- en nadelen beheeropties

	Langdurige bovengrondse opslag	Oppervlakte berging	Geologische berging in ondergrondse galerijen	Geologische berging in diepe boorgaten
Geschiktheid voor type radioactief afval	LMRA en HRA	LMRA (dat binnen enkele honderden jaren vervalt)	LMRA en HRA	LMRA en HRA (beperkte volumes)
Veiligheid				
<ul style="list-style-type: none"> Volwassenheid techniek van de beheeroptie Geologie extra veiligheidsbarrière boven op technische barrières Actief beheer op lange termijn geeft veiligheidsrisico door afhankelijkheid expertise en sociale stabiliteit Opslag/berging gevoelig voor invloeden van buitenaf (klimatologische en menselijke factoren) 	<ul style="list-style-type: none"> bewezen en vaak toegepast niet aanwezig ja ja 	<ul style="list-style-type: none"> bewezen en vaak toegepast mogelijk beperkt aanwezig nee beperkt 	<ul style="list-style-type: none"> in ontwikkeling en beperkt toegepast aanwezig nee zeer minimaal 	<ul style="list-style-type: none"> in ontwikkeling, nog niet toegepast aanwezig nee zeer minimaal
Geologie				
<ul style="list-style-type: none"> Bij locatiekeuze wordt rekening gehouden met seismische activiteit en vulkanisme Geschikte geologische formaties lijken aanwezig in Nederland 	<ul style="list-style-type: none"> ja niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> ja niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> ja ja 	<ul style="list-style-type: none"> ja ja
Economie				
<ul style="list-style-type: none"> Kosten voor realiseren beheeroptie Kosten voor beheer, onderhoud en monitoring Kosten voor terugneembaarheid Bijkomende kosten 	<ul style="list-style-type: none"> laag, maar terugkerend (om 100 – 300 jaar) hoog laag niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> middelmatig middelmatig middelmatig HRA berging 	<ul style="list-style-type: none"> hoog tot sluiting hoog, daarna beperkt oplopend in tijd niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> hoog beperkt zeer hoog niet van toepassing
Ethiek				
<ul style="list-style-type: none"> Effect op welzijn huidige³ en toekomstige generaties Autonomie toekomstige generaties andere oplossing afval (terugneembaarheid) Balans tussen baten (mogelijk hergebruik) en lasten 	<ul style="list-style-type: none"> beiden, vooral toekomstig groot middelmatig, veel lasten toekomstig generaties 	<ul style="list-style-type: none"> vooral huidige generaties groot, maar afnemend middelmatig, want alleen voor LMRA 	<ul style="list-style-type: none"> vooral huidige generaties middelmatig en afnemend goed 	<ul style="list-style-type: none"> vooral huidige generaties zeer minimaal middelmatig, geen baten toekomstig generaties
Multinationale berging				
<ul style="list-style-type: none"> Vermindert de kosten voor de realisatie van een eindbergingsconcept (door gezamenlijk onderzoek etc) meer keuze in geologische formatie en/ of locatie 	<ul style="list-style-type: none"> gedeeltelijk ja 	<ul style="list-style-type: none"> gedeeltelijk ja 	<ul style="list-style-type: none"> grotendeels (gezamenlijke bouw) ja 	<ul style="list-style-type: none"> gedeeltelijk ja
P&T				
<ul style="list-style-type: none"> Vergroot potentie om optie als eindberging te gebruiken. Verbeterd veiligheid beheeropties door verkorte levensduur afval 	<ul style="list-style-type: none"> ja mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> ja mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> nee beperkt 	<ul style="list-style-type: none"> nee beperkt

³ Zoals beschreven in de begrippenlijst wordt met 'huidige generatie' de generatie, die een eventueel gekozen eindoplossing aan zal leggen, bedoeld.

Begrippen en afkortingen

Actief beheer/actieve veiligheid	Beheer of veiligheid waarbij menselijke tussenkomst noodzakelijk is om het te blijven garanderen, zoals een elektronisch ventilatiesysteem of alarm.
Actiniden	Scheikundige elementen met atoomnummer 90 t/m 103. Al deze elementen zijn radioactief en vervallen naar lagere elementen.
Bentoniet	Klei-achtig materiaal dat onder andere wordt gebruikt om boorgaten af te dichten.
Biosfeer	Deel van de aarde (aardkorst, aardoppervlak, atmosfeer) waar levende organismen zich bevinden.
Criticaliteit	Moment waarop er in een kernreactie genoeg neutronen zijn om een de kernreactie zichzelf te laten versterken en door te laten gaan.
Commissie m.e.r.	Commissie voor de milieueffectrapportage
COVRA	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval
EZ	Ministerie van Economische Zaken
HABOG	Hoogradioactief Afval Behandelings- en OpslagGebouw (bij COVRA)
Halfwaardetijd	Door het uitzenden van radioactieve straling veranderen de atoomkernen van radioactieve stoffen. De tijd waarin de hoeveelheid van deze radioactieve atomen met de helft afneemt, noemt men de halfwaardetijd of halveringstijd.
HRA	Hoogradioactief Afval
Huidige generatie	Generatie die een eventueel gekozen eindoplossing aan zal leggen.
IAEA	International Atomic Energy Agency
Isotoop	Isotopen zijn atomen van hetzelfde element (evenveel protonen) met een verschillende opbouw van de atoomkern (verschillend aantal neutronen).
LMRA	Laag- en middelradioactief Afval

LOG	Laag en middelradioactief OpslagGebouw (bij COVRA)
M.e.r.-procedure	Milieueffectrapportage procedure
MER	Milieueffectrapport
Metallisch	De eigenschappen van metaal hebbend
Nationaal programma	Elke EU-lidstaat werkt aan een nationaal programma rond het beheer van radioactief afval. De lidstaten moeten hun programma uiterlijk in augustus 2015 aan de Europese Commissie voorleggen.
OPERA	Onderzoek Programma Eindberging Radioactief Afval
Opwerking van radioactief afval	Het terugwinnen van bruikbare stoffen uit verbruikte splijtstof
Passief beheer/passieve veiligheid	Beheer of veiligheid dat zonder menselijke tussenkomst ook gegarandeerd wordt door gebruik te maken van altijd aanwezige zaken, zoals de zwaartekracht of een geologische formatie.
Permeabiliteit	Doorlatendheid van een bepaalde stof.
Proliferatie	Verspreiding. Het non-proliferatieverdrag is bedoeld om de verspreiding van kernwapens een halt toe te roepen.
Radionucliden	Instabiele nuclide die spontaan zonder invloed van buitenaf vervalst onder uitzending van straling.
Rapport Verkenning opties voor het beheer op de lange termijn	Verkennde studie naar opties voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen op de lange termijn
Sorptie	De opname van materiaal aan het oppervlak door adsorptie of absorptie.
Splijtstof	Grondstoffen voor kernenergie zoals uranium. Deze stoffen worden in een kernreactor gespleten, waarbij energie vrij komt.
Verbreiding	Horizontale uitbreiding
ZELA	Zeer Laag Radioactief Afval

Deel A

1

Introductie

Het Rapport verkennende studie naar opties voor het beheer op de lange termijn wordt opgesteld ten behoeve van het nationale programma. Deze studie geeft een overzicht van de voor Nederland geschikte eindbergingsopties. En wat de voor- en nadelen daarvan zijn op de zeer lange termijn. Vanuit de Europese Unie is de verplichting opgelegd om een nationaal programma op te stellen en daarin te beschrijven hoe radioactief afval, nu en in de toekomst, veilig en verantwoord wordt beheerd⁴. In dit hoofdstuk wordt eerst het doel en de achtergrond van het nationale programma en vervolgens van dit rapport toegelicht. Voor een goed begrip van het rapport wordt aanbevolen de leeswijzer in paragraaf 1.3 door te nemen.

1.1 NATIONAAL PROGRAMMA

In Nederland wordt voor zeer diverse toepassingen gebruik gemaakt van technologieën waarbij radioactief afval en verbruikte splijtstof⁵ ontstaat. Dit afval ontstaat voor het grootste deel bij de opwekking van elektriciteit in kerncentrales, maar ook bij de productie en het gebruik van medische radioactieve isotopen in ziekenhuizen, werkzaamheden in de olie- en gasindustrie en onderzoekstoepassingen. Conform het Nederlandse beleid (zie verder paragraaf 2.2) wordt radioactief afval ten minste 100 jaar bovengronds opgeslagen⁶ bij de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) in Zeeland. Daarna is eindberging voor het afval voorzien.

Vanuit de Europese Unie is de verplichting opgelegd om een nationaal programma op te stellen en daarin te beschrijven hoe radioactief afval, nu en in de toekomst, veilig en verantwoord wordt beheerd.⁷ Nederland moet, net als de andere EU-Lidstaten, uiterlijk 23 augustus 2015 het nationale programma voor leggen aan de Europese Commissie⁸.

Het ministerie van Economische Zaken stelt het nationale programma op. In het nationale programma wordt het huidige Nederlandse beleid over het beheer van radioactief afval, dat de afgelopen decennia ontwikkeld is, gebundeld en in één document beschreven. In Nederland wordt al geruime tijd hetzelfde beleid gevoerd op het gebied radioactief afval. Ook het nationale programma introduceert geen nieuw beleid, maar zet het bestaande beleid op een rijtje, waaronder het beleid op de eindberging van het radioactief afval in Nederland.

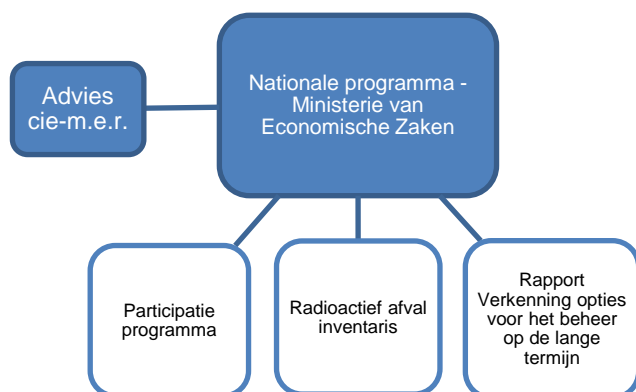
⁴ (Europese Unie, 2011)

⁵ Waar in dit rapport wordt verwezen naar radioactief afval wordt hiermee tevens verbruikte splijtstof bedoeld.

⁶ (Tweede Kamer der Staten Generaal, 1983-1984)

Om een actuele beschrijving te kunnen geven van het beleid inzake het beheer van radioactief afval, is ten behoeve van het nationale programma een drietal onderzoeken uitgevoerd, die als achtergrond informatie voor het nationale programma dienen (zie ook Figuur 1):

1. Participatie programma, opgesteld door het Rathenau instituut.
2. De inventaris van de huidige en toekomstige hoeveelheid radioactief afval door COVRA; en
3. voorliggende verkennende studie naar opties voor het beheer van radioactief afval (hierna: Rapport verkenning opties voor het beheer op de lange termijn).



Figuur 1 Onderdelen bij het nationale programma

ad 1 Participatie programma

In Nederland moet nog besluitvorming plaatsvinden over de wijze waarop eindberging van radioactief afval zal moeten gaan plaatsvinden. Het nationale programma voorziet nog niet in deze besluitvorming; Besluitvorming hierover vindt op een later moment plaats (zie ook figuur 2). Het participatie programma heeft tot doel in kaart te brengen welk proces het beste gevolgd kan worden om de samenleving te betrekken bij toekomstige besluitvorming over de eindberging van radioactief afval in Nederland.

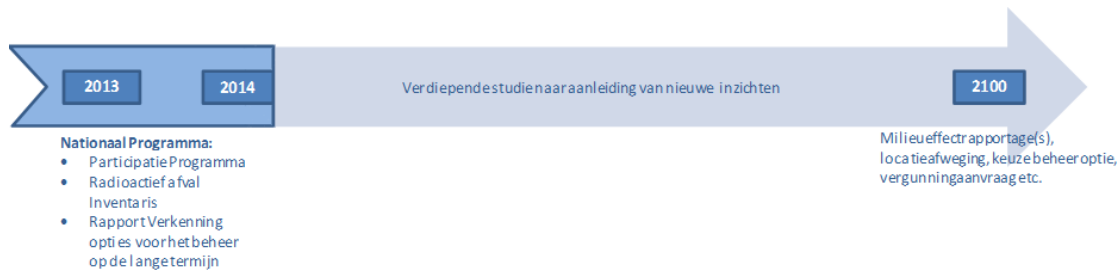
ad 2 Radioactief afval inventaris

Om het radioactief afval veilig en verantwoord te beheren moet er een goed beeld zijn van de huidige en toekomstige hoeveelheid radioactief afval in Nederland. Deze radioactief afval inventaris is gemaakt door COVRA, de huidige beheerder van het radioactief afval in Nederland en wordt gelijktijdig met voorliggend rapport en het nationale programma gepubliceerd.

ad 3 Rapport verkenning opties voor het beheer op de lange termijn

Een derde achtergrond document bij het nationale programma is voorliggend Rapport. Het doel van dit Rapport verkenning opties voor het beheer op de lange termijn wordt in de paragraaf hierna toegelicht.

De besluitvorming over de eindberging van radioactief afval vindt pas plaats op langere termijn. Figuur 2 geeft aan welke stappen er op dit moment genomen zijn, en welke stappen er in de komende honderd jaar zijn voorzien. In paragraaf 1.2 is een toelichting opgenomen op het Rapport verkenning opties voor het beheer op de lange termijn en het projectplan dat hiertoe als eerste stap is opgesteld.



Figuur 2 Huidige en (mogelijke) toekomstige stappen in keuzeopties voor het beheer op de lange termijn

1.2 RAPPORT VERKENNING OPTIES VOOR HET BEHEER OP DE LANGE TERMIJN

Doel

In aansluiting op het participatie programma heeft het ministerie van Economische Zaken gemeend dat de publicatie van het nationale programma een goed moment is om de samenleving te betrekken bij vaak genoemde opties voor het beheer van radioactief afval op de lange termijn. Dit rapport brengt deze opties voor het beheer van radioactief afval in beeld, evenals de voor- en nadelen daarvan.

Dit rapport heeft een abstract karakter. Het is de eerste stap in een reeks steeds concreter wordende stappen (zie ook Figuur 2) die de komende 100 jaar worden genomen om tot een definitieve keuze voor een beheeroptie en locatie daarvoor te komen. Omdat op dit moment een locatiekeuze nog niet aan de orde is en omdat (technische) details van beheeropties pas over tientallen jaren definitief worden uitgewerkt, wordt in dit rapport een afweging op hoofdlijnen gemaakt.

Projectplan en advies Commissie m.e.r.

Als startdocument voor dit rapport is het 'Projectplan verkennende studie naar de langetermijnbeheeropties voor radioactief afval en verbruikte splijtstoffen' opgesteld. In het projectplan is de aanpak voor de verkenning beschreven, evenals het proces dat doorlopen wordt. Hoewel dit Rapport geen verplichting kent voor het doorlopen van een procedure voor de milieueffectrapportage (verder: m.e.r.-procedure), heeft er toch een onafhankelijke toetsing door de Commissie voor de milieueffectrapportage (verder: Commissie m.e.r) plaatsgevonden en is er een mogelijkheid tot inspraak geboden.

Het Projectplan heeft van 11 oktober 2013 tot en met 21 november 2013 ter inzage gelegen bij het Ministerie van Economische Zaken. Een ieder heeft hierop zijn zienswijzen kunnen indienen. Deze zienswijzen zijn zoveel mogelijk verwerkt in dit rapport en zijn tevens door de Commissie m.e.r. verwerkt in haar advies (zie onderstaande toelichting).

Commissie-m.e.r.

Op basis van het Projectplan is de Commissie m.e.r. om advies gevraagd over de reikwijdte en detailniveau van dit rapport. Anders dan in het Projectplan was vermeld is in samenspraak met de Commissie m.e.r. overeengekomen dat hun advies niet alleen gericht is op dit Rapport verkenning opties voor het beheer op de lange termijn, maar op het gehele nationale programma. Resultaat is dat in het advies van de Commissie m.e.r. bijvoorbeeld ook wordt ingegaan op het participatieprogramma en dat het advies meer op procesniveau is dan de gebruikelijke (inhoudelijke) adviezen van de Commissie m.e.r.

In dit Rapport is als gevolg van het advies van de Commissie-m.e.r. op een aantal punten afgeweken van het Projectplan. Op advies van de Commissie m.e.r. worden ook 'multinationale berging' en 'partitie en transmutatie' als mogelijke beheeropties meegenomen in de verkenning en wordt per beheeroptie een beschrijving gegeven van de bouw- en operationele fase. Een verdere toelichting en uitwerking van de beheeropties is opgenomen in hoofdstuk 3 van dit rapport.

1.3 LEESWIJZER

Dit rapport is opgesplitst in twee delen: een deel A en een deel B. Deel A is bedoeld voor de geïnteresseerde burger en bestuurder die een overzicht wil krijgen van de mogelijke beheeropties voor radioactief afval met haar voor- en nadelen op hoofdlijnen. Deel B is bedoeld voor diegene die meer achtergrondinformatie wil krijgen van de voor- en nadelen van de verschillende beheeropties die in dit rapport worden beschouwd als mogelijk geschikte beheeropties.

Deel A

In hoofdstuk 2 wordt op hoofdlijnen de achtergrond geschetst van radioactief afval. Er wordt zowel een overzicht van het radioactief afval in Nederland gegeven, als een overzicht van het aanwezige beleid rondom dit type afval. Ook reeds uitgevoerde onderzoeksprogramma's zijn te vinden in hoofdstuk 2. Hoofdstuk 3 geeft een overzicht van de beheeropties die in deze studie zijn afgevallen, en de beheeropties die in deze verkenning worden beschouwd en om die reden in meer detail worden beschreven. Ook de huidige situatie (opslag bij COVRA) wordt toegelicht. De aandachtsgebieden (veiligheid, geologie, economie en ethiek) waarop de beheeropties zijn beoordeeld, worden geïntroduceerd in hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk zijn ook de gehanteerde afwegingskaders voor de aandachtsgebieden opgenomen. Deel A eindigt met een samenvatting van de voor- en nadelen van de beheeropties in hoofdstuk 5. Dit hoofdstuk is een samenvatting van deel B.

Deel B

In deel B worden de voor- en nadelen van de verschillende beheeropties stuk voor stuk beschreven aan de hand van de vier aandachtsgebieden. Elk hoofdstuk wordt afgesloten met een conclusie. In hoofdstuk 6 wordt begonnen met langdurige bovengrondse opslag. Oppervlakteberging volgt in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 worden twee vormen van geologische berging afgewogen; berging in ondergrondse galerijen en berging in diepe boorgaten. De twee laatste beheeropties zijn beschreven in hoofdstuk 9 en 10: Multinationale berging en partitie en transmutatie.

Samenvatting

Voorin het rapport is een samenvatting opgenomen. Daarin is de belangrijkste informatie uit deel a en deel b van het rapport in het kort beschreven.

Begrippenlijst

Dit rapport gaat over een technisch thema en bevat daarom veel vaktermen en afkortingen. Voor een overzicht van en toelichting op gebruikte begrippen en vaktermen in dit rapport wordt verwezen naar de begrippen- en afkortingenlijst voorin het rapport.

Referentielijst

Achterin dit rapport staat een alfabetische referentielijst waar de gebruikte bronnen in dit rapport beschreven staan. De gebruikte bronnen staan in de tekst met een voetnoot aangegeven en met een auteur en jaartal onder aan de pagina vernoemd.

2

Achtergrond

Dit hoofdstuk geeft inzicht in het radioactief afval dat in Nederland aanwezig is, de karakteristieken daarvan en de manier waarop het afval nu opgeslagen wordt (§2.1). Daarnaast wordt het beleid dat gevoerd wordt op het gebied van radioactief afval beschreven en is op rij gezet welke onderzoeksprogramma's er zijn geweest vanaf de jaren '70 (§2.2 en 2.3).

2.1 RADIOACTIEFAFVAL IN NEDERLAND

Het Nederlandse beleid voorziet vooralsnog in het ten minste 100 jaar bovengronds opslaan van radioactief afval, gevolgd door eindberging. Dit geldt zowel voor het hoogradioactief afval (HRA) als voor het laag- en middelradioactief afval (LMRA) wat na de langdurige bovengrondse opslagperiode nog niet vervallen is. De paragrafen hierna beschrijven de karakteristieken van de verschillende typen radioactief afval.

Hoogradioactief Afval

Op dit moment is in Nederland bij COVRA 85,6 m³ hoogradioactief afval aanwezig⁹. Dit afval bestaat voornamelijk uit verglaasd opwerkingsafval (afval dat na opwerking wordt verpakt in glas) en gecompecteerd metallisch afval met een zeer lange levensduur uit de kernenergiecentrales Borssele en Dodewaard. Daarnaast betreft het een gedeelte van het afval dat ontstaat bij de productie van medische isotopen als ook het verbruikte splijtstof afkomstig uit de onderzoeksreactoren in Petten en Delft. Deze verbruikte splijtstof uit de onderzoeksreactoren bevat naast splijtingsproducten in hogere mate de zwaardere actiniden, waaronder uranium en plutonium en kent daarom een langere levensduur dan de opgewerkte splijtstofstaven.

Laag- en middelradioactief Afval

Aan laag- en middelradioactief afval ligt in Nederland circa 11.000 m³ opgeslagen bij COVRA (exclusief NORM-afval, zie volgende paragraaf)¹⁰. Van deze hoeveelheid afval is ongeveer de helft afkomstig van de kernenergiecentrales Borssele en Dodewaard. Een gedeelte van het laag- en middelradioactief afval zal in de komende 100 jaar vervallen tot onder de vrijgavegrens en zal daarom niet in een eindberging hoeven te worden gebracht. LMRA dat niet binnen enkele honderden jaren vervalt noemen we in het vervolg van dit rapport langlevend LMRA.

⁹ (COVRA, 2013)

¹⁰ (COVRA, 2013)

Radioactief verval en halfwaardetijd

Radioactief verval is het verschijnsel waarbij een isotoop (dit is de aanduiding voor een scheikundig element met hetzelfde aantal protonen, en dus atoomnummer, maar een verschillend aantal neutronen) verandert in een ander isotoop doordat een elektron, proton of een alfadeeltje wordt uitgestoten of doordat een elektron of proton wordt opgenomen. Bij radioactief verval speelt de zogenaamde halfwaardetijd een belangrijke rol. De halfwaardetijd is de tijd waarna van de oorspronkelijke hoeveelheid stof nog precies de helft over is. Dus hoe sneller het radioactief verval van een stof, hoe korter de halfwaardetijd is. Hoe langer de halfwaardetijd, hoe langer een radioactieve stof zal moeten worden opgeslagen om te voorkomen dat de mens in contact komt met deze stof.

NORM Afval

Een aparte vorm van laag- en middelradioactief afval is NORM afval. NORM is het acroniem van "Naturally Occuring Radioactive Material". Het betreft hier afval met een verhoogde concentratie natuurlijke radioactiviteit, zoals calcinaat en verarmd uranium. Calcinaat ontstaat bij de verwerking van ertsen en bevat geconcentreerde natuurlijke radioactieve stoffen, zoals polonium, lood, en bismut. Dit zijn vervalproducten van de uranium en thoriumreeksen. Verarmd uranium is een bijproduct dat ontstaat bij de verrijking van uranium, dat wordt gebruikt bij de productie van reactorbrandstof. Zo ontstaat NORM afval bij processen waarbij grote hoeveelheden natuurlijke grondstoffen verwerkt worden.

Net als bij het andere laag- en middelradioactief afval zal een gedeelte van het NORM afval vervallen tijdens de komende honderd jaar. Calcinaat vervalt binnen de termijn van honderd jaar. Verarmd uranium niet. Dit zal, als het niet wordt ingezet voor andere doeleinden (zoals hergebruik), in de eindberging worden geborgen. Op dit moment is circa 17.000 m³ NORM afval bij COVRA opgeslagen¹¹.

ZELA

Een laatste categorie radioactief afval is Zeer Laag Radioactief Afval (ZELA). De radioactiviteit van dit afval is zo laag dat het via de weg van regulier afval kan worden verwerkt (storten)¹². Concreet gaat het in Nederland om NORM afval met een activiteitsconcentratie van minder dan 10 maal de vrijstellingsgrenzen. Deze mogen worden gestort op inrichtingen die aangewezen zijn voor het storten van gevaarlijke afvalstoffen. Inrichtingen voor stort van gevaarlijke afvalstoffen zijn ook aangewezen als inrichtingen voor ontvangst van radioactieve afvalstoffen van natuurlijke bronnen van ioniserende straling (Besluit stortplaatsen en stortverboden afvalstoffen, artikel 11k). Op dit moment maken twee inrichtingen gebruik van deze mogelijkheid: Afvalzorg Deponie in Nauema en Van Gansewinkel Minerals op de Maasvlakte in Rotterdam.

2.2 BELEID TEN AANZIEN VAN HET BEHEER RADIOACTIEF AFVAL

Het huidige Nederlandse beleid voor het beheer van radioactief afval is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

- Minimalisatie van het ontstaan van radioactief afval.
- Een veilig beheer van radioactief afval (volgens het IBC principe: Isoleren, Beheren, Controleren).
- Geen onredelijke lasten op de schouders van latere generaties.
- De veroorzakers van het radioactief afval dragen de kosten van het beheer ervan.

¹¹ (COVRA, 2013)

¹² Met ingang van 1 april 2008 gelden de bepalingen met betrekking tot stortplaatsen van het Bssa ook voor zeer laag radioactief afval. Dit betekent met name dat voor ZELA dezelfde eisen met betrekking tot acceptatie gelden als voor ander afval dat op de stortplaats wordt aangeboden (Ministerie van IenM, 2010).

In aanvulling hierop geldt dat de exploitant van een reactor zelf mag bepalen of de verbruikte splijtstof (in een installatie in het buitenland) wordt opgewerkt, of dat deze “direct” als radioactief afval naar COVRA wordt afgevoerd. In geval van opwerking zal uiteindelijk het hoogradioactieve opwerkingsafval naar COVRA worden terug gebracht. Indien niet wordt opgewerkt, wordt de verbruikte splijtstof beschouwd als radioactief afval. Splijtstof uit energiecentrales (Borssele) wordt opgewerkt. Afval uit onderzoeksreactoren niet.

Opwerken van splijtstof

In de gebruikte splijtstofstaven van de kernenergiecentrale Borssele zitten nog bruikbare stoffen. De exploitant van de kerncentrale Borssele (EPZ) laat deze stoffen terugwinnen (dit heet ‘opwerken’). Daarvoor gaat de gebruikte splijtstof naar een opwerkingsfabriek (Cap La Hague in Frankrijk). Daar worden de bruikbare bestanddelen (95%) gescheiden van radioactief afval om te kunnen worden hergebruikt. Het radioactief afval (5%) worden verglaasd en teruggezonden naar Nederland om bij de COVRA te worden opgeslagen¹³. COVRA ziet de volgende voordelen van opwerken¹⁴:

- huidige installaties zijn geschikt voor de verwerking en opslag van het HRA afkomstig van opwerking;
- circa 96% van de bestraalde splijtstof wordt hergebruikt;
- het voor eindberging dominante nuclide plutonium wordt verwijderd;
- bij het ontwerpen en fabriceren van splijtstofelementen wordt primair rekening gehouden met de eisen voor veilig gebruik, het lange termijn gedrag van bestraalde splijtstof in de afvalfase is daaraan ondergeschikt;
- het verglaasde afvalproduct is optimaal ontworpen als eindproduct voor eindberging.

Gedurende de bovengrondse opslag periode worden de benodigde financiële middelen gespaard voor het realiseren van een eindberging doordat deze kosten worden verwerkt in de tarieven die de aanbieders van het afval betalen op het moment dat zij het afval overdragen aan COVRA (“de vervuiler betaalt”). Ook wordt in deze periode onderzoek naar eindberging verricht. Voor de eindberging voor radioactief afval is in het beleid de eis gesteld dat deze terugneembaar dient te zijn, zolang als dat noodzakelijk wordt geacht.

Terugneembaarheid

Uit het oogpunt van mogelijk toekomstig hergebruik en integraal ketenbeheer heeft het kabinet aan een opbergfaciliteit voor afval de eis gesteld dat het radioactieve afval ook op langere termijn terugneembaar is¹⁵.

2.3 ONDERZOEKSPROGRAMMA'S

In het verleden is in Nederland een aantal onderzoeksprogramma's uitgevoerd naar het beheer op de lange termijn van radioactief afval. In deze paragraaf worden de belangrijkste beschreven.

OPLA en CORA

In 1985 heeft de Nederlandse regering een onderzoekprogramma gestart naar de mogelijkheden van verwijdering van radioactief afval in een berging in zoutformaties in Nederland, het OPLA programma. Dit programma maakte deel uit van het Integraal Landelijk Onderzoek Nucleair Afval (ILONA). Na onderzoeksprogramma OPLA (Opslag op Land) startte in 1995 een nieuwe onderzoeksfase, die van CORA (Commissie Onderzoek Radioactief Afval).

¹³ (Rijksoverheid, 2014)

¹⁴ (COVRA, 2008)

¹⁵ (Ministerie van VROM, 2002)

Het onderzoek van CORA concentreerde zich op de uitwerking van terugneembare bergingsmethoden, zowel ondergronds voor meerdere opberggesteenten als bovengronds en deze qua veiligheid en beheersbaarheid onderling te vergelijken¹⁶.

OPERA

Het primaire doel van het lopende onderzoeksprogramma OPERA is de ontwikkeling van Safety Cases voor een nationale eindbergingsfaciliteit voor radioactief afval in de in Nederland aanwezige gastgesteenten, steenzout en Boomse Klei. Het doel van deze Safety Case is om te laten zien of veilige, langetermijnberging van radioactief afval in Nederland mogelijk is. Naast langetermijnveiligheid, zal binnen OPERA de technische haalbaarheid van het eindbergingsconcept in Boomse Klei verder uitgediept worden¹⁷. Ook zullen actuele kostenschattingen voor de bergingen in beide gastgesteentes gemaakt worden. Andere aspecten zoals de operationele veiligheid, een verdere detaillering van het ontwerp of de keuze van een geschikt gastgesteente of locatie zijn vraagstellingen met minder prioriteit. Deze horen in een latere fase en zullen daarom binnen OPERA niet uitgewerkt worden¹⁸.

De resultaten van OPERA worden in 2016 verwacht en zullen om die reden niet worden meegenomen in dit rapport. Zodra de resultaten bekend zijn worden deze gepubliceerd op de website van COVRA (www.covra.nl).

¹⁶ (Tweede Kamer der Staten Generaal, 2002)

¹⁷ Zie de outline: (Verhoef, Neeft, Grupa, & Poley, 2011)

¹⁸ (Verhoef, Meerjarenplan OPERA, 2011)

3

Beheeropties

Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de van opties voor het beheer op de lange termijn die in dit rapport onderzocht worden. In het projectplan¹⁹ is aangegeven waarom dit de realistische beheeropties zijn die met elkaar worden vergeleken. In het projectplan vielen Partitie en Transmutatie en Multinationale berging onder de afgevallen beheeropties. Deze zijn echter in dit rapport toegevoegd naar aanleiding van advies van de Commissie m.e.r.²⁰. Voor elke beheeroptie worden de karakteristieken van de opslag of eindberging beschreven en de technische uitgangspunten die gehanteerd worden bij het beschrijven van de voor- en nadelen van deze opties in de hoofdstukken 6 tot en met 10. In paragraaf 3.8 wordt toegelicht welke beheeropties in dit rapport niet verder onderzocht worden en waarom niet.

3.1 AFBAKENING BEHEEROPTIES

In Tabel 3 is beschreven welk type afval kan worden opgeslagen in de verschillende beheeropties. Deze beheeropties worden verder toegelicht in paragraaf 3.3 tot en met 3.7.

Tabel 3 Oplossend vermogen van beheeropties.

	HRA	LMRA
Langdurige bovengrondse opslag	X	X
Oppervlakteberging		X*
Geologische berging in ondergrondse galerijen	X	X
Geologische berging in diepe boorgaten	X	X
Multinationale berging	X	X
Partitie en transmutatie	X	

*Voor LMRA dat binnen enkele honderden jaren verval

Een aantal opties voor berging op de lange termijn worden niet reëel geacht in Nederland:

- Storten in zee.
- Dump in ijskap.
- Directe injectie.
- Fusie met gastgesteente.
- Dump in de ruimte.
- Storten in een oude mijn.

Deze zijn in het projectplan afgevallen op basis van internationale normen en waarden. In paragraaf 3.8 worden dit nogmaals kort toegelicht.

¹⁹ (ARCADIS, 2013b)

²⁰ (Commissie voor de milieueffectrapportage, 2014)

Verschil tussen opslag en berging van radioactief afval

In dit rapport wordt gesproken over zowel opslag als berging van radioactief afval. Opslag (bijvoorbeeld bovengrondse opslag) gaat er per definitie van uit dat het afval er ooit uit wordt gehaald en is dan ook altijd een tijdelijke manier om het afval te bewaren. Na plaatsen van afval in een (eind)berging (bijvoorbeeld geologische berging) is er geen intentie om het afval er uit te halen.

3.2 HUIDIGE SITUATIE: 100 JAAR BOVENGRONDSE OPSLAG

Radioactief afval wordt in Nederland momenteel bovengronds opgeslagen en beheerd door COVRA. De gebouwen zijn zo ontworpen dat een interim-opslagperiode van minstens 100 jaar mogelijk is. Gedurende die periode kunnen de financiële middelen worden gespaard die nodig zijn voor de realisatie van een eindberging en is er voldoende tijd om het onderzoek te doen dat nodig is om een faciliteit voor eindberging te kunnen realiseren. Het ontbreken van natuurlijke passieve barrières zoals een stabiele geologische laag wordt opgevangen door een actief beheer en monitoring van alle veiligheidsfuncties van de faciliteiten.

Activiteiten COVRA

De huidige activiteiten van COVRA bestaan uit het verzamelen, verwerken en langdurig opslaan van radioactief afval. Het betreft zowel laag- en middelradioactief afval (LMRA) als hoogradioactief afval en bestraalde splijtstof (HRA).

Hoog Radioactief Afval (HRA)

Het hoogradioactief afval wordt bij COVRA opgeslagen in het Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslaggebouw (HABOG). Naast hoogradioactief (opwerkings)afval worden ook verbruikte splijtstofelementen van de Nederlandse onderzoeksreactoren en de filters afkomstig van de productie van medische isotopen opgeslagen in het HABOG. Dit gebouw is bestand tegen allerlei extreme invloeden van buitenaf zoals windhozen, gaswolkexplosies, aardbevingen, overstromingen en vliegtuigongevallen. Door middel van metingen en controles wordt het afval voortdurend bewaakt.

Het hoogradioactieve afval zit in speciale containers. Om de warmte die het hoogradioactieve afval produceert af te voeren, beschikt het HABOG over een passief koelsysteem, waarbij buitenlucht langs de buizen met afval stroomt en de door het afval opgewarmde lucht weer naar buiten wordt geleid. Aangezien het afval afgeschermd is van de omgeving wordt de langsstromende lucht niet radioactief besmet.

Bij het ontwerp van het HABOG is rekening gehouden met toekomstige uitbreidingen. De muren zijn van 1,70 meter dik beton en zijn zodanig geconstrueerd dat het gebouw bestand is tegen extreme invloeden van buitenaf. Daarnaast houden de muren de straling tegen en beschermen zo de medewerkers en omgeving. Het gebouw is ontworpen voor ten minste 100 jaar en kan met inspectie en onderhoud voor een nog langere periode gebruikt worden. In Tabel 4 is te zien hoeveel afval er in het HABOG opgeslagen ligt anno 2013.

