



# Milieu-effectrapportage Brandstofdiversificatie

Juli 2010

N.V. Elektriciteits-produktiemaatschappij Zuid-Nederland EPZ





# Milieueffectrapportage

## **Brandstof**diversificatie



Juli 2010

N.V. Elektriciteits-produktiemaatschappij Zuid-Nederland EPZ

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Voorgeschiedenis en aanleiding	6
1.2	Reikwijdte en procedure m.e.r.	7
1.3	Inhoud MER	8
<b>2</b>	<b>Probleemstelling en doel 9</b>	
2.1	Opbouw van dit hoofdstuk	9
2.2	Korte procesbeschrijving	9
2.3	Fabricage van de reactorkern	10
2.4	Mogelijkheden om een kerncentrale economisch te optimaliseren	11
2.5	Mogelijkheden om in de splijtstofcyclus kosten te besparen	11
2.6	Mogelijke alternatieve splijtstoffen voor natuurlijk uranium	13
2.7	Mengoxide (MOX)	14
2.8	Gecompenseerd verrijkt gerecycled uranium (c-ERU)	14
2.9	Vergelijking kostenopbouw van de alternatieve splijtstoffen	15
2.10	Doelstelling voorgenomen activiteit en conclusie voor kostenbeheersing	16
<b>3</b>	<b>Randvoorwaarden en besluitvorming</b>	<b>17</b>
3.1	Inleiding	17
3.2	Randvoorwaarden	17
3.2.1	Wetgeving	17
3.2.2	Geldende vergunningen en afspraken	18
3.2.3	Het beoordelingskader	19
3.2.4	Natuurbeleid	21
3.2.6	Overige overheidsvoorschriften	22
3.2.6	Beleid inzake opwerking en radioactief afval	22
3.3	Besluitvorming	23
<b>4</b>	<b>Huidig bedrijf, voorgenomen activiteit en alternatieven</b>	<b>24</b>
4.1	Inleiding	24
4.2	Voorgenomen activiteit: inzet van verschillende soorten splijtstof	24
4.2.1	Eerdere wijzigingen: hogere verrijgingsgraden	25
4.2.2	Thans aangevraagde wijzigingen splijtstof	25
4.2.3	Toepassing van mengoxide (MOX)	26
4.2.4	Toepassing van c-ERU	31
4.3	Overgangssituaties	34
4.4	Alternatieven	34
<b>5</b>	<b>Bestaande toestand van het milieu</b>	<b>38</b>
5.1	Inleiding	38
5.2	Lozingen bij normaal bedrijf	38
5.3	Situering en grondgebruik	39

<b>5.4</b>	<b>Veiligheid</b>	<b>40</b>
5.4.1	Inleiding	40
5.4.2	Beschouwde ongevallen	41
5.4.3	Ongevalsanalyses	42
	5.4.3.1 <i>Inleiding</i>	42
	5.4.3.2 <i>Kerninventaris</i>	42
	5.4.3.3 <i>Thermohydraulische analyses</i>	42
	5.4.3.4 <i>Radiologische analyses</i>	42
5.4.4	<i>Probabilistic Safety Assessment (PSA)</i>	44
	5.4.4.1 <i>Inleiding</i>	44
	5.4.4.2 <i>Werkwijze PSA</i>	44
	5.4.4.3 <i>Resultaten PSA</i>	45
5.4.5	Onderkriticaliteit in het splijtstofopslagbassin	46
<b>5.5</b>	<b>Luchtkwaliteit</b>	<b>47</b>
5.5.1	Achtergrondconcentraties radioactieve nucliden en straling	47
5.5.2	Bijdragen KCB aan de luchtkwaliteit	47
	5.5.2.1 <i>Lozingen naar de lucht</i>	47
	5.5.2.2 <i>Directe straling vanuit de KCB</i>	48
<b>5.6</b>	<b>Waterkwaliteit</b>	<b>48</b>
5.6.1	Algemene beschrijving	48
5.6.2	Biologische waterkwaliteit	49
5.6.3	Radiologische waterkwaliteit	49
5.6.4	Ecologische effecten van radiologische bijdragen KCB	49
<b>5.7</b>	<b>Bodem: depositie van radioactieve stoffen</b>	<b>50</b>
<b>5.8</b>	<b>Bijdragen KCB aan de totale stralingsbelasting</b>	<b>50</b>
5.8.1	Dosisbijdragen KCB	50
5.8.2	Gemiddelde stralingsbelasting in Nederland	51
5.8.3	Gevolgen van straling en toetsing aan dosiscriteria	51
<b>5.9</b>	<b>Radioactief afval en (gebruikte) splijtstoffen</b>	<b>51</b>
<b>5.10</b>	<b>Risico's inzake de verspreiding van kernwapens</b>	<b>53</b>
<b>5.11</b>	<b>Huidig transport van splijtstofelementen bij KCB</b>	<b>53</b>
5.11.1	Overzicht van de risico's	53
5.11.2	Dosis bij regulier transport	54
5.11.3	Risico's bij transportongevallen	55

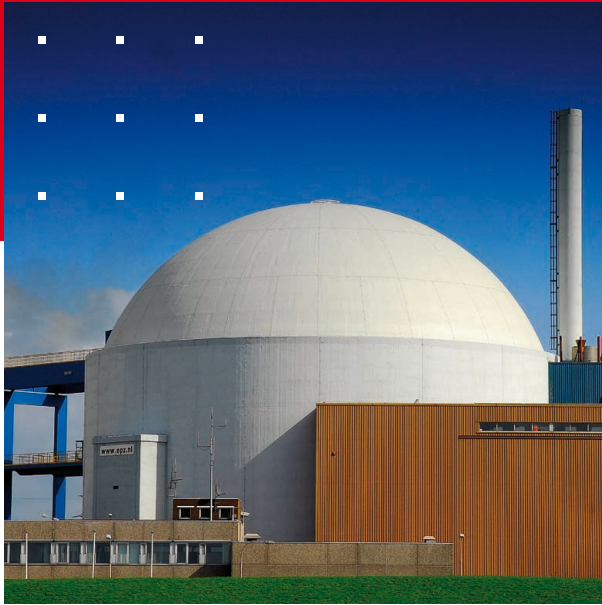
<b>6</b>	<b>Vergelijking milieugevolgen van de voorgenomen activiteit en de alternatieven</b>	<b>56</b>
<b>6.1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>56</b>
<b>6.2</b>	<b>Veiligheid</b>	<b>56</b>
6.2.1	Beschouwing van de reactorfysische wijzigingen en hun invloed op de veiligheid bij inzet van MOX-splijtstof	56
6.2.2	Bedrijfsvoering	59
6.2.3	Onderkriticaliteit in het splijtstofopslagbassin	60
<b>6.3</b>	<b>Lozingen en stralingsbelasting bij normaal bedrijf</b>	<b>60</b>
6.3.1	Stralingsbelasting via lozing naar de omgevingslucht	60
6.3.2	Stralingsbelasting via lozing naar de Westerschelde	61
6.3.3	Biologische waterkwaliteit	61
6.3.4	Stralingsbelasting via directe externe straling	62

<b>6.4</b>	<b>Veiligheidsaspecten bij storingen van het bedrijf</b>	<b>62</b>
6.4.1	Inleiding	62
6.4.2	Ongevalse analyses	63
	6.4.2.1 Kerninventaris	63
	6.4.2.2 Thermohydraulische analyses	64
	6.4.2.3 Radiologische analyses van ontwerpgevallen	65
6.4.3	Probabilistic safety assessment (psa)	66
	6.4.3.1 Inleiding	66
	6.4.3.2 Resultaten	66
<b>6.5</b>	<b>Radioactief afval en gebruikte splijtstofelementen</b>	<b>68</b>
6.5.1	Bedrijfsafval	69
6.5.2	Gecompecteerd metaalafval	69
6.5.3	Kernsplijtstofafval	69
6.5.4	Directe opslag van splijtstofelementen	70
<b>6.6</b>	<b>Transport</b>	<b>70</b>
6.6.1	Dosis bij regulier transport	70
6.6.2	Risico's bij transportongevallen	73
<b>6.7</b>	<b>Risico's inzake de verspreiding van kernwapens</b>	<b>74</b>
<b>6.8</b>	<b>Veranderingen in de splijtstofcyclus</b>	<b>77</b>
6.8.1	Ertswinning en extractie	77
6.8.2	Splijtstofproductie (Conversie, verrijking en fabricage splijtstofelementen)	77
6.8.3	Opwerking splijtstof	78
6.8.4	Transport	78
<b>6.9</b>	<b>Toetsing aan beschermingsbepalingen Westerschelde</b>	<b>78</b>
6.9.1	Structuurschema Groene Ruimte (SGR)	78
6.9.2	Natuurbeschermingswet	78
<b>6.10</b>	<b>Overzicht effecten en definitie meest milieuvriendelijke alternatief</b>	<b>79</b>
6.10.1	Overzicht effecten en conclusies	79
6.10.2	Meest milieuvriendelijke alternatief	81
<b>7</b>	<b>Leemten in kennis en evaluatieprogramma</b>	<b>82</b>
<b>7.1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>82</b>
<b>7.2</b>	<b>Leemten in kennis</b>	<b>82</b>
7.2.1	Ervaring in het gebruik van MOX-splijtstof	82
7.2.2	Ontwikkelingen in richtlijnen en regelgeving betreffende stralingsrisico's	82
<b>7.3</b>	<b>Evaluatieprogramma milieueffectrapportage</b>	<b>84</b>
7.3.1	Opzet evaluatie MER's	84
7.3.2	Andere evaluaties	85
7.3.3	Evaluatieprogramma van het onderhavige MER	85
<b>8</b>	<b>Conclusies</b>	<b>86</b>
<b>8.1</b>	<b>Voorgenomen activiteit</b>	<b>86</b>
<b>8.2</b>	<b>Toetsing voorgenomen activiteit aan EPZ randvoorwaarden</b>	<b>86</b>
<b>8.3</b>	<b>Veiligheid en consequenties voor mens en milieu</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>Verklarende woordenlijst</b>	<b>88</b>

<b>Bijlage a: De splijfstofcyclus</b>	<b>93</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>93</b>
<b>2 Gesloten splijfstofcyclus</b>	<b>93</b>
2.1 Ertswinning	93
2.2 Chemische Conversie	95
2.3 Uranium verrijking	95
2.4 Productie van splijstofelementen	96
2.5 Versplijting van uranium in kerncentrale	96
2.6 Opwerking van de splijstofelementen	96
2.7 Recycling	97
2.8 Radioactief afval	97
2.9 Directe opslag van gebruikte splijstof	99
<b>3 Risico's van de splijfstofcyclus</b>	<b>100</b>
3.1 Radiologische risico's bevolking	100
3.2 Radiologische risico's personeel	101
3.3 Radiologische risico's voor de verschillende fasen van de splijfstofcyclus	101
<b>Bijlage b: De huidige installatie</b>	<b>104</b>
<b>1 Algemene beschrijving</b>	<b>104</b>
<b>2 Het kernsplijtingsproces</b>	<b>106</b>
<b>3 Splijstofelementen</b>	<b>106</b>
<b>4 Opslag splijstofelementen</b>	<b>108</b>
4.1 Opslag van nieuwe splijstofelementen	108
4.2 Opslag van gebruikte splijstofelementen	109
<b>5 Veiligheidsvoorzieningen</b>	<b>109</b>
<b>6 Overige relevante systemen en voorzieningen</b>	<b>111</b>
<b>7 Bedrijfservaringen KCB</b>	<b>111</b>
<b>Bijlage c: Representatieve begingebourtenissen voor ongevallen bij de KCB</b>	<b>112</b>
<b>Bijlage d: Belangrijkste nucliden voor verschillende kernen</b>	<b>113</b>
<b>Bijlage e: Nuclide-inventaris van ontladen splijstofelementen na 3 en 500 dagen verval</b>	<b>117</b>

# 1 Inleiding

# 1



## 1.1 Voorgeschiedenis en aanleiding

De N.V. Elektriciteits-Produktie­maatschappij Zuid-Nederland (EPZ) exploiteert in Borssele de kernenergie­centrale Borssele (KCB) met een elektrisch vermogen van 512 MWe. Deze eenheid is in 1973 in bedrijf gesteld. De ligging van de KCB is aangegeven in figuur 1.1. De KCB is direct achter de zeedijk langs de Westerschelde gesitueerd.

Figuur S.1 Situering KCB (in cirkel).





EPZ is voornemens om de KCB te bedrijven tot en met december 2033, in overeenstemming met het zogenoemde Borssele-Convenant dat met de Nederlandse Staat in juni 2006 is afgesloten.

Naast programma's om de nucleaire veiligheid op het hoogste peil te handhaven, ontwikkelt EPZ activiteiten om te anticiperen op ontwikkelingen in de markt voor nucleaire splijtstoffen om de bedrijfseconomie van de KCB optimaal te houden. De verwerving van de splijtstofelementen vormt één van de belangrijkste beïnvloedbare kostenposten in de exploitatie van de KCB. De prijzen voor uranium-splijtstof fluctueren de laatste jaren sterk. De vraag naar kernenergie groeit internationaal. Dat beïnvloedt de prijs van de grondstoffen en de diensten die met de vervaardiging van splijtstof samenhangen. Ook anticipeert de markt op mogelijke nieuwbouw van kerncentrales wat deze prijzen nog sterker opdrijft.

EPZ is tot de conclusie gekomen dat diversificatie van haar nucleaire splijtstoffen nodig is om minder afhankelijk te worden van de prijsontwikkeling van verrijkt uranium. Die diversificatie zal vooral worden nagestreefd door mengoxide-elementen (MOX)<sup>1</sup> in te zetten. Daarnaast wenst EPZ voor de uraniumelementen die zijn gemaakt van verrijkt gerecycled uranium (ERU) compensatie van de reactiviteit toe te passen (*compensated ERU* of c-ERU). Het gaat EPZ er dus om de mogelijkheid te

verkrijgen (deels) over te stappen gerecyclede materialen. Gerecyclede materialen zijn in dit verband: c-ERU (afkomstig van gebruikte uraniumelementen en daarna hoger verrijkt ter compensatie van de lagere kwaliteit van gerecycled uranium) en MOX, gemaakt van plutonium (eveneens teruggewonnen uit gebruikte uraniumelementen) gemengd met verarmd uranium (een product van de verrijkingsindustrie). EPZ streeft naar het verminderen van de gebruikte hoeveelheid primaire grondstoffen (natuurlijk uranium) in de KCB. Het hergebruik van materialen in de vorm van c-ERU en MOX past binnen dit streven.

## 1.2 Reikwijdte en procedure m.e.r.

Dit MER dient ter onderbouwing van een aanvraag voor een (wijzigings)vergunning ingevolge artikel 15 onder b van de Kernenergiewet. Het doel is om naast de huidige splijtstofelementen met uraniumoxide, verrijkt tot  $4,4 \pm 0,05$  gew %, ook splijtstofelementen met MOX- en c-ERU-elementen te mogen gebruiken.

Volgens het Besluit m.e.r. 1994 bestaat voor de voorgenomen activiteit een zogenaamde beoordelingsplicht. Op lijst D van beoordelingsplichtige activiteiten is onder categorie 22.3 genoemd 'de wijziging of uitbreiding van een inrichting waarin kernenergie kan worden vrijgemaakt'. Daarbij wordt onder meer verwezen naar de gevallen waarop de activiteit betrekking



<sup>1</sup> Mengoxide wordt geproduceerd door het mengen van uraniumoxide en plutoniumoxide.

heeft, namelijk: 'een wijziging van de soort, hoeveelheid of verrijgingsgraad van de splijtstof'. In het onderhavige geval is een wijziging van de soort en van de verrijgingsgraad van de splijtstof aan de orde.