Tabel 4 Opgeslagen HRA in het HABOG in 2013²¹

	Volume (m ³)
Opgeslagen HRA warmte producerend ²²	41,7
Opgeslagen HRA niet warmte producerend	43,9



Figuur 3 HABOG

Laag- en Middeldradioactief Afval (LMRA)

Het laag- en middeldradioactief afval wordt in het AfvalVerwerkingsGebouw (AVG) geconditioneerd²³. Hierna wordt het in vaten geplaatst die vervolgens worden volgestort met beton. Het beton heeft twee functies, het immobiliseert het afval en zorgt voor afscherming van de straling. In geval van afval met een wat hogere activiteit worden de met afval en beton gevulde vaten geplaatst in een betonnen omhulsel, waarbij dit omhulsel voor extra afscherming zorgt. De vaten worden genummerd zodat achteraf altijd te herleiden is wat de precieze inhoud is. Vervolgens worden ze in rijen opgestapeld in het Laag- en middeldradioactief OpslagGebouw (LOG), hierdoor kunnen ze goed geïnspecteerd worden.

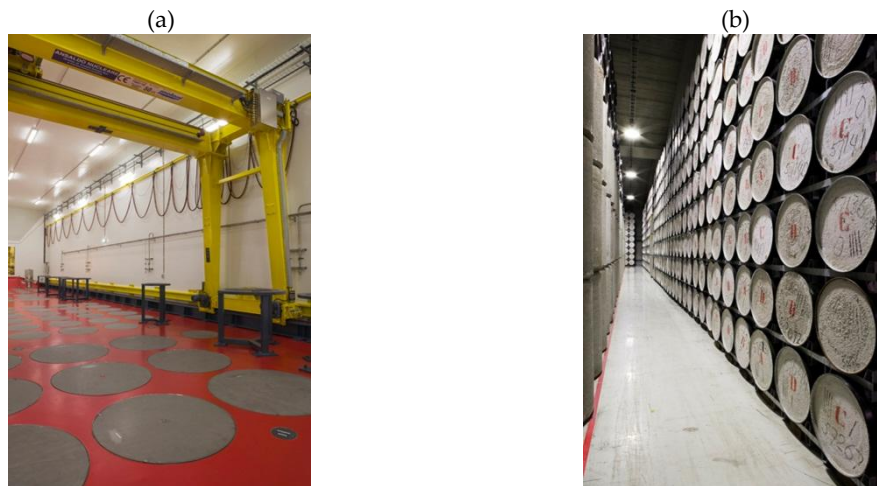
NORM afval

Het NORM afval wordt opgeslagen in het Container OpslagGebouw (COG) en het Verarmd uranium OpslagGebouw (VOG). In het COG worden versterkte zeecontainers met NORM afval-opgeslagen. Deze zeecontainers van kwalitatief hoogwaardig materiaal zijn gevuld met calcinaat. In het VOG worden kubusvormige (DV70) containers met verarmd uraniumoxide opgeslagen, zie Tabel 5.

²¹ (COVRA, 2013)

²² Verglaasd afval en splijtstof.

²³ Het inkapselen van verwerkt radioactief afval in een stevige, waterbestendige massa (cement, bitumen of glas) om het zo geschikt te maken voor verdere behandeling, transport, opslag en berging. Het doel van conditionering is het afval in te sluiten zodat de radioactieve stoffen zich niet in de biosfeer kunnen verspreiden (<http://www.belgoprocess.be/>).



Figuur 4 Opslag van (a) HRA en (b) LMRA bij COVRA (afkomstig van <http://www.covra.nl/>)

Tabel 5 Opgeslagen LMRA tot en met 2013²⁴

	Volume (m ³)
LOG	10.572
COG	6.545
VOG	10.850



Figuur 5 Luchtfoto en schematische weergave van het COVRA terrein²⁵.

Op het terrein van COVRA zijn de volgende gebouwen aanwezig (zie Figuur 5):

- KG: Kantoorgebouw.
- AVG: Afval Verwerkings Gebouw (verwerking van LMRA).
- LOG: Laag- en middelradioactief afval Opslag Gebouw (opslag van LMRA in beton).
- COG: Container Opslag Gebouw (opslag van onverwerkt vast LMRA in containers).
- VOG: Verarmd uranium Opslag Gebouw (opslag van verarmd uranium in containers).
- HABOG: Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslag Gebouw (opslag van HRA).

²⁴ (COVRA, 2013)

²⁵ www.COVRA.nl en (COVRA, 2013)

Uitbreiding gepland

COVRA heeft het voornemen om het terreingebruik anders in te richten dan in 1998 vergund en de opslagcapaciteit voor hoogradioactief afval uit te breiden, zodat optimaal wordt aangesloten bij de huidige inzichten met betrekking tot het afvalaanbod. Daarvoor heeft COVRA op 9 december 2013 een kernenergiewet vergunning aangevraagd. De vergunningaanvraag is op verzoek van het bevoegd gezag (Ministerie van Economische Zaken) op 13 februari 2014 door COVRA aangevuld. Van 6 maart tot en met 16 april 2014 heeft de vergunningaanvraag samen met het MER ter inzage gelegen²⁶.

3.3 LANGDURIGE BOVENGRONDSE OPSLAG



Figuur 6 Schematische weergave bovengrondse opslag

Een methode om het radioactieve afval langdurig veilig te beheren is om ervoor te kiezen de bestaande beheermethode voor eeuwig te continueren. Er zal actief voor moeten worden gezorgd dat het radioactieve afval buiten de invloedssfeer van de mens blijft (actieve veiligheid). Bij andere beheeropties (oppervlakteberging, geologische berging) zorgen passieve factoren (zoals geologie) ervoor dat dit gebeurt (passieve veiligheid). Doordat er langdurig actief beheer van de mens noodzakelijk is, ziet het Internationaal Atoomagentschap dit niet als geschikte optie voor eindberging van langlevend radioactief afval. Voor afval dat binnen 100 jaar vervalt kan bovengrondse opslag uiteraard wel als definitieve beheeroptie gedefinieerd worden.

Bij langdurige bovengrondse opslag moeten er elke 100-300 jaar nieuwe opslaggebouwen worden gebouwd, of moeten de bestaande gebouwen worden aangepast. Het afval dat dan voldoende vervallen is kan afgevoerd worden naar een reguliere afvalverwerker. Voor het overige afval zullen de verpakkingen gecontroleerd moeten worden en, indien nodig, dienen deze omgepakt te worden. Langdurige bovengrondse opslag vergt een actief beheer waarmee (hoge) kosten zijn gemoeid. Zonder van de lusten genoten te hebben worden de lasten hierdoor op de schouders van vele latere generaties gelegd. Het is noodzakelijk dat de kennis over het radioactieve afval en de installaties beschikbaar blijft. Ten slotte blijft een goede beveiliging noodzakelijk. Ook deze zaken brengen kosten met zich mee.

Doordat bij bovengrondse opslag het afval gemakkelijk toegankelijk en terugneembaar is, wordt daarmee de mogelijkheid open gehouden voor eventueel toekomstig beschikbare geavanceerde alternatieve nucleaire technologieën zoals partitie en transmutatie. Dergelijke technologieën kunnen er mogelijk in de toekomst voor zorgen dat de levensduur van het langlevend afval verkort wordt.

²⁶ (Ministerie van Economische Zaken, 2014)

Risico's van bovengrondse opslag zijn breuk van de opslag door invloeden van buitenaf en het risico op breuk in de keten van actief beheer (management, controle, onderhoud, middelen etc.).

Bouw- en exploitatiefase

In deze paragraaf wordt beschreven waar rekening mee is gehouden tijdens de bouw- en exploitatiefase van deze bovengrondse opslag.

Over het algemeen draait het bij bouwwerkzaamheden voor de berging van het afval in een bovengrondse opslag om de volgende activiteiten²⁷:

- Het voorbereiden van de locatie.
- Het uitvoeren van aanvullend geologisch/hydrogeologisch onderzoek en het monitoren van de locatie.
- Het bouwen van extra gebouwen en structuren, zoals kantoren, ruimten waar het afval binnenkomt, wordt geïnspecteerd en verpakt, en ruimten waar reparaties kunnen worden uitgevoerd.
- Het prepareren van bergingseenheden, waaronder het bouwen en plaatsen van eventuele bijbehorende gemaakte barrières.
- Het inbouwen van instrumenten voor het monitoren van het beheersysteem.

Om technische en financiële redenen worden bouwwerkzaamheden gefaseerd uitgevoerd. De omvang en de duur van de werkzaamheden zijn afhankelijk van het type voorziening.

In het ontwerp wordt rekening gehouden met het volgende:

- De robuustheid van de bouw op de lange termijn.
- De uitvoering van de bouw (bijv. bereiden van mortel of ander vulmateriaal, het storten van beton en het uitharden ervan).
- De verschillende bouwmaterialen en -componenten (bijv. het type cement, versterkingsmaterialen en aggregaat), waarbij gelet wordt op duurzaamheid, compatibiliteit en veiligheid (bescherming) (door verstandige keuzes en verstandig gebruik van materialen zijn de bouwtechnieken en de integriteit ervan op de lange termijn beter, waardoor de veiligheid wordt verbeterd en de kosten worden teruggebracht).
- De hoeveelheid en de aard van het afval dat moet worden opgeslagen.
- De vereisten tijdens de bouw (bijv. stroom, communicatie en toegangsroutes).

Eventuele wijzigingen in het ontwerp die tijdens de bouw worden voorzien, moeten nauwkeurig worden beoordeeld op hun effect op de veiligheid of het functioneren van de opslagplaats. Een zogenaamd QA-programma (Quality Assurance) waarbij bewaking, testen en inspecties worden opgenomen om ervoor te zorgen dat de opslagplaats wordt gebouwd volgens de geldende regels. Alle informatie ten aanzien van het bouwproces en de kwaliteitscontroles worden bewaard gedurende de tijd dat het afval ligt opgeslagen.

De operationele fase start met de inbedrijfname. Daarbij wordt gecontroleerd of de specifieke parameterwaarden daadwerkelijk binnen het ontwerp vallen zoals is aangegeven in de veiligheidsbeoordeling. Vervolgens kan afval worden ingenomen en wordt de bovengrondse opslag gevuld. Al het afval dat binnenkomt wordt gecontroleerd om na te gaan of het voldoet aan de ontvangsten- en opslagcriteria. In elk geval is een adequate afhandeling, bescherming en bufferopslagcapaciteit nodig om de normale hoeveelheid afval te verwerken, alsook de onverwachte pieken in afval en de mogelijke vertragingen in de bergingswerkzaamheden.

²⁷ (Nuclear Decommissioning Authority, 2011)

Bij het ontwerp en de bouw van de opslagfaciliteiten wordt rekening gehouden met een aantal ongevallenscenario's. Het "defence-in-depth"-principe om de mogelijke gevolgen van een ongeval te minimaliseren wordt toegepast aan de hand van een aantal maatregelen, zoals:

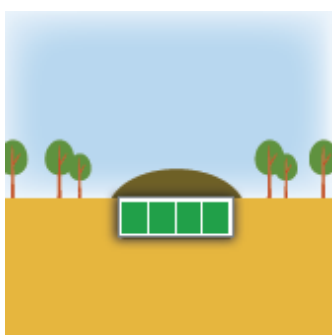
- Het voorkómen van incidenten door de kwaliteit van het ontwerp.
- Kwaliteitsborging voor de bouw en exploitatie.
- Risico management.
- Ontwikkelen en in stand houden van de veiligheidscultuur.

In Tabel 6 zijn de belangrijkste eigenschappen van (langdurige) bovengrondse opslag samengevat.

Tabel 6 Eigenschappen langdurige bovengrondse opslag

Eigenschap	Aanname
Beheermethode	Actief toezicht zal nodig blijven.
Periode waarna faciliteit vernieuwd moet worden	Minimaal elke 100-300 jaar.
Type radioactief afval dat kan worden geborgen	HRA en LMRA
Diepte van bergingsmethode	Bovengronds.
Ruimtebeslag	Enkele tientallen hectare bovengronds (terrein COVRA is nu 20 hectare groot)
Mogelijkheid om afval terug te halen en te bewerken	Hoog.
Invloeden die de bergingsmogelijkheid kunnen beschadigen	Geologische processen, klimatologische processen, door mens veroorzaakte gebeurtenissen.
Volwassenheid van techniek	Ver doorontwikkeld en in diverse landen (waaronder Nederland) gebruikt.
Bouw- en exploitatiefase	Zorgvuldige afweging locatie, bouwmaterialen en veiligheidsvoorzieningen. Continue toetsing van beheersysteem aan internationale best practices tijdens exploitatiefase.

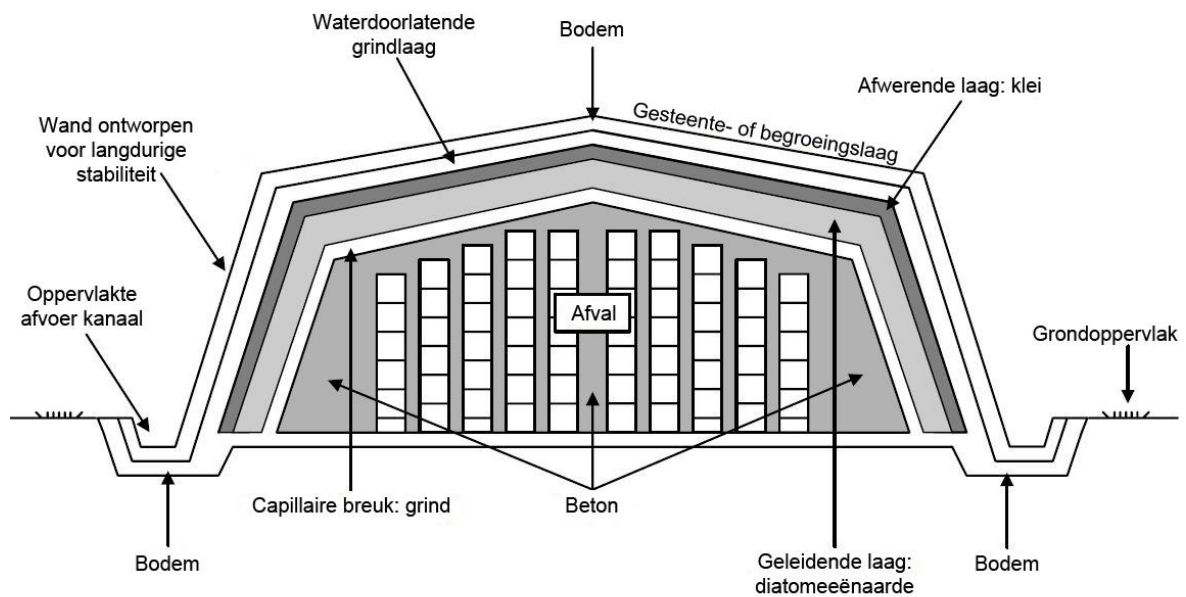
3.4 OPPERVLAKTEBERGING



Figuur 7 Schematische weergave oppervlakteberging

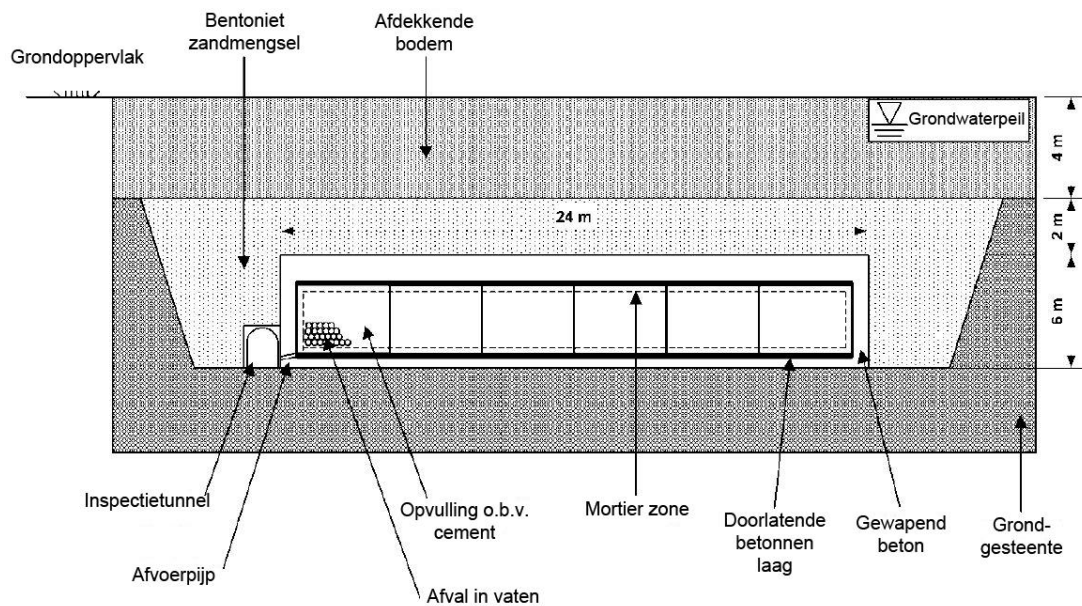
Er zijn meerdere methoden van oppervlakteberging. Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen ondiepe inrichtingen die vlak onder het aardoppervlak liggen, en diepere inrichtingen die tot enkele tientallen meters onder het aardoppervlak reiken (zie bijvoorbeeld Figuur 8 en Figuur 9). De ondiepe inrichtingen kunnen deels boven het aardoppervlak uit komen en hebben dan bijvoorbeeld de vorm van een terp. De ondiepe inrichting ligt meestal boven de grondwaterspiegel.

De afdekking van een ondiepe inrichting is meestal enkele meters hoog en is bedoeld om waterinfiltratie en contact met levende wezens (planten en dieren) te voorkomen. Boven op de afdekking kan vegetatie groeien. Diepere inrichtingen gaan tot enkele tientallen meters diep. De bodem vormt daarbij een extra barrière die de inrichting omsluit²⁸. Bij het sluiten van de berging worden de laatste barrières voor de passieve insluiting en afzondering rond het afval aangebracht, en is sprake van een passief systeem. Volgende generaties hoeven dan, in tegenstelling tot de bovengrondse opslag van radioactief afval, niet meer actief te handelen om de veiligheid te garanderen. Toezicht en monitoring blijven wel mogelijk, zolang toekomstige generaties dit wensen.



Figuur 8 Een concept van een ondiepe oppervlakte berging (IAEA, 2003).

²⁸ (NDA, 2010) (IAEA, 2005)



Figuur 9 Een concept van een diepere oppervlakte berging gebaseerd op een bergingsgewelf (niet op schaal getekend) bij de oppervlaktebergingsfaciliteit van Rokkasho in Japan (IAEA, 2003).

Oppervlakteberging is alleen geschikt voor LMRA dat binnen enkele honderden jaren vervalt²⁹, aangezien de berging geen garantie geeft dat het afval voor zeer lange tijd buiten de invloed van mensen en buiten de biosfeer blijft³⁰. Bij deze oppervlakteberging is er na sluiting van de berging geen actief toezicht meer, en is het gezien de geringe diepte relatief waarschijnlijk dat de faciliteit binnen enkele honderden jaren gedegradeerd is. De inhoud van de faciliteit kan dan in contact komen met mens en biosfeer. Bij het realiseren van deze beheeroptie moet dus aanvullend nog een geschikte berging voor het langlevend en/of hoogradioactief afval komen.

Het monitoren van het afval is relatief gemakkelijk evenals het realiseren van de terugneembaarheid van het afval. Net als bij bovengrondse opslag is een oppervlakteberging meer vatbaar voor aantasting door invloeden van buitenaf, zoals klimaat, geologische processen, aardbevingen en menselijke invloeden dan geologische berging.

Bouw- en exploitatiefase

Over het algemeen zijn de bouwwerkzaamheden voor het beheer van het afval in een oppervlakteberging vergelijkbaar met die van een bovengrondse opslag zoals beschreven in paragraaf 3.3.

Het duurt tientallen jaren om oppervlaktebergingen aan te leggen en te exploiteren. De doorlooptijd is zo lang doordat over het algemeen een aantal fases doorlopen dienen te worden, waarbij elke fase zijn eigen besluitvormingstraject kent. Figuur 10 laat een mogelijke fasering van de bouw en exploitatie fases van een oppervlakteberging. Deze fasering kan ook worden toegepast op geologische bergingsmethoden.

²⁹ (NDA, 2010) Volgens het Radioactive Waste Safety Standers (RADWASS) classificerings schema van het Internationaal Atoomagentschap is oppervlakteberging vooral geschikt voor LMRA (IAEA, 2005)

³⁰ (IAEA, 2014)



Figuur 10 Levensfasen van bergingen en voorbeelden van belangrijke beslissingsmomenten. Op basis van figuur uit: (NEA/OECD, 2011). Deze fasering kan ook van toepassing zijn op een geologische berging.

Het vullen van de oppervlakteberging houdt in dat er containers in de berging worden geplaatst. Deze worden beheerd totdat dat deel van de faciliteit wordt afgesloten. De berging kan bestaan uit een aantal eenheden hebben die één voor één kunnen worden gebouwd en gevuld. Zodra een bepaald gedeelte vol is, kan de ruimte rondom de verpakkingen van het afval opgevuld worden. Ook kan gewerkt worden met een tijdelijke afdekking om de infiltratie van water te beperken en om vóór afsluiting te beschermen tegen straling.

Het afval wordt gemonitord en bewaakt en ten slotte kan de berging worden afgesloten. Gedurende de operationele fase moeten er voldoende voorzieningen zijn om te monitoren, de gezondheid van de werknemers te beschermen en eventuele verontreinigde eenheden op te ruimen. De operationele periode duurt over het algemeen enkele tientallen jaren.

Voorbeelden van faciliteiten voor oppervlakteberging die op dit moment operationeel zijn:

- Finland – de bergingen bij Olkiluoto en Loviisa hebben beide een faciliteit voor LMRA. De Olkiluoto-faciliteit ligt 70 tot 110 meter onder de grond en is operationeel sinds 1992. De Loviisa-faciliteit ligt 110 meter onder de grond en is in 1997 in gebruik genomen.
- Frankrijk – de faciliteit Centre de l'Aube voor LMRA ligt niet onder de grond. Deze locatie werd in 1992 in gebruik genomen. De planning is dat Centre de l'Aube in 2025 sluit omdat dan de volledige capaciteit is bereikt.
- Spanje – de berging El Cabril voor LMRA bevindt zich op de locatie van een verlaten uraniummijn en is sinds 1961 operationeel.
- Zweden – de faciliteit SFR voor LMRA ligt op een diepte van 50 meter onder de bodem van de Oostzee. Deze faciliteit werd in 1988 in gebruik genomen.

Andere voorbeelden van faciliteiten zijn: de Low Level Waste Repository in het Verenigd Koninkrijk, drie opslagplaatsen voor LMRA in Barnwell, Clive en Richland in de VS en een opslagplaats voor LMRA in Rokkasho-Mura in Japan. Andere landen, zoals België willen een oppervlakteberging voor LMRA bouwen.

In Tabel 7 zijn de belangrijkste eigenschappen van bovengrondse opslag samengevat.

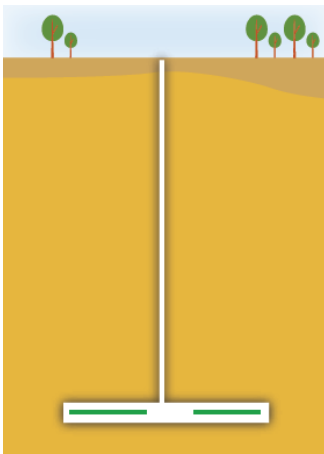
Tabel 7 Eigenschappen oppervlakteberging

Eigenschap	Aanname
Beheermethode	In de eerste fase is actief toezicht nodig, na verloop van tijd, bij sluiten systeem, wordt het beheer passief.
Periode waarna faciliteit vernieuwd moet worden	Het is de bedoeling dat deze opslagmethode niet vernieuwd hoeft te worden. Enkel in geval monitoring aanleiding daartoe geeft, kan overgegaan worden tot vernieuwing van de faciliteit.
Type radioactief afval dat kan worden geborgen	LMRA dat binnen enkele honderden jaren vervalt
Diepte van bergingsmethode	Bovengronds met een deklaag over de constructie of ondergronds (enkele tientallen meters ondergronds).
Ruimtebeslag	Ongeveer 10 hectare aan, of net onder de oppervlakte.
Mogelijkheid om afval terug te halen en te bewerken	Hoog, aangezien het afval aan of vlak onder het aardoppervlak ligt.
Invloeden die de bergingsmogelijkheid kunnen beschadigen	Geologische processen, klimatologische processen, door mens veroorzaakte gebeurtenissen.
Volwassenheid van techniek	Wordt al meer dan 50 jaar gebruikt. In de wereld zijn meer dan 80 plaatsen waar oppervlakteberging plaatsvindt ²⁸ .
Bouw- en exploitatiefase	Zorgvuldige afweging locatie, bouwmaterialen en veiligheidsvoorzieningen. Eventueel worden delen van berging tijdens exploitatiefase al afgesloten en opgevuld met opvulmateriaal.

3.5 GEOLOGISCHE BERGING

Geologische berging is een beheeroptie die tot doel heeft dat het afval ook na duizenden jaren buiten de biosfeer van de mens blijft. Geologische berging kan worden gerealiseerd door het afval in een geologische laag te plaatsen door middel van diepe boorgaten of in ondergrondse galerijen. De opties worden hierna verder toegelicht.

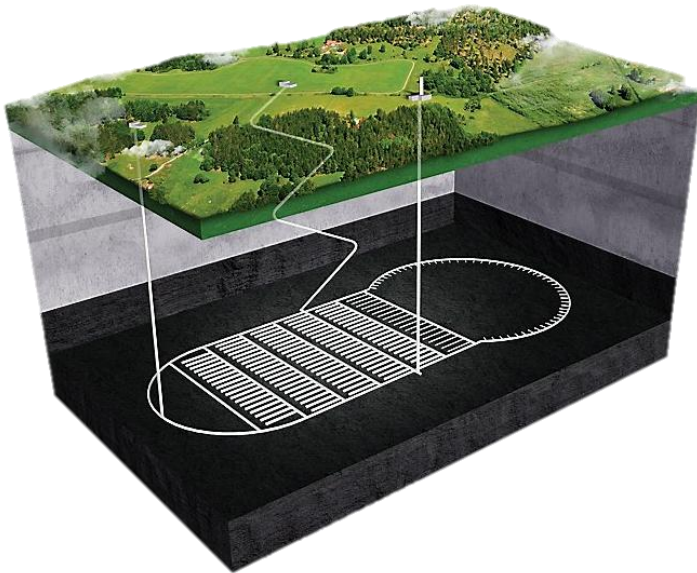
3.5.1 GEOLOGISCHE BERGING IN ONDERGRONDSE GALERIJEN



Figuur 11 Schematische weergave berging in ondergrondse galerijen

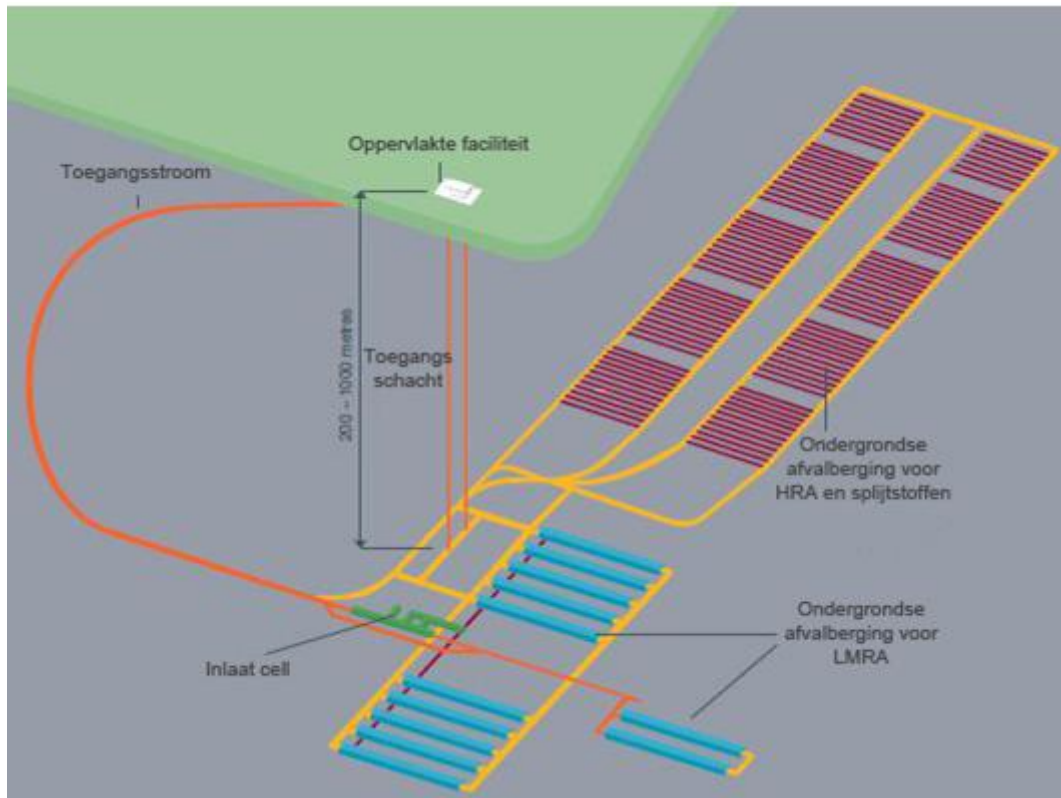
Bij geologische berging in ondergrondse galerijen wordt het radioactief afval op een diepte van enkele honderden meters in een speciaal ontworpen installatie geplaatst. Uitgangspunt is dat de bergingsfaciliteit speciaal ontworpen is voor de berging van radioactief afval (een 'dedicated facility'). Dat betekent dat de faciliteit, waarin radioactief afval wordt geborgen, speciaal voor dat doel ontworpen moet zijn. Berging in een oude mijn is daarom niet zondermeer een geschikte beheeroptie. Het is wel mogelijk dat er in of vanuit een oude mijn een speciaal ontworpen geologische bergingsfaciliteit wordt gebouwd. Na de exploitatiefase wordt de bergingsinstallatie afgesloten en is actief beheer niet nodig om de veiligheid te borgen. Wel wordt over het algemeen een aanzienlijke periode van monitoring voorzien na sluiting van de berging.

De veiligheid van mens en milieu berust op de kunstmatige barrières (de verpakking van het afval, het opvulmateriaal en de afdichting van de galerijen en de schachten) en op de natuurlijke barrière (het geologische gastgesteente). Op lange termijn degraderen de kunstmatige barrières en beperkt de geologische formatie de verspreiding van radionucliden waardoor deze beheeroptie ook geschikt is voor HRA.



Figuur 12 Artist impression van opslag in Boomse Klei³¹

³¹ (COVRA, 2011) Artist impression van een concept dat binnen OPERA wordt onderzocht. Dit concept kan in de loop van het onderzoek nog veranderen.



Figuur 13 Schematische weergave van een geologische bergingsfaciliteit waarbij de algemene eigenschappen zijn aangegeven (Nuclear Decommissioning Authority (NDA), 2010).

Er worden verschillende concepten ontwikkeld voor geologische berging, zie bijvoorbeeld in Figuur 12 een impressie van een concept dat binnen het Nederlandse onderzoeksprogramma OPERA wordt onderzocht. Figuur 13 is een schematische weergave van een concept van het Engelse NDA. Via een toegangsschacht en de hoofd galerij kan verpakt radioactief afval in de bergingsgalerijen worden geplaatst. Volgeplaatste bergingsgalerijen kunnen worden opgevuld met beton en betoniëten en kunnen worden afgesloten. Wanneer alle bergingsgalerijen afgesloten zijn, kunnen de hoofd galerij en de schachten eventueel nog open blijven. Een monitoringsprogramma is permanent in werking.

Op termijn kan de bergingsinstallatie helemaal worden afgesloten door ook de hoofd galerij en de schachten op te vullen. Vervolgens kan boven en onder de geologische formatie en aan de oppervlakte gemonitord worden.

Terugneembaarheid is bij berging in ondergrondse galerijen lastiger te realiseren dan bij bovengrondse opslag en oppervlakte berging. Dit wordt steeds moeilijker en duurder naarmate de bergingsinstallatie gevuld en afgesloten wordt. Soms wordt een soort tussenoplossing met een uitgesproken fasering ontwikkeld om een periode met terugneembaarheid te integreren in het concept van de berging.

Bouw- en exploitatiefase

Het duurt tientallen jaren om geologische bergingen aan te leggen en te exploiteren. De doorlooptijd is zo lang doordat over het algemeen een aantal fases doorlopen dienen te worden, waarbij elke fase zijn eigen besluitvormingstraject kent. Deze fases zijn vergelijkbaar met de Figuur 10 uit paragraaf 3.4. Voorafgaand aan de exploitatie moet worden aangetoond dat de operationele procedures voldoende getest en betrouwbaar zijn. Verdere uitdagingen zijn: het zorgen voor voldoende vertrouwen in de afsluitmethoden, en het invoeren van een veiligheidscultuur waar het behoud van de afvaldatabase en het beheer van kennis een rol speelt.

Bij de bouw van een geologische berging in ondergrondse galerijen kan ervaring vanuit de civiele techniek en mijnbouw worden ingezet. Een belangrijke uitdaging is het beschermen van de integriteit van de veiligheidskenmerken van de geologische laag waarin de berging gerealiseerd wordt. Verstoring hiervan kan worden geminimaliseerd door speciale graaftechnieken en bijvoorbeeld door het bekleden van de ondergrondse galerijen met speciaal mortel.

De keuze en het ontwerp van de meest geschikte vorm van ondergrondse toegang hangt van diverse factoren af, zoals de geologische laag en de diepte van de bergingsgalerijen.

Tijdens de exploitatie zijn de werkzaamheden onder andere het ontvangen, inspecteren en plaatsen van het afval onder de grond. Na ontvangst van het radioactief afval bij de geologische berging worden er inspecties uitgevoerd. Bijvoorbeeld om de staat van de verpakkingen te controleren en om radiologische metingen uit te voeren³².

In diverse landen wordt momenteel onderzoek gedaan naar geologische berging in ondergrondse galerijen. Onder andere in Nederland in het Onderzoek Programma Eindberging Radioactief Afval (OPERA), waarbij wordt gekeken naar de mogelijkheden van geologische berging in klei- en zoutlagen (zie ook paragraaf 2.3). In de VS is sinds 1999 een bergingslocatie voor defensie gerelateerd afval in Carlsbad, New Mexico, in gebruik. In Duitsland heeft de Konrad-faciliteit een vergunning voor radioactief afval dat geen warmte produceert. Deze wordt op dit moment gerenoveerd om de berging van afval mogelijk te maken. De faciliteit gaat waarschijnlijk in 2019 open. Sommige landen hebben hun voorkeurslocaties voor de berging in ondergrondse galerijen van afval al uitgekozen, of zijn deze aan het karakteriseren, zoals bijvoorbeeld:

- Canada – Ontario Power Generation heeft een faciliteit voor LMRA voorgesteld in Kincardin, zo'n 680 meter onder de grond in stabiele rotsformaties.
- China – Er wordt uitgebreid onderzoek gedaan bij Beishan in de Gobiwoestijn, waar in 2050 een faciliteit in bedrijf wordt genomen.
- Finland – Een ondergronds onderzoekslaboratorium is in bedrijf in Onkalo in de buurt van de kerncentrale in Olkiluoto. In december 2012 is een bouwvergunning voor een faciliteit op deze locatie verleend en de werkzaamheden zullen rond 2020 van start gaan.
- Frankrijk – Sinds mei 2013 is een maatschappelijke discussie gaande over een geplande faciliteit vlak bij het ondergrondse onderzoekslaboratorium in Bure. Volgens de planning moet de faciliteit in 2025 operationeel worden.
- Rusland – Lokale goedkeuring is verkregen voor een vestigingslocatie voor een ondergronds onderzoekslaboratorium vlak bij Krasnoyarsk. Op dezelfde locatie zou een faciliteit kunnen worden ontwikkeld die operationeel wordt rond 2035.
- Zweden – In 2011 is een aanvraag voor een vergunning ingediend om een faciliteit te bouwen op een locatie vlak bij Forsmark. Men hoopt dat de bouw in 2020 kan beginnen.