De m.e.r.-beoordelingsplicht houdt in dat het bevoegd gezag dient te beoordelen of een MER dient te worden opgesteld. Deze beoordeling heeft in dit geval niet plaatsgevonden, omdat de initiatiefnemer EPZ op voorhand heeft besloten een MER op te stellen.

De procedure van de milieueffectrapportage (m.e.r.) werd gestart met de bekendmaking van de door EPZ ingediende Startnotitie gevolgd door een periode van terinzagelegging ten behoeve van inspraak. Met inachtneming van onder andere het advies van de Commissie voor de milieueffectrapportage en de resultaten van inspraak, heeft het bevoegd gezag in april 2009 de richtlijnen voor het MER vastgesteld. Het onderhavige MER is opgesteld op basis van deze richtlijnen. De m.e.r.- en de vergunningprocedure zijn aan elkaar gekoppeld.

Na indiening van de vergunningaanvraag en het MER zullen deze documenten ter inzage worden gelegd. Gedurende een termijn van zes weken kan een ieder schriftelijk opmerkingen inbrengen. Ook kunnen mondeling opmerkingen worden ingebracht.

Het **bevoegd gezag** voor de KEW wordt gevormd door de Ministers van

- Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM)
- Economische Zaken (EZ)
- Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW).

De ministers beslissen in overeenstemming met de ministers die het mede aangaat. Het gaat hierbij om de ministers van Verkeer en Waterstaat (V&W) en Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV).

De coördinatie berust bij het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM).

### 1.3 Inhoud MER

Het MER volgt de systematiek van de hiertoe door het bevoegd gezag vastgestelde richtlijnen en ziet er globaal als volgt uit.

In hoofdstuk 2 worden de **probleemstelling en het doel van de voorgenomen activiteit** aangegeven.

In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de van overheidswege **reeds genomen en nog te nemen besluiten** over de KCB.

In hoofdstuk 4 wordt de voorgestelde splijtstofdiversificatie, de zogenaamde '**voorgenomen activiteit**', beschreven en worden de **alternatieven** voor de voorgestelde activiteit uitgewerkt.

In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de **bestaande toestand van het milieu** in de omgeving van de centrale.

In hoofdstuk 6 worden de **milieugevolgen** van de voorgenomen activiteit en de alternatieven met elkaar vergeleken en waar mogelijk getoetst aan wettelijke grenswaarden.

In hoofdstuk 7 worden de **leemten in kennis** besproken ten aanzien van de voorgenomen activiteit en de alternatieven en de milieu-beïnvloedingen van beide.

In hoofdstuk 8 worden de **conclusies** samengevat.

Verder is een vijftal bijlagen toegevoegd, namelijk (een beschrijving van):

- a De splijtstofcyclus
- b De huidige installatie
- c Representatieve begingebourtenissen voor ongevallen bij de KCB
- d Belangrijkste nucliden voor verschillende kernen
- e Nuclide-inventaris van ontladen splijtstof-elementen na 3 en 500 dagen verval.

Het MER is opgesteld onder verantwoordelijkheid van N.V. EPZ. Bij de totstandkoming is gebruik gemaakt van advieswerkzaamheden van NRG, KEMA en AREVA.

## 2 Probleemstelling en doel

### 2.1 Opbouw van dit hoofdstuk

*Om de achtergrond van het voornemen duidelijk te maken wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de mogelijkheden om bij een kerncentrale de kosten te beheersen. Om deze toelichting te kunnen volgen, is het nodig enig elementair begrip van de werking van kerncentrales en de vervaardiging van splijtstofelementen te hebben. Deze beknopte beschrijving wordt gegeven in de paragrafen 2.2 en 2.3. Vervolgens wordt in paragraaf 2.4 aangegeven welke mogelijkheden tot kostenbeheersing er bij kerncentrales zijn.*

Het blijkt dat de belangrijkste mogelijkheden gezocht moeten worden in de aanschaf van splijtstof en de verwerking van de gebruikte splijtstof: de splijtstofcyclus (zie bijlage A). Daarom worden de mogelijke maatregelen voor kostenbeheersing in de splijtstofcyclus behandeld in paragraaf 2.5. De splijtstofaanschafkosten blijken binnen deze cyclus het meest beïnvloedbaar, zodat in paragraaf 2.6 de alternatieve splijtstoffen ter vervanging van de huidige splijtstof worden geïnventariseerd. De conclusie van deze inventarisatie is dat er twee interessante mogelijkheden zijn om de splijtstofkosten te beheersen:

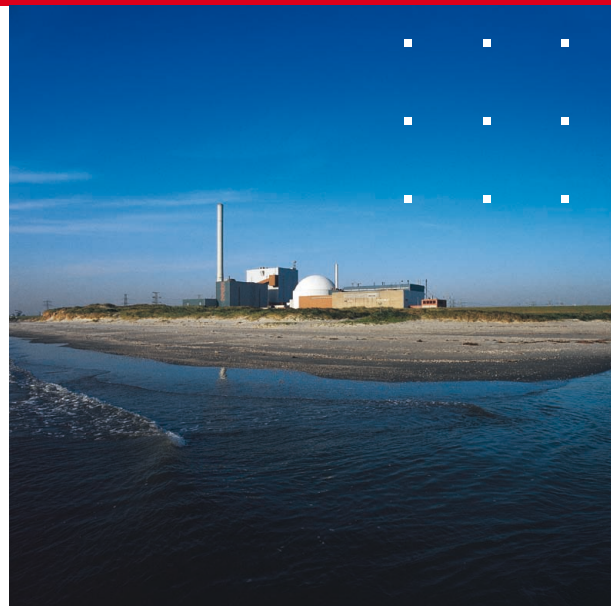
1. toepassing van mengoxide (MOX), waarbij het plutonium uit gebruikte splijtstof wordt ingezet gemengd met verarmd uranium.
2. toepassing van gecompenseerd verrijkt gerecycled uranium (c-ERU), waarbij uranium uit gebruikte splijtstof wordt benut.

In de paragrafen 2.7 tot en met 2.9 worden daarom de bedrijfsmatige en economische aspecten van c-ERU en MOX verder uitgewerkt.

Op basis van deze achtergrondinformatie wordt in paragraaf 2.10 de doelstelling van het project Brandstofdiversificatie omschreven.

### 2.2 Korte procesbeschrijving

De reactor van de kerncentrale Borssele (KCB) is een zogenaamde drukwaterreactor. Dit is het



# 2

meest gangbare type kernreactor in de wereld dat nog steeds voor nieuw te bouwen centrales wordt toegepast. Bij een dergelijke reactor wordt water onder hoge druk gebruikt voor het afvoeren van de warmte die bij kernsplijting geproduceerd wordt. Met deze warmte wordt uiteindelijk elektriciteit geproduceerd. Daarnaast wordt dit water gebruikt voor het afremmen van de neutronen. Dit laatste is nodig om het kernsplijtingsproces op gang te houden.

De energieproductie in de reactor is het gevolg van splijting van zware atoomkernen, namelijk van uranium en plutonium. Deze stoffen bestaan elk uit een mengsel van isotopen. Dit zijn stoffen (atomen) die chemisch identiek zijn maar die in kernprocessen onderling sterk verschillend gedrag vertonen. De splijtstof voor de KCB wordt momenteel gefabriceerd uit natuurlijk uranium of gerecycled uranium. Natuurlijk uranium, afkomstig van mijnbouw, bevat 0,7 gew % van het splijtbare isotoop uranium-235 en 99,3 gew % van het niet-splijtbare isotoop uranium-238. Gerecycled uranium bevat ook ongeveer 0,7 gew % uranium-235 en hoofdzakelijk uranium-238 en daarnaast niet-natuurlijke uraniumisotopen. Om het kernsplijtingsproces efficiënt te laten verlopen wordt in een verrijkingsinstallatie de concentratie splijtbaar uranium-235 voor de KCB verhoogd tot  $4,4 \pm 0,05$  gew %.

Tijdens het gebruik in de reactor ontstaat er uit het niet-splijtbare isotoop uranium-238

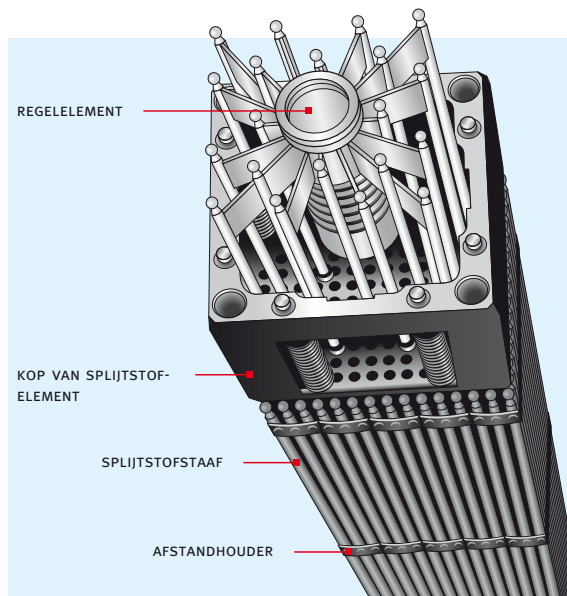
een nieuwe stof: plutonium. Dit plutonium is net als uranium een mengsel van splijtbare en niet splijtbare isotopen. De splijtbare isotopen zoals plutonium-239 doen mee in het proces van energieopwekking. Tijdens bedrijf van de reactor wordt dus (ook al in de bestaande situatie) energie opgewekt door splijting van een mengsel van uranium en plutonium, waarbij (in de bestaande situatie) gemiddeld circa 35% van de vrijgemaakte energie afkomstig is van het plutonium dat tijdens het proces zelf is ontstaan.

Splijtstofelementen zijn geschikt om gedurende enkele jaren energieproductie te leveren in de reactor. Na vier à vijf jaar inzet in de reactor is de hoeveelheid splijtbare nucliden zo ver afgenomen dat de energieopbrengst van de splijtstof afneemt. Dan moet de splijtstof door nieuwe worden vervangen. Voor het vervangen van een deel van de splijtstof (ongeveer 25%) door verse splijtstof wordt de reactor één keer per jaar stilgelegd.

Meer gedetailleerde informatie over de splijtstofcyclus staat in bijlage A, terwijl bijlage B de werking van de huidige KCB beschrijft.

### 2.3 Fabricage van de reactorkern

De reactorkern bevat circa 39 ton splijtstof. In de bestaande situatie heeft deze splijtstof de vorm van uraniumoxide ( $UO_2$ ) tabletten. De tabletten zijn, per ongeveer 210, als zuilen op elkaar gestapeld en geplaatst in dichtgelaste metalen



hulzen om zo de splijtstofstaven te vormen. Telkens zijn 205 splijtstofstaven gebundeld in een element dat verder ook ruimte biedt aan 20 regelstaafgeleidebuizen. De reactorkern is opgebouwd uit 121 van deze splijtstofelementen. Het proces voor het vervaardigen van de huidige splijtstofelementen van de KCB omvat globaal de volgende stappen (zie ook verdere detailbeschrijving in bijlage A):

1. Winnen en zuiveren van uraniumerts, waarbij uranium in de chemische vorm 'yellowcake' ( $U_3O_8$ ) beschikbaar komt. Dit (natuurlijke) uranium heeft altijd een gehalte van 0,7 gew % uranium-235.
2. Chemisch omzetten van yellowcake in gasvormig uraniumhexafluoride ( $UF_6$ ) als voorbereiding op de volgende stap.
3. Verrijken van het uranium in een verrijkingsfabriek, zodat het gehalte aan splijtbaar uranium-235 toeneemt tot (voor de KCB)  $4,4 \pm 0,05$  gew %. Bij dit proces komt ook een nevenstroom verarmd uranium vrij, waarvan het gehalte aan splijtbaar uranium-235 is afgenomen tot bijvoorbeeld 0,25 gew %.
4. Omzetten van het verrijkte uraniumhexafluoride in uraniumoxide ( $UO_2$ ) dat tot tabletten wordt verwerkt.
5. Verwerken van de uraniumoxidetabletten in splijtstofelementen en transport naar de KCB.

Tezamen worden deze stappen de 'front-end' van de splijtstofketen van de kerncentrale genoemd. De 'back-end' betreft alle activiteiten rond de afvoer en verwerking van de gebruikte splijtstof, zie ook paragraaf 2.5.

Er is momenteel een sterke ontwikkeling gaande op het gebied van de front-end kosten. Een ontwikkeling die wordt gedomineerd door sterk fluctuerende prijzen van de grondstof yellowcake. Dat leidt voor de kerncentrales tot meer kostenonzekerheid met betrekking tot de splijtstofkosten. Het is moeilijk te voorspellen hoe deze ontwikkeling zich in komende jaren zal voortzetten. Om minder afhankelijk te worden van onzekerheden in de marktontwikkeling, wenst EPZ de mogelijkheid te krijgen om splijtstofelementen te laten vervaardigen uit gerecyclede materialen waarvan de prijzen onafhankelijk zijn van vraag/aanbod op de grondstoffenmarkt.

## 2.4 Mogelijkheden om een kerncentrale economisch te optimaliseren

EPZ voorziet in de levering van elektriciteit aan haar klanten. De wijze waarop EPZ dat doet is vastgelegd in de visie<sup>2</sup>:

EPZ is een producent van elektriciteit met een concurrerend kostprijsniveau. Het voortdurend verbeteren van de veiligheid, de beschikbaarheid en de bedrijfszekerheid van haar productie-eenheden heeft voor EPZ de hoogste prioriteit, daarbij heeft nucleaire veiligheid de 'overriding priority'.

In het kader van het Convenant Kerncentrale Borssele dat tussen EPZ en de Nederlandse Staat in juni 2006 is overeengekomen, heeft EPZ de verplichting aanvaard met de KCB blijvend te behoren tot de 25% veiligste watergemodereerde kerncentrales van de Westerse wereld.

Bedrijfseconomisch gunstige resultaten worden behaald door hoge beschikbaarheid en bedrijfszekerheid van de installatie te realiseren tegen zo laag mogelijke kosten.

### Beschikbaarheid/bedrijfszekerheid

De beschikbaarheid van de installatie is zeer hoog, gemiddeld 93% in de laatste 10 jaar. De gemiddelde beschikbaarheid van vergelijkbare centrales bedraagt mondiaal 86%. De beschikbaarheid zou kunnen worden vergroot door de onderhoudsperiode waarin onder andere de splijtstofwissel (SW) plaatsvindt te verkorten. EPZ is echter van mening dat bij verdere verkorting van de SW-periode de zorgvuldigheid waarmee wordt gewerkt moeilijker kan worden gegarandeerd waardoor de veiligheid in het geding zou kunnen komen.

### Kostenbesparing

De kostprijs van elektriciteit uit de KCB valt globaal uiteen in drie delen: de kosten van investeringen en voorzieningen, de kosten van bedrijfsvoering en de kosten van de kernbrandstof.

- De eerste categorie (**investeringen en voorzieningen**) is weinig beïnvloedbaar wanneer de eenheid eenmaal gebouwd is en wanneer vaststaat met welke toekomstige uitgaven rekening gehouden moet worden (zoals de ontmanteling na einde bedrijf).
- De kosten voor **bedrijfsvoering** inclusief personeelskosten zijn, zonder het bestaande veiligheidsniveau te beïnvloeden, reeds in het verleden op een minimaal niveau gebracht.
- De derde groep kosten betreft de **splijtstof**. In de situatie van EPZ bedragen de splijtstofkosten ongeveer één derde van de integrale opwekkingskosten.