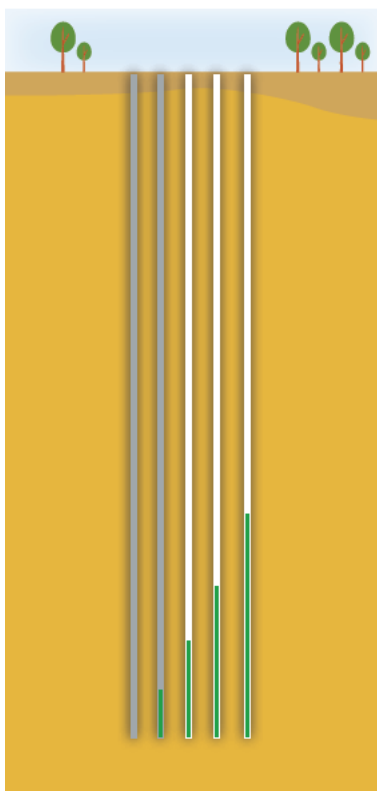
In Tabel 8 worden de belangrijkste eigenschappen van geologische berging in ondergrondse galerijen samengevat.

³² (NEA/OECD, 2013) en (NDA, 2010)

Tabel 8 Geologische berging in ondergrondse galerijen

Eigenschap	Aanname
Beheermethode	In de eerste fase is actief toezicht nodig, na verloop van tijd wordt het beheer passief.
Periode waarna faciliteit vernieuwd moet worden	Deze beheeroptie heeft de intentie om na de actieve periode voor altijd buiten de invloedssfeer van de mens en biosfeer te blijven.
Type radioactief afval dat kan worden geborgen	Laag- en middelradioactief afval en hoogradioactief afval.
Diepte van bergingsmethode	Ondergronds, afhankelijk van techniek, geologie en diepte van de faciliteit enkele honderden meters.
Ruimtebeslag	Voor sluiting van de schacht zullen er bovengronds enkele installaties zijn ten behoeve van de bouw van de schacht. Na sluiting zal hoogstens de toegang tot de schacht zichtbaar zijn. Ondergronds vindt een groter ruimtebeslag plaats op enkele honderden meters diepte.
Mogelijkheid om afval terug te halen en te bewerken	Afhankelijk van type van monitoring en mate van afsluiting van de faciliteit is er een middelmatige mogelijkheid om het afval terug te halen.
Invloeden die de bergingsmogelijkheid kunnen beschadigen	Geologische en interne processen en eventueel toekomstige menselijke invloeden.
Volwassenheid van techniek	In enkele landen wordt deze techniek getest. In de Verenigde Staten (New Mexico) is bijvoorbeeld een faciliteit voor lang levend hoogradioactief afval.
Bouw- en exploitatiefase	Beschermen van de integriteit van de veiligheidskenmerken van de geologische gastformatie. Tijdens de exploitatie ontvangen, inspecteren en plaatsen van het afval onder de grond. Na ontvangst van het radioactief afval bij de geologische berging worden er inspecties uitgevoerd.

3.5.2 GEOLOGISCHE BERGING IN DIEPE BOORGATEN



Figuur 14 Schematische weergave berging in diepe boorgaten

Bij het bergen van radioactief afval in diepe boorgaten wordt het afval in vaste vorm verpakt in containers en in de boorgaten geplaatst. Tussen de verschillende containers komt een buffermateriaal zoals beton. De IAEA onderscheidt twee typen van berging in boorgaten: berging aan de oppervlakte en middelmatige of diepe berging. In dit rapport wordt ervan uitgegaan van berging in diepe boorgaten tot enkele kilometers diepte.

Net als bij geologische berging in ondergrondse galerijen zijn er voor diepe boorgaten verschillende concepten denkbaar, zie bijvoorbeeld het concept in Figuur 15. Tussen de verpakkingen met radioactief afval die in een boorgat worden geplaatst komt opvulmateriaal (bv. bentoniet) en ook het bovenste gedeelte van het boorgat wordt opgevuld. De geologische formatie is na enige tijd, afhankelijk van de levensduur van de verpakking van het radioactief afval en van het opvulmateriaal, de enige barrière tussen het radioactief afval en het milieu. Net zoals bij geologische berging in ondergrondse galerijen moet de geologische formatie om deze reden met de nodige zorg uitgekozen worden.

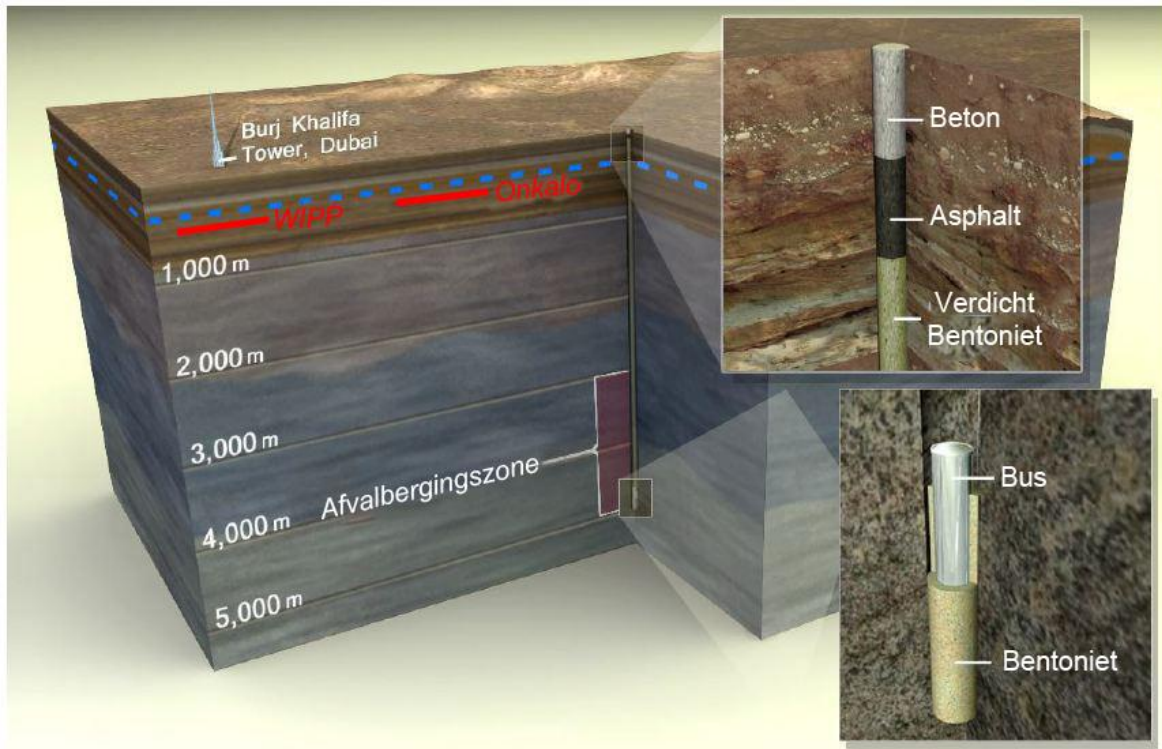
Berging in diepe boorgaten wordt gezien als een mogelijke oplossing voor kleine hoeveelheden hoogradioactief en/of langlevend afval (bv. plutonium). In verscheidene landen is onderzoek uitgevoerd naar berging in diepe boorgaten, voornamelijk in Zweden³³, maar ook in de Verenigde Staten³⁴, Zwitserland en Denemarken³⁵. In onderzoek is vooral zout en graniet als mogelijke gastgesteenten bestudeerd. Dit onderzoek heeft echter nog niet geleid tot een operationele toepassing van het gebruik van

³³ (SKB, 1989) (SKB, 1998)

³⁴ (Sandia National Laboratories, 2012)

³⁵ (Elsam/Elkraft, 1981)

boorgaten. Veel aanvullend onderzoek is nodig voordat deze techniek in Nederland toegepast kan gaan worden.



Figuur 15 Gegeneraliseerd concept voor berging van HRA en verbruikte splijtstoffen in diepe boorgaten (Sandia National Laboratories, 2012)

In een boorgat is niet te garanderen dat de containers lang intact blijven. De druk op deze diepte is dusdanig hoog dat welke constructie dan ook op relatief korte termijn zijn integriteit zal verliezen. Voordat er tot deze optie kan worden over gegaan, moet dus worden uitgesloten dat het radioactieve materiaal te snel kan migreren naar de oppervlakte. Dat betekent dat er strenge eisen moeten worden gesteld aan de locatie. Na de sluiting van het boorgat is geen menselijke tussenkomst meer voorzien. Terugnemen van het afval is bij deze beheeroptie redelijkerwijze niet meer mogelijk. Deze optie voldoet dan ook niet aan de eisen die het Nederlandse beleid stelt met betrekking tot terugneembaarheid. Omdat deze beheeroptie in verschillende landen wel nader onderzocht wordt is besloten de optie toch in deze studie te betrekken.

Het vereiste aantal boorgaten voor de berging van hoogradioactief en/of langlevend afval hangt onder andere af van de diepte en de warmteafgifte van het afval. Afhankelijk van het type afval moeten de boorgaten tussen enkele tientallen meters tot enkele honderden meters uit elkaar liggen. In een onderzoek door SKB in Zweden werd een afstand van minimaal 500 meter tussen twee boorgaten vooropgesteld. Een studie in de Verenigde Staten beveelt zelfs een afstand van minimaal 800 meter aan, wat zou leiden tot een grotere voetafdruk voor de totale opslagfaciliteit. Door de berging uit te stellen kan de warmteafgifte van het afval verminderen, zodat de minimale afstand tussen de boorgaten kleiner mag zijn.

De boorgaten hoeven niet allemaal tegelijk aangelegd hoeven te worden; slechts wanneer alle boorgaten aangelegd zijn, zal een maximale oppervlakte volledig ingenomen worden. In eerdere stadia is de voetafdruk minder groot^{36,37}. Boorgaten kunnen ook op verschillende diepten worden aangelegd (afhankelijk van het type afval).

Bouw- en exploitatiefase

De fasering en het proces van besluitvorming in de bouw- en exploitatiefase is voor geologische berging in diepe boorgaten vergelijkbaar met geologische berging in ondergrondse galerijen. Zie daarvoor paragraaf 3.5.1 en Figuur 10.

Voor het boren en aanleggen van boorgaten moeten de boorgaten worden ontworpen en worden de vereisten voor de boorgaten bepaald. De geboorde en voltooide boorgaten moeten worden gecontroleerd op de vereisten. Er zijn geen voorbeelden van diepe boorgaten voor de langetermijnberging van radioactief afval. De verdere ontwikkeling van deze optie kan, waar relevant, worden gebaseerd op de theorie en praktijk die gelden voor de aanleg van diepe boorgaten in de olie- en mijnbouwsector. Het overzicht hierna noemt een aantal factoren waar rekening mee moet worden gehouden tijdens de constructie en exploitatie van een systeem voor berging in diepe boorgaten³⁸.

- Het boorgat en de mantel moeten groot genoeg en voldoende stabiel zijn om te garanderen dat de afvalcontainers op de gewenste diepte kunnen worden geplaatst met zo min mogelijk kans dat de containers vast komen te zitten tijdens het plaatsen. Ook moet het mogelijk zijn containers tijdens de exploitatieperiode te verwijderen, indien nodig.
- De boorgaten moeten zo worden aangelegd en gevoerd dat onregelmatigheden of bochten geen belemmering vormen voor het plaatsen van afvalpakketten, zowel individueel als in reeksen. De boorgaten kunnen voorafgaand aan de plaatsing worden getest, bijvoorbeeld met dummy afvalpakketten.
- De boorgaten moeten stabiel blijven tijdens de constructiefase totdat de ruimte tussen de binnen- en buitenmantel is volgestort met beton, de afvalcontainers zijn geplaatst en de boorgaten zijn afgedicht/nagevuld. De technische eigenschappen van de afdichtingsmaterialen kunnen worden bepaald via directe en indirecte meting tijdens de constructie. Voor het beton geldt dat kwaliteitsbeheer en een gebruikshistorie in zowel civiele techniek als mijnbouw uitzicht geeft op goede plaatsing en prestaties.

De plaatsingsprocedures moeten een hoge mate van vertrouwen scheppen dat de blootstelling aan straling voor het personeel op een aanvaardbaar laag niveau is, dat er tijdens de werkzaamheden geen radioactief materiaal kan weglekken en dat er geen afvalcontainers vast kunnen komen te zitten boven de bergingszone in het boorgat.

Over het algemeen wordt aangenomen dat de containers een voor een worden geplaatst, maar de suggestie is ook al gedaan dat ze in kleine partijen kunnen worden geplaatst, gescheiden door een tijdsinterval en/of fysieke scheiders, of zelfs in lange reeksen (totale lengte ca. 200 meter). De twee hoofdfactoren die het tempo bepalen waarmee de verpakkingen met het afval kunnen worden verwerkt, zijn de snelheid waarmee ze worden afgeleverd op de locatie en klaargemaakt voor plaatsing, en de tijd vereist om het pakket naar beneden te transporteren en de apparatuur weer naar boven te halen voor de volgende lading. Voor het plaatsen komen diverse systemen in aanmerking.

³⁶ (IAEA, 2009)

³⁷ (Tractebel Engineering NV, 2010)

³⁸ (Nuclear Decommissioning Authority, 2011) (NDA, 2010) (Environment Agency, 2009)

De veiligheid tijdens het plaatsen wordt gegarandeerd door vaste controleprocedures en noodplannen voor onverwachte omstandigheden of gebeurtenissen.

Het afdichtingssysteem voor het boorgat is bedoeld om de toetreding van water te beperken en te voorkomen dat vervuiling vrijkomt nadat het boorgat uit bedrijf is genomen. Een dergelijk afdichtingssysteem zal moeten bestaan uit verschillende materialen, die niet alleen dienen als afdichting, maar ook als opvulling van het boorgat.

In Tabel 9 worden de belangrijkste eigenschappen van geologische opslag in diepe boorgaten samengevat.

Tabel 9 Eigenschappen geologische berging in diepe boorgaten

Eigenschap	Aanname
Beheermethode	Passief
Periode waarna faciliteit vernieuwd moet worden	Deze beheeroptie heeft de intentie om na de actieve periode voor altijd buiten de invloedssfeer van de mens en natuur te blijven.
Type radioactief afval dat kan worden geborgen	Laag- en middelradioactief afval en hoogradioactief afval.
Ruimtebeslag	Bij aanleg van de boorgaten zullen activiteiten over een groot oppervlak plaatsvinden. Na aanleg zal er geen of zeer beperkte ruimtebeslag zijn, afhankelijk van het concept. Ondergronds vindt een groter ruimtebeslag plaats op enkele kilometers diepte.
Diepte van bergingsmethode	Ondergronds, afhankelijk van techniek en geologie tot enkele kilometers.
Mogelijkheid om afval terug te halen en te bewerken	Laag. Het is in principe de bedoeling dat het afval niet terugneembaar is.
Invloeden die de bergingsmogelijkheid kunnen beschadigen	Geologische processen en eventueel toekomstige menselijke invloeden.
Volwassenheid van techniek	Nergens ter wereld toegepast
Bouw- en exploitatiefase	Het boorgat en de mantel moeten groot genoeg en voldoende stabiel zijn om te garanderen dat de afvalcontainers op de gewenste diepte kunnen worden geplaatst. Plaatsing van afval vindt één voor één plaats of in partijen.

3.6 MULTINATIONALE BERGING

Bij multinationale berging realiseren verschillende landen samen de beheeroptie op lange termijn. Dit is niet zozeer een beheeroptie, maar een organisatorische maatregel, die impact kan hebben op de geschiktheid van andere opties, omdat bijvoorbeeld het aanbod aan locaties toeneemt. Uitgangspunt in het Nederlandse en Europese beleid is dat elke lidstaat zelf verantwoordelijk is voor het beheer van radioactief afval. Dit betekent echter niet dat onderlinge samenwerking tussen lidstaten uitgesloten is. Het SAPIERR-II project, waar ook COVRA onderdeel van uitmaakt, geeft een praktische implementatiestrategie voor een multinationale (of gezamenlijke) eindberging³⁹.

³⁹ (COVRA, 2014)

Multinationale berging moet minimaal voldoen aan dezelfde criteria, vereisten en normen als nationale faciliteiten. In die zin is de hoofdinformatie voor de constructie- en exploitatiefase zoals omschreven in dit rapport identiek aan die voor oppervlakteberging (paragraaf 3.4), berging in ondergrondse galerijen (paragraaf 3.5.1) en berging in diepe boorgaten (paragraaf 3.5.2).

Daarnaast zijn de voordelen van multinationale berging, die gevolgen hebben voor de constructie en exploitatie, onder andere economisch, minder milieubelasting, grotere keuze aan geologische omstandigheden en hoger technisch potentieel. De nadelen zijn onder andere transport, afwijkende (nationale) wetgeving en definities, kostenverdeling onder partners, verschillende tijdschema's en locaties vanaf waar het afval aangevoerd wordt.

Tot op heden bestaat er geen internationale samenwerking voor de berging van radioactief afval. Wel wordt er samengewerkt aan onderzoek. De IAEA beschrijft drie mogelijke overkoepelende scenario's waarvan het geloofwaardig is dat deze leiden tot de ontwikkeling van gedeelde berging, namelijk⁴⁰:

- Samenwerkingsscenario's waarin twee of meer landen overeenkomen een gedeelde faciliteit op het grondgebied van een van die landen te ontwikkelen, in plaats van de ontwikkeling van een eigen faciliteit in elk land afzonderlijk. De berging kan een regionale berging zijn als de landen behoren tot dezelfde geografische regio.
- Aanhaakscenario's waarin een bestaand en vergoederd nationaal programma ruimte in zijn berging aanbiedt aan andere landen. Motieven voor een dergelijke beslissing kunnen van economische aard zijn of verband houden met veiligheid en bescherming. In de praktijk blijft de berging een nationale berging, maar een deel van het radioactief afval daarin is afkomstig van een ander land.
- Internationale of supranationale scenario's waarbij het beheer en toezicht op een hoger niveau worden geregeld. De organisatie van een dergelijke berging (of netwerk van bergingen) ligt volledig in de handen van een supranationale instantie zoals de Verenigde Naties, terwijl het bestuurslichaam een deskundig industrieel consortium inschakelt voor de feitelijke aanleg en de exploitatie van de berging.

Deze scenario's dienen alleen ter indicatie. Andere of soortgelijke samenwerkingsverbanden of een combinatie van de scenario's zijn ook mogelijk. In dit rapport wordt de term 'multinationale berging' gebruikt in algemene zin waarbij we uitgaan van gedeelde berging als concept. De veiligheidsoverwegingen zullen in de verschillende scenario's grotendeels identiek zijn.

3.7 PARTITIE EN TRANSMUTATIE

Partitie en transmutatie (P&T) is het veranderen van hoogradioactief afval met lange levensduur naar radioactief afval met een kortere levensduur zodat er uiteindelijk een kleinere hoeveelheid hoogradioactief afval overblijft. Dit is, net zoals multinationale berging, niet zozeer een beheeroptie, maar een maatregel die impact kan hebben op de geschiktheid van andere opties, omdat deze techniek de levensduur van het radioactief afval mogelijk kan verkorten. De technieken zijn nog in ontwikkeling. Het is daarom onzeker of deze in de toekomst daadwerkelijk op industriële schaal kunnen worden toegepast.

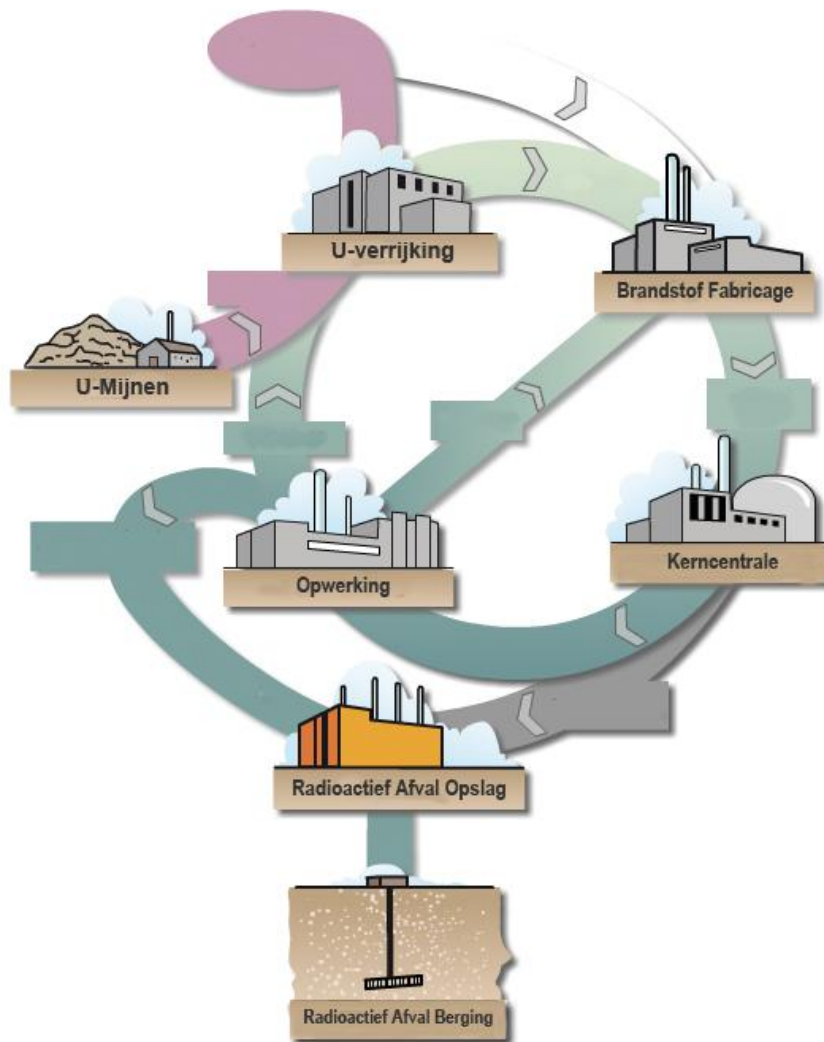
Partitie is een techniek die de niet herbruikbare en langlevende componenten (plutonium en americium), uit gebruikte splijtstof haalt. Vervolgens kan transmutatie plaatsvinden. Dit houdt in dat die componenten opnieuw een reactor ingaan waar ze vervallen tot stoffen met een kortere levensduur (mogelijk tot ongeveer driehonderd jaar).

⁴⁰ (NDA, 2010) (IAEA, 2004) (IAEA, 2011) (European Commission, 2008) (European Commission, 2006)

De technieken houden nauw verband met de brandstofcycli van kerncentrales. Daarom wordt hierna kort de open en gesloten brandstof cyclus beschreven en vervolgens hoe de technieken partitie en transmutatie zich verhouden tot de brandstofcycli.

Open en gesloten brandstofcyclus

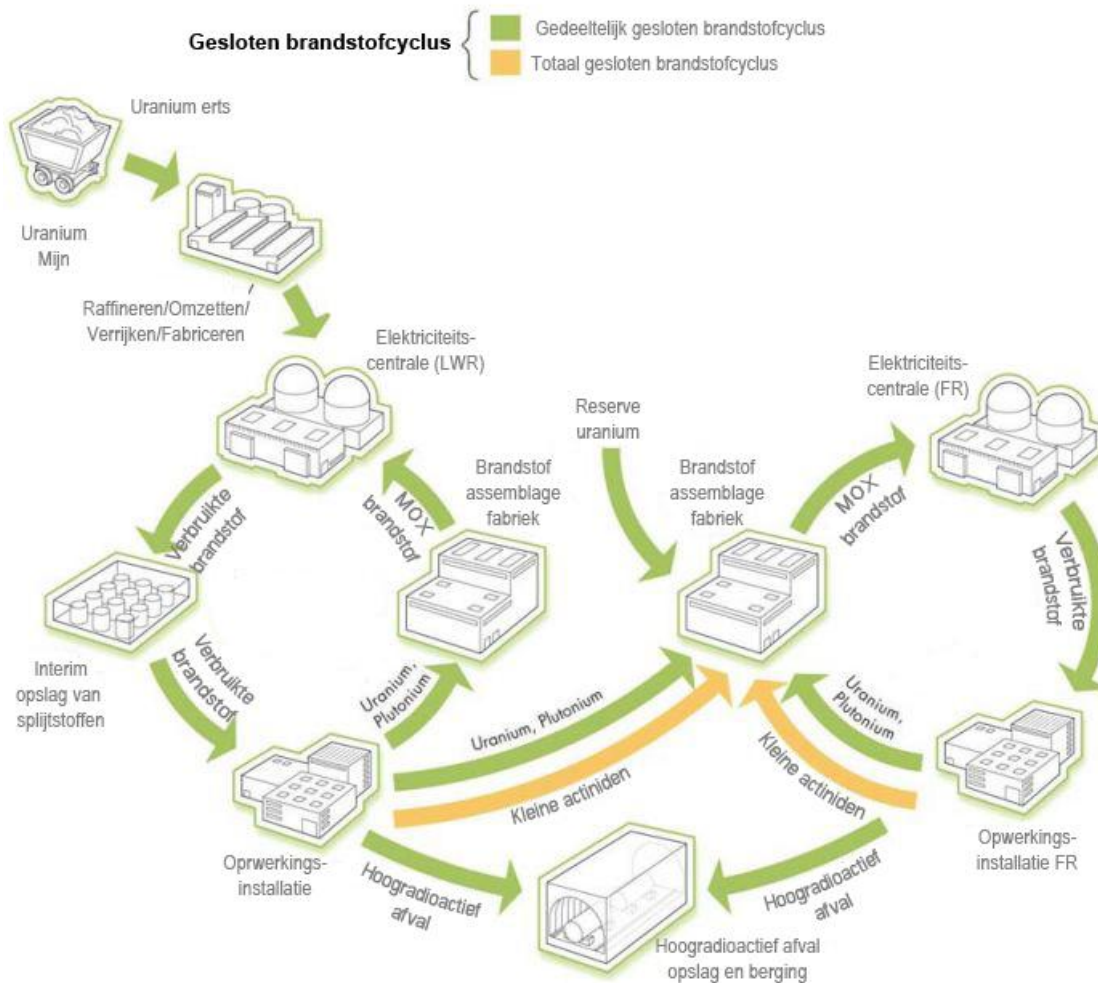
Figuur 16 laat zien hoe in een brandstofcyclus verbruikte splijtstof wordt opgewerkt in een opwerkingsinstallatie en de teruggewonnen uranium en plutonium vervolgens opnieuw als brandstof gebruikt worden in een kerncentrale. Deze gesloten brandstofcyclus (groene pijlen in de figuur) wordt ook toegepast door de kerncentrale in Borssele. Het hoogradioactief afval dat overblijft na opwerking van de verbruikte splijtstof heeft nog een levensduur van 5000 tot 10.000 jaar. Dit afval wordt in Nederland verglaasd (in glas gegoten) en opgeslagen bij COVRA. Bij een open brandstofcyclus worden verbruikte splijtstoffen direct afgevoerd als hoog radioactief afval (grijze pijl rechts onderin de figuur).



Figuur 16 Open en gesloten brandstofcyclus (Ensreg, 2006)

Wanneer P&T wordt toegepast in een brandstofcyclus wordt niet alleen het uranium en plutonium gescheiden uit de verbruikte brandstof, maar ook kleine actiniden (zie de oranje pijlen en de rechter cirkel in Figuur 17). Mogelijk kunnen deze ook opnieuw als brandstof worden hergebruikt. Er wordt verwacht dat door transmutatie de levensduur⁴¹ van deze actiniden met vijf tot tien keer verkort kan worden tot zo'n 500 tot 1000 jaar. In onderstaand figuur wordt dit benoemd als de totaal gesloten brandstofcyclus.

Actiniden zijn scheikundige elementen met atoomnummer 90 tot en met 103. Al deze elementen zijn radioactief en vervallen spontaan naar lagere elementen. Het zijn vervalproducten van de isotopen uranium en thorium en vervallen uiteindelijk naar lood.



Figuur 17 Schematische weergave van een gedeeltelijk gesloten en totaal gesloten brandstofcyclus (op basis van een figuur uit (NDA, 2010)).

Sinds de jaren '50 van de 20e eeuw wordt er al onderzoek gedaan naar partitie en transmutatie⁴² (bijvoorbeeld met behulp van een thoriumreactor). Op laboratorium schaal is levensduurverkorting mogelijk gebleken voor actiniden. De technologie is echter nog niet geschikt om op grote schaal toe te

⁴¹ Feitelijk worden de actiniden gesplitst tot korter levende isotopen. de levensduur van de actiniden zelf kan niet veranderd worden.

⁴² (IAEA, 2010)

passen. Zelfs als er verdere ontwikkelingen volgen, zal er de noodzaak blijven voor berging van hoogradioactief afval. Het proces zal namelijk ook hoogradioactief afval genereren.

Er zal echter wel minder opslagcapaciteit nodig zijn doordat de totale hoeveelheid hoogradioactief afval kleiner wordt⁴³. Hoewel partitie en transmutatie de hoeveelheid verbruikte splijtstof en de te bergen HRA mogelijk vermindert, zorgt deze techniek echter ook voor een grote toename van de hoeveelheid LMRA. Belangrijke notie is dat momenteel in Nederland verbruikte splijtstof (uit de kerncentrale; uit de onderzoeksreactoren wordt niet opgewerkt) verglaasd wordt opgeslagen. Verglaasd afval lijkt niet meer geschikt voor partitie en transmutatie.

Alle partitie en transmutatie -scenario's gaan uit van het terugwinnen en recyclen van actiniden en mogelijke splijtproducten. Daaruit blijkt dat P&T integraal onderdeel is van de brandstofcyclus van kernenergie productie. Het gebruik van geavanceerde brandstofcycli om partitie en transmutatie praktisch gezien te implementeren ligt nog minstens vele tientallen jaren in de toekomst, vanwege de tijd die er nodig is voor technisch onderzoek en voor het ontwikkelen en demonstreren van reactortechnologieën.

Bouw- en exploitatiefase

Zoals hiervoor beschreven zijn partitie en transmutatie alleen nog op laboratorium schaal uitgevoerd. Als deze technologieën op grote schaal zouden worden toegepast moeten daarvoor eerst reactoren worden (om)gebouwd. In landen waar opwerken van radioactief afval al mogelijk is (zoals in Frankrijk, waar de verbruikte splijtstoffen uit Nederland worden opgewerkt), zal invoering van partitie een aanvulling zijn op het proces in bestaande reactoren. Voor andere landen zullen voor partitie speciale scheidingsinstallaties moeten worden gebouwd. Ook voor transmutatie is een reactor nodig. Landen die P&T zien als integraal onderdeel van een toekomstig nucleair programma zullen overwegen transmutatie plaats te laten vinden in kernreactors (thermische- of snelle reactors). De bouw en/of het gebruik van kernreactors is sowieso onderdeel van het bouw en exploitatieproces van P&T. Zonder deze energiecycclus is P&T niet mogelijk⁴⁴.

3.8 AFGEVALLEN BEHEEROPTIES

Storten in zee

Het storten van radioactief afval in de zee zou ook een beheeroptie kunnen zijn. Een belangrijk nadeel van deze beheeroptie is dat de zee wordt vervuild en dat de terugneembaarheid van de vaten zeer lastig te realiseren is. Het storten van radioactief afval in zee is daarom op basis van internationale normen en waarden niet wenselijk. Om de vervuiling van de zeeën en oceanen terug te dringen heeft Nederland in 1972 het Verdrag van London⁴⁵ getekend. Dit verdrag is op 2 januari 1978 in werking getreden en bevat afspraken over dumping van afval (waaronder hoogradioactieve stoffen) en andere stoffen in zee. Dit verdrag is in 1996 opgevolgd door een Protocol, waarin een algemeen dumpingsverbod is vastgelegd, met uitzondering van enkele niet-radioactieve stoffen (inwerkingtreding 24/10/2008). Het dumpen van radioactief afval in de noordoostelijke Atlantische Oceaan is daarnaast ook verboden op grond van het OSPAR-Verdrag⁴⁶. Dit verdrag is in werking getreden in 1998 en heeft als belangrijkste doel het voorkomen en beëindigen van de verontreiniging van het mariene milieu en het beschermen van het zeegebied tegen de nadelige effecten van menselijke activiteiten ten einde de gezondheid van de mens te

⁴³ (Swedish reference group for P&T research, 2010)

⁴⁴ Voor meer gedetailleerde en technische informatie over Partitie en Transmutatie zijn deze bronnen te raadplegen: (National Nuclear Laboratory, 2013) (Nuclear Decommissioning Authority , 2013).

⁴⁵ (IMO, 1972)

⁴⁶ (OSPAR convention, 1992)

beschermen en het mariene ecosysteem in stand te houden en, wanneer uitvoerbaar, aangetaste zeegebieden te herstellen. Verder is het erop gericht om te komen tot een duurzaam beheer van het zeegebied waarop het OSPAR-Verdrag van toepassing is.

Het storten van radioactief afval in zee is niet verenigbaar met internationale normen en waarden. Deze optie wordt dan ook niet verder onderzocht in dit rapport. Het Zweedse concept waarbij een eindberging vanaf land onder de zeebodem wordt gemaakt, wordt beschouwd als berging in ondergrondse galerijen.

Dump in de ijskap

Gerelateerd aan storten in zee is de dump van radioactief afval in een ijskap. Hierbij wordt warmte producerend afval op het ijs geplaatst waardoor het ijs smelt en de container in de ijskap zakt. Na bevriezing van het gesmolten ijs is de container geïmmobiliseerd in de ijslaag. Deze verwijderingsmethode is enkel geschikt voor warmte producerend afval. Vanwege het ontbreken van ijskappen is deze beheeroptie in Nederland niet te realiseren. Daarnaast wordt op basis van internationale waarde en normen deze optie niet als gewenst beschouwd. Dit is onder andere vastgelegd in het Antarctische Verdrag⁴⁷. Het Antarctische Verdrag geldt voor het hele gebied onder de 60 graden zuiderbreedtelijn en stelt dat Antarctica enkel voor vredelievende doeleinden gebruikt mag worden. Nucleaire explosies en opslag van radioactief afval worden in het Verdrag verboden. Naast Antarctica heeft Groenland ook een ijskap. Maar ook Denemarken laat geen eindberging van radioactief afval in Groenland toe.

Dump in een ijskap kan niet in Nederland worden gerealiseerd (er is geen ijskap) en is tevens onverenigbaar met internationale normen en waarden. Daarom wordt deze optie niet verder onderzocht in dit rapport.

Directe injectie

Vloeibaar radioactief afval kan in een, zich op grote diepte bevindende, geschikte gesteentelaag worden geïnjecteerd. Hierbij wordt het afval in de poriën van het gesteente opgenomen en door de omliggende lagen vastgehouden. Het afval is niet meer terugneembaar na injectie.

Directe injectie is in het verleden in de Verenigde Staten en de Sovjet-Unie op beperkte schaal toegepast. Grootste bezwaar om deze optie toe te passen, is de grote onzekerheid over de eventuele migratie van radionucliden. Dit komt mede doordat het afval op een relatief ongecontroleerde manier op grote diepte wordt gebracht. Directe injectie is alleen geschikt voor vloeibaar afval, het merendeel van het Nederlandse (hoogradioactieve) afval is niet vloeibaar. Daarnaast wordt in het Besluit Stralingsbescherming⁴⁸ lozing van radioactieve stoffen in de bodem verboden.