## 2.5 Mogelijkheden om in de splijtstofcyclus kosten te besparen

De splijtstofkosten bestaan uit drie componenten:

- *back-end* (opwerken en recyclen)
- radioactief afval
- *front-end* (aanschaf splijtstofelementen).

Deze componenten worden hierna toegelicht.

### Back-end kosten

In voorgaande jaren heeft EPZ zich geconcentreerd op de verlaging van de *back-end* kosten. De kostprijs van het afvoeren van splijtstof, het opwerken en het recyclen van uranium en plutonium is ongeveer evenredig met het aantal af te voeren elementen. EPZ heeft zich er daarom op gericht om het jaarlijks uit te wisselen aantal splijtstofelementen zo klein mogelijk te houden. De methode daarvoor is splijtstofelementen langer in de reactor te laten staan en zo de 'opbrand' te verhogen. Dat kan alleen maar door aan de nieuwe splijtstofelementen meer splijtbaar uranium-235 toe te voegen, dat wil zeggen de verrijkingsgraad te verhogen.

In dat kader werd de oorspronkelijk vergunde verrijking van 3,3 gew % in 1999 verhoogd naar 4,0 gew % en in 2005 naar 4,4 ± 0,05 gew %. Splijtstofelementen verblijven nu vier tot vijf jaar in de reactor in plaats van de oorspronkelijke drie jaar. Dit heeft geleid tot reductie van de *back-end* kosten.

<sup>2</sup> Bron: Bedrijfsplan EPZ, 2010-2012

Een hogere verrijgingsgraad voor *Enriched Natural Uranium* (ENU) zou in theorie kunnen leiden tot een economisch voordeel, omdat het leidt tot hogere opbrandwaarden en daardoor tot lagere *back-end* kosten. Echter bij opwerking en hergebruik van gebruikte splijtstof is hogere verrijking ongunstig, omdat het leidt tot verslechtering van de kwaliteit van het gerecyclede plutonium en uranium. Dit leidt tot hogere kosten bij hergebruik. Een lagere verrijgingsgraad is economisch ongunstig, omdat dan de *back-end* kosten zullen stijgen. EPZ beschouwt daarom de huidige verrijgingsgraad van  $4,4 \pm 0,05$  gew % voor ENU als de optimale keus.

### Kosten radioactief afval

Aan de kant van het radioactief afval zijn er niet zo veel mogelijkheden om kosten te reduceren. Deze kosten bestaan voornamelijk uit de investering die EPZ gedaan heeft om bij COVRA het opslaggebouw HABOG te realiseren en om een financiële voorziening voor de eindberging te realiseren. Toekomstige hoeveelheden afval leveren relatief lage additionele kosten op, omdat het bestaande HABOG in gebruik blijft (al dan niet na eventuele uitbreiding van de opslagruimtes).

### Front-end kosten

Van de drie kostensoorten blijven alleen de *front-end* kosten over om verder te kunnen beïnvloeden. Een belangrijke factor is de markt voor uranium, die in de afgelopen jaren aanzienlijke ontwikkelingen heeft doorgemaakt na een lange periode van lage en stabiele prijzen. Figuur 2.5.1 illustreert die ontwikkelingen. EPZ moet daarom rekening houden met minder stabiele uraniumkosten.

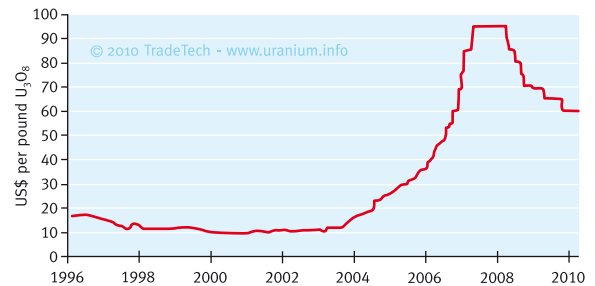
Naast de grondstofkosten spelen de kosten voor het verrijken een rol. Deze zijn, zoals blijkt uit figuur 2.5.2, ook aanzienlijk gestegen, maar minder dan die voor het uranium.

Voor EPZ zijn de mogelijkheden om de toekomstige *front-end* kosten te beheersen als volgt:

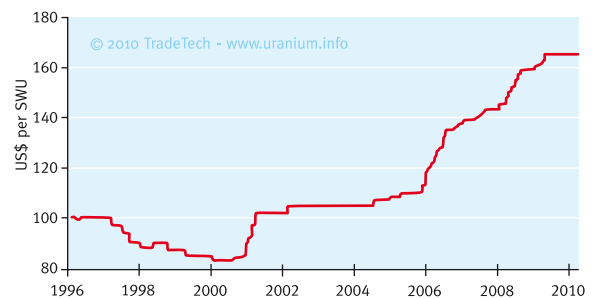
- Lange termijn uranium contracten sluiten met vaste prijzen.
- Alternatieven voor natuurlijk uranium vinden.

Beide mogelijkheden zijn intensief onderzocht. Het sluiten van lange termijn contracten met vaste prijzen biedt geen daadwerkelijk alternatief

**Figuur 2.5.1** Historische termijn contractprijzen natuurlijk uranium. Bron: [www.uranium.info](http://www.uranium.info).



**Figuur 2.5.2** Ontwikkeling van de kosten van uranium-verrijking (SWU = *Separative Work Unit*). Bron: [TradeTech](http://www.uranium.info).



voor kostenbeheersing. Immers door de sterk toegenomen vraag naar nieuw kernvermogen in de wereld en de daaruit te verwachten prijsstijging van uranium, is het feitelijk niet mogelijk om tegen gunstige prijzen lange termijn contracten aan te gaan. Een alternatief voor natuurlijk uranium wordt gevormd door gerecyclede splijtstoffen, namelijk opgewerkt uranium (bekend als RepU) en plutonium. Deze alternatieve splijtstoffen zijn teruggewonnen uit gebruikte kernbrandstoffen. Door meerdere typen kernsplijtstof mogelijk te maken (diversificatie) kan EPZ flexibeler inspelen op ontwikkelingen op de markt. Immers, er valt dan te kiezen uit een ruimer aanbod. Omdat voor wijzigingen in het soort kernsplijtstof een wijzigingsvergunning en een m.e.r. procedure nodig zijn, is de eerste stap in dit diversificatieproces om daarvoor vergunning aan te vragen.

## 2.6 Mogelijke alternatieve splijtstoffen voor natuurlijk uranium

Mogelijke alternatieve splijtstoffen voor natuurlijk uranium zijn:

- Plutonium in de vorm van mengoxide (MOX).
- (Gecompenseerd) verrijkt opgewerkt uranium ((c)-ERU, (*compensated enriched reprocessed uranium*)).
- Thorium splijtstof.

Deze alternatieven worden hierna stuk voor stuk nader belicht. Voor de productie van zowel MOX als ERU wordt gebruik gemaakt van grondstoffen die in de opwerkingsfabriek worden teruggewonnen uit gebruikte splijtstof.

### MOX

MOX is een industrieel alternatief voor uranium waarmee internationaal veel goede ervaring bestaat. Het gebruik van mengoxide om plutonium als splijtstof in te zetten is ook in Nederland niet helemaal nieuw. De kerncentrale Dodewaard zette tijdens bedrijf in het kader van onderzoek en productontwikkeling MOX-splijtstof in. Sinds 1972 wordt MOX op commerciële schaal ingezet in Duitse en andere buitenlandse kerncentrales (zie hoofdstuk 4).

EPZ verwacht een betere kostprijsbeheersing door de inzet van MOX. Bovendien neemt EPZ door MOX te gaan inzetten, zelf de verantwoordelijkheid voor het hergebruik van haar plutonium, zoals gedaan wordt door een meerderheid van de bedrijven die plutonium bezitten.

### ERU

Het gebruik van verrijkt gerecycled uranium is de oudste vorm van hergebruik. De grondstof voor ERU, *Reprocessed Uranium* (RepU), komt vrij bij het opwerken van gebruikte splijtstof. Al sinds 1978 wordt het RepU afkomstig van gebruikte splijtstof uit de KCB herverrijkt voor het maken van nieuwe splijtstofelementen. Sinds 2004 wordt het ook voor EPZ in Rusland herverrijkt en deels in de KCB opnieuw ingezet<sup>3</sup>. In 2008 bijvoorbeeld was de KCB voor 36% met ERU beladen.

De effectieve verrijkingsgraad van ERU is, door de aanwezigheid van uranium-236 (zie paragraaf 4.2.4), lager dan die van verrijkt natuurlijk uranium met dezelfde verrijkingsgraad. Om even efficiënt te zijn als verrijkt natuurlijk uranium, dient daarom voor ERU een hogere verrijkingsgraad te worden toegepast (compensatieprincipe). In buitenlandse kerncentrales is dit al jaren gebruikelijk (zie paragraaf 4.2.4). Omdat de vigerende Kewvergunning de verrijkingsgraad voor de KCB in absolute zin op  $4,4 \pm 0,05$  gew % begrenst, kan EPZ dat 'compensatie principe' niet toepassen. EPZ wenst daarom aanpassing van haar Kewvergunning, om in de toekomst gecompenseerde ERU-elementen (c-ERU-elementen) te kunnen gebruiken.

### Thorium

Hoewel thorium geen splijtstof is, kan het in een kernreactor omgezet worden in splijtbaar uranium (uranium-233) en is het mogelijk om met thorium energie te produceren. Daartoe moet thorium gecombineerd worden met plutonium of hoog verrijkt uranium om het proces op gang te brengen. De wereldreserves van thorium zijn groter dan die van uranium. In landen met grote thorium voorraden zoals India en Rusland, wordt veel onderzoek naar dit type splijtstof gedaan. In de USA hebben de kerncentrales *Shippingport* en *Ford St. Vrain* op thorium beladingen elektriciteit geproduceerd. In Nederland heeft de experimentele 'KEMA suspensie reactor' vanaf 1974 drie jaar lang met een thorium belading gefunctioneerd.

Er is echter geen sprake van een commercieel ontwikkelde markt voor thorium splijtstoffen en ook ontbreekt het aan faciliteiten voor de verwerking ervan (de opwerkingsfabriek in La Hague zou thorium splijtstof bijvoorbeeld niet kunnen ontvangen). Binnen de levensduur van de KCB (tot 2034) is daarom niet te verwachten dat thorium een reële commerciële optie wordt. EPZ gebruikt alleen bewezen techniek en sluit daarom uit aan thorium nader onderzoek te doen.

<sup>3</sup> Van de verzonden RepU wordt thans circa ¼ deel gebruikt voor de productie van EPZ splijtstof, ¾ deel van het verzonden RepU wordt gebruikt voor de productie van Russische splijtstof.

Gelet op het voorgaande zijn c-ERU en MOX de enige twee alternatieve splijtstoffen die ter vervanging van natuurlijk uranium in aanmerking komen. ERU wordt reeds bij KCB ingezet, maar optimalisatie is mogelijk door compensatie te gaan toepassen. MOX is voor KCB een nieuwe splijtstof maar is een ruim bewezen techniek.

## 2.7 Mengoxide (MOX)

In de opwerkingsfabriek in La Hague wordt het plutonium, dat tijdens bedrijf in Borssele in de splijtstofelementen is gevormd, weer voor hergebruik beschikbaar gemaakt. Het splijtbare plutonium kan het uranium-235 in splijtstofelementen vervangen. Bij de mengoxide (MOX) technologie wordt plutoniumoxide vermengd met oxide van verarmd uranium, totdat een splijtstof is verkregen die op soortgelijke wijze ingezet kan worden als verrijkt uranium. Het plutonium, dat uit circa acht uitgewerkte ENU-splijtstofelementen van de KCB wordt teruggewonnen, is voldoende om één nieuw MOX-splijtstofelement te maken.

Omdat EPZ voor het gebruik van MOX nog geen vergunning heeft, werd tot op heden het vrijgemaakte plutonium van EPZ door het bedrijf AREVA NC gebruikt om MOX-splijtstofelementen voor andere kerncentrales te produceren. Uit een economische analyse die EPZ heeft gemaakt, blijkt dat het vanuit het oogpunt van kostenbeheersing aantrekkelijk is om zelf MOX-splijtstofelementen te gaan toepassen. Het plutonium dat EPZ hiervoor op het oog heeft, is afkomstig van gebruikte vermogensreactorsplijtstof. Plutonium uit kernwapens wordt niet ingezet; dit is niet commercieel verkrijgbaar.

EPZ heeft de hoogte van en de variatie in de kosten van MOX-fabricage afgewogen tegen die van uraniumerts en verrijkingsarbeid. De kosten van MOX-fabricage zijn weliswaar aanzienlijk, maar voorspelbaar. De hoogte van en variatie in de kosten voor ENU-splijtstof zijn onvoorspelbaar. Vanuit het oogpunt van kostenbeheersing is het daarom voor EPZ aantrekkelijk om MOX-splijtstof te kunnen inzetten. EPZ neemt door het inzetten van MOX-splijtstof bovendien zelf de verantwoordelijkheid voor het hergebruik van haar plutonium. De ervaring van andere commerciële kerncentrales laat zien dat MOX

zonder problemen kan worden gebruikt als gedeeltelijke vervanging van verrijkt uranium.

## 2.8 Gecompenseerd verrijkt gerecycled uranium (c-ERU)

De uitgewerkte splijtstof die van de KCB wordt afgevoerd, bevat nog ongeveer 94% van de oorspronkelijke hoeveelheid uranium. Daarvan varieert het uranium-235 gehalte gewoonlijk tussen de 0,6 gew % en 0,8 gew %. Dat is vergelijkbaar met de hoeveelheid uranium-235 in natuurlijk uraniumerts (0,7 gew %). In de opwerkingsfabriek in het Franse La Hague wordt het uranium teruggewonnen. Met dit gerecyclede uranium, ook wel *Reprocessed Uranium* (RepU) geheten, kunnen op de gebruikelijke manier – na verrijking – weer splijtstofelementen worden gefabriceerd.

Gerecycled uranium levert een lagere kwaliteit splijtstof op dan natuurlijk uranium. Als gevolg van de kernprocessen in de reactor zijn er namelijk niet splijtbare uraniumisotopen gevormd, die in de natuur niet voorkomen zoals uranium-232 en uranium-236. Vooral het uranium-236 in gerecycled uranium maakt splijtstofelementen minder werkzaam waardoor er in de kernreactor een lagere energieopbrengst (opbrand) wordt bereikt. Dit economische nadeel betekent dat de handelswaarde van gerecycled uranium aanzienlijk lager is dan die van natuurlijk uranium.

Een methode om de lagere kwaliteit van gerecycled uranium te compenseren, zodat er toch de gewenste hoeveelheid energie mee geproduceerd kan worden, is het verrijken van het uranium tot een hogere waarde. Met dit gecompenseerde gerecyclede uranium kunnen splijtstofelementen gefabriceerd worden met dezelfde energieopbrengst als de huidige elementen op basis van natuurlijk uranium. De extra benodigde verrijkingsarbeid werkt kostenverhogend, wat af te wegen is tegen de besparing aan natuurlijk uraniumerts.

In de huidige situatie gebruikt EPZ al gerecycled uranium, maar de bedrijfsvergunning staat niet toe om de verminderde energieopbrengst ten gevolge van uranium-236 te compenseren door toepassing van een hogere verrijking dan



4,4 ± 0,05 gew % aan uranium-235. Daardoor bereiken EPZ's ERU-elementen op dit moment een lagere energieopbrengst dan de ENU-elementen (een economisch nadeel). Ook levert het gebruik van niet-gecompenseerd ERU meer radioactief afval op (een milieunadeel) dan het geval zou zijn voor gecompenseerd ERU. Voor dezelfde energieproductie zijn meer ERU-elementen dan c-ERU-elementen nodig.