Directe injectie valt hierdoor af als eindbergingsmethode voor vloeibaar radioactief afval en wordt niet meegenomen in dit rapport.

Fusie met gastgesteente

Een optie voor warmte producerend materiaal is het plaatsen van dit materiaal met een minimum aan pakking op 2 of 3km diepte. Door de gegenereerde warmte smelt het omringende gesteente waardoor het afval in het gesteente zakt. Na afkoeling is een goed afgedichte laag rondom het afval ontstaan. Het afval zou zelfs zo diep kunnen zakken dat het tot de vloeibare magma onder de aardkorst komt.

De methode kent nog geen praktische toepassing en is alleen een optie voor sterk warmte producerend materiaal. Er is nog weinig onderzoek naar deze methode gedaan. Daarnaast is een belangrijk nadeel dat

⁴⁷ (Secretariat of the Antarctic Treaty, 1959)

⁴⁸ (Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid, 2001) Artikel 35

de migratie van radionucliden in deze optie niet met voldoende nauwkeurigheid bepaald kan worden. Het afval is niet meer terugneembaar.

Net als directe injectie valt deze optie daarom af en wordt deze niet verder onderzocht in dit rapport.

Dump in de ruimte

Onder dump in de ruimte wordt het brengen van radioactief afval naar een baan om de aarde of daarbuiten verstaan. Schadelijke besmetting van de ruimte is door middel van het ruimteverdrag⁴⁹ uitgesloten. Daarnaast worden, sinds het ongeluk met de spaceshuttle Challenger in 1986, de risico's van deze dump onaanvaardbaar geacht. Het afval is tevens niet meer terugneembaar.

Dump in de ruimte is daarom onverenigbaar met de internationale waarden en normen en wordt daarom niet verder onderzocht in dit rapport.

Storten in een oude mijn

Radioactief afval kan worden gestort in oude mijnen (bijvoorbeeld zoutmijnen). De omliggende geologische structuur, in combinatie met materiaal waarmee de mijn wordt afgedicht, vormt dan een barrière tegen straling. Deze optie is relatief goedkoop ten opzichte van ondergrondse galerijen, omdat er geen schacht hoeft te worden gegraven. De terugneembaarheid is redelijk, zo lang het afval toegankelijk blijft via de schacht. Deze kan echter ook instorten waardoor het lastiger wordt het afval terug te halen.

In enkele landen bestaat deze vorm van langetermijnbeheer al, waaronder Duitsland. In de afgelopen 10 jaar is hier echter veel discussie over ontstaan. In Asse en Morsleben (Duitsland) zijn ondergrondse schachten ingestort. Enkele anderen staan op instorten. Daarnaast zorgt de ondergrondse druk voor het ontstaan van scheuren in het gesteente, waardoor grondwater in aanraking kan komen met het radioactieve afval.

In Nederland wordt het bergen van radioactief afval in een oude mijn niet als realistische optie gezien, omdat uitgegaan wordt van een zogenaamde 'dedicated facility' (speciaal ontworpen faciliteit). Dat betekent dat de faciliteit, waarin radioactief afval wordt geborgen, speciaal voor dat doel ontworpen moet zijn. Berging in een oude mijn wordt daarom niet als geschikte beheeroptie meegenomen in dit rapport. Het is wel mogelijk dat er in of vanuit een oude mijn een speciaal ontworpen geologische bergingsfaciliteit wordt gebouwd.

⁴⁹ (United Nations, 1974)

4

Afweging beheeropties

Dit hoofdstuk beschrijft de aanpak en het afwegingskader dat in dit rapport is gehanteerd. In paragraaf 4.1 worden eerst de methodiek en afbakening van het rapport toegelicht. Deze afbakening is van belang, omdat dit het vertrekpunt vormt voor de gekozen wijze van afwegen en de aandachtsgebieden (geologie, veiligheid, economie en ethiek) die zijn beschouwd. Per aandachtsgebied wordt het afwegingskader beschreven op basis waarvan de beheeropties tegen elkaar worden afgewogen. In paragraaf 4.2 t/m 4.5 wordt het afwegingskader per aandachtsgebied toegelicht.

4.1 METHODIEK EN AFBAKENING

Dit rapport heeft een abstract karakter. Het is de eerste stap in een reeks steeds concreter wordende stappen die de komende 100 jaar worden genomen om tot een definitieve keuze voor een beheeroptie en locatie daarvoor te komen. Omdat op dit moment een locatiekeuze nog niet aan de orde is en omdat (technische) details van beheeropties pas over tientallen jaren definitief worden uitgewerkt, wordt in dit rapport een afweging op hoofdlijnen gemaakt.

Dit betekent dat:

- Een kwantitatieve beoordeling nog niet aan de orde is.
- Er een beschouwing wordt uitgevoerd op basis van vier aandachtsgebieden.

Hierna wordt toegelicht waarom voor deze afbakening is gekozen. Dit neemt niet weg dat in latere besluitvormingsstadia wel alle relevante milieuaspecten beoordeeld zullen worden, waar nodig en mogelijk op basis van kwantitatieve beoordeling. Dit is nu echter niet aan de orde.

Geen kwantitatieve beoordeling

Zonder technische uitwerking van de beheeropties en zonder specifieke omgeving waarin een beheeroptie wordt toegepast, is het niet zinvol te rekenen aan de effecten. Er moeten dusdanig veel aannames worden gedaan dat de uitkomsten in dit stadium weinig waarde hebben. Een kwantitatieve uitwerking zou dan ook een vals gevoel van nauwkeurigheid geven. Daarbij komt nog dat deze nauwkeurigheid op dit moment niet voor alle beheeropties in dezelfde mate gehaald kan worden.

In plaats van een kwantitatieve beoordeling zal daarom een kwalitatieve beoordeling worden gegeven door experts op het gebied van de aandachtsgebieden veiligheid, geologie, economie en ethiek. Deze kwalitatieve beoordeling houdt in dat per beheeroptie een beschrijving wordt gegeven van effecten die wel en niet verwacht worden. Op basis van die beschrijving worden de voor- en nadelen van de beheeropties vanuit het perspectief van elk van de aandachtsgebieden in kaart gebracht.

Een beschouwing op basis van vier aandachtsgebieden

In dit rapport wordt geen beoordeling uitgevoerd voor reguliere milieuaspecten als lucht, geluid, ecologie, landschap, cultuurhistorie en archeologie. De effectbeoordeling van de meeste van deze aspecten heeft namelijk een sterke relatie met de omgeving⁵⁰ (zijn gebieds- en locatiespecifiek) en zijn daarnaast sterk afhankelijk van de technische uitvoering van de beheeropties. Omdat er in het kader van het nationale programma geen gebieds- en of locatieafwegingen worden gemaakt, wordt in deze fase geen effectbeoordeling voor deze aspecten uitgevoerd.

In dit Rapport Verkenning opties voor het beheer op de lange termijn wordt een afweging van de beheeropties gemaakt op basis van vier aandachtsgebieden, namelijk:

- Veiligheid.
- Geologie.
- Economie.
- Ethiek.

Voor deze aandachtsgebieden is gekozen, omdat ze in belangrijke mate leidend zijn in de vraag over de haalbaarheid en wenselijkheid van de beheeropties. Vinden we de opties veilig genoeg? Zijn er geschikte geologische lagen waarin we de opties kunnen realiseren? Kunnen we het bekostigen en moeten we het eigenlijk wel willen? Veiligheid heeft de hoogste prioriteit bij de afweging tussen de beheeropties. Daar wordt in de beoordelingen dan ook de meeste aandacht aan besteed. De andere aandachtsgebieden hebben een sterke relatie met veiligheid. Geologie fungeert bij sommige beheeropties (geologische berging) als een extra veiligheidsfunctie. Voldoende (economische) middelen is een belangrijke randvoorwaarde om een beheeroptie tot in de verre toekomst veilig te kunnen beheren. Ten slotte wordt bij ethiek ook de veiligheid vanuit toekomstige generaties beschouwd.

Hoewel deze aandachtsgebieden de voor- en nadelen van de beheeropties niet uitputtend in beeld brengen, geven ze in de huidige fase, waarin voorlopig nog geen keuze wordt gemaakt voor één van de beheeropties, inzicht in de haalbaarheid en wenselijkheid van de verschillende beheeropties. In de navolgende paragrafen wordt per aandachtsgebied het afwegingskader gepresenteerd.

4.2 AFWEGINGSKADER VEILIGHEID

Veiligheid heeft betrekking op de stralingsbescherming voor mens en milieu, en op de veiligheid van faciliteiten en activiteiten die zijn blootgesteld aan stralingsrisico's⁵¹. De veiligheidsbenadering omvat alle manieren waarop de veiligheid wordt gewaarborgd gedurende de levensduur van een faciliteit en daarbuiten.

In onderstaande tabel zijn deze afwegingscriteria opgenomen. Na de tabel zijn deze toegelicht. In figuur 13 onder de tabel worden sommige termen verklaard.

⁵⁰ De effecten op lucht en geluid zouden onafhankelijk van locatie kunnen worden bepaald.

⁵¹ (Nuclear Decommissioning Authority (NDA), 2010)

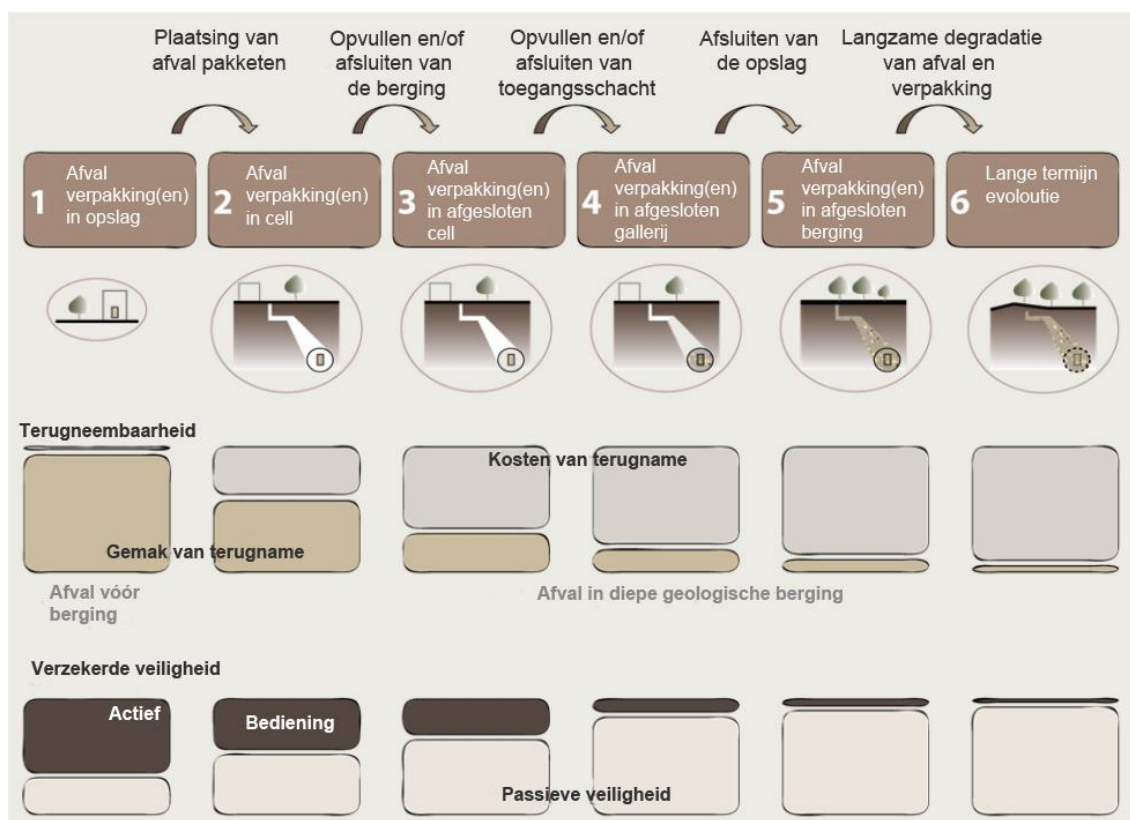
Aandachtsgebied	Afwegingscriteria
Veiligheid	<ul style="list-style-type: none"> Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid Passieve veiligheidsfuncties Meervoudige veiligheidsfuncties Insluiting van het afval Isolatie van het afval Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

Inzicht in aanpak/system en vertrouwen veiligheid

Bij dit criterium wordt beschouwd in hoeverre er over een toepasselijk lange periode voldoende inzicht is in de aanpak en/of eigenschappen van de faciliteit en haar gastomgeving en van de factoren die de veiligheid beïnvloeden (na sluiting), zodat er voldoende vertrouwen ontstaat in de veiligheid.

Passieve veiligheidsfuncties

Voor dit criterium wordt beschreven in hoeverre een toekomstige locatie zodanig wordt onderzocht en de faciliteit zodanig wordt ontworpen, gebouwd, geëxploiteerd en gesloten (waar van toepassing), dat veiligheid met passieve middelen op het hoogst mogelijke niveau kan worden gegarandeerd en dat de noodzaak tot actie na het sluiten van de faciliteit (waar van toepassing) wordt geminimaliseerd. Actieve veiligheid wordt dus voor een groot deel verzorgd door menselijk handelen en actieve monitoring. Passieve veiligheid wordt gegarandeerd door niet menselijke factoren, zoals gastgesteente en gebruikte materialen.



Figuur 18 Relatie tussen terugneembaarheid en veiligheid en de verschillende fasen van (geologische) berging (Verhoef & Neeft, 2014).

Meervoudige veiligheidsfuncties

De veiligheid wordt verzorgd door meervoudige veiligheidsfuncties, onder andere door een grondige selectie van het gast(gesteente), de omgeving en het ontwerp van technische afsluitingen. De totale prestatie van het systeem mag niet overmatig afhankelijk zijn van een enkele veiligheidsfunctie. Bij het criterium veiligheid worden de beheeropties daarom op de mogelijkheid van meervoudige veiligheidsopties beoordeeld (zie ook Figuur 19). Insluiting van het afval en isolatie van het afval zijn onderdeel van meervoudige veiligheidsfuncties.

Insluiting van het afval

Onder insluiting wordt verstaan: het zodanig ontwerpen van de faciliteit dat het vrijkomen van radionucliden uit het afval wordt voorkomen of geminimaliseerd. Dit kan worden gegarandeerd door een aantal fysieke barrières in het systeem, en door radioactief verval dat zover is gevorderd dat het gevaar van het afval aanzienlijk is gereduceerd. De beheeropties worden op deze mogelijkheden beoordeeld.

Isolatie van het afval

Bij dit criterium wordt beoordeeld in hoeverre de faciliteit zo wordt gesitueerd, ontworpen en geëxploiteerd dat zij over alle eigenschappen beschikt die bedoeld zijn om het radioactieve afval te isoleren van mensen en de omgevende biosfeer. Daarbij wordt rekening gehouden met zowel de natuurlijke evolutie van het systeem als gebeurtenissen die de faciliteit zouden kunnen verstoren.

Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

Ook voor passieve veiligheidsfuncties kan het wenselijk zijn een toepasselijk niveau van toezicht en beheer voor de bescherming en handhaving van de passieve veiligheidsfuncties te hebben. Bij dit criterium wordt bekeken in hoeverre dit noodzakelijk is, zodat deze veiligheidsfuncties ook na sluiting volledig intact blijven.



Figuur 19 Afbeeldingen van voorbeelden van meervoudige barrièresystemen zoals gebruikt voor (a) middelradioactief afval en (b) hoogradioactief afval en verbruikte splijtstoffen (op basis van een figuur uit: (Nuclear Decommissioning Authority (NDA), 2010)).

4.3 AFWEGINGSKADER GEOLOGIE

Geologie wordt vanuit het aandachtsgebied veiligheid beschouwd als een passieve veiligheidsfunctie. Om deze functie goed te kunnen vervullen moeten er wel geschikte geologische lagen aanwezig zijn voor de beheeropties. Dit wordt bekeken binnen het aandachtsgebied geologie. Er wordt zowel gekeken naar geschikte geologische lagen als mogelijk ander gebruik in de diepe ondergrond (medegebruik).

Ondergrond in Nederland

De opbouw van de Nederlandse ondergrond, in combinatie met de vereisten die aan de geologische omgeving worden gesteld, levert een aantal mogelijkheden op voor geologische berging (zowel in diepe boorgaten, als in ondergrondse galerijen). Geschikte geologische lagen voldoen aan een aantal criteria, zoals^{52,53}:

- De geologische omgeving (aardlagen) is goed te karakteriseren en heeft geometrische, fysische en chemische eigenschappen die de migratie van radionucliden van de bergingsinstallatie naar het milieu kunnen beperken. Uniforme formaties (met zelfde gesteente type, korrelgrootte en eigenschappen) in relatief eenvoudige geologische settings zijn te verkiezen omdat ze waarschijnlijk beter te karakteriseren zijn en de toekomstige evolutie nauwkeuriger ingeschat kan worden.
- Mogelijke toekomstige geodynamische fenomenen (onder andere seismiciteit en vulkanisme) beïnvloeden de geologische formatie niet op een zodanige manier dat het isolatievermogen van de bergingsinstallatie in het gedrang komt.
- De hydrogeologische kenmerken (hoe is het gedrag van water in het gesteente) van de geologische lagen moeten grondwaterstromingen beperken.
- Er moet rekening gehouden worden met de huidige en potentiële menselijke activiteiten op of nabij de locatie van de bergingsinstallatie. De kans dat menselijke activiteiten de isolatiecapaciteit van de bergingsinstallatie in het gedrang brengen, moet geminimaliseerd worden.

Hierbij is één laagpakket niet op voorhand beter dan een ander laagpakket. Het gaat ook om de veiligheid die combinaties van pakketten kunnen bieden.

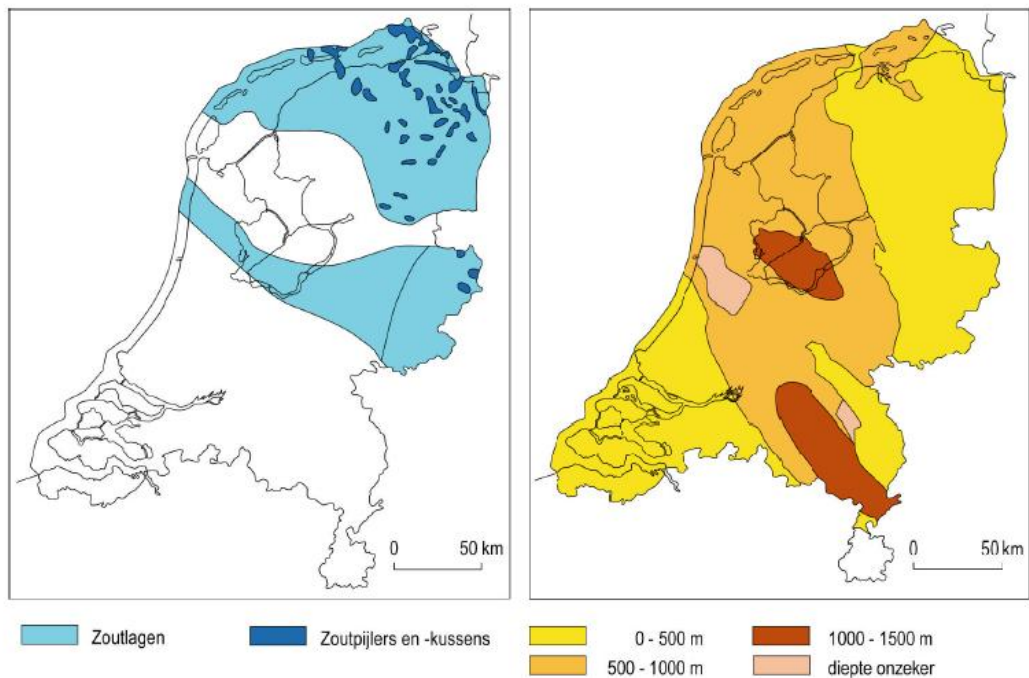
In verschillende onderzoeksprogramma's (OPLA, CORA, OPERA, zie paragraaf 2.3) zijn de potentiële geologische voorkomens in beeld gebracht en is de geschiktheid onderzocht. De geologische voorkomens die voldoen aan de bovengenoemde voorwaarden voor geologische berging, zijn steenzout en kleipakketten (zie Figuur 20). Berging in zout levert een goede barrière-werking, vanwege de natuurlijke plastische eigenschappen van zout waardoor ruimten worden dicht gedrukt en het afval door het zout wordt ingesloten. Hiermee wordt een passief-veilig opbergsysteem verkregen. Klei lijkt dezelfde plastische eigenschappen te bezitten als zout.

Hieronder volgt een beschrijving van deze geologische voorkomens, die is gebaseerd op de beschrijving in 'De ondergrond van Nederland'⁵⁴ en verschillende rapporten uit het CORA programma. In de Nederlandse ondergrond ontbreken ondiepe granietvoorkomens, die in andere landen (onder andere in de USA en Zweden) als (potentiele) bergingslocatie aanwezig zijn.

⁵² (IAEA, 2011)

⁵³ (IAEA, 2003)

⁵⁴ (De Mulder, E.F.J., M.C. geluk, I. Ritsema, W.E. Westerhoff & T.E. Wong, 2003)



Figuur 20 Kaarten met voorbeelden van potentiële gastgesteenten voor de eindberging van radioactief afval in Nederland: verbreiding van steenzout (links) en diepteligging Boomse Klei (rechts) – zoals gebruikt in het OPERA Meerjarenplan⁵⁵.

Steenzout

In de Nederlandse ondergrond is in de noordelijke helft van het land steenzout aanwezig. In verschillende Nederlandse onderzoeksprogramma's (OPLA, CORA, OPERA, zie paragraaf 2.3) zijn de verbreiding, de eigenschappen en de mogelijkheden van berging in het steenzout onderzocht. In Duitsland is praktijkonderzoek gedaan naar de mogelijkheden van de berging in zout van dezelfde ouderdom. Het zout is gevormd tijdens het Perm en afgezet in meerdere dikke lagen: De Zechstein groep. Een deel van deze lagen is na afzetting en begraving in de ondergrond vervormd tot zoutpijlers en zoutkussens. Deze zoutpijlers- en kussens reiken vanuit de oorspronkelijke laag omhoog. De dikte van de oorspronkelijk zoutlagen bedraagt enkele tientallen meters tot meer dan 700m. In de zoutpijlers – en kussens kan de dikte van het zout oplopen tot 2 km. De Zechstein groep bestaat uit een afwisseling van lagen met verschillende samenstellingen en omvat naast de steenzoutlagen ook schalies, kalksteen en dolomiet. Naast steenzout bevinden zich ook andere zouten in deze afzettingen, waaronder anhydriet (gedehydrateerd gips), carneliet en kieseriet.

Zechstein zouten zijn op verschillende plekken in Nederland gewonnen door middel van oplossingsmijnbouw. Bij oplossingsmijnbouw blijven cavernes (holtes) in de ondergrond achter. In de Nederlandse zoutvoorkomens heeft geen mijnbouw via schachten plaatsgevonden. Zechstein zoutlagen vormen voor verschillende gasvoorkomen in de Nederlandse ondergrond, waaronder het Slochteren gasveld, de afsluitende laag boven het reservoir gesteente (gesteente waar het gas zich in bevindt).

⁵⁵ (Verhoef, Meerjarenplan OPERA, 2011)

Tertiare kleipakketten

Verscheidende Tertiare kleipakketten zijn geïdentificeerd als potentieel geschikt voor berging, waarvan de Boomse klei de bekendste is. De mogelijkheden voor berging in de Boomse klei worden al tientallen jaren onderzocht in België (SCK-CEN, in⁵⁶). Ook in de Nederlandse ondergrond is Boomse klei aanwezig. De Boomse klei maakt deel uit van de Rupel formatie en komt vrijwel overal in de Nederlandse ondergrond voor.

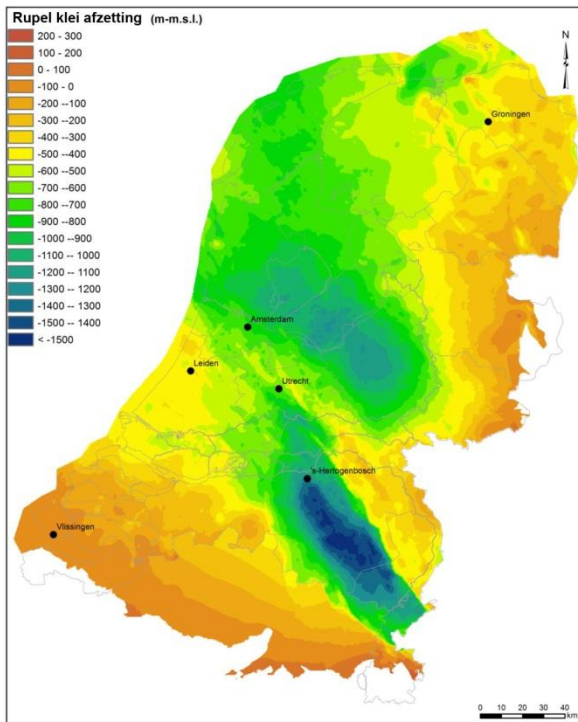
Tertiair en formatie van Rupel

Tertiair is een aanduiding voor een geologische periode van ongeveer 65 miljoen jaar geleden tot 2,5 miljoen jaar geleden. Het tertiair is weer onder te verdelen in subperioden met namen zoals het Paleoceen, Eoceen, Oligoceen, Mioceen en Pliocene. In al deze perioden lag het grootste deel van Nederland onder zeewater (met uitzondering van Zuid Limburg). Er werden in deze perioden verschillende materialen afgezet, zoals zand, kalksteen, klei en grind. Zo'n pakket van materialen dat is afgezet wordt een formatie genoemd. Vaak is de formatie genoemd naar een plek waar deze formatie is ontdekt of aan de oppervlakte ligt (bijvoorbeeld: de formatie van Maastricht). In het Oligoceen (33,9 – 23 miljoen jaar geleden) was de zee boven Nederland relatief diep en zijn er dikke kleifformaties afgezet van soms wel enkele honderden meters. Één van die formaties heet de formatie van Rupel. De zogenaamde Boomse klei ligt in deze formatie.

De diepte van het voorkomen verschilt sterk (zie Figuur 20) en ook de dikte van het pakket verschilt (zie Figuur 21). De samenstelling van de Boomse klei varieert. Deze bevat op sommige plekken meer of minder silt (materiaal met korrelgrootes tussen klei en zand) en zand en ook meer of minder organisch materiaal. Deze variaties geven de Boomse klei een duidelijke horizontale gelaagdheid.

Naast de Boomse klei uit de Rupel formatie is in het CORA onderzoek ook gekeken naar de verbreiding en de eigenschappen van andere Tertiare formaties. Naast de Boomse klei zijn de Klei van Asse en de Klei van Ieper in deze studie geïdentificeerd voor verder onderzoek, omdat deze in termen van samenstelling, ruimtelijke verbreiding en dikte kansrijke lagen lijken. De Klei van Landen en de Klei van Veldhoven en de Formaties van Oosterhout en Breda bieden geen mogelijkheden, omdat de samenstelling van de pakketten variabel is en de waterdoorlaatbaarheid relatief groot is.

⁵⁶ (Verhoef & Schröder, 2011) (NIRAS, 2011)



Figuur 21 Diepte van de basis en ligging van tertiaire kleien in Nederland (uit: (Vis & Verweij, 2014)).

Klei versus zout

Het voordeel van de Tertiaire kleilagen is dat de aanwezige kleimineralen mogelijk de verspreiding van vrijgekomen radionucliden beperken doordat deze kunnen worden gebonden. Het voordeel van het Zechstein zout is dat de potentiële gevolgen van medegebruik kleiner zijn, omdat er minder economisch winbare grondstoffen onder deze lagen zitten.

Afwegingscriteria

De afwegingscriteria voor geologie zijn opgenomen in Tabel 10. Hieronder staat een toelichting voor deze afwegingscriteria.

Tabel 10 Afwegingscriteria geologie

Aandachtsgebied	Afwegingscriteria
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geen of lage migratie grondwater en beperking verspreiding vrijgekomen radionucliden ▪ Homogene en goed te karakteriseren samenstelling laagpakket ▪ Voldoende verbreiding en dikte laagpakket ▪ Geen of beperkte seismische of vulkanische activiteit ▪ Huidig en toekomstig medegebruik

Geen of lage migratie grondwateren en beperking verspreiding vrijgekomen radionucliden

Als radionucliden vrijkomen, dan moeten deze zo min mogelijk verspreiden. Bij een ondergrondse berging zijn het grondwater en de (geo)chemische eigenschappen van het omhullende gesteente de twee factoren die van belang zijn voor de verspreiding van radionucliden. De karakteristeken van het geologische voorkomen moeten zo zijn dat grondwater er niet of nauwelijks door stroomt. Hierdoor wordt het verspreiden van vrijgekomen radionucliden voorkomen of beperkt. Geen of weinig grondwaterstroming treedt op als de doorlaatbaarheid van het geologische voorkomen minimaal is.

De sedimentdeeltjes (kalk- of zandkorrels, kleimineralen, organische delen) of kristallen moeten daartoe vrijwel zonder poriënruimte op elkaar gestapeld zijn. Ook moeten er geen breuken of breukjes door het gesteente lopen waarlangs grondwaterstroming kan plaatsvinden.

Homogene en goed te karakteriseren samenstelling laagpakket

Afhankelijk van hun ontstaanswijze en de veranderingen die daarna hebben plaatsgevonden hebben geologische voorkomens een samenstelling die wel of niet varieert. Variatie in de samenstelling kan optreden in het horizontale en in het verticale bereik.

Voldoende verbreiding en dikte laagpakket

Ook de verbreiding en de dikte van de geologische voorkomen is afhankelijk van hun ontstaan en van de veranderingen die daarna hebben plaatsgevonden.

Geen of beperkte seismische of vulkanische activiteit

Seismische activiteit in Nederland vindt plaats rond de actieve breuken in het zuidoosten van Nederland (Roerdalslenk) en gekoppeld aan de winning van aardgas in Groningen, Drenthe en Noord-Holland. Seismische activiteit, oftewel aardbevingen treden op bij breuken in de ondergrond, waar dan een plotsklapse beweging langs plaatsvindt. Door het optreden van een te zware aardbeving kan een berging op land of onder de grond beschadigen. Ook kan door het optreden van een aardbeving de situatie in de ondergrond dusdanig veranderen dat bijvoorbeeld de grondwaterstromingen wijzigen. Dit soort secundaire effecten kunnen raken aan het eerder genoemde afwegingscriterium over de migratie van grondwater.

Vulkanische activiteit vindt in Nederland niet plaats en er zijn geen aanwijzingen dat in de verre toekomst vulkanische activiteit te verwachten is. Dit onderdeel wordt daarom in de hoofdstukken 6 tot en met 8 niet meer benoemd.

Risico's door huidig en toekomstig medegebruik

De ondergrond wordt voor verschillende doeleinden gebruikt. Bij dit criterium wordt ingegaan op potentiële gevolgen van ander gebruik (medegebruik) van de beoogde lagen voor geologische berging en van de onderliggende en bovenliggende lagen. Huidig medegebruik van de ondergrond omvat de winning van water, de winning van delfstoffen, zoals gas, olie en zout, het winnen warmte en de opslag van gas, CO₂ en warmte en koude. Medegebruik vindt tegenwoordig plaats door het uitvoeren van boringen, die afhankelijk van het type winning van tientallen meters tot enkele kilometers diep reiken. In het verleden heeft ook medegebruik plaatsgevonden door de winning van steenkool in mijnen.

Toekomstig medegebruik zal waarschijnlijk bestaan uit de huidige vormen van medegebruik en mogelijk uit nieuwe vormen van medegebruik. Op dit moment staat uitbreiding van de gaswinning naar schaliegasvoorkomens ter discussie. Waar en op welke wijze medegebruik plaats vindt hangt af van de voorkomens van delfstoffen en warmte en de mogelijkheden voor opslag. De technische mogelijkheden voor de benutting van de ondergrond zijn de afgelopen tientallen jaren steeds toegenomen, bijvoorbeeld door de ontwikkeling van boortechieken (van verticaal naar horizontaal gestuurd) en de ontwikkelingen rond productieverbetering van gas- en olievoorkomens (o.a. injectie van water en stoom, 'fracking').

4.4 AFWEGINGSKADER ECONOMIE

Dit onderdeel gaat in op een aantal economische aspecten van beheeropties op de lange termijn. Deze vormen bouwstenen voor een mogelijke toekomstige maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA).

In een MKBA wordt een integrale afweging beoogd van alle relevante effecten, inclusief veiligheid voor mens en leefmilieu van mogelijke beheeropties op de lange termijn ten opzichte van een referentiealternatief. In deze studie vindt een afweging van de beheeropties plaats op dusdanig hoog abstractieniveau dat deze zich niet leent voor een MKBA. De economische effecten worden hier kwalitatief beschreven.

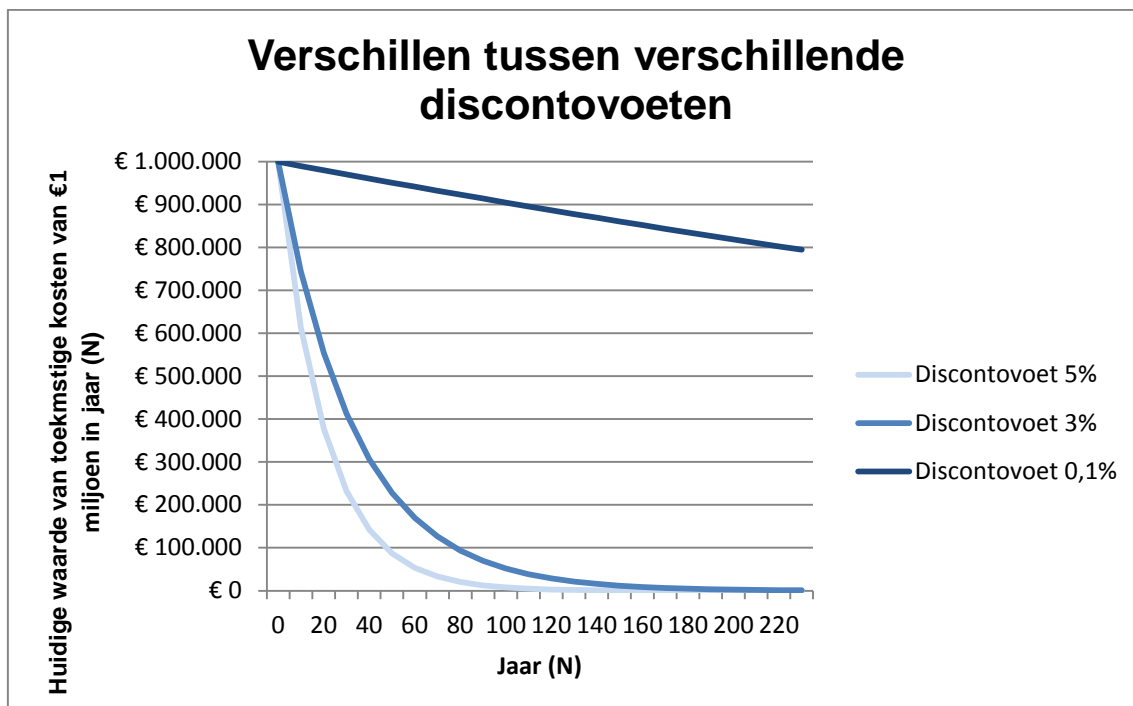
In deze paragraaf wordt eerst een algemene beschouwing over de wijze van economische waardering van effecten gemaakt, met name in relatie tot het langetermijnkarakter van de activiteit. Vervolgens wordt ingegaan op de financiering van de beheeropties. Dit zijn zaken die van toepassing zijn op alle beheeropties en die daarom ook niet meer terugkomen in de afweging tussen de beheeropties (in de hoofdstukken 6 tot en met 9). Vervolgens wordt in deze paragraaf aandacht besteed aan de afwegingscriteria die vanuit economisch perspectief relevant zijn en onderscheidend voor de verschillende beheeropties; kosten en ruimtebeslag.

Waarderingsmethodiek

In 'standaard' economische waarderingsmethodieken, zoals ook toegepast in maatschappelijke kosten-batenanalyses, wordt een discontovoet gebruikt om de zogenaamde maatschappelijke tijdvoordeel uit te drukken. Kortweg komt dit neer op een lagere waardering van effecten (positief en negatief) die zich op langere termijn voordoen ten opzichte van effecten die eerder optreden. In de praktijk betekent dit dat economische effecten na een tijdhorizon van circa 50 jaar zijn 'weggeëbd'. Dit is weergegeven in Figuur 22.

Toepassing van de gebruikelijke discontovoet zou betekenen dat de per definitie langetermijneffecten van beheer en opslag van het radioactiefafval (honderden tot tienduizenden jaren) niet meegewogen worden bij de afweging tussen de beheeropties. Daarom wordt hier uitgegaan van een discontovoet voorgesteld om een lagere discontovoet te gebruiken, namelijk $\approx 0\%$. Dit is vergelijkbaar met de economische waardering van klimaatmaatregelen, waarbij ook uitgegaan wordt van een zeer lange termijn.⁵⁷

⁵⁷ Zoals o.a. beargumenteerd door Stern (Synapse, 2008).



Figuur 22 Verschillen tussen discontovoeten van $\approx 0\%$, 3% en 5%

Het gevolg van toepassing van een maatschappelijke discontovoet $\approx 0\%$ is dat toekomstige effecten (positief en negatief) net zo zwaar meetellen als dat deze nu gemaakt zouden worden. Daarmee worden de belangen van toekomstige generaties in deze studie in de economische waardering gelijk gesteld aan de belangen van de huidige generatie beslissers.

Financiering

De kosten van inzameling, verwerking en opslag van radioactief afval door COVRA worden voor een groot deel gedekt uit de bijdragen van de afval leverende partijen. Hiermee wordt uitvoering gegeven aan het principe 'de vervuiler betaalt'.

Via een daartoe ingesteld fonds wordt ook voorzien in de financiering van de kosten van eindberging. Dit fonds is gebaseerd op financiering van de kosten van een vorm van eindberging, geraamd op circa € 2 miljard met een bandbreedte van 25%⁵⁸. Het is van belang om te borgen dat de middelen uit dit fonds voldoende zijn om de uiteindelijke berging daadwerkelijk te realiseren. Dit is afhankelijk van

- De kosten van de uiteindelijke gekozen vorm van eindberging;
- De beschikbare middelen uit de (geïndexeerde) financiële bijdragen van leveranciers van radioactief afval en de beleggingsresultaten (rekenrente).

Afwegingscriteria

In tabel 10 zijn de afwegingscriteria opgenomen die voor het aandachtsgebied economie worden gehanteerd, om de onderscheiden beheeropties te beoordelen. Deze beoordeling vindt kwalitatief plaats en, waar mogelijk, ondersteund door enkele globale kengetallen.

⁵⁸ (COVRA, 2013)

Tabel 11 Afwegingskader Economie

Aandachtsgebied	Afwegingscriteria
Economie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten ▪ Ruimtelijke beperkingen

Kosten

Met de hierboven beschreven methode van economische waardering wordt per beheeroptie beschreven wat de toekomstige kosten voor een beheeroptie zijn. Dit gaat om initiële kosten (ontwerp en aanleg opslagfaciliteit), reguliere terugkerende kosten (inzameling, opslag en beheer, monitoring en beveiliging) en kosten om terugneembaarheid van het afval te realiseren. Kanttekening is steeds dat het hier gaat om een kostenberekening van meer dan 100 jaar in de toekomst. Gezien de grote mate van onzekerheid over deze tijdsperiode kunnen de kosteninschattingen daarom alleen worden gebruikt om beheeropties onderling te beoordelen (beheeroptie x is goedkoper dan beheeroptie y).

Ruimtelijke beperkingen

Het toepassen van één van de beheeropties kan ervoor zorgen dat beschikbare ruimte niet kan worden gebruikt voor andere doeleinden. Dit kan zowel gaan om ruimte aan het aardoppervlak rondom de beheeroptie (horizontaal vlak), als ruimte ondergronds. Aan het horizontale vlak kunnen op de plek van de beheeroptie bijvoorbeeld geen andere activiteiten meer plaatsvinden. Daarbij moet de berging rekening houden met kritieke bovengrondse infrastructuur, zoals dijken. Ondergrondse ruimtebeperking is bijvoorbeeld het geval bij geologische berging (zowel in ondergrondse galerijen als in diepe boorgaten). In de directe nabijheid van deze berging kan bijvoorbeeld geen winning van grondstoffen plaatsvinden. In dit rapport is beoordeeld in hoeverre beheeropties tot ruimtelijke beperkingen voor andere doeleinden kunnen leiden.

4.5 AFWEGINGSKADER ETHIEK

De opslag en berging van radioactief afval is vanzelfsprekend ook een onderwerp van ethische discussies. In dit rapport wordt geprobeerd de morele problematiek per beheeroptie te verkennen. In de ethische analyse over opslag en berging van radioactief afval vormt het begrip rechtvaardigheid⁵⁹ de grondslag. Het begrip, zoals gehanteerd door Taebi (2010) is afgeleid van principes van de Amerikaanse politieke filosoof John Rawls⁶⁰ en de Engelse filosoof Brian Barry⁶¹ (zie kader voor korte uitleg).

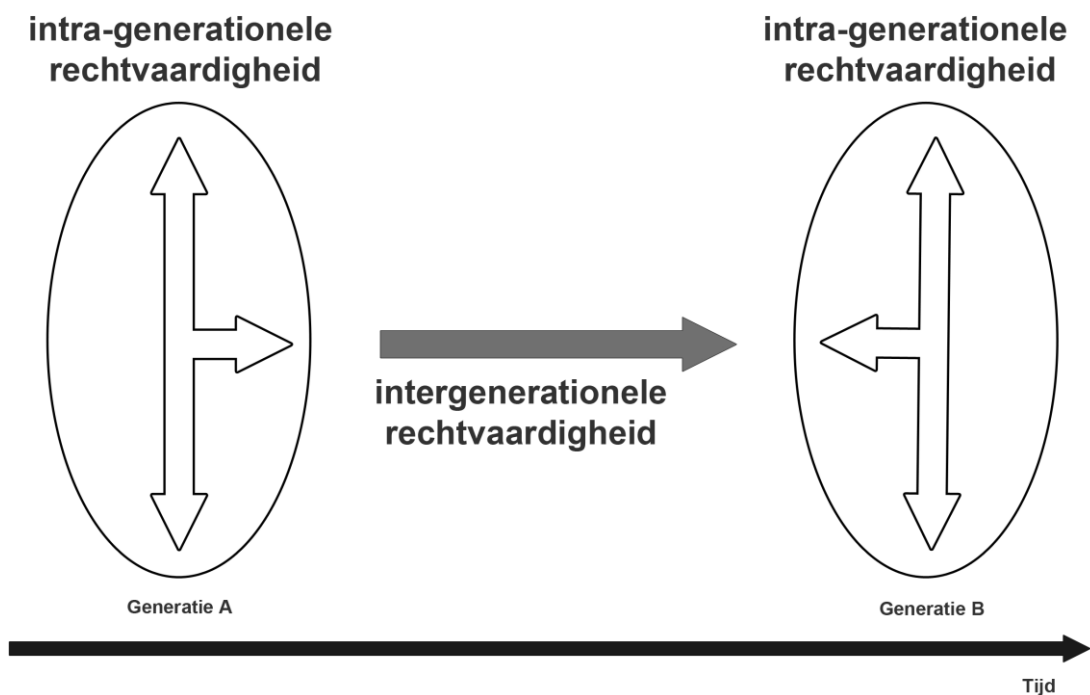
Gezien de zeer lange tijdschalen die nodig zijn voor het veilig beheren van radioactief afval, wordt bijzondere aandacht besteed aan het principe van rechtvaardigheid binnen generaties en tussen generaties (intra- en intergeneratiele rechtvaardigheid) bij de invulling van het recht op ontwikkeling (principe 3 in de Verklaring van Rio de Janeiro⁶²). Dit principe houdt rekening met zowel de behoeftes van huidige en toekomstige generaties bij het recht op ontwikkeling. Deze ethische theorie, ook wel plausibele ethiek genoemd, beschouwt toekomstige generaties gelijk aan de huidige. Deze behandeling is gelijk aan de manier waarop de economisch effecten in de toekomst gelijk worden gesteld aan de huidige. Dit is geïllustreerd in Figuur 23.

⁵⁹ (Taebi, Nuclear Power and Justice between Generations, A moral analysis of fuel cycles, 2010) (Teabi & Kadak, 2010)

⁶⁰ (Wikipedia, 2014)

⁶¹ (Wikipedia, 2014)

⁶² (United Nations, 1992)



Figuur 23 De ruimtelijke en tijdsdimensies van intra- en intergenerationale rechtvaardigheid (Bewerking: Taebi, 2010:13)

Principes van Rawls en toevoeging Barry

- 1) Eerste principe - Aan iedere persoon komt een gelijk recht toe op een zo uitgebreid mogelijk totaalsysteem van gelijke basisvrijheden, dat in overeenstemming is met een gelijkaardig systeem van vrijheid voor allen. Dit principe wordt ook wel het 'gelijkheidsprincipe' genoemd: gelijke basisrechten voor iedereen.
- 2) Tweede principe - Sociale en economische ongelijkheden moeten zodanig worden ingericht dat ze zowel:
 - a) de minst bedeelden er ook op vooruit gaan. Dat betekent dat de sociale groei van een deel van de maatschappij nooit ten koste mag gaan, en ook ten goede komt, aan de minstbedeelden.
 - b) verbonden zijn met functies en betrekkingen die openstaan voor allen onder de voorwaarden van eerlijke gelijkheid van kansen.Dit heet het 'ongelijkheidsprincipe': ongelijkheden mogen bestaan, mits de minst bedeelden daar ook profijt van hebben.

De principes van Rawls zeggen in feite nog niets over de rechtvaardigheid tussen generaties. Om deze reden voegt Taebi (2010: 11) hier noties over duurzame ontwikkeling van Barry aan toe: *'Barry expounds his theory of intergenerational justice by spelling out the normative aspects of the notion of sustainable development and committing that the value of an entity X as we enjoy it should be sustained into the future so that future generations do not fall below our level of X'*. Deze noties over de waarde van een goed X voor toekomstige generaties is een toevoeging aan het tweede principe (het ongelijkheidsprincipe) van Rawls. Het betekent namelijk dat de sociale groei van een deel van de huidige maatschappij nooit ten koste mag gaan, en ook ten goede komt, aan toekomstige maatschappijen.

Voor een effectieve toepassing van het ethische begrip rechtvaardigheid op verschillende beheeropties van radioactief afval moet het begrip worden opgedeeld in beoordelingscriteria.

Daarbij kan gebruik worden gemaakt van 'the Ethical Matrix' (zie Mephram *et al.*, 2006: 5⁶³). Deze onderscheidt de begrippen *welzijn*, *autonomie*, en *rechtvaardigheid*. In de morele discussie over opslag en berging van radioactief afval speelt de lange termijn een dominante rol. Hierdoor is het begrip over rechtvaardigheid ingenomen door het begrip bruikbaarheid (zie ook de begrippen 'Resource Durability' en 'Economic Viability', Taibi & Kadak, 2012: 1358/1360). De drie ethische sleutelbegrippen omvatten tevens de negen principes van radioactief afvalbeheer (zie Tabel 12), die de kern vormen van het Gezamenlijk Verdrag⁶⁴ voor de veiligheid van het beheer van bestraalde splijtstoffen en van het beheer van radioactief afval (IAEA, 1995). Deze zijn opgenomen in Tabel 12.

Tabel 12 De 9 veiligheidsprincipes van IAEA (1995)

Principe nr.	Essentie
1.	Radioactief afval moet zo beheerd worden dat een aanvaardbaar niveau van bescherming van de menselijke gezondheid verzekerd wordt.
2.	Radioactief afval moet zo beheerd worden dat een aanvaardbaar niveau van bescherming van het leefmilieu geboden wordt.
3.	Radioactief afval moet zo beheerd worden dat rekening wordt gehouden met de effecten op de menselijke gezondheid en op het leefmilieu voorbij de nationale grenzen.
4.	Radioactief afval moet zo beheerd worden dat de voorspelde impact op de gezondheid van volgende generaties niet groter zal zijn dan het relevante niveau van impact dat vandaag als aanvaardbaar wordt beschouwd.
5.	Radioactief afval moet zo beheerd worden dat er geen overmatige lasten worden gelegd op de volgende generaties.
6.	Radioactief afval moet beheerd worden binnen een aangepast wettelijk kader, waarin de verantwoordelijkheden duidelijk toegekend zijn en waarin voorzien wordt in onafhankelijke regulerende functies.
7.	Het voortbrengen van radioactief afval zal tot een haalbaar minimum beperkt worden.
8.	De onderlinge afhankelijkheid van al de stappen van het voortbrengen en het beheren van radioactief afval moet afdoende in rekening gebracht worden.
9.	De veiligheid van de installaties voor het beheer van radioactief afval moet gedurende de ganse duur van het beheer afdoende verzekerd worden.

Stakeholders

De belangrijkste stakeholders in de discussie zijn enerzijds *huidige generaties* en anderzijds *toekomstige generaties*. Het is zeer aan te raden om in een later stadium, wanneer er concrete beheeropties voor concrete locaties worden onderzocht, een volledige stakeholdersanalyse uit te voeren aan de hand van de Ethical Matrix. In zo'n analyse zouden dan ook afvalleveranciers, beheerders radioactief afval en onderzoekscentra kunnen worden meegenomen. Het gaat dan vooral om het betrekken van 'concrete' bestaande personen en instanties in het planvormingsproces. Dat kan op verschillende manieren. In een stakeholderanalyse staat de vraag centraal hoe échte, bestaande betrokkenen worden geraakt in hun belangen. Vervolgens kunnen deze belangen in het planvormingsproces onderling worden gewogen.

⁶³ (Mephram, 2006)

⁶⁴ (IAEA, 1995)

Afwegingscriteria

In Tabel 13 zijn de afwegingscriteria opgenomen die voor het aandachtsgebied ethiek worden gehanteerd. In de navolgende paragrafen worden ze toegelicht.

Tabel 13 Afwegingscriteria Ethiek

Aandachtsgebied	Afwegingscriterium	Subcriteria	Principes IAEA, zie Tabel 12
Ethiek	Rechtvaardigheid	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Welzijn: <ul style="list-style-type: none"> – Veiligheid, – Leefomgeving en – Kosten 	Principes 1, 2, 3, 4 en 9
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Autonomie door: <ul style="list-style-type: none"> – Procedurele rechtvaardigheid – Terugneembaarheid – Keuzelast 	Principes 6 en 8
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bruikbaarheid als grondstof 	Principe 5

Welzijn

Welzijn is een breed begrip dat in dit hoofdstuk wordt afgebakend door te beoordelen of de desbetreffende beheeroptie invloed heeft op de leefomgeving, de kosten en de veiligheid van de stakeholders. Radioactief afval heeft de bijzondere eigenschap dat het een hoeveelheid radioactieve stoffen bevat die vanuit het oogpunt van stralingsbescherming specifieke beschermingsmaatregelen vergen. Dit brengt eisen met zich mee op het gebied van veiligheid, leefomgeving. Hiermee zijn hoge kosten gemoeid. De fundamentele veiligheidsprincipes (zie ook ICRP, 2007⁶⁵) vereisen dat de menselijke gezondheid, en haar leefomgeving ook over de grenzen wordt gewaarborgd. Tevens moeten de beheeropties zo lang mogelijk de veiligheid van de installaties voor het beheer van radioactief afval afdoende verzekeren.

Autonomie

Per beheeroptie wordt beschreven in hoeverre de belangrijkste stakeholders, in dit geval de huidige generatie en toekomstige generaties keuzevrijheid hebben, wanneer de beheeroptie wordt toegepast. De belangrijkste vraag is dan met name in hoeverre zowel huidige als toekomstige generaties worden vertegenwoordigd in het huidige democratische proces? Hilhorst⁶⁶ (1987) noemt het uitgangspunt om sterkere politieke vertegenwoordiging van toekomstige generaties in ons democratisch bestel mee te nemen. Dat kan een speciale ombudsman, een regeringscommissie of een eigen belangenbehartiging voor toekomstige generaties zijn. Natuurlijk heeft de 'stem van de toekomst' al een plek in diverse politieke partijprogramma's maar ook in het gedachtegoed van NGO's.

De huidige generatie stelt hoge eisen aan een veilige opslag en berging van kernafval. Dit zou ook moeten gelden voor toekomstige generaties, om negatieve effecten te voorkomen. Om toekomstige generaties gelijk te stellen aan de huidige generatie wordt het begrip terugneembaarheid als beoordelingscriterium gebruikt. Door terugneembaarheid blijft voor een bepaalde periode de mogelijkheid bestaan om het afval terug te nemen uit de opslag of berging en te recyclen of te controleren en eventuele maatregelen te nemen. Onomkeerbare gevolgen kunnen op deze manier worden voorkomen. Tegelijkertijd worden de noodzakelijke inspanningen dus groter, omdat men ervoor moet zorgen dat de opslag intact blijft.

⁶⁵ (ICRP, 2007)

⁶⁶ (Hilhorst, 1987)

Elke volgende generatie wordt daarmee een plicht opgelegd de opslag of eindberging te onderhouden en te controleren.

Een negatief effect is tevens dat met terugneembaarheid ook een eventuele keuzelast wordt doorgegeven. In principe wordt keuze gezien als een vorm van vrijheid en determinisme, maar de keuzeproblematiek omtrent het beheren van radioactief afval kan door toekomstige generaties ook als last worden ervaren.

Bruikbaarheid als grondstof

In dit afwegingscriterium wordt per beheeroptie beoordeeld in hoeverre de beheeroptie nog mogelijkheden biedt om het radioactieve afval te hergebruiken als grondstof: dat wil zeggen hoe lang het economisch gewin kan opleveren omdat het radioactief afval nog als grondstof kan worden gebruikt.

5

Samenvatting beheeropties

Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van de in deel B beschreven voor- en nadelen van de beheeropties. In deel B worden per beheeroptie en vanuit de vier aandachtsgebieden veiligheid, geologie, economie en ethiek deze voor- en nadelen uitgewerkt. Dit hoofdstuk vat de belangrijkste en opvallendste punten samen in een toelichting en een tabel waar de voor- en nadelen systematisch en in trefwoorden in zijn aangegeven.

De beheeropties die in dit rapport beschreven worden zijn niet één op één vergelijkbaar met elkaar. Oppervlakteberging en geologische berging zijn daadwerkelijke eindbergingsopties. Dat betekent dat radioactief afval daarin wordt opgeborgen met als doel dat het daar altijd op een veilige manier blijft liggen. Bovengrondse opslag is in feite bedoeld als tijdelijke opslag van radioactief afval, maar kan in theorie eeuwig worden verlengd. Multinationale berging is een organisatorische oplossing, waar partitie en transmutatie vooral tot doel heeft de radioactiviteit van het afval te verminderen.

De tabel hierna geeft systematisch en in trefwoorden de voor- en nadelen per beheeroptie en vanuit de verschillende aandachtsgebieden weer. Multinationale berging en partitie en transmutatie zijn in zichzelf geen beheeropties, maar kunnen wel invloed hebben op de fysieke beheeropties. Daarom wordt in de tabel de invloed van een keuze voor deze opties op de fysieke opties gegeven. Na de tabel volgt een nadere toelichting op de beheeropties.

Tabel 14 Samenvatting voor- en nadelen beheeropties

	Langdurige bovengrondse opslag	Oppervlakte berging	Geologische berging in ondergrondse galerijen	Geologische berging in diepe boorgaten
Geschiktheid voor type radioactief afval	LMRA en HRA	LMRA (dat binnen enkele honderden jaren vervalt)	LMRA en HRA	LMRA en HRA (beperkte volumes)
Veiligheid				
<ul style="list-style-type: none"> Volwassenheid techniek van de beheeroptie Geologie extra veiligheidsbarrière boven op technische barrières Actief beheer op lange termijn geeft veiligheidsrisico door afhankelijkheid expertise en sociale stabiliteit Opslag/berging gevoelig voor invloeden van buitenaf (klimatologische en menselijke factoren) 	<ul style="list-style-type: none"> bewezen en vaak toegepast niet aanwezig ja ja 	<ul style="list-style-type: none"> bewezen en vaak toegepast mogelijk beperkt aanwezig nee beperkt 	<ul style="list-style-type: none"> in ontwikkeling en beperkt toegepast aanwezig nee zeer minimaal 	<ul style="list-style-type: none"> in ontwikkeling, nog niet toegepast aanwezig nee zeer minimaal
Geologie				
<ul style="list-style-type: none"> Bij locatiekeuze wordt rekening gehouden met seismische activiteit en vulkanisme Geschikte geologische formaties lijken aanwezig in Nederland 	<ul style="list-style-type: none"> ja niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> ja niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> ja ja 	<ul style="list-style-type: none"> ja ja
Economie				
<ul style="list-style-type: none"> Kosten voor realiseren beheeroptie Kosten voor beheer, onderhoud en monitoring Kosten voor terugneembaarheid Bijkomende kosten 	<ul style="list-style-type: none"> laag, maar terugkerend (om 100 – 300 jaar) hoog laag niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> middelmatig middelmatig middelmatig HRA berging 	<ul style="list-style-type: none"> hoog tot sluiting hoog, daarna beperkt oplopend in tijd niet van toepassing 	<ul style="list-style-type: none"> hoog beperkt zeer hoog niet van toepassing
Ethiek				
<ul style="list-style-type: none"> Effect op welzijn huidige⁶⁷ en toekomstige generaties Autonomie toekomstige generaties andere oplossing afval (terugneembaarheid) Balans tussen baten (mogelijk hergebruik) en lasten 	<ul style="list-style-type: none"> beiden, vooral toekomstig groot middelmatig, veel lasten toekomstig generaties 	<ul style="list-style-type: none"> vooral huidige generaties groot, maar afnemend middelmatig, want alleen voor LMRA 	<ul style="list-style-type: none"> vooral huidige generaties middelmatig en afnemend goed 	<ul style="list-style-type: none"> vooral huidige generaties zeer minimaal middelmatig, geen baten toekomstig generaties
Multinationale berging				
<ul style="list-style-type: none"> Vermindert de kosten voor de realisatie van een eindbergingconcept (door gezamenlijk onderzoek etc) meer keuze in geologische formatie en/ of locatie 	<ul style="list-style-type: none"> gedeeltelijk ja 	<ul style="list-style-type: none"> gedeeltelijk ja 	<ul style="list-style-type: none"> grotendeels (gezamenlijke bouw) ja 	<ul style="list-style-type: none"> gedeeltelijk ja
P&T				
<ul style="list-style-type: none"> Vergroot potentie om optie als eindberging te gebruiken. Verbeterd veiligheid beheeropties door verkorte levensduur afval 	<ul style="list-style-type: none"> ja mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> ja mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> nee beperkt 	<ul style="list-style-type: none"> nee beperkt

⁶⁷ Zoals beschreven in de begrippenlijst wordt met ‘huidige generatie’ de generatie, die een eventueel gekozen eindoplossing aan zal leggen, bedoeld.

Bovengrondse opslag en oppervlakteberging

Voordelen van bovengrondse opslag en oppervlakteberging zijn dat dit vaak toegepaste technieken zijn, waarbij het afval goed gemonitord kan worden. Daarnaast is terugneembaarheid makkelijk en tegen lage kosten te realiseren. Toekomstige generaties hebben daardoor de autonomie om het afval te hergebruiken of een andere oplossing voor het radioactief afval te kiezen, bijvoorbeeld door nieuwe technieken op het afval toe te passen. Nadeel van bovengrondse berging is dat niet te garanderen is dat de keten van actief beheer ononderbroken blijft waardoor de veiligheid op de lange termijn niet te garanderen is. Er is immers geen geologische laag die op de lange termijn als passieve veiligheidsbarrière fungeert. Daarnaast moeten verpakkingen en gebouwen om de 100 tot 300 jaar vervangen worden. Dit levert veiligheidsrisico's op voor toekomstige generaties. Ook leidt dit ertoe dat doorlopend kosten gemaakt moeten blijven worden voor de opslag. Bij oppervlakteberging is dat niet het geval omdat er geen actief beheer nodig is. Nadeel van een oppervlakte berging is echter dat hier alleen LMRA dat binnen enkele honderden jaren vervalt kan worden opgeslagen en er dus nog een aparte oplossing moet worden gevonden voor het HRA en LMRA dat niet binnen enkele honderden jaren vervalt.

Geologische berging

Voordeel van geologische berging is dat de geologische formatie waar het afval in geborgen wordt een extra veiligheidsbarrière oplevert boven op de technische barrières die bovengrondse opslag en oppervlakteberging ook kennen. Nederland kent hiervoor geschikte geologische formaties (voor zover nu bekend Tertiaire kleilagen en Zechstein steenzout lagen). Er is praktijkervaring met een geologische berging in ondergrondse galerijen (in de VS) en het is een veel onderzochte techniek, die internationaal als veilig wordt beschouwd. Geologische berging in diepe boorgaten is technisch minder ver ontwikkeld en ook nog nergens ter wereld toegepast. Het lijkt vooral geschikt voor kleine hoeveelheden radioactiefafval.

Na sluiting van een geologische berging is in principe geen actief beheer meer nodig, waardoor daarna geen lasten worden doorgegeven aan toekomstige generaties. De initiële kosten voor geologische berging zijn hoog vergeleken met bovengrondse opslag en oppervlakteberging, daar tegen over staat dat er veel beperkter kosten doorgeschoven naar toekomstige generaties. Bij geologische berging in ondergrondse galerijen is terugneembaarheid voor een bepaalde periode goed te realiseren, hoewel dit wel duurder is dan bij bovengrondse opslag en oppervlakteberging. Bij geologische berging in diepe boorgaten is terugneembaarheid zeer lastige te realiseren, als het al mogelijk is.

Multinationale berging

Multinationale berging is geen uitwerking van een technische oplossing maar een organisatorische oplossing rond een beheeroptie. Deze heeft als voordeel dat landen hun kennis kunnen bundelen en een bredere keuze aan locaties beschikbaar is, wat uiteindelijk kan leiden tot een veiligere oplossing. Omdat het aantal eindbergingen afneemt, is daarmee ook het totale veiligheidsrisico kleiner. Ander voordeel is dat de kosten voor de eindberging gedeeld worden. Nadeel is dat afval over langere afstanden getransporteerd moet worden en dat landen onderling goede afspraken moeten maken over de overdracht van verantwoordelijkheden op de lange termijn. Multinationale berging kan leiden tot het beperken van de autonomie van zowel de huidige als van toekomstige generaties.

Partitie en transmutatie (P&T)

Partitie en transmutatie zijn technieken die nog in ontwikkeling zijn en naar verwachting nog vele decennia onderzoek vergen voordat deze op grote schaal kunnen worden toegepast. Partitie en transmutatie leiden niet tot een vermindering van de hoeveelheid radioactief afval, maar wel tot een kortere levensduur van HRA. Voordeel is daarom dat dit HRA daardoor met minder risico's voor de verre

toekomst in een eindberging kan worden geborgen. Nadeel is dat bij het toepassen van partitie en transmutatie ook weer LMRA wordt geproduceerd en dat de verbruikte splijtstoffen die momenteel verglaasd worden opgeslagen niet meer geschikt zijn voor P&T. Daarnaast vereist P&T een continue splijtstofcyclus. Door de huidige praktijk van het verglazen van verbruikte splijtstoffen en door het lange ontwikkeltraject van P&T is veruit het grootste deel van het in Nederland voorziene radioactieve afval niet geschikt voor deze optie.

Deel B

6

Langdurige bovengrondse opslag

Dit hoofdstuk beschrijft de voor- en nadelen van de beheeroptie langdurige bovengrondse opslag vanuit het perspectief van de vier aandachtsgebieden veiligheid, geologie, economie en ethiek. Dit is de uitwerking van de samenvatting van de voor- en nadelen van alle beheeropties die in hoofdstuk 5 is opgenomen. Voor de kenmerken van langdurige bovengrondse opslag verwijzen we terug naar paragraaf 3.3. De daar beschreven karakteristieken worden in dit hoofdstuk niet herhaald en als bekend beschouwd. Per aandachtsgebied worden de voor- en nadelen van langdurige bovengrondse opslag beschreven op basis van de afwegingscriteria die voor de aandachtsgebieden geformuleerd zijn in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk sluit af met een korte conclusie per aandachtsgebied.

6.1 VEILIGHEID

De beoordeling van de afwegingscriteria heeft plaatsgevonden aan de hand van een literatuurstudie.⁶⁸

Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid

Bovengrondse opslag is een bewezen techniek, maar het is lastig langdurig actief beheer te waarborgen voor de zeer lange termijn. De verantwoordelijkheid voor afvalbeheer wordt bij langdurige opslag doorgeschoven naar toekomstige generaties, waarbij men erop vertrouwt dat gemeenschappen in de toekomst stabiel blijven. Dat wil zeggen dat door oorlog, verlating of maatschappelijke veranderingen de keten van actief beheer van het afval niet verbroken wordt. Langdurige bovengrondse opslag vereist constant toezicht en leidt mogelijk (ook in de toekomst) tot blootstelling van medewerkers aan radioactieve straling tijdens onderhoudswerkzaamheden. Op dit moment zijn er geen landen die plannen hebben voor het invoeren van langdurige (dat wil zeggen langer dan een paar honderd jaar) bovengrondse opslag.

Om de veiligheid van een bovengrondse opslag aan te tonen wordt gebruik gemaakt van rekenmodellen. Hierbij worden bijvoorbeeld toekomstige grondwaterstromen, stabiliteit van de ondergrond, degraderen van de verpakkingen, etc. gemodelleerd. Rekenmodellen worden gebruikt om aan te tonen of de opslag of berging voldoet alle (veiligheids)eisen, ook op de zeer lange termijn. Naast te modelleren hoe het afval en de opslag zich zullen gedragen wordt er ook bewezen dat de opslag bestand is tegen bepaalde scenario's. Ook wordt er aangetoond wat voor onzekerheidsmarges er bij de uitkomsten van de modellen horen. Dit geldt overigens niet alleen voor bovengrondse opslag, maar ook voor oppervlakte berging en geologische berging.

⁶⁸ (NDA, 2010) (Nuclear Decommissioning Authority, 2012) (Office for Nuclear Regulation, the Environment Agency and the Scottish Environment Protection Agency, 2011) (IAEA, 2009) (Committee on Radioactive Waste Management, 2009) (IAEA, 2006) (United Kingdom Nirex Limited, 2004) (Nordic Nuclear Safety Research, 2011)

Passieve veiligheidsfuncties

Moderne bovengrondse opslagfaciliteiten hebben een levensduur die gewoonlijk niet langer is dan 100 jaar, maar die met goed onderhoud wel beperkt te verlengen is. Bij langdurige bovengrondse opslag is het daarom noodzakelijk om gebouwen en faciliteiten om de 100 tot 300 jaar te vervangen.

Bij langdurige bovengrondse opslag is actief beheer nodig om het afval veilig opgeslagen te houden boven de grond. Bijvoorbeeld een systeem om de omgevingsfactoren binnen de loods te reguleren. Dergelijke systemen dienen echter zo te worden ontworpen dat zij weinig onderhoud vragen, en er bij een defect niet direct herstel/vervanging nodig is. De mate van passieve veiligheid wordt vastgesteld door afweging van diverse factoren, onder andere veiligheid, bescherming van het afval, kosten en duurzaamheid.

Meervoudige veiligheidsfuncties

Bij langdurige bovengrondse opslag moet aan een aantal veiligheidsfuncties worden voldaan, zoals de afvoer van restwarmte, insluiting, stralingsbescherming, terugneembaarheid, beheersing van de uitstoot van gassen naar de buitenwereld en het handhaven van de toegestane omgevingsfactoren binnen de faciliteit. Deze veiligheidsfuncties kunnen in gevaar komen door een aantal tekortkomingen, zoals achteruitgang van de insluiting, blootstelling van personeel of publiek, afname in de afvoer van restwarmte, risico's in verband met het verwerken en stroomuitval. Alle aspecten van het ontwerp van de faciliteit dienen rekening te houden met de verwachte opslagduur (inclusief veroudering en achteruitgang), zodat de faciliteit te allen tijde voldoet aan de gestelde veiligheidsfuncties.

Het aantal mogelijke opeenvolgende storingen neemt toe bij een langere opslagperiode, waarmee ook de risico's van ongevallen en daarmee van blootstelling aan straling van personeel en publiek groter worden.

Insluiting van het afval

Maatschappelijke veiligheid is een belangrijk punt bij een langere opslagperiode, omdat het risico dat het toezicht achterwege blijft of de faciliteit verlaten wordt groter is. Als de opslagfaciliteit gedurende deze langere periode op een veilige wijze wordt geëxploiteerd, zal het risico voor de maatschappij heel klein zijn.

De werkzaamheden worden na verloop van tijd waarschijnlijk intensiever als blijkt dat de opslagfaciliteit moet worden verbouwd of het afval opnieuw moet worden verpakt. Dit kan extra stralingsrisico's opleveren voor het personeel.

Bij de opslag van afval dat splijtbaar materiaal bevat, dient rekening te worden gehouden met de mogelijke gevolgen van een wijziging in de vorm van dat afval door interne of externe gebeurtenissen. Het evaluatierapport over langere opslag bij COVRA concludeerde dat het onwaarschijnlijk is dat de stalen verpakking of de geconditioneerde afvalvorm ernstig achteruit gaat gedurende een opslagperiode van 300 jaar. Dit betekent dat het tijdens deze periode niet nodig is het opgeslagen afval opnieuw te verpakken of opnieuw te conditioneren.

Over een nog langere termijn is het wellicht wel nodig om het afval opnieuw te verpakken, maar dat is kostbaar en arbeidsintensief. Daarvoor zouden, naast de opslagruimtes zelf, specifiek daartoe uitgeruste faciliteiten nodig zijn die men tot in lengte van dagen zou kunnen exploiteren.

Isolatie van het afval

Er moet ook rekening worden gehouden met versturende factoren, zoals bijvoorbeeld stormen, overstromingen, branden en aardbevingen en neerstortende vliegtuigen. In het evaluatierapport over de langere opslag bij de COVRA is daarom bijvoorbeeld de beoordeling van de radiologische risico's veroorzaakt door de overstroming van het LOG meegenomen. Hoe langer het afval wordt opgeslagen, des te groter het cumulatieve risico is dat dergelijke gebeurtenissen zich voordoen.

Bovengrondse opslagfaciliteiten kunnen gevoelig zijn voor indringers en kunnen zelfs een militair doelwit worden. Beveiligingsmaatregelen moeten de gehele periode gehandhaafd blijven.

Over zeer lange termijnen wordt het steeds belangrijker om externe factoren en klimatologische processen en effecten goed mee te wegen. Ook moeten de mogelijkheden van een ijstijd of een meteorietinslag worden meegenomen, die normaliter uitgesloten zijn vanwege de zeer grote intervallen waarmee deze voorkomen.

Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

De veiligheid van langdurige opslag vereist de permanente instelling van een infrastructuur die toezicht en veiligheid garandeert, waarbij de toekomstige maatschappij actief toezicht uitoefent op het radioactief materiaal. Uit de meeste onderzoeken volgt de conclusie dat actief toezicht niet kan worden gegarandeerd over zeer lange termijnen, zodat langdurige of eeuwige opslag praktisch noch aanvaardbaar is.