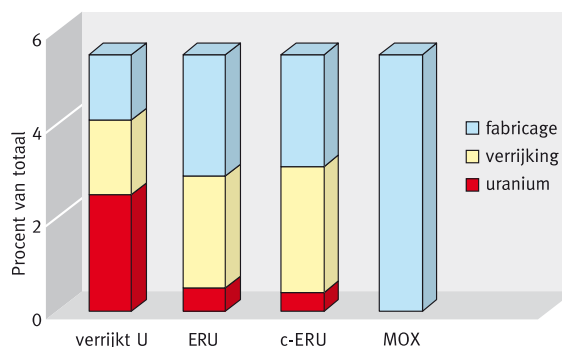
## 2.9 Vergelijking kostenopbouw van de alternatieve splijtstoffen

Zoals hierboven werd vermeld, omvatten de brandstofkosten voor de KCB zowel de kosten voor de aanschaf van elementen (*front-end*) als de kosten van de afvoer en verwerking en van het afval (*back-end*). Het inzetten van alternatieve brandstoffen, c-ERU of mengoxide MOX, heeft voor de processen en hoeveelheden in de *back-end*, noch voor de daarmee gepaard gaande kosten gevolgen. EPZ is van plan om, na gebruik, de c-ERU-elementen en de MOX-elementen te laten opwerken in AREVA's installaties in La Hague net zoals nu gebeurt voor elementen van verrijkt uranium en van niet gecompenseerd ERU. Omdat voor het opwerken een prijs per kilogram gangbaar is, zullen de *back-end* kosten naar verwachting niet afhangen van de soort brandstof. Daarom worden de *back-end* kosten in de vergelijking hierna niet meegenomen.

In het hierna volgende model<sup>4</sup> (figuur 2.9.1) is de opbouw van de brandstofkosten getoond voor de alternatieven 'verrijkt U' (ENU), 'niet-gecompenseerd verrijkt RepU' (ERU), 'verrijkt gecompenseerd RepU' (c-ERU) en 'mengoxide' (MOX).

- Bij **verrijkt uranium (ENU)**, in de huidige situatie de meest gebruikte soort brandstof, gaat in de toekomst de kostprijs van natuurlijk uranium de grootste bijdrage leveren in de totale kosten, gevolgd door de kosten van verrijking en van fabricage.
- Bij **niet-gecompenseerd verrijkt ERU**, wat nu ook al ingezet wordt, zijn de verwervingskosten van het RepU veel

Figuur 2.9.1 Model voor de kostencomponenten van alternatieve soorten kernbrandstof voor de KCB.



geringer dan van natuurlijk uranium. EPZ heeft bij herhaling RepU overgenomen van andere marktpartijen en heeft daar ervaring mee. Daarentegen zijn de verrijkings- en fabricagekosten hoger dan voor ENU-elementen.

- Voor **gecompenseerd c-ERU** is de verdeling van kosten vergelijkbaar met die van ERU, zij het dat er hogere verrijkingskosten zijn ter compensatie van uranium-236.
- Voor **MOX** zijn de verwervingskosten voor de grondstoffen, plutonium en verarmd uranium, niet van belang. Er is geen vrije markt voor plutonium en verarmd uranium is zeer goedkoop. De kosten worden geheel bepaald door de kosten voor veilig beheer en transport en fabricage.

EPZ kan lange-termijn contracten afsluiten voor verrijking en fabricage van splijtstof. Zo is het goed mogelijk om MOX voor de levensduur van de kerncentrale tegen een bekende prijs te bestellen. Dat is niet mogelijk voor natuurlijk uranium. Omdat de prijs van uranium (rood gekleurd in bovenstaande figuur) erg veranderlijk is, worden geen lange termijn contracten tegen aanvaardbare commerciële condities aangeboden. Het levert dus onzekerheid in de toekomstige brandstofprijs op. EPZ kan die onzekerheid beperken door ERU, c-ERU en MOX in te zetten, zoals figuur 2.9.1 aangeeft.

<sup>4</sup> Aan de absolute waarden in dit model kan geen betekenis worden toegekend. Er bestaan nog geen commerciële overeenkomsten waaraan de werkelijke kosten kunnen worden ontleend. Ter wille van de beeldvorming zijn de totalen in deze figuur op 100% gesteld.

## 2.10 Doelstelling voorgenomen activiteit

De doelstelling van de voorgenomen activiteit luidt samengevat: verruiming van de toegestane soorten splijtstof voor de KCB, door toelating van MOX-elementen en c-ERU-elementen van gerecycled uranium met een zodanige verrijking dat deze beide typen elementen qua energiepotentieel equivalent zijn aan verrijkt natuurlijk uranium van  $4,4 \pm 0,05$  gew %, ten einde minder afhankelijk te worden van prijsfluctuaties op de markt van nucleaire splijtstoffen en daarmee de splijtstofkosten beter te kunnen beheersen.

Belangrijke randvoorwaarden voor EPZ zijn:

- het veiligheidsniveau van de bedrijfsvoering mag niet aangetast worden<sup>5</sup>
- significante installatiewijzigingen (extra regelstaven of dergelijke) worden uitgesloten
- zo laag als redelijkerwijs mogelijke milieu-belasting
- geen wijzigingen in de splijtstofinzet (gelijkblijvende cyclusduur, gelijke gemiddelde eindopbrand)
- geen veranderingen voor de *back-end* (transport en opwerken)
- geen significante invloed op de geplande ontmanteling na 2034.

Gezien de in dit hoofdstuk gehouden beschouwing met betrekking tot soorten splijtstoffen zijn MOX en gecompenseerd ERU twee interessante alternatieve splijtstoffen voor verrijkt natuurlijk uranium. Omdat de huidige Kew-vergunning die opties niet toelaat, vraagt EPZ een wijzigingsvergunning aan om deze soorten splijtstof te mogen toepassen.

<sup>5</sup> In het kader van het 'Borssele convenant' uit 2006 heeft EPZ de verplichting met de KCB blijvend te behoren tot de 25% veiligste watergemodereerde kerncentrales van West-Europa en Noord-Amerika.

# 3 Randvoorwaarden en besluitvorming

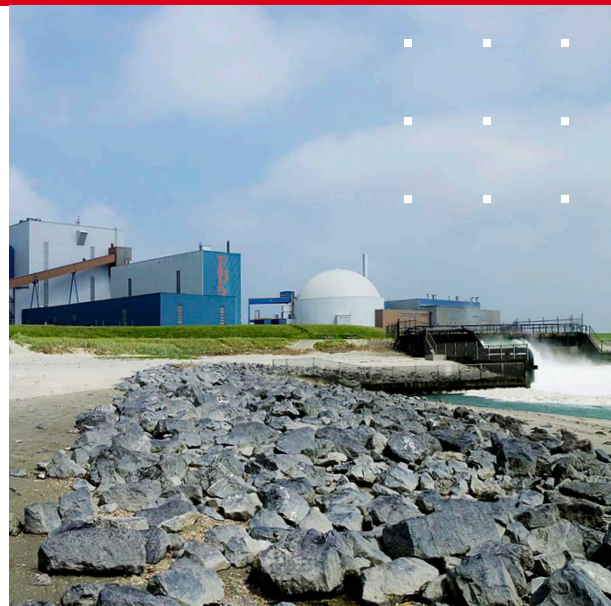
## 3.1 Inleiding

*De voorgenomen brandstofdiversificatie bij de KCB zal uitgevoerd worden met inachtneming van de bestaande regelgeving en eerder genomen besluiten van de overheid. Dit geldt zowel voor de voorgenomen activiteit als voor de hierna te beschrijven alternatieven. In dit hoofdstuk zullen de randvoorwaarden behandeld worden, die van invloed (kunnen) zijn op de voorgenomen activiteit en op de toetsing van de milieubeïnvloeding in dit MER.*

In paragraaf 3.2 zal een toelichting gegeven worden op de volgende voor de besluitvorming relevante randvoorwaarden:

- **Wetgeving:**
  - Kernenergiewet met bijbehorende uitvoeringsbesluiten, zoals het Besluit stralingsbescherming (Bs) en het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse)
  - Wet milieubeheer
  - Besluit Milieueffectrapportage 1994
  - Algemene wet bestuursrecht
- **Geldende vergunningen en afspraken:**
  - verleende vergunningen
  - overeenkomst met Frankrijk van 9 februari 2009
  - convenant kerncentrale Borssele
- **Beoordelingskader:**
  - wettelijk kader Kernenergiewet
  - risiconormering voor ontwerpgevallen
  - risiconormering voor ernstigegevallen
  - veiligheidsnormen en -richtlijnen
  - beveiliging kernmateriaal
- **Natuurbeleid**
- **Nationaal Plan Kernongevallenbestrijding (NPK)**
- **Nota's inzake opwerking en radioactief afval**

In paragraaf 3.3 wordt aangegeven ten behoeve van welke besluiten het MER wordt opgesteld en door welke overheidsinstantie(s) deze besluiten zullen worden genomen.



## 3.2 Randvoorwaarden

### 3.2.1 Wetgeving

#### **Kernenergiewet (Stb. 1963-82)**

De Kernenergiewet (Kew) is een raamwet die betrekking heeft op activiteiten waarbij met ioniserende straling wordt gewerkt of waarbij deze straling vrijkomt. Het doel van de wet is volgens de Memorie van Toelichting:

- de bevordering van een goede ontwikkeling betreffende het vrijmaken en het gebruik van radioactieve stoffen en van ioniserende straling uitzendende apparatuur
- bescherming tegen de gevaren die zijn verbonden aan het gebruik van radioactieve stoffen en ioniserende straling.

De wet heeft onder meer betrekking op:

- nucleaire veiligheid
- de volksgezondheid
- de bescherming op de arbeidsplaats tegen de gevaren van radioactieve stoffen en ioniserende straling
- het bevorderen van de milieuhygiëne.

De Kernenergiewet kent meerdere vergunningstelsels die alle relevant zijn voor de KCB. Zij hebben betrekking op het wijzigen van een inrichting (artikel 15, onder b), het voorhanden hebben van splijtstoffen (artikel 15, onder a) en het voorhanden hebben, toepassen en zich ontdoen van radioactieve stoffen (artikel 29, eerste lid). Een en ander wordt nader uitgewerkt in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse)(Stb. 1969-403) en het Besluit stralingsbescherming (Bs)(Stb. 2001-397).

Het Bkx bevat onder meer algemene regels met betrekking tot de gegevensverstrekking over de (wijzigingen in) inrichtingen. Het Bs bevat verder bepalingen met betrekking tot de principes en de normstelling voor stralingsbescherming (zie verder par. 3.2.3).

De Kew en de bovengenoemde besluiten zijn de afgelopen jaren geharmoniseerd met Europese wetgeving. Dit geldt met name de Richtlijn 96/29/Euratom die de basisnormen stelt voor de bescherming van de gezondheid van de bevolking en de werkers tegen de aan ioniserende straling verbonden gevaren (PbEG 1996, L 159).

#### **Wet milieubeheer (Stb. 1993-80)**

Een aantal onderdelen van de Wet milieubeheer is van overeenkomstige toepassing op de Kew, bijvoorbeeld de bepalingen betreffende milieu-effectrapportage (hoofdstuk 7). De conventionele milieuaspecten van kerncentrales worden aan het toetsingskader van de Wet milieubeheer getoetst.

#### **Besluit milieueffectrapportage 1994**

Volgens het Besluit m.e.r. 1994 bestaat voor de voorgenomen activiteit een zogenaamde beoordelingsplicht. Op lijst D van beoordelingsplichtige activiteiten is onder categorie 22.3 genoemd 'de wijziging of uitbreiding van een inrichting waarin kernenergie kan worden vrijgemaakt'. Daarbij wordt onder meer verwezen naar de gevallen waarop de voorgenomen activiteit betrekking heeft, namelijk: 'een wijziging van de soort, hoeveelheid of verrijgingsgraad van de splijtstof'. In het onderhavige geval is een wijziging van de soort en van de verrijgingsgraad van de splijtstof aan de orde.

De m.e.r.-beoordelingsplicht houdt in dat het bevoegd gezag dient te beoordelen of een MER dient te worden opgesteld. Deze beoordeling heeft in dit geval niet plaatsgevonden, omdat de initiatiefnemer (EPZ) op voorhand heeft besloten een MER op te stellen. Deze procedure is beschreven in hoofdstuk 7 van de Wet milieubeheer.

#### **Algemene wet bestuursrecht (Stb. 1994-1)**

De Algemene wet bestuursrecht (Awb) bevat de procedurele bepalingen voor besluiten ingevolge de Kew. De Wm bevat ten opzichte van de Awb aanvullende procedureregels voor vergunningen en coördinatie bij vergunningaanvragen alsmede

voor bedenkingen en beroep tegen besluiten (zie verder paragraaf 3.3).

### **3.2.2 Geldende vergunningen en afspraken**

#### **Verleende vergunningen**

In de vergunningaanvraag wordt een overzicht van de reeds verleende vergunningen ingevolge artikel 15 van de Kernenergiewet gegeven.

#### **Overeenkomst met Frankrijk van 9 februari 2009**

In juni 2006 heeft Frankrijk haar wet inzake het beheer van radioactieve stoffen herzien. Eén van de bepalingen van deze nieuwe wet luidt dat landen die gebruikte splijtstoffen op Frans grondgebied willen brengen met het oog op recycling, tevoren een specifieke overeenkomst moeten sluiten. Deze overeenkomst moet onder meer bindende termijnen voorschrijven voor terugvoer van radioactief afval naar het land van herkomst. Een overeenkomst van deze strekking, die betrekking heeft op het opwerkingscontract van EPZ met AREVA NC, werd op 9 februari 2009 tussen de Nederlandse en Franse regeringen te Parijs getekend. Zowel de Tweede als de Eerste Kamer hebben ingestemd met goedkeuring van het aangepaste verdrag met Frankrijk.

#### **Convenant Kerncentrale Borssele**

In juni 2006 is door de minister van EZ, de staatssecretaris van VROM, EPZ en de aandeelhouders ERH (voorheen Essent) en Delta een convenant getekend met betrekking tot de KCB (Stcrt. 2006-136). Het convenant steunt op drie belangrijke pijlers:

- De KCB blijft open tot 2034 met zeer hoge veiligheidsnormen. De KCB zal, vrij geformuleerd, tot de 25 procent veiligste kerncentrales van de westerse wereld blijven behoren.
- De eigenaren ERH en Delta investeren gezamenlijk voor 250 miljoen euro in projecten op het terrein van duurzame energie.
- Uiterlijk 31 december 2033 wordt de kerncentrale buiten gebruik gesteld direct gevolgd door ontmanteling.

### 3.2.3 Het beoordelingskader

#### 3.2.3.1 Wettelijk kader Kernenergiewet

Het wettelijk kader is gebaseerd op de volgende drie principes van stralingsbescherming die zijn neergelegd in het Besluit stralingsbescherming (Bs)(Stb. 2001-397):

##### ■ **Rechtvaardiging** (art. 4 Bs)

Dit principe wil zeggen dat een activiteit pas wordt toegestaan als de sociale, economische en andere voordelen opwegen tegen de gezondheidsschade die er het gevolg van kan zijn. Bij de gezondheidsschade gaat het om de schade voor alle direct betrokkenen: werknemers en overige leden van de bevolking. Hiervoor zijn criteria aangegeven in de ministeriële Regeling bekendmaking rechtvaardiging gebruik van ioniserende straling (Stcrt. 2002-248). Hierin staat van een aantal toepassingen aangegeven dat deze algemeen gerechtvaardigd zijn. De KCB wordt met name genoemd onder categorie I.B.2 'Energieopwekking'. Uit het feit dat de Energieopwekking als een gerechtvaardigde activiteit wordt aangemerkt en dat een bedrijfsvergunning aan EPZ is verleend, mag worden afgeleid dat het hier om een activiteit gaat die is toegestaan binnen de kaders van de van toepassing zijnde wet- en regelgeving.