Bij de overweging van opslag voor een termijn van 100 tot 300 jaar wordt algemeen aangenomen dat er wel organisatorisch beheer aanwezig is om de faciliteit te exploiteren en het benodigde bewakingsniveau te bieden, terwijl bij oneindige opslag eenzelfde soort toezicht op faciliteiten wordt verondersteld. De meeste studies achten het vermogen om adequate bewaking van de locatie over een zeer lange termijn in stand te houden twijfelachtig. In sommige evaluatierapporten worden oorlogen of milieurampen als mogelijke oorzaak genoemd voor een verlaten opslagfaciliteit.

6.2 GEOLOGIE

Geen seismische activiteit

Voor de seismische activiteit geldt dat de kans op het optreden afhankelijk is van het gebied. Voorafgaand aan het realiseren van een langdurige bovengrondse opslag moet beoordeeld worden of er sprake is van een seismisch actief gebied. Door seismische actieve gebieden te vermijden zal de kans op effecten door seismische activiteit voor alle beheeropties hetzelfde zijn.

Criteria diepe ondergrond

De overige afwegingscriteria voor geologie hebben betrekking op de diepe ondergrond en zijn daarom niet van toepassing op bovengrondse opslag. De samenstelling van de diepe ondergrond brengt geen voor- of nadelen met zich mee voor een bovengrondse berging.

6.3 ECONOMIE

Kosten

Kosten voor het oprichten van de beheeroptie

Langdurige bovengrondse opslag biedt de flexibiliteit en de mogelijkheid om het afval eenvoudig terug te nemen. Het kan bovendien een kostenbesparing opleveren als de hoeveelheid te bergen voorraad afneemt vanwege het verval van radioactiviteit tijdens de opslagperiode.

De kosten voor het oprichten van een bovengrondse opslag moeten echter elke 100 tot 300 jaar opnieuw worden gemaakt, omdat (met de huidige stand van de techniek) na deze periode de veiligheid van de gebouwen niet meer gewaarborgd kan worden. De éénmalige investeringskosten voor de bouw van een bovengrondse opslag liggen wel lager dan voor het realiseren van bijvoorbeeld een geologische berging. Echter doordat deze kosten bij deze beheeroptie juist niet eenmalig zijn, maar elke 100 tot 300 jaar opnieuw moeten worden opgebracht, zullen deze kosten op de lange termijn veel hoger uitvallen.

Beheer- en monitoringskosten

De orde grootte beheerkosten van deze beheeroptie kunnen worden afgeleid van de huidige kosten die door COVRA worden gemaakt. Een inschatting kan worden gemaakt uit een combinatie van een kostenkengetal per m³ en de verwachte hoeveelheid afval binnen de termijn van 100 jaar.

Op basis van het jaarverslag van COVRA⁶⁹ kan herleid worden dat er in 2013 op de COVRA-site 237 m³ LMRA en 12,6 m³ HRA ingezameld, verwerkt en opgeslagen is. In totaal was er einde 2012 10.572 m³ LMRA en 85,6 m³ HRA bij COVRA opgeslagen. De totale kosten voor alle activiteiten bedroegen circa € 17 mln in dit jaar.

Op basis van de huidige kostenstructuur en aangeleverde volumes en soorten radioactief afval, zouden de kosten per 100 jaar circa € 1.700 mln. bedragen⁷⁰. Op basis van de beschikbare informatie in het jaarverslag is geen nadere kostentoedeling te maken naar specifieke activiteit (inzameling, verwerking en opslag).

Kosten om terugneembaarheid te garanderen

Er hoeven bij langdurige bovengrondse opslag geen extra kosten geraamd te worden om de terugneembaarheid van het afval te garanderen, omdat het afval direct bereikbaar is.

Ruimtelijke beperkingen

Het ruimtebeslag van de huidige COVRA activiteiten bedraagt ongeveer 20 hectare. Hoewel een deel van het radioactief afval op termijn opnieuw verpakt dient te worden en dit tot meer afval leidt, zal een groot deel van het afval op termijn ook vervallen zijn. De totale hoeveelheid afval bij langdurige bovengrondse opslag neemt daarom vermoedelijk niet toe, waardoor het ruimtebeslag in de toekomst gelijk blijft.

6.4 ETHIEK

Welzijn

Bovengrondse opslag is een bewezen en vaak toegepaste techniek en daarmee veilig toe te passen op korte en middellange termijn, echter veiligheid op de lange termijn is afhankelijk van een keten van actief beheer. Dit vormt een last voor toekomstige generaties en is lastig te waarborgen over een periode van (veel) langer dan 100 jaar. Actief beheer leidt ertoe dat ook toekomstige werknemers bloot zullen worden gesteld aan straling gedurende monitoring, onderhoud en het opnieuw verpakken van radioactief afval. Daarnaast is voor juist actief beheer een goede informatieoverdracht naar de verre toekomst noodzakelijk.

Wat betreft de kosten geldt momenteel voor radioactief afval het principe 'de vervuiler betaalt'. Daarbij worden fondsen aangelegd voor de eindberging van het radioactief afval. De kosten hiervoor worden elke 5 jaar herzien. Bij deze beheeroptie is echter tot in de (verre) toekomst actief beheer en vervanging van gebouwen nodig.

De kosten hiervoor zijn nu onmogelijk in te schatten, laat staan bij elkaar te brengen, dus zullen ook in de toekomst opgebracht moeten worden. Dit betekent dat toekomstige generaties ook financiële lasten zullen dragen.

Autonomie

Het voordeel van deze beheeroptie vanuit het criterium autonomie is dat terugneembaarheid gemakkelijk te realiseren is. Dit stelt toekomstige generaties in de gelegenheid om een andere keuze te maken voor het beheer van het afval dan huidige generaties, wanneer dit door bijvoorbeeld technologische innovaties

⁶⁹ (COVRA, 2013)

⁷⁰ Daarbij geldt dat de nominale waarde \approx contante waarde vanwege een toe te passen discontovoet \approx 0%.

geschikter wordt geacht. Deze keuze kan echter ook als een last worden ervaren. Met deze optie wordt tijd gewonnen om een definitieve bergingsoptie te ontwikkelen en om mogelijk te kiezen voor ander beleid met betrekking tot het afval. Zo kan mogelijke verdere vooruitgang in afvalbeheertechnieken worden toegepast.

Bij langdurige bovengrondse opslag dragen toekomstige generaties echter een onevenredige last ten opzichte van de huidige generatie, aangezien zij mogelijk achterblijven met kosten en met een ruimtebeslag van afval, waarvan ze zelf de lusten niet hebben gehad. Elke 100 tot 300 jaar moeten de gebouwen en verpakking van het radioactief afval vervangen worden. Op het moment dat de opslag aan vervanging toe is, móet er wat mee gebeuren, wil de veiligheid niet in het geding komen.

Bruikbaarheid als grondstof

Het voordeel van deze beheeroptie is dat toekomstige generaties bij bovengrondse opslag goed toegang hebben tot het radioactief afval en de mogelijkheid hebben om te kunnen besluiten het op andere wijze te willen beheren en/of gebruiken. Echter, momenteel wordt het afval 'verglaasd' opgeslagen. Als we toekomstige generaties in staat willen stellen het huidige afval als grondstof te kunnen gebruiken stellen we onszelf ook direct voor de opgave het afval niet verglaasd meer op te slaan. In dat geval zijn eventuele kansen die het hergebruik van het afval als grondstof biedt, in deze beheeroptie te benutten (zie bijvoorbeeld Teabi, 2010: 121). Een bijkomend nadeel hiervan is wel dat ook toekomstige generaties zich zullen moeten blijven inspannen om technologische te blijven ontwikkelen op het gebied van hergebruik binnen en buiten radioactieve brandstofcycli.

6.5 CONCLUSIE

Veiligheid

Langdurige bovengrondse opslag is een bewezen techniek, maar levert organisatorische uitdagingen op doordat het in standhouden van de veiligheidsfuncties (actief beheer) niet is te garanderen op de lange termijn. Daarnaast stelt het mogelijk toekomstige generaties bloot aan straling vanwege de noodzaak om het afval om de 100 tot 300 jaar opnieuw te verpakken. Ten slotte neemt het cumulatieve risico op verstoring van de opslag door externe factoren en klimatologische processen toe.

Geologie

Het vermijden van seismisch actieve gebieden is voor bovengrondse opslag, net als bij alle beheeropties, van belang. De overige afwegingscriteria voor geologie hebben betrekking op de diepe ondergrond en zijn daarom niet van toepassing op bovengrondse opslag. De samenstelling van de diepe ondergrond brengt geen voor- of nadelen met zich mee voor een bovengrondse berging.

Economie

De éénmalige investeringskosten voor de bouw van een bovengrondse opslag liggen lager dan voor het realiseren van bijvoorbeeld een geologische berging. Echter doordat deze kosten bij deze beheeroptie niet eenmalig zijn, maar elke 100 tot 300 jaar opnieuw moeten worden opgebracht, kunnen de kosten uiteindelijk hoger uitvallen.

Ook de kosten voor beheer en onderhoud zijn op de korte termijn goed in te schatten, bijvoorbeeld op basis van de kosten die COVRA jaarlijks maakt. Echter ook deze kosten blijven doorlopen tot op de zeer lange termijn. Het garanderen van fondsen is daardoor zeer lastig.

Ethiek

Deze beheeroptie stelt deze en toekomstige generaties in staat om nieuwe eindbergingsmethodes te ontwikkelen en het radioactief afval dat in deze berging is opgeslagen redelijk gemakkelijk terug te halen

en in die nieuwe berging op te slaan. Echter, de veiligheidsfuncties met dit type beheeroptie op deze lange termijn zijn lastig te borgen. Langdurige bovengrondse opslag legt met name een veiligheidsrisico bij toekomstige generaties, omdat de berging actief beheer vereist. Daarnaast moeten blijvend kosten gemaakt worden, waardoor deze afgewenteld worden op toekomstige generaties.

7

Oppervlakteberging

Dit hoofdstuk beschrijft de voor- en nadelen van oppervlakteberging vanuit het perspectief van de vier aandachtsgebieden veiligheid, geologie, economie en ethiek. Dit is de uitwerking van de samenvatting van de voor- en nadelen van alle beheeropties die in hoofdstuk 5 is opgenomen. Voor de kenmerken van oppervlakteberging verwijzen we terug naar paragraaf 3.4. De daar beschreven karakteristieken worden in dit hoofdstuk niet herhaald en als bekend beschouwd. Per aandachtsgebied worden de voor- en nadelen van oppervlakteberging beschreven op basis van de afwegingscriteria die voor de aandachtsgebieden geformuleerd zijn in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk sluit af met een korte conclusie per aandachtsgebied.

7.1 VEILIGHEID

De beoordeling van de afwegingscriteria heeft plaatsgevonden aan de hand van een literatuurstudie.⁷¹

Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid

BerGING van LMRA in een oppervlakteberging vindt al enkele decennia in diverse landen plaats. Daaruit blijkt dat het een realistische en praktische methode is voor het veilig isoleren van dergelijk radioactief afval. Het afval kan na berging weer worden teruggenomen, al wordt dit na verloop van tijd vaak lastiger naarmate de berging volledig wordt afgesloten.

Passieve veiligheidsfuncties

De vorm van het afval en het materiaal waarin het is verpakt, leveren passieve veiligheidsfuncties op, zoals bescherming tegen radioactieve straling en insluiting van het afval. Gedurende de exploitatiefase zijn ook actieve technische systemen en/of menselijk optreden nodig. Passieve veiligheid draagt bij aan het verminderen van risico's tijdens deze periode.

Veiligheid na afsluiting wordt verzorgd door passieve middelen die inherent zijn aan de eigenschappen van de locatie en de faciliteit en kunnen bestaan uit technische en geologische/natuurlijke barrières.

Meervoudige veiligheidsfuncties

De veiligheidsfuncties tijdens exploitatie kunnen bestaan uit insluiting, beperking van vrijkomen van radioactiviteit, afscherming en beveiliging. Een van de aspecten inherent aan langdurige veiligheid na sluiting bestaat uit de veiligheidsfuncties van de diverse elementen, zoals fysieke insluiting (belemmering van verspreiden van radionucliden m.b.v. een fysieke barrière), chemische insluiting (vertraging en afzwakking van de verspreiding van radionucliden door een chemische barrière), hydrologische aspecten (belemmering van verplaatsing van grondwater door natuurlijke of kunstmatige barrières), afname van de kans op binnendringen en de gevolgen daarvan (door natuurlijke en kunstmatige barrières) en zorgen voor structurele stabiliteit (instandhouding van de geometrie van de opslag door betonnen barrières).

⁷¹ (IAEA, 2001) (IAEA, 2012) (NIRAS, 2012)

Insluiting van het afval

De eigenschappen van de locatie en de verpakking van de oppervlakteberging dragen bij aan passieve insluiting. Met controlesystemen en door toezicht uit te oefenen op de berging en de onmiddellijke omgeving wordt voorkomen dat menselijke activiteiten de door de berging geboden passieve insluiting verstoren. Omdat de oppervlakteberging zich niet op grote diepte in de aarde bevindt, kan deze in een gebied liggen dat direct toegankelijk is voor mensen. Dit betekent dat insluiting voornamelijk afhankelijk is van de technische barrières van de faciliteit (in tegenstelling tot geologische of natuurlijke barrières).

Isolatie van het afval

Zoals hiervoor aangegeven kunnen indringers niet worden uitgesloten. Daarom wordt er, teneinde isolatie te behouden, voorzien in controlesystemen en toezicht voor een aanzienlijke periode. Tijdens de exploitatiefase van de berging (als deze nog niet afgesloten is) moet ook rekening gehouden worden met overstromingen. Deze bedreigingen moet voorafgaand aan de realisatie van een oppervlakteberging bestudeerd worden en bekend zijn. Indien nodig moeten passende maatregelen getroffen worden.

Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

De veiligheid van een opslag- of bergingsfaciliteit mag op lange termijn niet afhankelijk zijn van actieve maatregelen. Dit betekent niet dat geen actief toezicht zal plaatsvinden, zoals in de paragraaf hiervoor ook al genoemd.

Voorbeelden van maatregelen die kunnen worden genomen zijn beperkingen in de toegang voor mens en dier, inspectie van fysieke omstandigheden, onderhoud en controles of de faciliteit werkt zoals voorspeld (bijvoorbeeld door de mate van degradatie van de faciliteit en verpakkingen te controleren).

7.2 GEOLOGIE

Geen seismische activiteit

Voor de seismische activiteit geldt dat de kans op het optreden hiervan afhankelijk is van het gebied waar de berging wordt gerealiseerd. Voorafgaand aan het realiseren van een oppervlakteberging moet beoordeeld worden of er sprake is van een seismisch actief gebied. Door seismische actieve gebieden te vermijden zal de kans op effecten door seismische activiteit voor alle beheeropties hetzelfde zijn.

Criteria diepe ondergrond

De overige afwegingscriteria voor geologie hebben betrekking op de diepe ondergrond en zijn daarom niet van toepassing op oppervlakte berging, omdat deze zich maar tot maximaal een tiental meters onder de grond bevindt. De samenstelling van de diepe ondergrond brengt daarom geen voor- of nadelen met zich mee voor een oppervlakteberging.

7.3 ECONOMIE

Kosten

Belangrijke notie is dat de kosten voor het beheer van radioactief afval in een oppervlakteberging, zoals hierna beschreven, onvolledig zijn. In de oppervlakteberging kan alleen LMRA geplaatst worden. Voor het HRA moet een aanvullende voorziening getroffen moeten worden inclusief bijbehorende kosten.

Kosten voor het oprichten van de beheeroptie

In Nederland is nog geen oppervlakteberging gerealiseerd, op basis waarvan een kosteninschatting gegeven kan worden. In België is wel recentelijk de aanleg van een dergelijk systeem nader onderzocht⁷². Dit betreft een opslagcapaciteit van circa 33.000 – 49.000 m³. De door NIRAS verstrekte kostprijs exclusief onzekerheidsmarge bedraagt € 300 mln. Inclusief onzekerheidsmarge is deze € 400 mln. (prijspeil 2003). Vergeleken met de kosten voor een geologische berging is dit relatief laag. Aanvullend op de oppervlakteberging moet echter ook nog een eindberging voor HRA worden gerealiseerd. De kosten hiervan zijn afhankelijk van het type eindberging dat gekozen wordt.

Beheer- en monitoringskosten

De kosten na sluiting van de berging voor institutionele controle zijn in België geschat op ongeveer 1 miljoen euro per jaar voor een periode van 200 tot 300 jaar⁷³. De periode waarin deze kosten gemaakt worden, is waarschijnlijk vergelijkbaar met de periode waarin na sluiting gemonitord wordt bij een geologische berging. Bij langdurige bovengrondse opslag is de periode waarin deze kosten gemaakt worden veel langer.

Kosten om terugneembaarheid te garanderen

De kosten om terugneembaarheid te garanderen bij oppervlakte berging zijn minder hoog dan bij geologische berging, vanwege de ondiepe ligging. Vergeleken met bovengrondse opslag kunnen de kosten om terugneembaarheid te garanderen hoger zijn, omdat het afval wellicht door meerdere barrières is ingesloten.

Ruimtelijke beperkingen

De ruimtebehoefte in het horizontale vlak is waarschijnlijk vergelijkbaar met die van de bovengrondse opslag. Door de aard van de berging zal waarschijnlijk sprake zijn van een zekere beperking ten aanzien van het verticale ruimtegebruik (aardlagen). De consequenties daarvan zijn locatie afhankelijk.

7.4 ETHIEK

In grote lijnen is de ethische beoordeling van deze optie hetzelfde als van bovengrondse opslag. In deze paragraaf worden alleen de elementen benadrukt die verschillen met die optie. Behalve deze paragraaf wordt voor de beoordeling daarom verwezen naar paragraaf 6.4.

Welzijn

Doordat de oppervlakteberging een eindberging is hoeft er voor LMRA ook niet verder nagedacht te worden over een vervolgbeheer. Daarnaast gaat een oppervlakteberging uit van passief beheer. Dit ontziet zowel huidige als toekomstige generaties. Huidige en toekomstige generaties worden wel voor het vraagstuk geplaatst wat er met HRA moet gebeuren, aangezien dat niet in de oppervlakteberging geplaatst kan worden. Wat betreft veiligheid wordt deze optie als positief gezien, omdat er internationaal praktijkervaring mee is opgedaan.

Wat betreft de kosten voor oppervlakteberging is het een voordeel dat ze eenmalig zijn aangezien dit een beheeroptie is die bedoeld is als eindberging. Dit betekent dat de financiële lasten van de bouw eenmalig zijn en gedragen worden door de generatie die het realiseert. Nadeel is echter wel dat er blijvende kosten

⁷² (ARCADIS, 2011)

⁷³ (NIRAS, 2010)

worden gemaakt voor toezicht en monitoring, maar dit geldt voor een periode die nog te overzien is (200 tot 300 jaar).

Vanuit het financiële perspectief geldt dat de kosten vrij goed zijn in te schatten, waardoor het aanleggen van voldoende fondsen geborgd kan worden. Echter daarnaast dienen ook fondsen voor de eindberging van het HRA gegarandeerd te worden.

Autonomie

De huidige planningspraktijk biedt belanghebbenden door inspraak de mogelijkheid om vanuit verschillende invalshoeken het planningsproces omtrent type en de locatie van de berging te beïnvloeden. Dat geeft huidige generaties een zekere mate van autonomie. Doordat de terugneembaarheid van het afval goed en relatief goedkoop te realiseren is, hebben toekomstige generaties ook een vrij grote autonomie om ervoor te kiezen het radioactief afval terug te halen en op een andere manier te bergen is - mocht dat wenselijk zijn.

Toekomstige generaties worden niet geconfronteerd met een keuzelast voor een berging waar LMRA definitief en veilig kan worden opgeslagen. Wat betreft LMRA worden er daarmee geen lasten doorgeschoven. Voor HRA moet een andere oplossing gekozen worden.

Bruikbaarheid als grondstof

De ethische beoordeling is hetzelfde als die voor bovengrondse opslag, zie paragraaf 6.4.

7.5 CONCLUSIE

Veiligheid

Berging van LMRA in oppervlakte berging is een bewezen en realistische beheeroptie. Na sluiting van de berging borgen passieve functies de veiligheid, maar in praktijk kan ook dan nog actief beheer wenselijk zijn. Omdat het afval niet op grote diepte ligt, blijft het makkelijk toegankelijk en terugneembaar, wat er tegelijkertijd voor zorgt dat monitoring tegen ongewenste (menselijke) activiteiten wenselijk blijft.

Geologie

Het vermijden van seismisch actieve gebieden is voor oppervlakte berging, net als bij alle beheeropties van belang. De overige afwegingscriteria voor geologie hebben betrekking op de diepe ondergrond en zijn daarom niet van toepassing op oppervlakteberging. De samenstelling van de diepe ondergrond brengt geen voor- of nadelen met zich mee voor een oppervlakteberging.

Economie

De kosten voor het realiseren van de oppervlakte berging zijn relatief laag, vergeleken met een geologische berging. De kosten voor toezicht na sluiting van de berging worden waarschijnlijk voor eenzelfde periode gemaakt als bij geologische berging. Bij langdurige bovengrondse berging lopen deze kosten veel langer door. Belangrijkste onzekere kostenfactor is dat bij deze beheeroptie een aanvullende faciliteit voor het HRA gerealiseerd moet worden.

Ethiek

De lasten van radioactief afval, zoals veiligheidsrisico en kosten voor realisatie van de berging worden voor het LMRA door de huidige generatie gedragen. Nadeel is dat oppervlakte berging niet geschikt is voor HRA en de lasten daarvan mogelijk wel door toekomstige generatie gedragen moeten worden. Toekomstige generaties behouden de autonomie om een andere oplossing voor het afval toe te passen, omdat het gemakkelijk terugneembaar is.

8

Geologische berging

Dit hoofdstuk beschrijft de voor- en nadelen van geologische berging vanuit het perspectief van de vier aandachtsgebieden veiligheid, geologie, economie en ethiek. Dit is de uitwerking van de samenvatting van de voor- en nadelen van alle beheeropties die in hoofdstuk 5 is opgenomen. Bij het uitwerken van de voor- en nadelen wordt een onderscheid gemaakt tussen een geologische berging in ondergrondse galerijen en geologische berging in diepe boorgaten. Voor de kenmerken van deze varianten van geologische berging verwijzen we terug naar paragraaf 3.5. De daar beschreven karakteristieken worden in dit hoofdstuk niet herhaald en als bekend beschouwd. Per aandachtsgebied worden de voor- en nadelen van de twee varianten van geologische berging beschreven op basis van de afwegingscriteria die voor de aandachtsgebieden geformuleerd zijn in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk sluit af met een korte conclusie per aandachtsgebied.

8.1 VEILIGHEID

8.1.1 ONDERGRONDSE GALERIJEN

De beoordeling van de afwegingscriteria heeft plaatsgevonden aan de hand van een literatuurstudie⁷⁴.

Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid

De technische haalbaarheid en inzicht in de veiligheid van geologische berging in ondergrondse galerijen worden ondersteund door meer dan drie decennia onderzoek. In diverse landen wordt deze optie van geologische berging overwogen voor het beheer van radioactief afval. In de VS wordt geologische berging op grote diepte geëxploiteerd voor defensie-gerelateerd niet warmteproducerend radioactief afval.

Passieve veiligheidsfuncties

In de veiligheid na afsluiting wordt voorzien door middel van passieve veiligheidsfuncties, dankzij de kenmerken van de geologische laag. Tot de technische maatregelen die kunnen bijdragen aan passieve veiligheid behoren het immobiliseren van radioactieve materialen, fysieke en chemische stabiliteit, afbraakbestendigheid van de verpakking en een lokale omgeving die de levensduur van afvalcontainers optimaliseert.

⁷⁴ (Defra, BERR, Welsh Assembly Government, Department of the Environment Northern Ireland, 2008) (Nuclear Decommissioning Authority, 2010) (Committee on Radioactive Waste Management, 2009) (IAEA, 2012) (IAEA, 2011) (Nuclear Decommissioning Authority, 2010) (Nuclear Decommissioning Authority, 2013) (Nuclear Decommissioning Authority, 2012) (NWMO of Canada, 2011) (Nuclear Decommissioning Authority, 2011) (Nuclear Decommissioning Authority, 2010) (Environment Agency, 2009)

Hoewel het beheer van een geologische berging grotendeels gebaseerd is op passieve eigenschappen, zijn er ook actieve veiligheidsfuncties nodig tijdens de exploitatie.

De werking van de natuurlijke en technische barrières bieden veiligheid na afsluiting en actieve beheersing is niet meer nodig om de veiligheid te garanderen. In de praktijk kunnen (tijdelijk) organisatorische controlesystemen en een toezichtsplan wenselijk zijn na afsluiting.

Na de afsluiting van een geologische bergingsfaciliteit is er een passief systeem waarvan de natuurlijke en technische barrières samenwerken bij het isoleren en insluiten van radioactiviteit totdat deze zodanig is vervallen of nog zo weinig potentieel gevaar oplevert in de zin dat het niet meer in schadelijke concentraties in het milieu kan terugkeren.

Meervoudige veiligheidsfuncties

Voordeel van geologische berging ten opzichte van bovengrondse opslag of oppervlakte berging is dat de geologische laag een extra en duurzame barrière vormt om de verspreiding van radionucliden te beperken. Tot de overige barrières behoren de verpakking van het afval; het buffer- of vulmateriaal rondom de containers en de hoeveelheid daarvan en verzegelingssystemen. Elke barrière biedt één of meerdere veiligheidsfuncties over verschillende tijdstermijnen. Het relatieve belang van de veiligheidsfuncties verschilt per type afval en de diverse geologische omgevingen.

Het buffer- of vulmateriaal vervult een reeks aan mogelijke veiligheidsfuncties: het biedt fysieke bescherming aan de afvalcontainers, het beperkt de beweging van het water daaromheen. Het kan ook in sommige ontwerpen een chemische barrièrefunctie hebben. De gekozen barrières en veiligheidsfunctie daarvan is ook afhankelijk van het type LMRA of HRA. LMRA bevat namelijk kleinere hoeveelheden radioactiviteit en genereert geen substantiële hoeveelheden vervalwarmte. Het kan echter wel aanzienlijke gasvolumes voortbrengen en LMRA wordt ook in een veel groter volume geproduceerd dan HRA.

Insluiting van het afval

Insluiting van het radioactief afval in een geologische berging is afhankelijk van de eigenschappen van het afval en de verpakking in combinatie met de eigenschappen van de andere technische componenten van het bergingssysteem. Het gaat bijvoorbeeld om vulmaterialen en het geologische gastgesteente, waardoor water bijvoorbeeld niet bij de verpakkingen kan komen en de fysieke integriteit van de verpakking beschermt. Het doel van geologische berging is niet om absolute en volledige insluiting tot in de eeuwigheid te garanderen. Insluiting van afval betekent een ontwerp maken waarbij de vrijgekomen radioactiviteit binnen de geaccepteerde (veiligheids)normen blijft.

Insluiting is het belangrijkste voor het zeer geconcentreerde en langlevende radioactieve afval. De berging van dergelijk afval in een geologische bergingsfaciliteit vereist een hoge mate van insluiting, en onverslijtbare verpakkingen van het afval. Doel daarvan is om het merendeel van de korterlevende radionucliden te laten vervallen en de daarbij vrijkomende warmte flink te laten afnemen. En om ervoor te zorgen dat eventuele migratie van radionucliden pas plaatsvindt nadat de vervalwarmte aanzienlijk is afgenomen en er een stabielere fysieke en chemische omgeving is ontstaan.

Isolatie van het afval

Isolatie is een inherente eigenschap van geologische berging. De diepte waarop berging plaatsvindt en de eigenschappen van het geologische gastgesteente zijn de voornaamste middelen om het afval te isoleren van biosfeer en mens.

De veiligheidszorgen vanwege mogelijke indringers nemen sterk af vergeleken met bovengrondse opslag, wat vooral te danken is aan de aanzienlijke diepte waarop de geologische opslag zich bevindt.

Ook berging van zeer geconcentreerd en langlevend afval in vaste vorm helpt mee bij het bereiken van de benodigde isolatiegraad voor het afval van de toegankelijke omgeving.

Voor sluiting van de berging is deze nog wel gevoelig voor versturende factoren, zoals overstromingen. In de CORA onderzoeken is daarom voor geologische berging in zout of klei een aantal verwaarlozingsscenario's, waarbij waterinbreuk optreedt in niet afgedichte galerijen in de risicobeschouwingen meegenomen.

Bij langdurige isolatie moet rekening worden gehouden met zowel de natuurlijke ontwikkeling van het systeem als gebeurtenissen die het systeem kunnen verstoren. De keuze voor een locatie in stabiel geologisch gesteente biedt bescherming tegen geologische en klimatologische processen en effecten, en met het kiezen van een locatie ver van die plaatsen waarvan men weet dat er bodemschatten zitten, wordt de kans op onbedoelde versterking verkleind en blijven de bodemschatten bereikbaar voor exploitatie.

Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

De systemen worden zo ontworpen dat een storing in één barrière geen gevolgen heeft voor de veiligheid dankzij andere, onafhankelijke technische en natuurlijke barrières. Onderhoud is dan ook niet vereist. Het kan wenselijk zijn voor een bepaalde periode de langdurige functie en stabiliteit van de eigenschappen van geologische barrières te monitoren.

Vanwege de lange opslagperiode die in overweging wordt genomen is controle op de lange termijn beperkt, zo niet onrealistisch. Hetzelfde geldt voor onderhoud en reparaties op de lange termijn. Barrières moeten zo stevig zijn dat reparaties of verbeteringen niet nodig zijn. Geologische berging kan gefaseerd worden gerealiseerd, zodat de afvalstoffen nog lang kunnen worden teruggenomen.

8.1.2 DIEPE BOORGATEN

De argumenten afgezet tegen onderstaande afwegingscriteria zijn ontwikkeld aan de hand van een literatuurstudie⁷⁵.

Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid

Er zijn in diverse landen concepten ontwikkeld voor berging in diepe boorgaten, deze zijn echter nog nergens uitgevoerd.

Boorgaten dieper dan 5 kilometer (in bijvoorbeeld de olie- en gasindustrie) zijn ongebruikelijk. De diepste gaten zijn meestal bedoeld voor geowetenschappelijk onderzoek. De bestaande boortechnieken moeten in staat zijn betrouwbare boorgaten tot op die diepte te maken met een diameter die groot genoeg is om het afval in te kunnen plaatsen. Ook moet er inzicht zijn in de aard van het afval en de isolatie daarvan. Vooral als het gaat om afval met een hoge temperatuur, moeten de gevolgen voor de bouw van het boorgat en de effecten op de lange termijn bekend zijn. De toepassing van de technologie voor berging in diepe boorgaten dient uit te gaan van de huidige stand van de techniek en dient tevens te voorspellen welke verbeteringen of uitbreidingen in de kennis en uitrusting redelijkerwijs verwacht mogen worden in de ontwerp- en constructiefase van de eerste diepe boorgaten.

De belangrijkste risico's bij de aanleg van de boorgaten zijn de instabiliteit van de wand (wat noodzakelijk is bij het terughalen van afvalcontainers en het vergroten van de boorgatdiameter) en vastzittende pijpen. Andere risico's zijn storingen in de boortrein en de boorconstructie door beschadiging, scheuren of

⁷⁵ (IAEA, 2012) (Sandia National Laboratories, 2012) (ICRP, 2013) (United States Nuclear Waste Technical Review Board, 2013) (United States Nuclear Regulatory Commission, 2011) (Sandia National Laboratories, 2009) (Beswick, 2008) (United Kingdom Nirex Limited, 2004)

metaalmoetheid. Strenge procedures en uitgebreide inspectieprogramma's voor alle gereedschappen en onderdelen van de boortrein die in het boorgat gebruikt worden kunnen deze risico's verkleinen. Daarnaast moeten op basis van een uitgewerkt concept de gevolgen van het mislukken van verzegeling van een diep boorgat worden ingeschat. Op basis daarvan kan technologie voor toezicht op boorgaten over een zeer lange periode voorzien worden. Een nadeel is dat terugneembaarheid van het afval vooralsnog niet binnen het concept van berging in diepe boorgaten past.

Passieve veiligheidsfuncties

Passieve veiligheid in een geologische berging in diepe boorgaten wordt geboden door bijvoorbeeld een chemisch stabiele vorm van het afval, robuustheid van de verpakkingen, het vulmateriaal, berging op grote diepte en de geologische laag waarin het afval geborgen wordt. Operationele activiteiten kunnen zo worden georganiseerd dat een beperkt aantal actieve maatregelen nodig is voor de veiligheid, zoals het aanbrengen van afscherming in de pakketten, wat afhandeling door mensen mogelijk maakt.

De passieve veiligheid kan ook worden vergroot door de exploitatieperiode kort te houden. Door pas te boren, te bouwen, te plaatsen, af te vullen en af te sluiten als voldoende afval voor berging aanwezig is, zodat deze volledige reeks werkzaamheden achter elkaar kan worden uitgevoerd.

In de praktijk wordt verwacht dat organisatorische controles zoals beperkingen in locatiegebruik ook na afsluiting van de faciliteit nog een tijd worden gehandhaafd.

Meervoudige veiligheidsfuncties

Niet als bij geologische berging in ondergrondse galerijen geldt dat een voordeel ten opzichte van bovengrondse opslag of oppervlakte berging is dat de geologische laag een extra en duurzame barrière vormt om de verspreiding van radionucliden te beperken. Dit wordt aangevuld door technische barrières die gedurende verschillende periodes een aantal veiligheidsfuncties leveren zoals bijvoorbeeld corrosiebestendige verpakkingen en afvulmateriaal op basis van bijvoorbeeld cement waardoor gunstige chemische voorwaarden en derhalve chemische insluiting voor duizenden jaren worden gecreëerd.

Bij sommige concepten van diepe boorgaten wordt vooral vertrouwd op de geologie en de bergingsdiepte. Aan verpakking van het afval en derhalve aan de bijbehorende veiligheidsfuncties wordt daarbij nauwelijks enig voordeel toegekend voor veiligheid op de lange termijn.

Insluiting van het afval

Berging in boorgaten is niet beperkt tot de dieptes die gelden voor oppervlakteberging (enkele tot tientallen meters) of geologische berging in ondergrondse galerijen (honderden meters). Daardoor is meer keuze in geologische formaties, rekening houdend met de insluiting van radionucliden en hun isolatie voor mens en milieu.

Technische barrières, zoals de vorm en de verpakking van het afval kunnen vooral in de beginperiode zorgen voor insluiting. Dan is de radioactiviteit nog het grootst.

Afval met een hoge radioactiviteit kan worden ingekapseld in een matrix en in containers met een lange levensduur worden geplaatst. De radionucliden in het afval worden dan voor honderden of zelfs duizenden jaren met fysieke en chemische functies ingesloten. Andere technische barrières, zoals het gebruik van opvulmateriaal, kan voor nog langere insluiting zorgen, maar insluiting van alle radionucliden voor eeuwig mag niet verwacht worden.

Ook natuurlijke barrières leveren insluiting en leiden tot vertraging van het transport van radionucliden in de diepe ondergrond. Op basis van radioactief materiaal dat van nature in de diepe ondergrond aanwezig is, is aangetoond dat deze natuurlijke barrières voor zeer lange termijnen doeltreffend kunnen zijn.

Isolatie van het afval

Berging in diepe boorgaten in een geschikte geologische omgeving kan zorgen voor zeer sterke isolatie van het afval dankzij de grote diepte. Het daadwerkelijke isolatieresultaat hangt sterk af van de geologie.

Een verzegelingssysteem voor het boorgat isoleert het afval van hoger gelegen gesteente en grondwater. Naar verwachting isoleert de combinatie van bovengenoemde factoren de radionucliden van de biosfeer totdat de radioactiviteit tot een veilig niveau is gedaald. Berging op grote diepte vergroot de veiligheid en draagt mede bij aan het verkleinen van het risico en de gevolgen van menselijk indringen. Overwogen kan worden om herkenningpunten aan de oppervlakte te verbergen/verwijderen en de bovenste tientallen meters van het boorgat te vernietigen om het herintreden ernstig te bemoeilijken.

Bij langdurige isolatie moet rekening worden gehouden met zowel de natuurlijke ontwikkeling van het systeem als gebeurtenissen die het systeem kunnen verstoren.

Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

De langdurige functie en stabiliteit van het systeem kan voor een bepaalde tijd worden gemonitord. Bewaking en toezicht ter plaatse is nodig tijdens de exploitatieperiode, maar de mate waarin deze werkzaamheden worden verricht kan worden teruggebracht na afsluiting, omdat er dan nog sprake is van institutionele controle (toezicht vanuit een overheid).

8.2 GEOLOGIE

8.2.1 ONDERGRONDSE GALERIJEN

Beperking verspreiding vrijgekomen radionucliden

De bergingszone is bij geologische berging op zodanig grote diepte dat de lage permeabiliteit van de geologische formatie en de trage beweging van vloeistoffen op die diepte evenals de grotere afstand tot de toegankelijke omgeving leiden tot lange reistijden van vrijgekomen radionucliden. De lage concentratie zuurstof op die diepte leidt tot een geochemische isolatie van het afval door de geringere oplosbaarheid en beweeglijkheid van sommige radionucliden. Tot slot vertraagt de binding van veel radionucliden aan de geologische formatie het transport van radionucliden. Zowel Zechstein zout als de Tertiare klei hebben geen of een lage migratie van grondwater. Specifiek voor de Tertiare klei geldt daar nog bij dat de verspreiding door vrijgekomen radionucliden wordt beperkt doordat de radionucliden zich binden aan de kleimineralen.

Een risico bij de geologische berging in ondergrondse galerijen is overstroming door grondwater, wanneer de berging nog niet gesloten is. Het gaat dan niet om het grondwater in het pakket waar het radioactief afval wordt geborgen, maar om watervoerende pakketten boven de laag waar wordt geborgen. Als zo'n pakket niet goed is afgesloten, of als de afsluiting in de loop van de tijd lekt raakt, dan kan grondwater bij de geologische berging komen, wat ongewenste verspreiding van radionucliden kan bespoedigen.

Geen seismische activiteit

De kans op het optreden van seismische activiteit kan door de keuze van locatie worden beperkt. De gevolgen van het optreden van een aardbeving zijn mede afhankelijk van de eigenschappen van het gesteente waarin de berging is geplaatst en van het omringende gesteente. Factoren die hierbij een rol spelen zijn onder andere de diepte en de aanwezigheid van breuken. Zout en kleilagen zijn zeer verschillende materialen met duidelijk andere materiaaleigenschappen. De materialen zullen naar

verwachting anders reageren op aardbevingen. Die materiaaleigenschappen en de reactie op aardbevingen zijn niet alleen afhankelijk van de samenstelling, maar ook van de diepte waarop de lagen zich bevinden. Zout op grote diepte, waar de temperatuur en druk hoog zijn, gedraagt zich anders dan zout op een beperkte diepte. En dat geldt ook voor kleilagen op verschillende diepten. De gevolgen van een aardbeving zullen daarom anders zijn in een laag op grote diepte dan in een laag in het ondiepe bereik. Ook de ontwikkelingen na een aardbeving zullen anders zijn voor de verschillende materialen en op de verschillende diepten. Hoe de verschillen tussen zout en kleilagen doorwerken in de stabiliteit van berging tijdens en na een aardbeving is met de huidige stand van kennis niet vast te stellen⁷⁶. Voorafgaand aan het realiseren van een geologische berging moet locatie specifiek onderzoek gedaan worden naar de seismische activiteit op de beoogde locatie.

Homogene en goed te karakteriseren samenstelling laagpakket en voldoende verbreiding en dikte laagpakket

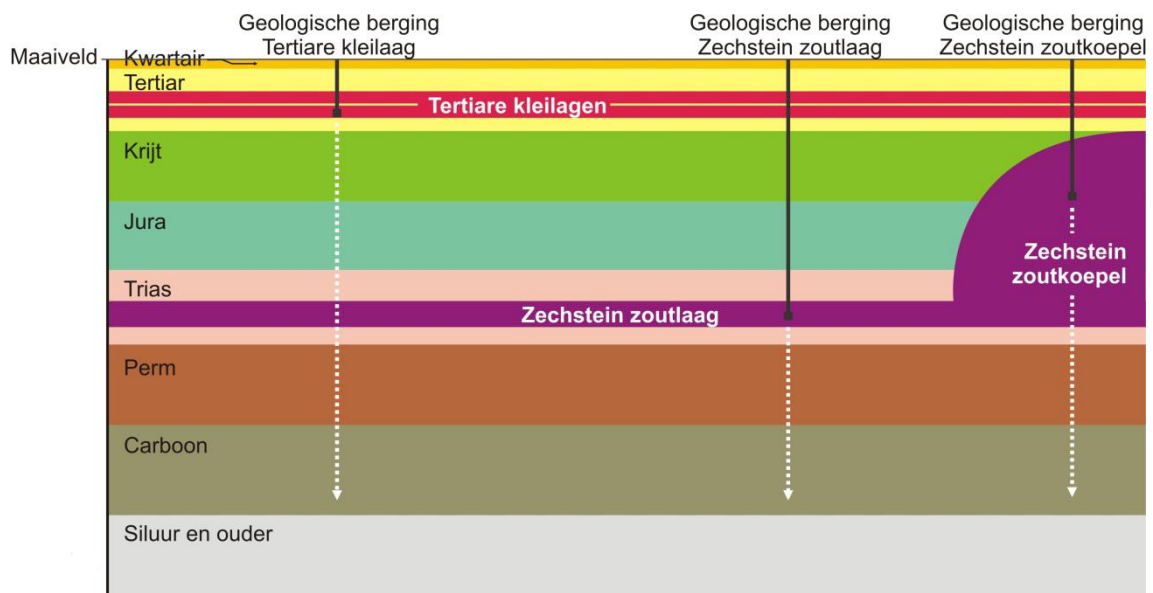
Zowel het steenzout als de Tertiare klei bestaan in Nederland uit voldoende homogene en goed te karakteriseren laagpakketten, met een voldoende verbreiding en dikte. Voor het Zechstein zout geldt dat de homogene en goed te karakteriseren laagpakketten betrekkingen hebben op de oorspronkelijk lagen die geen tot weinig vervorming hebben ondergaan door bewegingen in de zoutlagen. Het Zechstein zout dat in de vorm van zoutpilaren – en kussens in de ondergrond aanwezig is, is door deze bewegingen vervormd. De lagen liggen niet meer in hun oorspronkelijk voorkomen, maar kunnen geplooid en verbreukt zijn.

Tertiare kleipakketten zijn jongere afzettingen dan het Zechstein zout en zullen daarom overwegend ondieper worden aangetroffen. Hoe dieper de ondergrondse galerijen liggen, hoe groter de kans dat de faciliteit bezwijkt onder de toenemende temperatuur en druk. Dit verkleint de terugneembaarheid.

Risico's door huidig en toekomstig medegebruik

In de ondergrond vinden steeds meer activiteiten plaats. Voor de toekomst kan niet worden uitgesloten dat er meer en ander medegebruik zal plaatsvinden dan hetgeen we nu voor ogen hebben. De exacte diepte waar de Tertiare kleilagen en het Zechstein zout in de ondergrond aanwezig is, verschilt in de Nederlandse ondergrond, beide liggen diep in de ondergrond. De Tertiare kleien zijn relatief hoger in de ondergrond aanwezig dan het Zechstein zout. Met relatief hoger wordt bedoeld dat het Zechstein zout eerder is afgezet (Perm) en dat daar laagpakketten uit het Mesozoïcum (Trias, Jura en Krijt) en Kenozoïcum (Tertiair, Kwartair) bovenop kunnen liggen. Dit is hieronder schematisch weergegeven in Figuur 24. Onder de Tertiare kleien kunnen laagpakketten uit het Mesozoïcum en Paleozoïcum liggen. Over het algemeen is er meer onder de Tertiare kleien aanwezig dan onder het Zechstein zout. Daarmee is voor tertiaire kleien de kans groter dat winbare grondstoffen (gas, olie, zout) of warmte aanwezig is onder de berging. Zechstein zout is weliswaar zelf een winbare delfstof, wat op zichzelf een kans op medegebruik op levert, maar om het Zechstein zout te bereiken moet altijd het Tertiair worden gepasseerd (doorboord). Daarmee het risico op medegebruik kleiner voor het Zechstein zout dan voor de Tertiare kleien.

⁷⁶ In CORA 16 wordt in de aanbevelingen geconstateerd dat "voor modelberekeningen van de stabiliteit bestaan er te weinig (experimenteel bepaalde) parameters die representatief zijn voor diepten van 500 tot 800 m" (Rijkers, Huisman, de Lange, Weijers, & Witmans-Parker, 1998).



Figuur 24 Schematische weergave van de lagen ten opzichte van elkaar (ter verduidelijking: in werkelijkheid verschillen de dikte en diepte per laag en lopen ze niet dusdanig evenwijdig aan elkaar).

8.2.2 DIEPE BOORGATEN

De opmerkingen bij geologische berging in de voorgaande paragraaf gelden zowel voor berging in ondergrondse galerijen als geologische berging in diepe boorgaten.

De belangrijkste verschillen tussen de technieken hebben betrekking op het dieptebereik, terugneembaarheid en controleerbaarheid en de vereiste technische kennis. Vanuit geologie is vooral het dieptebereik interessant.

Met diepe boorgaten kunnen dieper gelegen lagen worden benut dan bij berging in ondergrondse galerijen. De bergingszone is op zodanig grote diepte dat de lage permeabiliteit van de geologische formatie en de trage beweging van vloeistoffen op die diepte evenals de grotere afstand tot de toegankelijke omgeving leiden tot lange reistijden. De lage concentratie zuurstof op die diepte leidt tot een grotere geochemische isolatie van het afval door de geringere oplosbaarheid en beweeglijkheid van sommige radionucliden.

8.3 ECONOMIE

8.3.1 ONDERGRONDSE GALERIJEN

Kosten

Kosten voor het oprichten van de beheeroptie

Geologische berging in ondergrondse galerijen is geschikt als beheeroptie voor alle typen radioactief afval. Voordeel is daarom dat maar één eindberging gerealiseerd hoeft te worden, anders dan wanneer bijvoorbeeld gekozen wordt voor oppervlakteberging.

Kostenramingen van geologische berging in ondergrondse galerijen zijn tamelijk uiteenlopend, want deze zijn afhankelijk van volume en locatie en bijkomende specificaties en aannamen. Het grootste deel van de kosten bij een geologische berging in ondergrondse galerijen zit hem in het maken van de schachten.

In Nederland bestaat nog geen geologische berging. In een rapport van ECN⁷⁷ uit 1999 zijn twee specificaties voor een diepe (geologische) berging van circa 185 m³ HRA op kosten geschat⁷⁸. Rekening houdend met inflatie (o.b.v. producenten prijsindex) en omrekening van guldens naar euro's, zou een dergelijke berging nu circa € 550 mln. kosten.⁷⁹ In deze calculatie zijn de kosten voor terugneembaarheid niet meegenomen. De volgende kostenposten zijn wel opgenomen:

- Ontwerp en bouw
- Opbergen afval
- Afsluiten van de mijn

Recenter is in dezelfde Belgische studie⁸⁰ als genoemd in paragraaf 7.3 (oppervlakteberging), waarin ook een kosteninschatting is gegeven van de aanleg van een geologische berging in ondergrondse galerijen. Voor de diepe geologische berging ligt de kostprijs inclusief onzekerheidsmarges rond € 1 mld (prijspeil 2003). Rekening houdend met inflatie, is dit een bedrag van circa € 1,5 mld. op basis van huidig prijspeil. Hierbij geldt de kanttekening dat het afvalvolume waar rekening mee wordt gehouden beduidend groter is dan in de bovengenoemde Nederlandse studie.

Beheer- en monitoringskosten

De kosten voor beheer- en monitoring zijn in de bovengenoemde kengetallen meegenomen. Na afsluiten van de mijn wordt over gegaan op passief beheer van het afval. Dan hoeven er in principe geen kosten meer gemaakt te worden, tenzij er voor wordt gekozen de berging te blijven monitoren.

Kosten om terugneembaarheid te garanderen

Belangrijke aandachtspunten zijn de mate van terugneembaarheid en de kosten van terugneembaarheid van afval. De kosten voor terugneembaarheid zijn groter bij berging in ondergrondse galerijen dan bij oppervlakteberging en bovengrondse opslag, maar zijn goed in te schatten en zijn mede afhankelijk van de periode waarop terugneembaarheid gegarandeerd moet worden.

Ruimtelijke beperkingen

De ruimtebehoefte aan de oppervlakte zal waarschijnlijk in grote lijnen vergelijkbaar zijn met de alternatieven van bovengrondse berging of oppervlakte berging. Door de aard van de berging zal waarschijnlijk wel sprake zijn van een zekere beperking t.a.v. het verticale ruimtegebruik (aardlagen). De consequenties ervan zijn locatie afhankelijk.

8.3.2 DIEPE BOORGATEN

Kosten

Kosten voor het oprichten van de beheeroptie en beheer en monitoringskosten

Berging van radioactief afval in diepe boorgaten is nog een experimentele techniek. Er zijn nog geen operationele opslagfaciliteiten gerealiseerd. Kostenramingen zijn gebaseerd op (deels) vergelijkbare ramingen van geothermische boringen. Deze lopen uiteen van US\$ 1-4 mln. per kilometer diepte per

⁷⁷ (ECN, 1999)

⁷⁸ 320 afvalcontainers, elk met een lengte van 134 cm. en een diameter van 43 cm.

⁷⁹ In het kader van OPERA worden nieuwe kostenramingen gemaakt voor geologische berging.

⁸⁰ (ARCADIS, 2011)

boring⁸¹. De totale kosten van de booractiviteit is dan afhankelijk van het op te slaan volume per boorgat maal het totaal volume. Daarbij komen dan echter nog kosten van voorbereiding, inrichting site, monitoring en controle.

In vergelijking met geologische berging in ondergrondse galerijen kunnen de initiële kosten mogelijk aanmerkelijk lager uitvallen⁸², omdat er in Nederland relatief weinig radioactief afval is en je voor deze variant de berging gefaseerd per boorgat kunt aanleggen.

Dit is dan wel weer exclusief reguliere terugkerende kosten.

Kosten om terugneembaarheid te garanderen

Een (andere) belangrijke bijkomende kostenpost is die van de eventuele terugneembaarheid van het afval. Dit is – vergeleken met berging in ondergrondse galerijen, oppervlakteberging en langdurige opslag bovengronds – bijzonder lastig en dus duur, als het al te realiseren is.

Ruimtelijke beperkingen

De ruimtebehoefte in het horizontale vlak zal waarschijnlijk groter zijn dan bij bovengrondse berging, oppervlakte berging of geologische berging in ondergrondse galerijen, omdat de afstand tussen de boorgaten aanzienlijk moet zijn. Door de aard van de berging zal ook sprake zijn van een beperking t.a.v. het verticale ruimtegebruik (aardlagen). De consequenties ervan zijn locatie afhankelijk.

8.4 ETHIEK

8.4.1 ONDERGRONDSE GALERIJEN

Welzijn

Doordat de berging in ondergrondse galerijen een geschikte eindberging is voor alle typen radioactief afval (zowel LMRA als HRA), hoeft er verder niet nagedacht te worden over aanvullende inspanningen ten behoeve van het afval. Dit kan zowel de huidige als toekomstige generaties ontzien. Wel is het waarschijnlijk dat na sluiting van de berging gemonitord wordt om te controleren of de berging zijn veiligheidsfuncties goed vervult. Ook is een goede informatieoverdracht tussen generaties van belang, om bijvoorbeeld te voorkomen dat toekomstige generaties ‘per ongeluk’ een geologische berging vinden en daar ongewenst binnendringen.

Geologische berging in ondergrondse galerijen is op diverse locaties mogelijk. Wanneer deze berging eenmaal gerealiseerd is, zou er weinig tot geen effect moeten zijn op de leefomgeving. De beleving van het wonen rondom een geologische berging kan echter wel veranderen. Dit is mede afhankelijk van het draagvlak in de omgeving. Dit onderstreept het belang van een gedegen participatieproces.

De kosten zijn eenmalig en te dragen door huidige generaties. Afhankelijk van het tijdspad tot sluiting worden geen financiële lasten neergelegd bij latere generaties.

Autonomie

De generatie die een keuze maakt voor deze beheeroptie zal een monopolie hebben op inspraak op de aan te wijzen locatie voor de geologische berging. Toekomstige generaties hebben de mogelijkheid om voor

⁸¹ (IAEA, 2009) (IAEA, 1994) (IAEA, 2006)

⁸² (United States Nuclear Waste Technical Review Board, 2013)

een andere berging te kiezen, zolang het afval nog terugneembaar is (afhankelijk van ontwerp IAEA, 2009⁸³). De mate van terugneembaarheid hangt af van de fase waarin de berging is en is zeer kostbaar.

Wat betreft de autonomie van toekomstige generaties over besluitvorming biedt 'Adaptive Phase Management' (NWMO, 2005⁸⁴) kansen. Dit kan door toekomstige generaties ook als keuzelast worden ervaren. De aanpak 'Adaptive Phase Management' is gebaseerd op een reeks stappen of trappen met belangrijke beslissingen, telkens ondersteund door nieuwe kennis, informatie, onderzoek en ontwikkeling. De flexibiliteit in het tempo waarin de geologisch berging wordt gerealiseerd, komt tegemoet aan de wens om toekomstige generaties in staat te stellen beslissingen te nemen als de best beschikbare informatie aanwezig is. Dit kan bijvoorbeeld gaan over beslissingen ten aanzien van:

- De selectie van een gewenste locatie.
- Een beslissing over het al dan niet bouwen van een tijdelijke ondiepe ondergrondse opslag bij de centrale site en vervoer over gebruikt materiaal in afwachting van het ontwikkelen van de diepe berging.
- Een beslissing over het moment waarop de geologische berging wordt gebouwd.
- Een beslissing over het moment waarop de geologische berging wordt gesloten en faciliteiten worden ontmanteld.

Wat betreft autonomie is ook een goede informatieoverdracht over beschikbare kennis van de opslagplaats van generatie op generatie noodzakelijk. Dit is nodig om de berging goed te kunnen beheren, zolang de berging nog actief beheer vergt.

Bruikbaarheid als grondstof

Bij deze beheeroptie kunnen toekomstige generaties nog gedurende een aanzienlijke periode bij het radioactief afval. In die periode zijn de kansen om het hergebruik dat het afval als grondstof biedt te benutten. Toekomstige generaties moeten zich dan ook inspannen voor technologische ontwikkelingen die het mogelijk maken het radioactief afval te hergebruiken.

8.4.2 DIEPE BOORGATEN

Welzijn

Geologische berging in diepe boorgaten is net zoals berging in ondergrondse galerijen op diverse locaties mogelijk. Bij aanleg van deze beheeroptie is er mogelijk een grotere impact op de leefomgeving omdat de boorgaten over een groot oppervlak moeten worden aangelegd. Wanneer deze berging gerealiseerd is, kan er afhankelijk van het ontwerp, zeer weinig ruimtebeslag zijn op de omgeving. Net als bij geologische berging geldt wel dat de beleving van de leefomgeving door omwonenden kan veranderen.

Net als bij de ondergrondse galerijen zijn de kosten ook bij deze geologische beheeroptie eenmalig en te dragen door de huidige generatie. Er worden, naar verwachting, geen financiële lasten neergelegd bij latere generaties.

Met diepe boorgaten is in tegenstelling tot berging in ondergrondse galerijen nog geen praktijk ervaring opgedaan, waardoor meer risico's bestaan omtrent veiligheid. Het feit dat het afval dieper onder de grond

⁸³ IAEA (2009) Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability, IAEA Nuclear Energy Series Technical No. NW-T-1.19, Vienna

⁸⁴ NWMO (2005) The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel, Choosing a way forward, Final Study, Ottawa/Ontario

kan worden opgeslagen heeft als voordeel dat vrijgekomen radionucliden over het algemeen een langere reistijd naar de oppervlakte hebben.

Autonomie

Terugneembaarheid past niet in de huidige concepten van diepe boorgaten. Dit beperkt toekomstige generaties in hun autonomie om een andere keuze te maken wat betreft de berging van het afval of het afval nog te hergebruiken. Echter toekomstige generaties worden hiermee door huidige generaties niet achtergelaten een eventuele keuzelast.

Bruikbaarheid als grondstof

Het nadeel van deze beheeroptie is dat toekomstige generaties bij deze bergingsmethode geen toegang hebben tot het radioactief afval. In dit geval zijn eventuele kansen die het hergebruik van het afval als grondstof biedt, niet te benutten. Een bijkomend voordeel hiervan is wel dat ook toekomstige generaties zich niet hoeven in te spannen om technologische te blijven ontwikkelen voor het hergebruik van radioactief afval dat door eerdere generaties is opgeslagen.

8.5 CONCLUSIE

8.5.1 ONDERGRONDSE GALERIJEN

Veiligheid

Het doel van geologische berging is insluiting, en isolatie van de radionucliden in het afval van de biosfeer. Op grote diepte is isolatie een inherente veiligheidsfunctie. De geologische formatie biedt een extra veiligheidsfunctie boven op de technische functies. Meerdere veiligheidsfuncties vergroten zowel de veiligheid als het vertrouwen door te waarborgen dat het totale functioneren van het geologische bergingssysteem niet van één veiligheidsfunctie afhangt.

Passieve eigenschappen, zoals bescherming en insluiting dankzij het verpakkingsmateriaal, bieden veiligheid tijdens werkzaamheden. Veiligheid na sluiting wordt geboden door passieve systemen, zoals geologische en technische barrières. Als de ondergrondse galerijen zijn afgesloten kan nog monitoring bovengronds plaatsvinden door huidige of toekomstige generaties. Ook kan de berging gefaseerd worden afgesloten, zodat het afval nog een lange periode kan worden teruggenomen.

Geologie

Een geschikte geologische formatie is de belangrijkste veiligheidsfunctie voor geologische berging. Zowel het steenzout als de Tertiaire klei hebben geen of een lage migratie van grondwater. Tertiaire klei beperkt tevens de verspreiding van vrijgekomen radionucliden doordat de radionucliden zich binden aan de kleimineralen. Het risico op medegebruik wordt kleiner ingeschat voor het Zechstein zout dan voor de Tertiaire kleien. Wat betreft bescherming tegen seismische activiteit is het moeilijk een onderscheid te maken tussen Tertiaire klei en steenzout. De materiaaleigenschappen en de reactie op aardbevingen zijn niet alleen afhankelijk van de samenstelling, maar ook van de diepte waarop de lagen zich bevinden.

Economie

De kosten voor het realiseren van een geologische berging zijn hoog in vergelijking met de andere beheeropties. Omdat na sluiting van de berging uitgegaan wordt van passief beheer zijn de kosten na realisatie van de berging veel lager en beter in te schatten dan bij langdurige bovengrondse opslag, waarbij de kosten blijven terugkeren. De kosten voor terugneembaarheid zijn hoger bij berging in ondergrondse galerijen dan bij oppervlakteberging en bovengrondse opslag. Ze zijn wel goed in te schatten, zodat hier rekening mee kan worden gehouden bij het aanleggen van de fondsen voor de berging.

Ethiek

Bij geologische berging in ondergrondse galerijen worden de lasten vooral bij de huidige generatie geplaatst. Toekomstige generaties worden niet of beperkt geconfronteerd met lasten van het afval waar ze de lasten niet van hebben gehad. De autonomie van toekomstige generaties een andere keuze voor het afval te maken wordt steeds geringer, doordat het radioactief afval steeds lastiger terug te halen is.

8.5.2 DIEPE BOORGATEN

Veiligheid

Berging in diepe boorgaten is nog geen bewezen techniek, hetgeen veiligheidsrisico's met zich mee brengt. Net als bij geologische berging wordt veiligheid na sluiting geboden door passieve systemen, zoals geologische en technische barrières. Berging op grote diepte vergroot de veiligheid door isolatie en insluiting en draagt mede bij aan het verkleinen van het risico en de gevolgen van menselijk indringen. Het terugnemen van afval na plaatsing en verzegeling past niet in de huidige concepten van berging in diepe boorgaten.

Geologie

De belangrijkste verschillen met geologische berging in ondergrondse galerijen zijn het dieptebereik, terugneembaarheid en controleerbaarheid en de vereiste technische kennis. Met diepe boorgaten kunnen dieper gelegen lagen kunnen worden benut dan bij berging in ondergrondse galerijen.

Economie

In vergelijking met geologische berging in ondergrondse galerijen kunnen de initiële kosten mogelijk aanmerkelijk lager uitvallen, omdat er in Nederland relatief weinig radioactief afval is en je voor deze variant de berging gefaseerd per boorgat kunt aanleggen. De kosten om het afval terug te kunnen nemen kunnen echter zeer hoog oplopen, als terugnemen al mogelijk is.

Ethiek

Voordeel is dat de huidige generatie die de lasten van het radioactief afval heeft, ook zorgdraagt voor de lasten ervan. De autonomie van toekomstige generaties is bij het gebruiken van diepe boorgaten als berging in het geding. Het terughalen van radioactief afval is vrijwel onmogelijk, waardoor de toekomstige generatie beperkt wordt in haar handelen en keuzevrijheid. Daarnaast is het bergen in diepe boorgaten nog geen bewezen techniek, waardoor dit meer veiligheidsrisico's met zich mee brengt.

9

Multinationale berging

Dit hoofdstuk beschrijft de voor- en nadelen van multinationale berging vanuit het perspectief van de vier aandachtsgebieden veiligheid, geologie, economie en ethiek. Dit is de uitwerking van de samenvatting van de voor- en nadelen van alle beheeropties die in hoofdstuk 5 is opgenomen. Voor de kenmerken van multinationale berging verwijzen we terug naar paragraaf 3.6. De daar beschreven karakteristieken worden in dit hoofdstuk niet herhaald en als bekend beschouwd. Per aandachtsgebied worden de voor- en nadelen van multinationale berging beschreven op basis van de afwegingscriteria die voor de aandachtsgebieden geformuleerd zijn in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk sluit af met een korte conclusie per aandachtsgebied.

9.1 VEILIGHEID

De beoordeling van de afwegingscriteria heeft plaatsgevonden aan de hand van een literatuurstudie⁸⁵. Veel van de voordelen en nadelen van multinationale berging zijn nagenoeg gelijk aan die van de fysieke beheeropties. Als zodanig is het merendeel van de veiligheidsargumenten dat geldt voor oppervlakteberging (paragraaf 7.1), geologische berging (paragraaf 8.1.1) en berging in diepe boorgaten (paragraaf 8.1.2) ook relevant in het kader van multinationale berging.

Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid

Belangrijke voordelen van multinationale berging zijn de keuze aan veilige locaties en geologische lagen en kennisbundeling op het gebied van veiligheid. Nadelen zijn dat meer afval op één plek opgeslagen wordt en dat meer transport nodig is, waardoor op die locaties meer risico's vanuit veiligheid ontstaan. Organisatorisch is een multinationale berging een grotere uitdaging dan een nationale oplossing, omdat het aanleveren van het afval vanuit verschillende landen een andere fasering kan hebben en het afval vanuit de landen om verschillende bewerking of monitoring kan vragen.

Door de jaren heen zijn verschillende concepten aangedragen en de algemene consensus binnen de wetenschap en techniek is dat het mogelijk is op een veilige wijze multinationale berging te realiseren.

Passieve veiligheidsfuncties

De ruimere keuze aan mogelijk geschikte locaties en geologische omgevingen die in aanmerking kunnen komen, kan verder bijdragen aan het terugdringen van effecten op de omgeving van de berging. Kwaliteitsbewaking van de afvalpakketten kan variëren als verschillende nationale systemen worden gevolgd. In sommige gevallen kan opnieuw conditioneren en/of herverpakken van afval nodig zijn, om ervoor te zorgen dat afval vanuit verschillende landen op dezelfde manier kan worden geborgen.

⁸⁵ (IAEA, 2004)

Meervoudige veiligheidsfuncties

Er kunnen technische voordelen worden gerealiseerd door samen te werken bij de implementatie van opslagfaciliteiten. Er is meer deskundigheid en kapitaal beschikbaar voor het ontwikkelen van robuuste technische systemen, en mogelijk is er een ruimere keuze aan locaties. Gedeelde faciliteiten kunnen waarschijnlijk profiteren van betere technische maatregelen, bijv. door harmonisatie van normen voor het realiseren van de hoogste veiligheidsnormen.

Insluiting van het afval

De radiologische veiligheid wordt beter door multinationale berging, mits de opslagplaats van de samenwerkende landen voldoet aan dezelfde internationale normen als die waaraan nationale faciliteiten moeten voldoen. Transportroutes worden langer als het afval uit andere landen moet komen. De kans bestaat dat het gastland zich op de lange termijn geconfronteerd ziet met meer negatieve effecten voor het milieu, omdat het ook de radioactieve materialen gaat bergen die door partnerlanden zijn gegenereerd. Door de afhandeling van grotere afvalvolumes kan sprake zijn van hogere stralingsdoses.

Er is kans op een grotere verscheidenheid aan afvalbronnen door verschillen in nationaal geldende normen voor conditioneringstechnologieën en het verpakken van afval. Kwaliteitsbewaking van de afvalpakketten kan variëren als verschillende nationale systemen worden gevolgd. In sommige gevallen kan opnieuw conditioneren en/of herverpakken van afval nodig zijn.

Isolatie van het afval

In vergelijking met gespreide nationale bergingen, is de kans dat kennis over de gezamenlijke berging in de verre toekomst verloren gaat kleiner. Daardoor neemt de kans op indringers af. Bewaking is voor een enkele locatie eenvoudiger dan voor verspreide locaties en kan ook eerder door samenwerking worden gerealiseerd.

Het verzamelen van grote volumes radioactief materiaal op één of enkele plekken maakt het een aantrekkelijk doelwit voor indringers en bovendien kunnen de mogelijke gevolgen van ongewenst indringen groter zijn.

Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

Multinationale faciliteiten kunnen waarschijnlijk profiteren van verhoogde organisatorische beveiligingsmaatregelen door bundeling van kennis en capaciteit, waardoor de hoogste veiligheidsnormen worden gegarandeerd.

9.2 GEOLOGIE

Vanuit geologisch perspectief biedt internationale berging ruimere mogelijkheden die in Nederland niet bestaan, zoals de berging in granietlichamen die dichter onder het oppervlak liggen en de berging in gebieden met de grootste tektonische stabiliteit.

9.3 ECONOMIE

Dit alternatief is geen onderscheidende bergingstechniek, maar een andere wijze van organisatie van de berging van radioactief afval. Daarmee blijven alle beoordelingen van de andere, individuele alternatieven onveranderd. Er zijn echter wel belangrijke potentiële effecten van dit alternatief op de kosten en ruimtelijke beperkingen.

Een belangrijke overweging voor landen om multinationale berging te onderzoeken is kostenefficiëntie: de kosten van gezamenlijke realisatie en beheer door meerdere landen kunnen aanmerkelijk lager uitvallen dan de optelsom van de individuele sites. In de SAPIERR-studie van de Europese Commissie zijn hiertoe kostenramingen gemaakt die wijzen op een potentiële – gezamenlijke - kostenbesparing van 40%. Dit op basis van geologische berging.

Conceptueel gezien is multinationale berging van toepassing op alle types radioactief afval, maar er kunnen economische factoren gelden voor LMRA (waarvoor bergingskosten lager zijn en de volumes groter) waardoor een multinationale berging minder interessant is dan voor HRA (met relatief hoge bergingskosten en kleine volumes).

Ruimtelijke beperkingen

Afhankelijk van waar (in welk land) een multinationale bergingsfaciliteit gerealiseerd wordt, kan een groot effect (positief of negatief) optreden ten opzichte van het ruimtebeslag van de individuele beheeropties (per land). Dit geldt zowel voor het horizontale als het verticale ruimtebeslag.

9.4 ETHIEK

Zoals eerder gesteld is deze methode geen beheeroptie maar een kwestie van het organiseren van een optie. De onderscheidende kenmerken kunnen daarom bij deze optie niet worden ingevuld. Echter is er wel een aanvulling mogelijk op een ander abstractieniveau:

Welzijn

Het delen van verantwoordelijkheid, kosten en dergelijke met andere landen biedt voordelen. Zoals in paragraaf 9.3 is geschetst, levert het in ieder geval kostenefficiëntie op, waardoor er geld bespaard wordt. Dit raakt het welzijn van de inwoners van de samenwerkende landen. De impact op de leefomgeving is in potentie kleiner, omdat landen gezamenlijk hun afval in één of enkele bergingen kunnen opslaan⁸⁶. De kennis en middelen om veiligheid te waarborgen worden gebundeld. En doordat het totaal aan bergingen afneemt, neemt ook de totale kans op veiligheidsincidenten af, bijvoorbeeld door menselijk indringen.

Voor het land waar de multinationale berging gerealiseerd wordt, is de impact op de leefomgeving daarentegen groter. Ook kan het vanuit non-proliferatie als nadeel gezien worden dat één land beschikt over een grotere hoeveelheid radioactief afval.

Autonomie

Er wordt een samenwerkingsverband aangegaan, waarmee landen mogelijk hun verantwoordelijkheid overgeven aan andere landen. Er ontstaat daarbij een afhankelijkheidsrelatie waarin de autonomie van een land op dit punt minder kan worden. Ook toekomstige generaties zijn gebonden aan deze afspraken waar ze zelf geen invloed op hebben gehad, waardoor hun autonomie beperkt wordt.

⁸⁶ (Taebi, 2012)

Het organiseren van multinationale berging is vooral voordelig omdat men dan kan kiezen voor locaties en beheeropties die mogelijk in eigen land niet mogelijk zijn. Dat vergroot in zekere zin de keuzevrijheid van de huidige generatie. Het is echter van belang dat de multinationale berging niet ten nadele van één van de samenwerkende partijen mag uitvallen. Multinationale berging kan er uiteraard ook toe leiden dat afval vanuit andere landen naar Nederland vervoerd wordt.

Bruikbaarheid als grondstof

Dit beoordelingscriterium is niet van toepassing bij deze beheeroptie omdat het primair geen fysieke oplossing betreft. Daarmee valt geen oordeel te vellen op basis van het begrip bruikbaarheid als grondstof.

9.5 CONCLUSIE

Veiligheid

Door een ruimere keuze voor de meest veilige locatie en door bundeling van organisatorische capaciteit en kennis kan een multinationale berging veiliger zijn dan verschillende verspreide bergingen. Tegelijkertijd is er meer transport van het radioactief afval nodig en kan een grotere hoeveelheid afval ongewenst indringen aantrekken. Organisatorisch is een multinationale berging een grotere uitdaging, omdat het aanleveren van het afval vanuit verschillende landen een andere fasering kan hebben en het afval vanuit de landen om verschillende bewerking of monitoring kan vragen.

Geologie

Vanuit geologisch perspectief biedt multinationale berging mogelijkheden die in Nederland niet bestaan, zoals de berging in granielichamen.

Economie

De kosten van multinationale berging kunnen aanmerkelijk lager uitvallen (40%) dan de optelsom van alle individuele bergingsfaciliteiten per land.