##### ■ **Optimalisatie /ALARA** (art. 5 Bs)

Het ALARA-beginsel (*As Low As Reasonably Achievable*) is het streven naar zo laag als redelijkerwijs mogelijke emissies en blootstelling aan radioactiviteit. Bij de toepassing van dit beginsel wordt rekening gehouden met maatschappelijke en economische factoren en met zowel milieuhygiënische als arbeidshygiënische aspecten. Bij wijze van een globale invulling van ALARA kunnen door de overheid dosisbeperkingen voor specifieke activiteiten worden gesteld. Dosisbeperkingen zijn dus vooral bedoeld als hulpmiddel om ALARA toe te passen.

##### ■ **Dosislimieten** (art. 6, 48, 49 Bs; art. 18 Bkse)

Dit zijn maximaal toegestane doses die in geen geval overschreden mogen worden om een minimum beschermingsniveau te garanderen. In het Besluit stralingsbescherming is de dosislimiet bij normaal bedrijf voor leden van de bevolking op 1 mSv per jaar gesteld (0,1 mSv

per bron). Als arbeidslimiet geldt 20 mSv per jaar. Rekenregels en de toetsingsmethoden met betrekking tot de dosisniveaus (omgevings-equivalente, equivalente en effectieve doses) worden gegeven in de ministeriële 'Regeling analyse gevolgen ioniserende straling voor het milieu' (Stcrt. 2002, 73).

#### 3.2.3.2 Risiconormering voor ontwerpgevallen

De installatie is zodanig ontworpen dat gepostuleerde ontwerpgevallen worden beheerst. Voor de ontwerpgevallen wordt, afhankelijk van de kans van optreden van het ontwerpgeval, een dosis criterium vastgesteld via een getrapte schaal: hoe kleiner de kans, hoe groter de toelaatbare dosis. De relatie tussen de kans op optreden van het ontwerpgeval en de toelaatbare dosis ligt vast in art. 18.2 Bkse.

In tabel 3.2.1 zijn de kansgebieden met de bijbehorende maximale dosiswaarden aangegeven. Het kansgebied  $F \geq 10^{-1}$  heeft betrekking op normaal bedrijf. De dosis criteria zijn bedoeld om de kans op sterfte ten gevolge van lange-termijn effecten te beperken. Met lange-termijn effecten worden ziektes bedoeld, zoals kanker, die zich vele jaren na de bestraling kunnen openbaren. Dit in tegenstelling tot korte-termijn effecten, die het gevolg zijn van een zodanige beschadiging van organen, dat deze niet of verminderd functioneren. Deze effecten treden op binnen enkele uren of weken. Ze worden echter alleen waargenomen indien een hoge drempelwaarde wordt overschreden. Ter vermijding van korte-termijn effecten ten gevolge van jodiumopname door de schildklier is in een aanvullend criterium de maximale schildklierdosis gesteld op 500 mSv<sup>6</sup>.

Tabel 3.2.1 Dosiscriteria voor personen tot 16 jaar en volwassenen als functie van het kansgebied. Bron: Bkse art. 18.2

Gebeurtenis frequentie (F) (per jaar)		Effectieve dosis E (mSv)		
		Personen v.a. 16 jaar	Personen tot 16 jaar <sup>1)</sup>	
$10^{-1} >$	F	$\geq 10^{-1}$	0,1	0,04
$10^{-2} >$	F	$\geq 10^{-2}$	1	0,4
$10^{-4} >$	F	$\geq 10^{-4}$	10	4
$10^{-6} >$	F	$\geq 10^{-6}$	100	40

1) Bij ongevalslozingen, waaraan over het algemeen alle leeftijdscategorieën van de omwonende bevolking worden blootgesteld, is het risico voor de groep eenjarige kinderen het grootst. Daarom wordt voor de groep kinderen tot 16 jaar voor alle ontwerpgevallen de maximale dosis voor eenjarige kinderen berekend.

<sup>6</sup> In het kader van het Nationaal Plan Kernongevallenbestrijding is voorgesteld om de interventiewaarde voor de schildklierdosis voor kinderen te verlagen naar 100 mSv.

### 3.2.3.3 Risiconormering voor ernstige ongevallen

Ook bij ongevallen waar in het ontwerp geen rekening mee is gehouden, is het van belang de gevolgen voor de omgeving te beperken. Ontwerpoverschrijdende gebeurtenissen worden doorgaans ‘buiten-ontwerpongevallen’ of ‘ernstige ongevallen’ genoemd. De kansen op dergelijk ongevallen zijn zeer klein. Bij de vergunningverlening wordt getoetst aan normen ten aanzien van het zogenaamde individueel risico en het groepsrisico.

#### Individueel risico

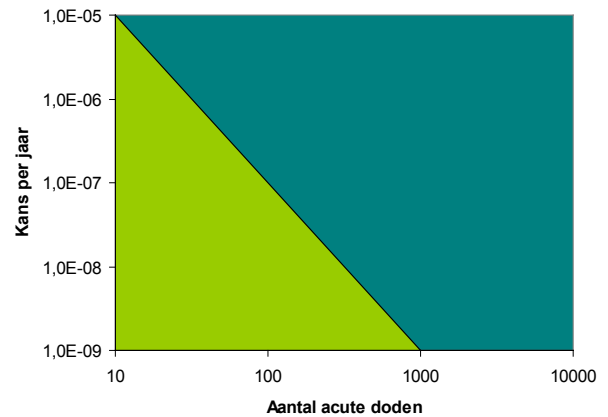
Uitgangspunt voor de bepaling van het individueel risico (IR) is de multi-functionaliteit van de omgeving van een bron. Een bedrijf mag door zijn aanwezigheid geen extra belemmeringen opleveren voor de realistisch te achten gebruiksmogelijkheden (Stb. 1996-44). Het maximaal toelaatbaar (toegevoegd) individueel risico voor leden van de bevolking bedraagt voor alle stralingsbronnen tezamen  $10^{-5}$  per jaar en vanwege één bron  $10^{-6}$  per jaar. Deze risico's drukken de kans uit dat een persoon ten gevolge van een ongevalsemissie van een bron direct of op latere leeftijd komt te overlijden. Zo komt bijvoorbeeld een risico van  $10^{-6}$  overeen met een kans van één op de miljoen. Om dit toetsbaar te maken, moet de waarde van het plaatsgebonden risico buiten het bedrijfsterrein worden vastgesteld. Dit gebeurt met een risicoanalyse waarvoor de gehanteerde rekenmethode wordt voorgeschreven door het bevoegd gezag.

#### Groepsrisico

Bij grote ongevallen waarbij vele slachtoffers direct tijdens het ongeval of kort daarna kunnen vallen, wordt bovendien rekening gehouden met de maatschappelijke ontwrichting die dit teweeg zou kunnen brengen. Hieraan is vorm gegeven door middel van het zogenaamde groepsrisico. Het criterium voor het groepsrisico beoogt de kans op maatschappelijke ontwrichting te verkleinen door te stellen dat de kans op ongevallen met meer dan 10 acute doden ten hoogste  $10^{-5}$  per jaar mag zijn. Voor meer dan 100 acute doden is de maximaal toelaatbare kans gesteld op  $10^{-7}$ . Een factor 10 meer acute doden levert dus een toelaatbare kans die een factor 100 lager ligt, enzovoort (zie figuur 3.2.1).

Figuur 3.2.1 Grenzen aan het groepsrisico.

Het gebied rechtsboven is niet toelaatbaar op grond van het Nederlandse risicobeleid.



### 3.2.3.4 Veiligheidsnormen en -richtlijnen

Sinds 1974 onderhoudt het Internationale Atoomenergie Agentschap (IAEA) een stelsel van veiligheidsnormen en richtlijnen voor kernenergiecentrales (serie nr. 50), de zogenaamde *Codes and Safety Guides*. Het IAEA beveelt het gebruik van deze *Codes en Safety Guides* in de lidstaten aan als middel ter verzekering van een veilige toepassing van kernenergie. De *Codes* beschrijven de hoofddoelstellingen en voorwaarden waaraan moet worden voldaan en de *Safety Guides* geven mogelijke manieren van uitvoering weer. In de afgelopen jaren zijn door de Nederlandse overheid de voorschriften in de *Codes* – deels geamendeerd – vastgesteld en gepubliceerd in de reeks *Nucleaire Veiligheidsregels (NVR)*. Ook de *Safety Guides* zijn op dezelfde wijze bewerkt en omgezet in *Nucleaire Veiligheidsrichtlijnen (ook NVR)*. De vastgestelde NVR's worden als voorschriften in de KCB-vergunningen verwerkt.

De IAEA werkt momenteel aan een herziening van voornoemde *Codes and Safety Guides*. Van een aantal guides is al een nieuwe, meer op de huidige stand der techniek afgestemde, eindversie verschenen. Een aantal andere bestaat op dit moment alleen als concept. De Nederlandse overheid is in navolging van de IAEA bezig om de NVR's aan te passen. Voor zover relevant, worden deze aanpassingen betrokken in het toetsingskader.

### 3.2.3.5 Beveiliging kernmateriaal

Medio 2008 werd in Wenen het Verdrag inzake de fysieke beveiliging van kernmateriaal (Trb. 2006, 81) afgesloten. De uitvoering hiervan werd in juni 2009 in het Staatsblad gepubliceerd als een wijziging van onder meer het Bkse. Op grond daarvan worden de wettelijke bepalingen voor de beveiliging van kernmateriaal van toepassing op kerninstallaties. Doel is het misbruik van radioactief materiaal te voorkomen, ook wanneer dit materiaal wordt toegepast in een kerninstallatie. Het wijzigingsbesluit treedt in werking op een bij koninklijk besluit te bepalen tijdstip (Stb. 2009, 296).

### 3.2.4 Natuurbeleid

De KCB is gelegen aan de Westerschelde. Dit estuarium behoort tot de Ecologische Hoofd Structuur (EHS) van Nederland (SGR, 1993). De EHS is een stelsel van bestaande natuurgebieden, te ontwikkelen natuurgebieden en verbindingzones. Daarnaast is de Westerschelde aangewezen als beschermd Natura 2000-gebied. Deze status betekent dat nagegaan moet worden of de activiteit significante negatieve gevolgen voor de instandhouding van beschermde soorten en habitats in de Westerschelde heeft.

De voorgenomen splijtstofdiversificatie leidt niet tot een aanpassing van de vergunde lozingen op de Westerschelde (zie desbetreffende toetsing in hoofdstuk 6). Er blijken geen significante wijzigingen op te treden in de bestaande milieu-situatie. Daarom is de conclusie dat het voornemen geen significant effect heeft voor vogels, zeehonden en andere faunasoorten. Dit geldt ook voor de habitattypes waarvoor de Westerschelde wordt aangewezen als Natura 2000-gebied. Een zogenaamde ‘passende beoordeling’ en/of een vergunning ingevolge de Natuurbeschermingswet (Nbw) 1998 zijn daarom niet aan de orde. Dit is in overeenstemming met de regeling omtrent bestaand gebruik in de aangepaste Nbw (Stb 2009, 18).

Autonome ontwikkelingen van het milieu ten gevolge van initiatieven in de omgeving van KCB zijn niet expliciet in deze Milieueffectrapportage opgenomen. Enerzijds omdat er geen initiatieven zijn die al zo concreet zijn dat er sprake is van een ingediende vergunningsaanvraag, anderzijds omdat de initiatieven in de omgeving van KCB waarvan sprake is, de beoordeling van de aanvraag niet beïnvloeden.



### 3.2.5 Overige overheidsvoorschriften

Volgens de KEW (art. 40, 41) en de Wet rampen en zware ongevallen (Stb. 1993-503) moet in gemeentelijke rampbestrijdingsplannen invulling worden gegeven aan het Nationaal Plan Kernongevallenbestrijding (NPK) uit 1989. De KCB is op grond van het NPK aan te merken als zogenaamd categorie A-object, een nucleair object waarbij de gevolgen van ongevallen verder dan de lokale omgeving kunnen reiken.

Het 'Rampbestrijdingsplan Kernenergiecentrale Borssele' is op 27 september 2007 vastgesteld door de burgemeesters van de gemeenten Borsele, Goes, Hulst, Kapelle, Middelburg, Noord-Beveland, Reimerswaal, Sluis, Schouwen Duiveland, Terneuzen, Tholen, Veere en Vlissingen.

De Beveiligingsrichtlijnen kerninstallaties van het Ministerie van EZ bevatten richtlijnen voor een aantal beveiligingsmaatregelen. Het gaat hierbij om materiële, organisatorische en personele beveiliging. Deze richtlijnen zijn voor de KCB van toepassing.

### 3.2.6 Beleid inzake opwerking en radioactief afval

In het algemene afvalbeleid is als uitgangspunt neergelegd dat de opslag of stort van niet-verwerkbaar afval moet voldoen aan de zogenaamde IBC-criteria (Isoleren, Beheersen en Controleren). Een bergingswijze voor radioactief afval zal aan deze criteria moeten voldoen.





De Nederlandse overheid heeft bepaald dat de opslag van uit Nederland afkomstig radioactief afval in Nederland moet plaatsvinden door één centrale organisatie op één locatie (Tweede Kamer, 1984). Bij Besluit van 31 augustus 1987, Stcrt.176, is de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) erkend als de ophaaldienst voor de Nederlandse radioactieve afvalstoffen. Haar opslaglocatie bevindt zich in de Gemeente Borsele, op het industriegebied Vlissingen-Oost.

In 2003 is bij COVRA een gebouw voor hoog-radioactief afval (HABOG) in gebruik genomen. De specificaties van het radioactieve afval dat resteert na het recyclen van splijtstoffen, en dat door EPZ wordt aangeboden ter opslag in het HABOG (en uiteindelijk ter (geologische) eindberging), waren door de verantwoordelijke ministers reeds eerder goedgekeurd. Zoals in paragraaf 6.5.3 wordt behandeld zal de voorgenomen activiteit geen aanpassingen van de eigenschappen van het afval tot gevolg hebben en zal er voor COVRA daarom geen noodzaak zijn tot een wijzigingsvergunning.

### 3.3 Besluitvorming

Dit MER is opgesteld ten behoeve van de te nemen besluiten inzake de wijzigingsvergunning voor de Kew. In het kader van de Kew-aanvraag worden tevens een geactualiseerd veiligheidsrapport (VR) en een overzicht van de niet-nucleaire gevolgen van de voorgenomen wijziging ('Gevaar, Schade, Hinder': GSH) gerapporteerd.

Een wijzigingsvergunning ingevolge de Waterwet is niet vereist aangezien in de vergunnings-situatie ten aanzien van lozingen op de Westerschelde geen veranderingen optreden.

De Kew-vergunning wordt aangevraagd bij de bevoegde ministers van:

- Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM)
- Economische Zaken (EZ)
- Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW).

De ministers beslissen in overeenstemming met de ministers die het mede aangaat. Het gaat hierbij om de ministers van Verkeer en Waterstaat (V&W) en Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV).

De procedures voor vergunningverlening krachtens de Kew zijn beschreven in de Algemene wet bestuursrecht en de Wet milieubeheer. De m.e.r.-procedure is geïntegreerd in de vergunning-procedure. Dat wil zeggen dat de vergunning-aanvraag en het MER tegelijk worden ingediend en ook voor het overige overeenkomstig de Wet milieubeheer gecoördineerd worden voorbereid en behandeld. Ten aanzien van de besluitvorming over deze vergunning geldt dat deze voorafgegaan wordt door inspraak- en adviesprocedures, terwijl tegen de besluiten beroep mogelijk is.

Na afgifte van de beschikking (het verlenen van de vergunning door het Bevoegd Gezag) bestaat de mogelijkheid tot beroep bij de Raad van State.

# 4 Huidig bedrijf, voorgenomen activiteit en alternatieven

# 4



In bijlage A wordt de leveringsketen van de splijtstof (meestal splijtstofcyclus genoemd) behandeld.

In bijlage B zijn de beschrijvingen van de bestaande installatie en het bestaande gebruik als achtergrondinformatie opgenomen. De bestaande installatie, het ontwerp van het splijtstofelement, het nucleaire proces en de veiligheidsvoorzieningen er om heen wijzigen niet wezenlijk als gevolg van de voorgenomen activiteit.

De overige wijzigingen die het gevolg zijn van de voorgenomen activiteit worden in paragraaf 4.2 behandeld. In paragraaf 4.3 wordt dieper ingegaan op de zogenaamde overgangssituaties.

Het MER dient tevens die alternatieven van de voorgenomen activiteit te beschrijven, die redelijkerwijs in beschouwing dienen te worden genomen. Deze worden besproken in paragraaf 4.4. De volgende alternatieven worden behandeld:

- nulalternatief
- uitvoeringsalternatieven
- het meest milieuvriendelijke alternatief (mma).

## 4.1 Inleiding

*In hoofdstuk 2 zijn de aanleiding van de vergunningaanvraag en de voorgenomen wijziging ten opzichte van de huidige bedrijfsvoering besproken. In dit hoofdstuk wordt de voorgenomen activiteit verder uitgewerkt. Tevens worden de alternatieven voor de voorgenomen activiteit behandeld.*

## 4.2 Voorgenomen activiteit: inzet van verschillende soorten splijtstof

De voorgenomen activiteit bestaat uit het mogelijk maken van de inzet van twee aanvullende soorten splijtstof:

1. **mengoxide (MOX)** waarmee eenzelfde vermogensproductie (zelfde eindopbrand) kan worden bereikt als met natuurlijk uraniumoxide met een verrijking van  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235. Dit betekent de inzet van MOX met een gemiddeld gehalte van maximaal  $5,41$  gew %  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  (plutonium-239 + plutonium-241). Het aandeel aan mengoxide-elementen in de kern wordt beperkt tot maximaal 48 stuks hetgeen overeenkomt met 40% van de in totaal 121 elementen van een KCB kern.
2. **uraniumoxide** op basis van gerecycled uranium waarmee eenzelfde vermogensproductie (zelfde eindopbrand) kan worden bereikt als met natuurlijk uraniumoxide met een verrijking van  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235. Dat wil zeggen dat dit uraniumoxide (compensated enriched recycled uranium: c-ERU) qua reactiviteit equivalent is aan verrijkt natuurlijk uranium. Daartoe dient het c-ERU verrijkt te worden tot maximaal  $4,6 \pm 0,05$  gew % uranium-235.

Uitgangspunt hierbij is dat bij gelijkblijvende bedrijfsvoering eenzelfde vermogensproductie (zelfde eindopbrand) kan worden bereikt bij het definitief ontladen van de splijtstofelementen in de reeds vergunde en bovengenoemde situaties.

#### 4.2.1 Eerdere wijzigingen: hogere verrijksgraden

Het gebruik van de alternatieve splijtstoffen c-ERU en MOX is niet de eerste wijziging die EPZ aanbrengt in het ontwerp van de splijtstof-elementen. Oorspronkelijk was vergund om in de KCB uranium met een verrijksgraad van 3,3 gew % uranium-235 te gebruiken, in overeenstemming met de gangbare praktijk in 1973. Om reden van economische optimalisatie zijn later verhogingen van de verrijksgraad aangevraagd en verkregen.

Dat betrof eerst verhoging naar 4,0 gew % uranium-235 (in 1999) en later verder naar  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235 (in 2004). De hogere uraniumverrijking maakt eenzelfde energieproductie mogelijk met minder splijtstof-elementen. De hoger verrijkte splijtstofelementen blijven langer in de reactor (bijvoorbeeld vijf jaar in tegenstelling tot de oorspronkelijk drie jaar). Hierdoor neemt de gemiddelde 'opbrand' bij het definitief ontladen van de elementen aanzienlijk toe.

Het economische voordeel van hoge opbrand is voornamelijk dat er minder gebruikte splijtstof gerecycled hoeft te worden: er hoeft minder materiaal opgewerkt te worden. Bovendien ontstaat hierdoor minder afval dat verwerkt en bij COVRA opgeslagen moet worden.

De voordelen van hogere verrijking zitten dus in het gebruik van een lager aantal elementen per jaar en daarmee lagere kosten voor de *back-end* van de splijtstofcyclus.

Parallel met de verhoging van de verrijksgraad werd in de loop der jaren ook het mechanische en thermohydraulische ontwerp van de splijtstof-elementen verder ontwikkeld. Het resultaat is dat het nu toegepaste type al is voorbereid op hogere opbranden dan EPZ feitelijk realiseert. Dit nieuwe type heeft de HTP<sup>7</sup> structuur met debriserfilter<sup>8</sup> en M5 materiaal voor de omhulling<sup>9</sup> van de splijtstofstaven.

#### 4.2.2 Thans aangevraagde wijzigingen splijtstof

Voor de komende jaren wenst EPZ de mogelijkheid te krijgen om van gerecyclede materialen (RepU, plutonium, verarmd uranium) splijtstof te laten maken die dezelfde opbrand kan halen als de reeds vergunde splijtstofelementen van  $4,4 \pm 0,05$  gew % natuurlijk uranium (ENU). In tabel 4.2.1 zijn de aangevraagde wijzigingen samengevat. Het voornemen is om daarbij niets te wijzigen in het thermohydraulische ontwerp van de splijtstofelementen, zodat de gunstige eigenschappen van het huidige ontwerp behouden blijven. De voordelen van de wijziging van de splijtstofsamenstelling zullen bij de voorgenomen activiteit komen van de *front-end*, namelijk van het vermijden van de aanschaf van natuurlijk uranium, waarvan de prijs sterk aan fluctuaties onderhevig is. Deze wijziging zal niets veranderen aan de kosten van de *back-end*, omdat (bij gelijkblijvende opbrand van de splijtstof) zowel qua hoeveelheden als qua technische processen niets significant wijzigt in het recycling proces. Dit zal in de volgende paragrafen in meer detail worden besproken, allereerst voor toepassing van MOX (paragraaf 4.2.3), daarna voor c-ERU (paragraaf 4.2.4).

Tabel 4.2.1 Aangevraagde additionele splijtstoffen.

Type splijtstof	Splijtstofsamenstelling
c-ERU	$4,6 \pm 0,05$ gew % <sup>235</sup> U (equivalent aan $4,4 \pm 0,05$ gew % <sup>235</sup> U qua reactiviteit voor onbestraalde splijtstof) <sup>1)</sup>
MOX	Maximaal gemiddeld 5,41 gew % splijtbaar plutonium (Pu <sub>splijtbaar</sub> <sup>2,3)</sup> )

- 1) De compensatie voor de aanwezigheid van <sup>236</sup>U zal maximaal 0,20 w/o <sup>235</sup>U bedragen (zie 4.2.4).
- 2) De aanduiding van de splijtbare plutoniumisotopen, <sup>239</sup>Pu + <sup>241</sup>Pu.
- 3) In ieder element zal het percentage Pu<sub>splijtbaar</sub> in de afzonderlijke splijtstofstaven als volgt zijn:  $\leq 2,6$  w/o in 12 staven,  $\leq 3,6$  gew % in 56 staven en  $\leq 6,4$  gew % in 137 staven.

<sup>7</sup> High Thermal Performance: gericht op het functioneren bij verhoogde temperatuur.

<sup>8</sup> Filter bedoeld om stofdeeltjes uit het koelwater te filteren die de splijtstofstaven zouden kunnen beschadigen.

<sup>9</sup> Bekleding van de splijtstofstaven met speciale legering M5 ter beperking van corrosie.

### 4.2.3 Toepassing van mengoxide (MOX)

#### Kenmerken mengoxide

Zoals reeds beschreven worden de door EPZ gebruikte splijtstofelementen naar de opwerkingsfabriek van de firma AREVA NC in La Hague, in Frankrijk, getransporteerd. Voor recycling doeleinden wordt daar het plutonium, waarvan de massa circa 1% van de oorspronkelijke splijtstofmassa bedraagt, teruggewonnen. Aangezien EPZ momenteel geen vergunning heeft om zelf MOX als splijtstof in te zetten, wordt EPZ's plutonium door AREVA NC overgenomen voor de productie van MOX-elementen voor kerncentrales elders in Europa. Inmiddels is het geproduceerde plutonium van EPZ (circa 3 ton) grotendeels (2,7 ton) op deze wijze verwerkt<sup>10</sup>.

EPZ wil door middel van een vergunningswijziging zelf MOX kunnen inzetten en zo haar eigen plutonium gebruiken.

In MOX-elementen wordt de functie van het splijtbare uranium-235 in de klassieke splijtstof-elementen overgenomen door splijtbaar plutonium. Het uranium in MOX-elementen bevat nog 0,25 gew % uranium-235. Plutonium is, evenals uranium, een mengsel van splijtbare en niet-splijtbare isotopen. Splijtbare isotopen zijn plutonium-239 en plutonium-241. De belangrijkste niet-splijtbare isotopen zijn plutonium-240 en plutonium-242. Afhankelijk van de opbrand van de splijtstof waaruit het plutonium afkomstig is, neemt het gehalte aan niet-splijtbare isotopen toe. In tabel 4.2.2 is de samenstelling gegeven die representatief is voor de kwaliteit plutonium die EPZ denkt te gaan toepassen. Dit plutonium bestaat voor 64,4% uit splijtbare isotopen.

Wanneer de totale massa van alle plutonium-isotopen samen wordt genomen, wordt de massa uitgedrukt als  $Pu_{\text{totaal}}$ . Meestal wordt alleen de massa van de nuttige splijtbare isotopen vermeld:  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  (=  $Pu_{\text{fiss}}$ ).

EPZ wenst MOX splijtstofelementen te gebruiken die in een gestandaardiseerd herladingsmodel van de reactorkern dezelfde opbrand kunnen bereiken als ('equivalent zijn aan') de nu al vergunde splijtstofelementen op basis van natuurlijk uranium dat tot  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235 is verrijkt. Deze MOX-elementen moeten samen met de uranumelementen in een reactorkern geplaatst kunnen worden. Het beoogde aantal mengoxide-elementen in de kern is nu nog niet exact aan te geven, maar zal worden beperkt tot een maximum aandeel in de kern van 40% aan mengoxide-elementen. Het overige gedeelte, minimaal 60%, blijft bestaan uit uranumelementen (eventueel verrijkt gerecycled uranium).

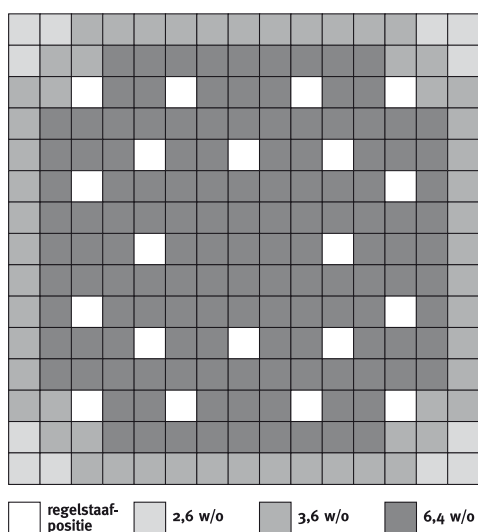
Op basis van het bovengenoemde equivalentie-principe is door het bedrijf AREVA NP het best mogelijke MOX-element voor EPZ ontworpen. Om de MOX-elementen zonder beperkingen samen met uranumelementen in een kern te kunnen inzetten, moeten splijtstofstaven worden gebruikt van drie verschillende  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  gehalten. Hierin zijn de splijtstofstaven met het kleinste gehalte  $\leq 2,6$  gew %  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  op de hoeken van het splijtstofelement gelokaliseerd, de splijtstofstaven met een  $\leq 3,6$  gew %  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  gehalte aan de randen en de splijtstofstaven met het hoogste  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  gehalte ( $\leq 6,4$  gew %) aan de binnenzijde (zie figuur 4.2.1).

Tabel 4.2.2 Representatieve samenstelling van het door EPZ te gebruiken plutonium.

Plutonium isotoop	Percentage gew %	Eigenschappen	Kenmerken
<sup>238</sup> Pu	2,7	halfwaardetijd 88 jaar, niet splijtbaar	Splijt spontaan onder uitzending van neutronen; produceert warmte door radioactief verval.
<sup>239</sup> Pu	54,8	halfwaardetijd 24.000 jaar, splijtbaar	Belangrijkste waardevolle isotoop voor energieproductie.
<sup>240</sup> Pu	25,3	halfwaardetijd 6.560 jaar, niet splijtbaar	Splijt spontaan onder uitzending van neutronen.
<sup>241</sup> Pu	9,6	halfwaardetijd 14,3 jaar, splijtbaar	Door verval van <sup>241</sup> Pu groeit de radioactieve dochter <sup>241</sup> Am in. Dit leidt, na zuivering tijdens opwerken, tot gestaag toenemende radioactiviteit in opslag.
<sup>242</sup> Pu	7,6	halfwaardetijd 376.000 jaar, niet splijtbaar	Splijt spontaan onder uitzending van neutronen.

<sup>10</sup> AREVA Juni 2009: 'Traitement des Combustibles usés provenant de l'étranger dans les installations AREVA NC de La Hague, Rapport 2008'.

Figuur 4.2.1 Schematische dwarsdoorsnede van het optimale MOX-element.



Deze opsplitsing van een MOX-element in zones met verschillende plutonium gehalten is voor drukwaterreactoren een gangbaar principe waarmee reeds veel ervaring is opgedaan in het buitenland.

Het gemiddelde plutoniumgehalte in de MOX-splijstofelementen die EPZ heeft laten ontwerpen, is maximaal 5,41 gew %  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  wat overeenkomt met  $\sim 8,4$  gew %  $Pu_{\text{totaal}}$  (zie tabel 4.2.2). Het overige gedeelte van de splijstof bestaat uit verarmd uranium dat hoofdzakelijk uit uranium-238 bestaat met 0,25 gew % uranium-235. De feitelijke samenstelling van MOX wordt bepaald door de samenstelling van het beschikbare plutonium.

Indien in de toekomst andere kwaliteiten plutonium gebruikt gaan worden dan in bovenstaand voorbeeld, zal het gemiddelde gehalte aan  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  op 5,4 gew % gemaximeerd blijven, maar het gemiddelde gehalte aan  $Pu_{\text{totaal}}$  kan iets hoger zijn dan 8,4 gew %. Hogere gehalten  $Pu_{\text{totaal}}$  kunnen leiden tot hogere stralingsbelastingen bij het hanteren van deze splijstof. De reactorfysische eigenschappen van MOX, waarmee EPZ in het kader van de vergunningaanvraag berekeningen heeft laten uitvoeren, worden uitsluitend bepaald door het gehalte aan  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  en niet door het gehalte  $Pu_{\text{totaal}}$ .