Ethiek

Door een samenwerking met andere landen aan te gaan vindt er een verschuiving plaats in het dragen van de lasten en ook van eventuele lusten. Die worden dan mogelijk niet alleen over generaties verdeeld, maar kunnen ook onevenredig terecht komen bij een van de samenwerkende landen. Zij zouden mogelijk meer risico kunnen dragen. Bovendien wordt de autonomie van toekomstige generaties mogelijk beperkt door langetermijnafspraken tussen landen.

10

Partitie en transmutatie

Dit hoofdstuk beschrijft de voor- en nadelen van partitie en transmutatie vanuit het perspectief van de vier aandachtsgebieden veiligheid, geologie, economie en ethiek. Dit is de uitwerking van de samenvatting van de voor- en nadelen van alle beheeropties die in hoofdstuk 5 is opgenomen. Voor de kenmerken van partitie en transmutatie (P&T) verwijzen we hier terug naar paragraaf 3.7. De daar beschreven karakteristieken worden in dit hoofdstuk niet herhaald en als bekend beschouwd. Per aandachtsgebied worden de voor- en nadelen van partitie en transmutatie beschreven op basis van de afwegingscriteria die voor de aandachtsgebieden geformuleerd zijn in hoofdstuk 4. Dit hoofdstuk sluit af met een korte conclusie per aandachtsgebied.

10.1 VEILIGHEID

De beoordeling van de afwegingscriteria heeft plaatsgevonden aan de hand van een literatuurstudie⁸⁷.

Inzicht in aanpak/systeem en vertrouwen in veiligheid

Zoals in paragraaf 3.7 aangegeven is het doel van partitie en transmutatie (P&T) het verkorten van de levensduur van radioactief afval. Indien het in de toekomst mogelijk wordt deze technieken op grote schaal toe te passen kan het radioactief afval veiliger geborgen worden en neemt het aantal onzekerheden dat gepaard gaat met zo'n lange termijn af.

Nadeel van P&T is dat dit de bouw van een reactor vereist, die waarschijnlijk niet in elk land gerealiseerd zal worden. Er zal HRA over langere afstanden moeten worden vervoerd, wat een veiligheidsrisico met zich mee brengt. Een ander nadeel is dat nog niet zeker is dat P&T in de toekomst daadwerkelijk op industriële schaal toegepast kan worden. Hier is nog veel onderzoek voor nodig en de uitkomsten daarvan zijn dus nog onzeker.

Passieve- en meervoudige veiligheidsfuncties

Omdat partitie en transmutatie geen eindbergingsoplossing is, maar technologieën om de levensduur van radioactiefafval te verkorten, zijn de criteria passieve- en meervoudige veiligheidsfuncties lastig toe te passen op deze technologie. Wel kan gesteld worden dat bij deze technologieën nog steeds een eindberging gerealiseerd moet worden, die voorzien moet zijn van passieve- en meervoudige veiligheidsfuncties.

⁸⁷ (NEA/OECD, 2013) (Nuclear Waste Management Organization, 2013) (Nuclear Waste Management Organization, 2013) (NEA/OECD, 2011) (Nuclear Decommissioning Authority, 2011) (van Goethem, 2010) (IAEA, 2010) (Salvatores, Na, & Nordborg, 2006) (IAEA, 2004) (Radioactive Waste Management Advisory Committee, 2003) (Baetsle, 2001) (Cordfunke, Gruppelaar, & Franken, 1995)

Insluiting van het afval

Toekomstige stralingsrisico's kunnen door P&T worden verkleind. Het verwijderen van actiniden uit het afval heeft echter heel weinig invloed op de effecten van de straling, indien deze in de toekomst zou vrijkomen. Nadelen van P&T zijn het ontstaan van secundair afval en meer blootstelling van het personeel.

Isolatie van het afval

Partitie en transmutatie kan een belangrijke rol spelen bij het verlagen van veiligheidszorgen door indringen door de levensduur van het radioactief afval te verkorten. Een ander voordeel is dat het risico op criticaliteit bij splijtstof afneemt (niet bij opwerkingsafval). De warmteafgifte van HRA kan waarschijnlijk aanzienlijk worden teruggedrongen door partitie en transmutatie. Dit betekent dat er minder ondergrondse opslagruimte nodig is, al kan het zijn dat daarvoor bovengrondse opslag van afval met korter levende splijtproducten vereist is om er volledig van te profiteren.

Het grootschalig industrieel toepassen van partitie en transmutatie-technieken vindt waarschijnlijk niet tegelijk plaats. Partitie is wellicht veel eerder in te voeren dan transmutatie. Dit scenario zou kunnen leiden tot het aanleggen van een grote voorraad gescheiden 'minor' actiniden (deze leveren de grootste bijdrage aan radioactiviteit, neutronenoutput en radiotoxiciteit van verbruikte splijtstoffen) in afwachting van transmutatie. Dit levert veiligheids- en beveiligingsproblemen op, en vergroot ook het risico op verspreiding van splijtbaar materiaal (proliferatie).

Toezicht op en beheer van de veiligheidsfuncties

Er zijn scenario's waarbij het scheiden van 'minor' actiniden tot een kleinere voetafdruk van de beheeroptie kan leiden. Door het radiotoxische gevaar van het afval te verlagen, zorgt partitie en transmutatie voor een aanzienlijke afname van de algehele hoeveelheid materiaal die in de opslagruimte moet worden ondergebracht. Hiermee wordt de invloed van diverse onzekerheden in het ontwerp van beheeropties verlaagd en helpt het mee de onzekerheid die samenhangt met de zeer lange levensduur van radioactiviteit te reduceren.

Partitie en transmutatie helpt ook mee de periode waarin opslagruimten onder toezicht moeten blijven te verkorten tot technologische en beheersbare termijnen.

10.2 GEOLOGIE

Partitie en transmutatie is geen zelfstandige beheeropties op de lange termijn, maar een techniek om de aard en omvang van het radioactieve afval te beïnvloeden. Er zullen dus altijd een of meer (aanvullende) beheeropties geselecteerd moeten worden om berging op de lange termijn te kunnen realiseren. Geologie is voor partitie en transmutatie daarom geen relevant aandachtsgebied.

10.3 ECONOMIE

Ook hier geldt dat partitie en transmutatie geen zelfstandige beheeroptie op de lange termijn is, maar een techniek om de aard en omvang van het radioactieve afval te beïnvloeden. Er zal dus altijd een (aanvullende) beheeropties geselecteerd moeten worden om berging op de lange termijn te kunnen realiseren.

Kosten

Dit alternatief heeft een tweeledige uitwerking op de kosten:

- Enerzijds een kostenverhoging vanwege de inzet van de betreffende partitie en transmutatie-technieken als zodanig (o.a. bouwen van een reactor) en het onderzoek daarnaar. Gezien de experimentele status is hierover geen kostenraming beschikbaar.
- Anderzijds een kostenverlagend effect op de inzet van aanvullende bergingsfaciliteiten vanwege het (beoogde) volumebeperkend effect van de inzet van de partitie en transmutatie-technieken.

Ruimtelijke beperkingen

Partitie en transmutatie van radioactief afval moet plaatsvinden in een reactor, ongeacht de aanvullende beheeroptie (bovengronds, oppervlakte of ondergronds). De ruimtebehoefte aan het oppervlak zal dus waarschijnlijk groter zijn. Daar staat tegenover dat P&T kan leiden tot een gelijkblijvende of kleiner ruimtebeslag door het afval (HRA), afhankelijk van de volumereductie, maar wel weer een groter beslag voor LMRA nodig is.

10.4 ETHIEK**Welzijn**

Het voordeel van partitie en transmutatie is dat de hoeveelheid hoogradioactief afval wordt beperkt en het afval voor kortere tijdsperioden hoeft te worden opgeslagen. Dit wordt als veiliger beschouwd, dan in de overige beheeropties (zie paragraaf 10.1). Tegelijkertijd zorgen meerdere handelingen met gebruikte splijtstof ook weer voor meer veiligheidsrisico's.

Wat betreft de effecten op de directe leefomgeving is het ruimtebeslag zoals hiervoor geschetst waarschijnlijk groter dan bij keuze voor alleen langdurig bovengrondse opslag, oppervlakte- of geologische berging.

Wat betreft de kosten worden de meeste kosten door huidige en komende generaties gemaakt. Hoewel er op lange termijn duidelijke besparingen mogelijk zijn, zullen de kosten op de kortere termijn relatief hoog zijn.

Autonomie

Volgens Taebi⁸⁸ is P&T vanuit het morele oogpunt een wenselijke optie voor onze omgang met radioactief afval omdat deze technieken de levensduur van het afval mogelijk substantieel verminderen en daarmee de belangen van de toekomstige generaties goed dient. Een bijkomend voordeel noemt hij dat met toepassen van P&T langdurige bovengrondse opslag als alternatief voor geologische berging in een nieuw daglicht komt te staan. Dit maakt een onderscheid tussen toekomstige generaties (in de nabije en de zeer verre toekomst) overbodig. Volgens Taebi (2011) wordt dit bekritiseerd (door bijvoorbeeld de IAEA) omdat we met geologische opslag een prima veilige en duurzame oplossing kunnen bieden. Waarom zouden we dan zo'n grote (en kostbare) onderzoekslast op ons willen nemen? Dit kan worden weerlegd met het argument dat we simpelweg niet kunnen voorspellen wat het menselijk gedrag over 10.000 danwel 100.000 jaar is of hoe die generaties eruit zullen zien. Voor die termijn voorzieningen treffen is per definitie onderhevig aan een grote mate van onzekerheid. P&T zou bijvoorbeeld eventuele besluitvorming over meest wenselijke geologische locaties door de generaties heen kunnen afwachten en aanpassen aan de wensen en eisen van dat moment. Wat nu nog niet kan, zou in de toekomst wel een optie kunnen zijn⁸⁹.

⁸⁸ (Taebi, 2010)

⁸⁹ (Taebi, 2011)

Dit kan echter ook beschouwd worden als een keuze last voor toekomstige generaties. De wens voor een nieuwe techniek wordt neergelegd bij de toekomstige generatie, terwijl nu nog onzeker is of deze techniek wel op industriële schaal kan worden toegepast in de toekomst. Daarmee wordt niet noodzakelijkerwijs hun keuzevrijheid aangetast. De toekomstige generatie kan altijd beslissen toch al voor een andere beheeroptie te kiezen.

P&T zal verder moeten worden ontwikkeld en hier zal tijd overheen gaan. Dit moet voor een deel door toekomstige generaties worden uitgevoerd. Zij dragen hiermee zowel lusten als lasten. Dat wil zeggen: ze dragen de kosten voor de innovatie, maar kunnen daar mogelijk ook van profiteren als de techniek gerealiseerd is. Kritisch punt daarbij is dat nu nog niet met zekerheid gesteld kan worden dat het onderzoek ertoe leidt dat P&T in de toekomst op industriële schaal kan worden toegepast. Daarnaast is verglaasd afval niet meer beschikbaar voor partitie en transmutatie (of in het beste geval tegen zeer hoge kosten), waardoor toekomstige generaties wel een oplossing moeten blijven vinden voor dit afval.

Bruikbaarheid als grondstof

Wat betreft bruikbaarheid als grondstof wordt bij P&T op de lange termijn het meeste grondstofgebruik bespaard. Een bijkomend nadeel hiervan is wel dat ook toekomstige generaties zich zullen moeten inspannen om technologieën te ontwikkelen voor het hergebruik van radioactief afval dat door ons en hen is en wordt opgeslagen.

10.5 CONCLUSIE

Veiligheid

Partitie en transmutatie is nog geen techniek die op grote schaal kan worden toegepast en vergt een langlopend onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma. Het doel van partitie en transmutatie is verlaging van de levensduur van het radioactief afval. Daardoor wordt de berging veiliger en neemt het aantal onzekerheden dat gepaard gaat met zo'n lange termijn af. Hoewel partitie en transmutatie de hoeveelheid HRA mogelijk vermindert, zorgt deze techniek echter ook voor een toename van de hoeveelheid LMRA dat niet binnen enkele honderden jaren verval.

Geologie

Het aandachtsgebied geologie is niet relevant voor partitie en transmutatie.

Economie

Partitie en transmutatie is geen volwaardige eindbergingsoptie, maar kan nuttig zijn om de kosten van de eindbergingsalternatieven te drukken. Voor partitie en transmutatie moeten echter ook veel kosten gemaakt worden voor onderzoek en bijvoorbeeld voor een bouwen van een reactor waar partitie en transmutatie op grote schaal kan worden toegepast.

Ethiek

Partitie en transmutatie moet nog verder ontwikkeld worden, waarbij deze onderzoekslast mogelijk deels terecht komt bij toekomstige generaties. Hiermee wordt vooral een wens neergelegd bij toekomstige generaties, omdat nu nog onzeker is of in de toekomst P&T daadwerkelijk op industriële schaal kan worden toegepast. De autonomie van de toekomstige generatie blijft bestaan om een andere keuze te maken voor het afval. Nadeel is dat er tot de toepassing van P&T een opslag/bergingsoplossing moet worden gevonden voor het afval. Indien P&T succesvol toegepast kan worden heeft dit als resultaat dat beduidend minder lasten van radioactief afval hoeven te worden doorgeschoven naar toekomstige generaties.

Bijlage 1 Referentielijst

- ARCADIS. (2011). *Project MER geïntegreerd project van opperolakteberging in Dessel voor het Belgisch laag- en middelactief kortlevend afval*.
- ARCADIS. (2013b). *Projectplan verkennende studie naar de lange termijn beheeropties voor radioactief afval en verbruikte splijtstoffen*. Arnhem: ARCADIS.
- Baetsle, L. (2001). *Application of Partitioning/Transmutation of Radioactive Materials in Radioactive Waste Management*. Opgehaald van Lectures Given at the Workshop on Hybrid Nuclear Systems for Energy Production, Utilisation of Actinides and Transmutation of Long-Lived Radioactive Waste Trieste: http://users.ictp.it/~pub_off/lectures/Ins012/Baetsle.pdf
- Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials. (2012, December). *Summary of the Safety Report for the Surface Repository of Category A waste in Dessel*. Opgehaald van NIROND-TR2012-17N VERSION 1: <http://www.niras-cat.be/downloads/BelgianAgencyforRadioactiveWaste.pdf>
- Beswick, J. (2008, April). *Status of Technology for Deep Borehole Disposal*. Opgehaald van <http://www.nwtrb.gov/facts/deepborehole.pdf>
- Brugge, J.V.M. & B.J. Vrouwe. (2011). *Rapportage van onderzoek aan eigenschappen van de Klei van Boom die relevant zijn bij de beschouwing van dit laagpakket voor opslag van kernafval. T&A Survey BV Rapportnummer: 1010-OEM2274*.
- Commissie voor de milieueffectrapportage. (2014). *Nationaal uitvoeringsprogramma voor het langetermijnbeheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen*. Utrecht.
- Committee on Radioactive Waste Management. (2009). *Report on National Research and Development for Interim Storage and Geological Disposal of Higher Activity Radioactive Wastes, and Management of Nuclear Materials*. Opgehaald van <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100105045320/http://www.corwm.org.uk/Pages/Current%20Publications/2543%20CoRWM%20Report%20on%20RD%20Final%2030%20October%2009.pdf>
- Cordfunke, E., Gruppelaar, H., & Franken, W. (1995, Juli). *Transmutation of Nuclear Waste*. Opgehaald van Status Report RAS Programme 1994: Recycling and Transmutation of Actinides and Fission Products: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/032/27032288.pdf
- COVRA. (2008). *Beleidsplan 2009-2014*. Vlissingen.
- COVRA. (2011, Juli 5). *Outline of a disposal concept in clay*. Opgehaald van <http://www.covra.nl/cms-file/get/iFileId/2417>
- COVRA. (2012). *Jaarrapport*. Opgehaald van <http://www.covra.nl/jaarrapport-2012>
- COVRA. (2013). *Jaarrapport 2013*. Middelburg.
- COVRA. (2014). *COVRA Internationaal*. Opgehaald van <http://www.covra.nl/Eindberging/internationaal>
- De Mulder, E.F.J., M.C. geluk, I. Ritsema, W.E. Westerhoff & T.E. Wong. (2003). *De ondergrond van Nederland*. TNO.
- Defra, BERR, Welsh Assembly Government, Department of the Environment Northern Ireland. (2008, Juni). *Managing Radioactive Waste Safety: A framework for Implementing Geological Disposal*. Opgehaald van https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/228903/7386.pdf
- ECN. (1999). *De kosten van het terughaalbaar opbergen van radioactief afval in de diepe ondergrond/opberging in zoutgesteente*. ECN.
- Elsam/Elkraft. (1981). *Disposal of High-level Waste from Nuclear Power Plants in Denmark; Salt Dome Investigations*. Denmark: ELSAM Frederica, Denmark and ELKRAFT Baler.
- Ensreg. (2006). *Nuclear fuel cycle*. Ogeroepen op September 3, 2014, van <http://www.ensreg.eu/nuclear-safety/nuclear-fuel-cycle>

- Environment Agency. (2009, Februari). *Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes: Guidance on Requirements for Authorisation*. Opgehaald van https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296504/geho0209bpjm-e-e.pdf
- European Commission. (2006). *SAPIERR Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories. Contract number F16W-CT-2003-509071*. Opgehaald van ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp6- Euratom/docs/sapierr-projrep_en.pdf
- European Commission. (2008). *Strategic Action Plan for Implementation of European Regional Repositories: Stage 2. Work Package 4 - Safety and Security of Regional Repositories. Contract Number: FP6-035958*. Opgehaald van ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp6- Euratom/docs/sapierr-2-4-safety-and-security-of-regional-repositories_en.pdf
- Europese Unie. (2011). *Richtlijn 2011/70/EURATOM van de Raad*. Brussel: Publicatieblad van de Europese Unie.
- Gerritsen, F. . (2006). *Nationale Onderzoeksagenda Archeologie 1.0*. Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed (RCE).
- Hilhorst. (1987). *Verantwoordelijk voor toekomstige generaties? Een sociaal-ethische bezinning op bevolkingsaantal, kernenergie, grondstoffen en genetica*. Kampen: J.H. Kok .
- Huisman, D.J., De Lange, G., Weijers, J.P., Witmans-Parker, N. (1998). *Inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen van Tertiaire kleipakketten – CAR Fase II*. NITG-TNO. 167 pp.
- IAEA. (1994). *Siting of Geological Disposal Facilities: A safety Guide*. Safety Series No. 111-G-4.1.
- IAEA. (1995). *Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series No. 111-F*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2001). *Performance of Engineered Barrier Materials in Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste: Results of a Co-ordinated Research Project*. Opgehaald van http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1255_prn.pdf
- IAEA. (2003). *Considerations in the Development of Near Surface Repositories for Radioactive Waste*. Opgehaald van Technical Reports Series No. 417: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS417_web.pdf
- IAEA. (2003). *Scientific and technical basis for the geological disposal of radioactive wastes*. Wenen: Technical report series no. 413.
- IAEA. (2004). *Developing Multinational Radioactive Waste Repositories: Infrastructural Framework and Scenarios of Cooperation*. Opgehaald van IAEA TEC-DOC 1413: http://www.arius-world.org/pages/pdfs_pub/IAEA-TECDOC-1413.pdf
- IAEA. (2004). *Developing Multinational Radioactive Waste Repositories: Infrastructural Framework and Scenarios of Cooperation*. IAEA TEC-DOC 1413. Opgehaald van http://www.arius-world.org/pages/pdfs_pub/IAEA-TECDOC-1413.pdf
- IAEA. (2004). *Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management*. Opgehaald van Technical Reports Series No. 435: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS435_web.pdf
- IAEA. (2005). *Upgrading of near surface repositories for radioactive waste*. Wenen: Technical reports series No. 433.
- IAEA. (2006). *Geological Disposal of Radioactive Waste: Safety Requirements*. Safety Standards Series No. WS-R-4.
- IAEA. (2006). *Storage of Radioactive waste: Safety Guide*. Opgehaald van http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1254_web.pdf
- IAEA. (2009). *Borehole disposal facilities for radioactive waste*. Wenen: IAEA safety standards series No. SSG-1.
- IAEA. (2009). *Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability*. IAEA Nuclear Energy Series Technical.

- IAEA. (2009). *Predisposal Management of Radioactive Waste: General Safety Requirements*. Opgehaald van http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1368_web.pdf
- IAEA. (2010). *Assessment of Partitioning Processes for Transmutation of Actinides*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2010). *Assessment of Partitioning Processes for Transmutation of Actinides*. Opgehaald van IAEA-TECDOC-1648: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1648_CD/Start.pdf
- IAEA. (2011). *Geological disposal facilities for radioactive waste*. Wenen: IAEA safety standards series No. SSG-14.
- IAEA. (2011). *The Management System for the Development of Disposal Facilities for Radioactive Waste*. Opgehaald van IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.2: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1496_web.pdf
- IAEA. (2011). *Viability of Sharing Facilities for the Disposal of Spent Fuel and Nuclear Waste*. IAEA-TECDOC-1658. Opgehaald van http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1658_web.pdf
- IAEA. (2012). *The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Guide*. Opgehaald van IAEA Safety Standards Series No. SSG-23: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1553_web.pdf
- IAEA. (2014). *Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste*. Wenen.
- IAEA. . (2005). *Upgrading of Near Surface Repositories for Radioactive Waste. Technical Reports Series No. 433*. . Opgehaald van http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS433_web.pdf
- ICRP. (2007). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP.
- ICRP. (2013). *Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste*. Opgehaald van ICRP Publication 122.
- IMO. (1972, November 13). *Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter*. Opgehaald van International Maritime Organization: <http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/Convention-on-the-Prevention-of-Marine-Pollution-by-Dumping-of-Wastes-and-Other-Matter.aspx>
- International Atomic Energy Agency (IAEA) . (2011). *Viability of Sharing Facilities for the Disposal of Spent Fuel and Nuclear Waste*. IAEA-TECDOC-1658. . Opgehaald van http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1658_web.pdf
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2004). *Developing Multinational Radioactive Waste Repositories: Infrastructural Framework and Scenarios of Cooperation*. IAEA TEC-DOC 1413. Opgehaald van http://www.arius-world.org/pages/pdfs_pub/IAEA-TECDOC-1413.pdf
- Jongmans et al. (2013). *Landschappen van Nederland, Geologie, bodem en landgebruik*.
- Mepham, e. (2006). *Ethical Matrix Manual*. The Hague: LEI.
- Ministerie van Economische Zaken. (2014, maart 5). *Uitbreiding HABOG, wijziging locatie VOG2 en revisie Kernenergiewetvergunning COVRA, Ministerie van Economische Zaken* . Opgeroepen op mei 2014, van Kennisgeving kernenergiewet: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2014-5979.html>
- Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie. (2011). *Brief 32645 nr. 1 Kernenergie*. 's Gravenhage: Tweede Kamer der Staten-Generaal.
- Ministerie van IenM. (2010). *Landelijk afvalbeheerplan 2009-2021*. Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, ruimtelijke ordening en milieu.
- Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. (2001). *Besluit stralingsbescherming*. 's Gravenhage.
- Ministerie van VROM. (2002). *Brief Radioactief afvalbeleid 28 674*. 's-Gravenhage.
- Ministerie VROM en Ministerie van Sociale zaken en Werkgelegenheid. (1989). *Dutch Nuclear Safety Rules: Nederlandse Veiligheids Regels (Hoofdregel QA) NVR 1.3 (Main Rule about QA)*. Opgehaald van <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2004-55-p17-SC64121.html> .
- National Nuclear Laboratory. (2013). *Minor Actinide Transmutation: A Position Paper*. Opgehaald van National Nuclear Laboratory. Minor Actinide Transmutation: A Position Paper. Ook beschikbaar

- op: http://www.nnl.co.uk/media/71280/minor_actinide_transmutation_-_position_paper_-_final_for_web.1.pdf
- NDA. (2010). *Geological Disposal: Steps Towards Implementation*. Opgehaald van Report No. NDA/RWMD/013: <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-Steps-Towards-Implementation-March-2010.pdf>
- NDA. (2010). *Geological Disposal: Steps Towards Implementation*.
- NEA/OECD. (2011). *Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation*. Opgehaald van <https://www.oecd-nea.org/science/reports/2011/6894-benefits-impacts-advanced-fuel.pdf>
- NEA/OECD. (2011). *Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-level Radioactive Waste and Spent Fuel*. Opgehaald van Final Report of the NEA R&R project: https://www.oecd-nea.org/rwm/rr/documents/RR-Final-Report_GD.pdf
- NEA/OECD. (2013, April). *Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation*. Opgehaald van Twelfth Information Exchange Meeting Prague, Czech Republic 24-27 September 2012: <https://www.oecd-nea.org/science/docs/2013/nsc-doc2013-3.pdf>
- NEA/OECD. (2013, Februari). *The Construction and Operation of Geological Disposal Facilities for High-level Radioactive Waste and Spent Fuel - Challenges and Opportunities*. Opgehaald van www.oecd-nea.org/rwm/documents/geological-facilities-A4.pdf
- NIRAS. (2010). *Een geïntegreerd project van oppervlakteberging in Dessel voor het Belgisch laag- en middelactief kortlevend afval*. ARCADIS.
- NIRAS. (2010). *Strategic environmental assessment (SEA) over het afvalplan van NIRAS*. Antwerpen: NIRAS.
- NIRAS. (2011, September). *Afvalplan*. Opgehaald van Voor het langetermijnbeheer van geconditioneerd hoogradioactief en/of langlevend afval en overzicht van verwante vragen: <http://www.niras-afvalplan.be/nieuw/downloads/pdf/Afvalplan.pdf>
- NIRAS. (2012, December). *Summary of the Safety Report for the Surface Repository of Category A waste in Dessel*. Opgehaald van NIRON-TR2012-17N VERSION 1: <http://www.niras-cat.be/downloads/BelgianAgencyforRadioactiveWaste.pdf>
- Nordic Nuclear Safety Research . (2011). *Experiences of Storage of Radioactive Waste Packages in the Nordic Countries*. Opgehaald van <http://www.nks.org/scripts/getdocument.php?file=11101011119735>
- Nuclear Decommissioning Authority . (2011, Februari). *Geological Disposal: RWMD Technical Strategy*. . Opgehaald van NDA Report No. NDA/RWMD/075: <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-RWMD-Technical-Strategy-February-2011.pdf>
- Nuclear Decommissioning Authority . (2013, Juli). *Geological Disposal: How the World is Dealing with its Radioactive Wastes*. Opgehaald van <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-disposal-how-the-world-is-dealing-with-its-radioactive-wastes-July-2013.pdf>
- Nuclear Decommissioning Authority (NDA). (2010). *Geological Disposal: Steps Towards Implementation*. Opgehaald van <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-Steps-Towards-Implementation-March-2010.pdf>
- Nuclear Decommissioning Authority (NDA). (2010). *Geological Disposal: Steps Towards Implementation*.
- Nuclear Decommissioning Authority. (2010). *Geological Disposal: An overview of the Generic Disposal System Safety Case*. Opgehaald van NDA Report No. NDA/RWMD/010: <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-An-overview-of-the-generic-Disposal-System-Safety-Case-December-2010.pdf>
- Nuclear Decommissioning Authority. (2010). *Geological Disposal: Generic Environmental Safety Case: Main Report*.
- Nuclear Decommissioning Authority. (2011, Februari). *Literature Review of Partitioning and Transmutation*. Opgehaald van <http://www.nda.gov.uk/documents/biblio/upload/Literature-review-of-partitioning-and-transmutation-2011.pdf>

- Nuclear Decommissioning Authority. (2012, Juli). *Frequently Asked Questions (FAQs) related to Geological Disposal*. Opgehaald van <https://www.nda.gov.uk/documents/upload/Frequently-Asked-Questions-related-to-Geological-Disposal-July-2012.pdf>
- Nuclear Decommissioning Authority. (2012, November). *Industry Guidance: Interim Storage of Higher Activity Waste Packages - Integrated approach*. Opgehaald van <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Industry-Guidance-Interim-Storage-of-Higher-Activity-Waste-Packages-Extended-Summary-November-2012.pdf>
- Nuclear Waste Management Organization . (2013). *Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and Transmutation*. Opgehaald van http://www.nwmo.ca/uploads_managed/MediaFiles/2325_watching_brief_on_reprocessing_-_update_2013.pdf
- Nuclear Waste Management Organization. (2013). *Minor Actinide Transmutation: A Position Paper*. Opgehaald van http://www.nnl.co.uk/media/71280/minor_actinide_transmutation_-_position_paper_-_final_for_web.1.pdf
- NWMO. (2005). *The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel, Choosing a way forward, Final Study*. Ottawa/Ontario.
- NWMO of Canada. (2011, Maart). *OPG's Deep Geologic Repository for Low & Intermediate Level Waste: Postclosure Safety Assessment*. Opgehaald van <http://www.nwmo.ca/uploads/DGR%20PDF/Licensing/Postclosure-Safety-Assessment.pdf>
- Office for Nuclear Regulation, the Environment Agency and the Scottish Environment Protection Agency. (2011, November). *The Management of Higher Activity Radioactive Waste on Nuclear Licensed Sites: Part 3c - Storage of Radioactive Waste*. Opgehaald van <http://www.onr.org.uk/wastemanage/rwm-part3c.pdf>
- OPLA; Commissie Opberging te Land, CORA; Commissie Opberging Radioactief Afval. (1993, 1995-2001). *Onderzoek naar de geologische opberging van radioactief afval in Nederland. Eindrapport Aanvullend onderzoek van Fase 1 (1A)*. Opgehaald van <http://www.covra.nl/infocentrum/opera>
- OSPAR convention. (1992). *Convention for the protection of the marine environment of the north-east Atlantic*. Opgehaald van http://www.ospar.org/html_documents/ospar/html/ospar_convention_e_updated_text_2007.pdf
- Radioactive Waste Management Advisory Committee. (2003). *The Radioactive Waste Management Advisory Committee's Advice to Ministers on the Application of Partitioning and Transmutation in the UK*. Opgehaald van <http://www.laka.org/docu/boeken/pdf/6-01-5-56-23.pdf>
- Rijkers, R., Huisman, D., de Lange, G., Weijers, J., & Witmans-Parker, N. (1998). *Inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen en Tertiare kleipakketten – CAR (tertiary Clay As potential host Rock) Fase II (CORA 16 in overview report)*.
- Rijksoverheid. (2014). *Radioactief afval*. Opgeroepen op mei 2014, van Kernenergie: <http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/kernenergie/radioactief-afval>
- Salvatores, M., Na, B.-C., & Nordborg, C. (2006). *Challenges and Potential Benefits of Partitioning and Transmutation (P&T)*. Opgehaald van NEA Update, NEA News 2006 - No. 24.1: http://www.oecd-nea.org/nea-news/2006/NEA_News_Vol_24_No_1_p_t.pdf
- Sandia National Laboratories. (2009, Augustus). *Deep Borehole Disposal of High-Level Radioactive Waste*. Opgehaald van Sandia Report SAND2009-4401: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/094401.pdf>
- Sandia National Laboratories. (2012, Augustus). *Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal*. Opgehaald van Fuel Cycle Research & Development: <http://energy.gov/sites/prod/files/2013/06/f1/FY12%20Research,%20Development,%20and%20Demonstration%20Roadmap%20for%20Deep%20Borehole%20Disposal.pdf>
- Sandia National Laboratories. (2012). *Research, Development, and Demonstration Roadmap for Deep Borehole Disposal. Fuel Cycle Research & Development*. Sandia Report.

- Secretariat of the Antarctic Treaty. (1959, December 1). *Conference on Antarctica*. Opgehaald van The Antarctic Treaty: http://www.ats.aq/documents/DCDC/fr/DCDC_fr002_e.pdf
- SKB. (1989). *Storage of Nuclear Waste in Very Deep Boreholes: Feasibility Study and Assessment of Economic Potential. Part I: Geological Considerations. Part II: Overall Facility Plan and Cost Analysis*. SKB.
- SKB. (1998). *The Very Deep Hole Concept – Geoscientific appraisal of conditions at great depth*. SKB.
- Swedish reference group for P&T research. (2010). *Partitioning and transmutation Current developments*. Stockholm: SKB.
- Taebi, B. (2010). *Nuclear Power and Justice between Generations, A moral analysis of fuel cycles*. Delft: TU Delft.
- Taebi, B. (2011). The morally desirable option for nuclear power production. *Philosophy & Technology*(Nr. 24), 169-192.
- Taebi, B. (2012). Multinational Nuclear Waste Repositories and Their Complex Issues of Justice. *Ethics, Policy & Environment*, 15:1, 57-62.
- Teabi, B., & Kadak, A. (2010). Intergenerational Considerations Affecting the Future of Nuclear Power: Equity as a Framework for Assessing Fuel Cycles. *Risk Analysis*(Vol. 30, No. 9).
- Tractebel Engineering NV. (2010). *Strategic Environmental Assessment (SEA) over het Afvalplan van NIRAS*. Antwerpen: NIRAS.
- Tweede Kamer der Staten Generaal. (1983-1984). *Nota Radioactief Afval 18 343 nrs. 1–2*. 's Gravenhage: Tweede Kamer der Staten Generaal.
- Tweede Kamer der Staten Generaal. (2002, november 11). *Brief van de Staatssecretaris van VROM*. Opgeroepen op mei 2014, van Radioactief afvalbeleid: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/kst-28674-1.html>
- United Kingdom Nirex Limited. (2004). *A review of the Deep Borehole Disposal Concept for Radioactive Waste*. Opgehaald van Nirex Report No. N/108: <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/A-review-of-the-deep-borehole-disposal-concept-for-radioactive-waste-Nirex-Report-N-108-June-2004.pdf>
- United Kingdom Nirex Limited. (2004). *Literature Review of Approaches to Long-Term Storage of Radioactive Waste and Materials*. Opgehaald van <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Literature-review-of-approaches-to-long-term-storage-of-radioactive-waste-and-materials-Nirex-Report-N-107-2004.pdf>
- United Nations. (1974). *Convention on the Registration of Objects Launched into Outer Space*. New York: United Nations Office for Outer Space Affairs.
- United Nations. (1992). *Report to the UN Conference on Environment and Development*. Rio de Janeiro: Distr. GENERAL 12 August 1992.
- United States Nuclear Regulatory Commission . (2011). *Regulatory Perspectives on Deep Borehole Disposal Concepts*. Opgehaald van <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1114/ML111470719.pdf>
- United States Nuclear Waste Technical Review Board. (2013). *Deep Borehole Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Waste*. Opgehaald van <http://www.nwtrb.gov/facts/BoreholeFactSheet.pdf>
- van Goethem, G. (2010). *Euratom Research and Training Programme for Partitioning and Transmutation*. Opgehaald van Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation 11th Information Exchange Meeting: https://www.oecd-neo.org/pt/iempt11/documents/O3_IEMPT11EuratomstrategyGVGNov10.pdf
- Verhoef & Schröder. (2011). *Research Plan OPERA-PG-COV004*.
- Verhoef, E. (2011). *OPERA Meerjaren plan OPERA-PG-COV002*.
- Verhoef, E. (2011). *Meerjarenplan OPERA*. Vlissingen: COVRA N.V.
- Verhoef, E., & Neeft, E. (2014). *Towards a safety strategy, Developing a long-term Dutch research program into geological disposal of radioactive waste*. OPERA.
- Verhoef, E., Neeft, E., Grupa, J., & Poley, A. (2011). *Outline of a disposal concept in clay*. Vlissingen: COVRA N.V.
- Vis, G.-J., & Verweij, J. (2014). *Geological and geohydrological characterization of the Boom Clay and its overburden*. OPERA.

Vos et al, P. (2012). *Atlas van Nederland in het Holoceen*. Bert Bakker.

Wikipedia. (2014). *A Theory of Justice*. Opgehaald van http://nl.wikipedia.org/wiki/A_Theory_of_Justice

Wikipedia. (2014). *Brian Barry*. Opgehaald van http://nl.wikipedia.org/wiki/Brian_Barry