### Consequenties van het gebruik van plutonium in de vorm van MOX

*Voor de oorsprong van de splijstof*

Als EPZ tot 40% van de reactor kern (dat wil

zeggen 48 van de in totaal 121 brandstofelementen) uit MOX-elementen wil laten bestaan, moet jaarlijks gemiddeld 330 kilogram plutonium ( $Pu_{\text{totaal}}$ ) – 12 elementen met elk circa 27,5 kg plutonium – gedurende een aantal jaren als grondstof voor MOX-elementen worden ingezet. Momenteel beschikt EPZ zelf niet over plutonium. Al het plutonium van KCB dat tot en met 2015 werd en wordt vrijgemaakt bij het opwerken van de splijstof van KCB is immers reeds door AREVA NC overgenomen en gebruikt voor de productie van MOX-splijstof ten behoeve van andere centrales. De gemiddelde jaarlijkse productie uit het opwerken van eigen splijstof bedraagt momenteel circa 93 kilogram  $Pu_{\text{totaal}}$ . In de periode van 2015 tot 2034 produceert EPZ in totaal genoeg plutonium om gedurende een aantal jaren 40% MOX in te kunnen zetten. Wanneer EPZ langer MOX wil inzetten of stopt met opwerken kan zij het plutonium op commerciële basis overnemen van andere partijen. Dat is mogelijk, net zoals in het verleden andere partijen plutonium van EPZ hebben overgenomen voor eigen gebruik.

Voor de aanschaf van MOX heeft EPZ alleen plutonium op het oog dat afkomstig is van opgewerkte civiele kernbrandstoffen van drukwaterreactoren en kokendwaterreactoren. In enkele landen (de Verenigde Staten, Rusland) is plutonium beschikbaar gekomen uit ex-militaire voorraden (ontmantelde kernkoppen). Kenmerk van dat soort plutonium is dat het vrijwel geheel uit splijtbare isotopen (vooral plutonium-239) bestaat. Het militaire plutonium zal op basis van ontwapeningsverdragen in de landen van oorsprong gerecycled worden; het komt daarom niet in aanmerking voor export naar de Europese MOX markt. Euratom houdt toezicht op transacties met plutonium of andere splijstoffen.

De gebruikte MOX-elementen zullen worden opgewerkt. Het hergebruik van het plutonium uit de gebruikte MOX-splijstofelementen zal, vanwege de beperkte resterende bedrijfsduur van de centrale, niet in de KCB plaatsvinden. De herbruikbare splijstoffen afkomstig uit opwerking zullen worden overgenomen door AREVA NC en worden verwerkt in de splijstofcyclus van andere kerncentrales. Het restafval zal worden opgeslagen bij COVRA.

#### *Voor de bedrijfsvoering*

EPZ heeft het voornemen om, na verkrijging van de vergunning om MOX toe te passen, met de inzet van 8 MOX-elementen te starten. Gezien de beperkte bedrijfservaringen met MOX met een verrijkingsgraad van 5,41 gew %  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  én een inzet tot 40% MOX-elementen in de reactorkern, worden deze elementen als voorloper elementen beschouwd. Deze 8 elementen zullen, naast de gebruikelijke jaarlijkse visuele inspecties, onderworpen worden aan een extra inspectieregime waarbij met name zal worden verzekerd dat het kogelmeetsysteem voor de bewaking van de reactorfysische parameters betrouwbare informatie levert. De inhoud van dit extra inspectieregime zal in detail met de Kernfysische Dienst van het Ministerie van VROM worden overlegd.

Daarna zullen er jaarlijks, tijdens de achtereenvolgende SW-perioden, 12 MOX-elementen bijgeplaatst worden tot er in de kern een maximum van 48 stuks is bereikt. Dit maximum van 48 stuks blijft daarna gehandhaafd. Dit betekent dat er jaarlijks opgebrande MOX-elementen uit de kern worden verwijderd en deze vervangen worden door een gelijk aantal nieuwe MOX-elementen. In vergelijking met uraniumelementen moeten MOX-elementen met een vergelijkbare opbrand na definitieve ontlading uit de reactor in het algemeen 1 à 2 jaar langer in het splijtstofopslagbassin afkoelen voordat ze kunnen worden afgetransporteerd. De inzet van MOX-elementen zal op zodanige wijze plaatsvinden dat deze inzet geen invloed heeft op de verplichting tot directe ontmanteling na het einde van de bedrijfstijd.

Aangezien er geen neutronenfysische verschillen zijn tussen ENU-, ERU- en c-ERU-elementen kunnen deze elementen in alle mogelijke mengverhoudingen naast maximaal 40% MOX, worden ingezet.

Door het gebruik van MOX-elementen neemt het percentage plutonium ten opzichte van uranium in de kern toe. Verschillen in de nucleaire eigenschappen van uranium en plutonium maken het nodig om het meet & regelsysteem van de kernreactor aan te passen. Soortgelijke aanpassingen in de KCB zijn ook gedaan na de eerdere stapsgewijze verhogingen van de verrijkingsgraad van splijtstof uit natuurlijk uranium van 3,3 gew % naar  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235.

Bij gebruik van MOX-splijtstofelementen wordt de werkzaamheid (effectiviteit om neutronen in te vangen) van de regelstaven, die bij invallen de onderkriticaliteit van de reactor moeten waarborgen, minder. Voor iedere kernbelading van KCB wordt voor de te beladen kern een formele veiligheidsanalyse van het reactorbedrijf uitgevoerd. Ook de regelstaafwerkzaamheid wordt voor iedere kernbelading berekend. Alleen wanneer de regelstaafwerkzaamheid binnen de voorgeschreven limietwaarden valt, mag de betreffende belading worden uitgevoerd. Deze werkwijze blijft bij toekomstig gebruik van MOX en c-ERU splijtstof gehandhaafd.

Boor wordt in de vorm van boorzuur in het hoofdkoelmiddel opgelost om de reactor te regelen en om bij lage temperaturen langdurig de onderkriticaliteit te garanderen. Het isotoop boor-10 is het werkzame bestanddeel van boor dat neutronen absorbeert en kernreacties stopt. Bij het gebruik van MOX-splijtstofelementen wordt het boor minder werkzaam. AREVA heeft onderzocht of bij een inzet van 40% MOX-splijtstof met een gemiddeld gehalte  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  van 5,41 gew % de huidige boreringsystemen aan de eisen voldoen en welke aanpassingen er nodig zijn indien dit niet het geval is. Uit deze studie is naar voren gekomen dat, om bij de inzet van MOX aan alle veiligheidstechnische eisen te kunnen blijven voldoen, een verhoging van het boor-10-gehalte in het gebruikte boorzuur van 20 At% naar 32 At% volstaat. Behoudens bij de overgang van 20 At% op 32 At%, waarbij zeker gesteld moet worden dat er zich overal in de installatie waar dat nodig is 32 At% boor-10 bevindt, leidt deze aanpassing niet tot een verandering van de bedrijfsvoering.

#### *Voor transporten en splijtstofhantering*

Een verandering als gevolg van de toepassing van MOX vindt plaats bij het logistieke proces van de aanvoer van nieuwe splijtstofelementen. Omdat MOX plutonium bevat, zijn de nieuw gefabriceerde splijtstofelementen radioactiever dan nieuw gefabriceerde uranium brandstofelementen. Ook worden aan het vervoer van plutonium over de openbare weg zwaardere eisen gesteld qua beveiliging, omdat plutonium in een andere beveiligingsklasse valt dan uranium. Daarom wordt voor het transport van MOX naar Borssele een speciaal type transportverpakking ontwikkeld, met een zeer hoge bestendigheid tegen transportongevallen

of sabotagepogingen. Deze verpakking zal in eigenschappen tenminste equivalent zijn aan de zogenaamde MX6 verpakking. In de beschouwingen wordt daarom uitgegaan van de MX6 verpakking.

De MX6 verpakking is een cilindrische container met een gewicht van 20 ton die maximaal 6 MOX-elementen kan bevatten (zie figuur 4.2.2). De container wordt over de openbare weg vervoerd in een 'security vehicle', een gespecialiseerde vrachtwagen met een zeer hoge beschermingsgraad tegen eventuele aanvallen van kwaadwillenden.

Het transport van MOX maakt geen onderdeel uit van de huidige vergunningaanvraag. Voor nucleaire transportmiddelen en transporten worden aparte certificaten en vergunningen verleend door de autoriteiten in de landen die het aangaat (in dit geval Frankrijk, België en Nederland). Ter informatie wordt in hoofdstuk 6 van dit MER kort ingegaan op de mogelijke gevolgen van transporten met verse MOX-elementen.

Het gebruik van de MX6 transportverpakking (of equivalent) heeft invloed op de bedrijfsprocessen, omdat de wijze van interne hantering anders is dan die van verpakkingen van verse uranium splijtstofelementen. Ook moet gerekend worden op een hogere dosisbelasting voor de EPZ-medewerkers die worden ingezet voor het ontvangen van de verpakking en het overbrengen van de MOX-elementen naar het opslagbassin van de kerncentrale (zie paragraaf 6.4 en 6.6). Uit ervaringen in buitenlandse kerncentrales blijkt dat deze wijzigingen in interne hanteringsprocessen goed uitvoerbaar zijn.

De uraniumelementen vereisen een afkoelperiode die, afhankelijk van de opbrand, 1 tot 2 jaar bedraagt. De benodigde afkoeltijd, die samenhangt met het ontwerp van de aftransportcontainer, is naar verwachting voor MOX-elementen 1 tot 2 jaar langer dan voor uraniumelementen. De opslagcapaciteit van het splijtstofopslagbassin (SOB) is voldoende om het langere verblijf in het SOB te kunnen garanderen. Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van aftransporteren zouden een langere afkoelperiode ongedaan kunnen maken.

#### **Gevolg van eventuele besluiten om niet meer op te werken**

EPZ geeft er de voorkeur aan om het opwerken van gebruikte splijtstofelementen tot en met einde bedrijfsduur in 2033 voort te zetten. Immers hergebruik van stoffen vermindert het beslag op natuurlijke bronnen. De voordelen hiervan worden elders in dit MER toegelicht. Daarnaast is het afval afkomstig van opwerking beheersbaar in zowel de hoeveelheid als in de wijze van verpakken. De hoeveelheid afval na opwerken is kleiner dan bij directe opslag. De wijze waarop het afval verpakt wordt, in glas, maakt dat het met inachtneming van de voorgeschreven veiligheidsmaatregelen, past binnen de faciliteiten bij COVRA, die voor de opslag van afval afkomstig van opwerken ontworpen zijn. De hoeveelheid radioactiviteit in het afval na opwerken is lager dan bij niet opwerken. Het opwerken van bestraalde splijtstoffen past daarom in een beleid waarin de beperking van de hoeveelheid afval zowel in activiteit als in volume een belangrijk aandachtspunt vormt.

In geval EPZ haar huidige beleid met betrekking tot opwerking niet zou kunnen voortzetten, zal

**Figuur 4.2.2** Links: MX6 transportverpakking voor MOX (zonder security vehicle).  
Rechts: Transportverpakking met uraniumelementen op vrachtwagen.



een andere vorm van opslag van de gebruikte splijtstoffen moeten worden gevonden. Het meest voor de hand liggend is de zogenoemde directe opslag waarbij de bestraalde splijstofelementen langjarig worden opgeslagen in een bassin of in speciale opslagcontainers. Directe opslag vergt eveneens een oplossing voor eindberging. In landen waarin directe opslag wordt toegepast, zoals Finland en Zweden is al een aanvang gemaakt met het realiseren van een geologische eindberging. Een beleidwijziging in de richting van directe opslag vergt actief overheidsbeleid op het gebied van randvoorwaarden waaraan dergelijke faciliteiten, zowel de tussentijdse opslag als de eindberging moeten voldoen. Ook op het gebied van veiligheidsvoorschriften, locatiekeuze en draagvlak bij de bevolking zal nog het nodige ontwikkeld moeten worden.

Zowel MOX-elementen, als ENU-, ERU- of c-ERU-elementen zijn zowel geschikt voor opwerken als voor directe opslag.

#### Ervaringen met MOX

In het buitenland, ondermeer in België, Frankrijk, Duitsland en Zwitserland, bestaat al ruime ervaring met het gebruik van MOX-elementen (zie tabel 4.2.3). Deze ervaringen hebben aangetoond dat het technisch goed mogelijk is om het gebruik van MOX-elementen in te voeren.

Binnen de veiligheidsgrenswaarden die inherent zijn aan het ontwerp van de reactor, kan een kern samen worden gesteld met een groter

of kleiner aandeel MOX-elementen. Tevens leren deze ervaringen dat MOX-elementen, ondanks de hogere radioactiviteit van de verse elementen, veilig gehanteerd kunnen worden waarbij de risico's voor bevolking en personeel aanvaardbaar blijven.

EPZ is voornemens een MOX-element te ontwerpen volgens de stand-der-techniek. Het ontwerp van de MOX-elementen voor EPZ is vergelijkbaar met andere moderne ontwerpen van MOX-elementen, zoals het 'MOX parité' splijstofelement met 5,36 gew %  $Pu_{fiss}$ . Dit element wordt sedert 2007 in Franse 900 MW centrales gebruikt (zie ook tabel 4.2.3).

Ten aanzien van de inzet van MOX splijstof kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

1. Er is bijna 40 jaar ervaring met commerciële inzet van MOX in Europese drukwaterreactoren.
2. Europese drukwaterreactoren hebben vergunningen voor de inzet van MOX tot maximaal 50%.
3. Percentages tussen 30% en 40% MOX worden in Europese drukwaterreactoren toegepast.
4. Percentages  $Pu_{splijtbaar}$  tot 5,36 gew % worden toegepast in Europese kerncentrales.

EPZ vraagt vergunning aan voor de inzet van 40% MOX-splijstofelementen in de KCB reactor-kern. De in eerdergenoemde landen opgedane

Tabel 4.2.3 Gerealiseerde en vergunde inzet van MOX-elementen in Europese drukwaterreactoren.

Centrale	Gerealiseerd percentage MOX (%)	Vergund percentage MOX (%)	Vergund $Pu_{fiss}$ (gew %)	Centrale	Gerealiseerd percentage MOX (%)	Vergund percentage MOX (%)	Vergund $Pu_{fiss}$ (gew %)
<b>Duitsland</b>				<b>Zwitserland</b>			
1. Isar 2 (1998)	40	50	4,53	11. Beznau (KKB-1) (1978)	34	40	4,3
2. Grafenrheinfeld (1985)	33	33	4,52	12. Beznau (KKB-2) (1978)	34	40	4,3
3. Philippsburg 2 (1988)	37	37	4,41	13. Gösgen (1997)	36	37	4,8
4. Neckar-Westheim (GKN 1) (1982)	9	9		<b>België</b>			
5. Neckar-Westheim (GKN 2)	37	37	4,50	14. Doel (1995)	±20	24	5,0
6. Obrigheim (1972)	23	uit bedrijf		15. Tihange (1995)	±20	24	5,0
7. Brokdorf (1989)	33	33	3,86	<b>Frankrijk</b>			
8. Unterweser (1984)	33	50	4,48	16 t/m 37			
9. Grohnde (1988)	33	33	3,09	900 MWe-eenheden (1987)	±33	±33	5,36
10. Emsland	25	25	4,63				



ervaringen met de inzet van MOX, zowel met het percentage  $Pu_{\text{splijtbaar}}$  in de splijtstof als met het percentage MOX-elementen in de kern, zijn verwerkt in de ontwerpcodes zoals die gebruikt zijn voor een haalbaarheidsstudie voor de MOX-inzet bij de KCB. Deze ontwerpcodes zijn voor MOX-splijtstof ruimschoots gevalideerd en de ervaringen met het gebruik van MOX-splijtstof zijn positief. Op basis hiervan kan worden gesteld dat de voorgenomen inzet van MOX in de KCB past binnen de internationale ervaring met de inzet van MOX-splijtstof in drukwaterreactoren. Vanzelfsprekend heeft EPZ ook zelf met eigen berekeningen in een haalbaarheidsstudie de veiligheid van een dergelijke kernlading met MOX onderbouwd. Bovendien zal EPZ de eerste lading van 8 MOX-elementen als voorloper elementen beschouwen. Deze 8 elementen zullen, naast de gebruikelijke jaarlijkse visuele inspecties, onderworpen worden aan een extra inspectieregime, waarbij met name zal worden verzekerd dat het kogelmeetsysteem voor de bewaking van de reactorfysische parameters betrouwbare informatie levert. Over de inhoud van dit extra inspectieregime zal in detail met de Kernfysische Dienst van het Ministerie van VROM worden overlegd.

#### 4.2.4 Toepassing van c-ERU

De vigerende Kew-vergunning bepaalt dat de verse splijtstof  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235

mag bevatten. EPZ is voornemens vergunning te vragen om ERU-elementen met een hogere verrijking (gecompenseerde verrijkt gerecycled uranium, c-ERU) te mogen inzetten, mits is aangetoond dat de reactiviteit van deze c-ERU-elementen kleiner is of gelijk blijft aan die van de nu vergunde elementen.

#### Kenmerken verrijkt gerecycled uranium (ERU)

Op dit moment brengt EPZ de gebruikte splijtstof-elementen naar de opwerkingsfabriek van de firma AREVA NC in La Hague, Frankrijk. Het uranium dat hieruit wordt teruggewonnen heeft ongeveer 94% van de oorspronkelijke splijtstof-massa en is dus de omvangrijkste productstroom van het proces in La Hague. EPZ gebruikt momenteel in de KCB niet-gecompenseerd ERU<sup>11</sup>.

De huidige vergunning schrijft voor dat de toegepaste splijtstof  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235 mag bevatten. Deze vergunningslimiet is gebaseerd op de eigenschappen van verrijkt natuurlijk uranium. Gerecycled uranium heeft evenwel een andere samenstelling dan natuurlijk uranium. In tabel 4.2.4 wordt de samenstelling van de grondstof natuurlijk uranium vergeleken met een typische kwaliteit gerecycled uranium (RepU). Na verrijking levert natuurlijk uranium ENU brandstof en RepU levert ERU brandstof op. De belangrijkste isotopen in RepU die niet voorkomen in natuurlijk uranium, zijn uranium-232 en uranium-236. De consequenties die deze isotopen hebben op de eigenschappen van ERU worden hierna behandeld.

Tabel 4.2.4 Vergelijking van de isotopische samenstelling van natuurlijk uranium en van typisch gerecycled RepU.

Isotoop	Natuurlijk uranium	RepU	Kenmerken
<sup>232</sup> U	-	$0,1 - 0,3 \cdot 10^{-6}$ gew %	Vervalt tot radioactieve dochters (waaronder thallium-208); stralingsbescherming is aandachtspunt bij transport.
<sup>234</sup> U	0,0055 gew %	0,1 - 0,2 gew %	Neutronen absorber, wordt omgezet in splijtbaar <sup>235</sup> U.
<sup>235</sup> U	0,71 gew %	0,5 - 1,0 gew %	Splijtbaar isotoop van uranium.
<sup>236</sup> U	-	0,3 - 1,0 gew %	Neutronen absorber; vermindert reactiviteit van de splijtstof.
<sup>238</sup> U	99,3 gew %	complement	Kan door neutronenvangst omgezet worden in splijtbaar <sup>239</sup> Pu.

<sup>11</sup> EPZ heeft reeds ervaring met de inzet van niet gecompenseerde ERU-elementen met een verrijkingpercentage van 4,4 w/o <sup>235</sup>U. In de KCB zijn vanaf 2003 (niet gecompenseerde) ERU-elementen gedurende vier jaar in de reactor geplaatst. In het jaar 2008 bevonden zich 44 stuks ERU-elementen (36%) tegelijk in de reactor.

# 4

## Consequenties van de aanwezigheid van $^{232}\text{U}$ in (c-)ERU splijtstofelementen

Het isotoop uranium-232 is in een lage concentratie aanwezig in reprocessed uranium (RepU). Het vervalt met een halfwaardetijd van 69 jaar. Eén van ‘dochteren’ die hieruit ontstaat, is het radioactieve Thallium-208 ( $^{208}\text{Tl}$ ). Opgeslagen RepU en (c-)ERU worden door de toename van deze radioactieve dochters in de loop van de jaren enigszins radioactiever (zie figuur 4.2.3). Dit kan voornamelijk gevolgen hebben voor het personeel van installaties waarin RepU en (c-)ERU worden bewerkt, zoals de conversie-, verrijkings- en fabricage-installaties.

Deze mogelijke gevolgen worden beheerst door tegenmaatregelen waardoor aan de strenge eisen, die internationaal gesteld worden aan stralingsbescherming voor werknemers, wordt voldaan. In de praktijk worden met betrekking tot het isotoop uranium-232 in de productie-industrie/splijtstoffabricage waar nodig mitigerende maatregelen genomen. Bij diverse verrijkingsfabrieken op basis van de centrifugetechnologie is bijvoorbeeld een deel van de installatie van de vereiste stralingsafscherming voorzien. Het isotoop uranium-232 vormt daarom een beheersbaar stralingsprobleem dat ook op de lange duur het recyclen van uranium niet in de weg zal staan. Wel brengen de beschermende maatregelen bij toeleveranciers hogere onkosten met zich mee ten opzichte van de verwerking van natuurlijk uranium. Voor de verwerking van EPZ's gerecycled uranium zijn er tot nog toe bij de fabricage van ERU-elementen geen beperkingen geweest, verbonden met het aanwezige uranium-232.

Bij gebruik van c-ERU wijzigt de stralingsbelasting van het EPZ-personeel niet significant en blijft deze onveranderd ver onder de wettelijke normen. Dat komt vooral doordat werk-

nemers in de kerncentrale maar korte tijd in de directe nabijheid van verse splijtstofelementen behoeven te werken. Bovendien is de radioactiviteit van de c-ERU-elementen maar in geringe mate verhoogd. Dit wordt in de hoofdstukken 5 en 6 toegelicht.

## Consequenties van de aanwezigheid van $^{236}\text{U}$ in (c-)ERU splijtstofelementen

Van uranium-236 is het nadeel dat het neutronen absorbeert zonder te splijten, waardoor het de ‘reactiviteit’ van de splijtstof ongunstig beïnvloedt. Verder is het massaverschil tussen moleculen  $^{236}\text{UF}_6$  en  $^{235}\text{UF}_6$  gering; hierdoor valt niet te vermijden dat bij de fysische verrijking van gerecycled uranium het uranium-236 samen met uranium-235 mee verrijkt. Het gevolg is dat splijtstofelementen die van gerecycled en herverrijkt uranium zijn gemaakt, een lagere ‘effectieve’ verrijking hebben dan elementen van natuurlijk uranium, bij gelijke gehalten aan uranium-235 (bijvoorbeeld 4,4 gew %).

Bijgevolg bereiken elementen van ERU een lagere opbrand en leveren dus minder energie. In de praktijk wordt dit nadeel meestal vermeden door de uranium-235 verrijking van ERU splijtstof hoger te kiezen dan die van ENU splijtstof. Om het effect van uranium-236 op te heffen moet elk procentpunt uranium-236 in het uranium worden gecompenseerd met ongeveer één derde procentpunt uranium-235. Dit wordt ‘uranium-236 compensatie’ genoemd (compensatieprincipe). EPZ is voornemens compensatie toe te passen tot maximaal 0,20 gew % uranium-235 wat correspondeert met ongeveer 0,6 gew % uranium-236. Dit is conform de internationale ervaring met compenseren.

Het beoogde aantal c-ERU-elementen in de kern is nu nog niet exact aan te geven.

Figuur 4.2.3 Opslag van gerecycled uranium in Pierrelatte (Frankrijk).



De berekeningen van de milieugevolgen als gevolg van de uranium-236 compensatie zijn conservatief uitgevoerd voor een additionele verrijking van 0,5 gew % uranium-235, de aanwezigheid van 1,5 gew % uranium-236 en de inzet van 100% c-ERU-elementen in de kern.

### Ervaringen met c-ERU splijtstof

In de KCB zijn vanaf 2003 (niet-gecompenseerde) ERU-elementen gedurende vier jaar in de reactor geplaatst. In het jaar 2008 bevonden zich 44 stuks ERU-elementen tegelijk in de reactor, waarvan de kern op dat moment dus voor 36% uit gerecycled uranium bestond. Er zijn in de KCB geen operationele verschillen (bijvoorbeeld tijdens visuele inspecties van de splijtstofelementen) geconstateerd tussen deze en de klassieke splijtstofelementen verkregen uit natuurlijk uranium.

Ervaringen van exploitanten van kerncentrales in andere landen<sup>12</sup> hebben aangetoond dat er eveneens weinig verschil bestaat in de bedrijfsvoering van de reactor bij gebruik van gecompenseerd verrijkt gerecycled uranium (c-ERU) of verrijkt natuurlijk uranium<sup>13</sup>. Splijtstofelementen van c-ERU zijn en worden gebruikt in Frankrijk, Duitsland, Zwitserland en België (zie tabel 4.2.5).

Ten aanzien van de inzet van c-ERU-elementen kan de volgende conclusie getrokken worden:

1. Europese lichtwaterreactoren hebben c-ERU-elementen tot een percentage van 4,91 gew % uranium-235 ingezet.
2. Compensaties tussen 0,11 en 0,45 gew % uranium-235 worden in Europese drukwaterreactoren toegepast.

De radiologische analyses voor de inzet van c-ERU zijn uitgevoerd voor de maximaal toegepaste compensatie in Europese drukwaterreactoren, i.e. 0,45 gew % <sup>235</sup>U wat correspondeert met een maximaal uranium-235 percentage van 4,9 gew % uranium-235 en 1,5 gew % uranium-236. De splijtstofleverancier van EPZ, AREVA, heeft ervaring met compensatie tot 0,2 gew %. EPZ is daarom voornemens om compensatie tot maximaal 0,2 gew % toe te gaan passen voor haar c-ERU splijtstofelementen. De uitgevoerde analyses (voor 0,45 gew % compensatie) zijn conservatief voor de voorgenomen compensatie tot 0,2 gew %. Dat wil zeggen dat de gevolgen van de inzet van 0,2 gew % gecompenseerd c-ERU kleiner zijn dan die van 0,45 gew % gecompenseerd c-ERU.

Bij AREVA, de splijtstofleverancier van EPZ, bestaat inmiddels ervaring met het opwerken van gebruikte (c-)ERU-splijtstofelementen. Hoewel EPZ zelf nog geen ervaring heeft met het afvoeren van ERU-splijtstofelementen worden geen bijzonderheden verwacht. Het opwerkingscontract van EPZ met AREVA voorziet al in de aanbidding van gerecyclede materialen en in de wijze van transport is er geen verschil. In La Hague worden al langer ERU-elementen voor de tweede keer gerecycled. Wel zal het teruggewonnen 'tweede generatie' ERU van mindere kwaliteit zijn (hogere concentraties uranium-232 en uranium-236) vergeleken met het ERU waar EPZ momenteel mee werkt. Dat zal de economische waarde van dit ERU negatief beïnvloeden. Dit nadeel wordt door EPZ verdisconteerd in de besluitvorming over de hoeveelheid in te zetten ERU.

Tabel 4.2.5 Gerealiseerde inzet van c-ERU en bijbehorende ENU equivalentie.

Reactor	c-ERU, percentage <sup>235</sup> U (w/o)	Equivalent ENU (w/o)	Bijzonderheden
<b>Duitsland</b>			
Neckarwestheim 2	4,6	4,4	
<b>Zwitserland</b>			
Goesgen	4,91	4,8	
<b>Belgie</b>			
Doel-1	4,25	3,8	1994-2003, niet voortgezet wegens beëindigen opwerken
<b>Frankrijk</b>			
Cruas 3	4,1	3,7	
Cruas 4	4,1	3,7	

<sup>12</sup> 'Management of Reprocessed Uranium: Challenges and Options', IAEA 2009, NF-T-4.4 (technical report).

<sup>13</sup> 'Management of Reprocessed Uranium, Current Status and Future Prospects', IAEA February 2007, Tecdoc 1529.

### 4.3 Overgangssituaties

Bij het uitvoeren van analyses waarmee wordt aangetoond dat de reactor veilig (voor systeem en milieu) wordt bedreven, wordt uitgegaan van hypothetische evenwichtskernen. Deze evenwichtskernen kunnen worden bereikt door uitvoering van een jaarlijks repeterend patroon van splijstofelement herladingen. De tussenliggende kernconfiguraties worden overgangssituaties genoemd. De evenwichtssituaties, die in de praktijk zelden of nooit worden bereikt, gelden als representatief voor de tussenliggende configuraties.

Als voorbeeld geldt de situatie van 2004, toen vergunning werd gevraagd en verkregen voor de overgang van 4,0 gew % naar  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU-splijststof. Omdat een dergelijke overgang geleidelijk wordt gerealiseerd, is er sprake van overgangssituaties waarin de kern combinaties van ENU-elementen van 4,0 gew % en  $4,4 \pm 0,05$  gew % beginverrijking bevat. Van deze overgangssituaties is aangetoond dat ze qua veiligheids- en milieuaspecten binnen de grenzen berekend voor de evenwichtskernen voor 4,0% en  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU-splijststof vallen.

Met de huidige aanvraag kunnen combinaties van verschillende typen (ENU, MOX, ERU en c-ERU) splijstofelementen voorkomen. De werkelijke samenstelling van de reactor verandert dus per jaar. Deze hangt onder meer af van economische omstandigheden, namelijk of MOX of c-ERU gebruik voordelen heeft voor de kostprijs en van de reeds beschikbare, eventueel gedeeltelijk gebruikte, splijstofelementen in voorraad. Zo kan vastgehouden worden aan de huidige configuratie met  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU, of vindt een gedeeltelijke of gehele (maar dan ook weer stapsgewijze) vervanging plaats door c-ERU-elementen. Veiligheids- en milieueffecten voor een complete c-ERU kern zijn in het Veiligheidsrapport respectievelijk in hoofdstuk 6 van dit MER gegeven.

Met betrekking tot de inzet van MOX is reeds aangegeven dat EPZ streeft naar een inzet van maximaal 40% MOX-elementen, om reden van splijstofflexibiliteit en om reden van prijsstabilisatie. Een kernsamenstelling van maximaal 40% MOX-elementen is daarom in de rekenmodellen gebruikt om aan te tonen dat de milieugevolgen van MOX aanvaardbaar

zijn. Deze kernsamenstelling is afdekkend voor overgangssituaties met een lager percentage MOX-elementen en voor alle mogelijke mengverhoudingen van elementen met uranium als splijststof (ENU, ERU en c-ERU).

Voorgenomen wijzigingen in de bedrijfssystemen (zoals de invoering van verrijkt boor) zullen aangebracht worden voordat MOX wordt beladen, en worden niet teruggedraaid wanneer eventueel het gebruik van MOX wordt verminderd of wordt beëindigd.

Uit bovenstaande volgt dat ook deze voorgenomen wijziging van te gebruiken splijststof impliceert dat er in de praktijk niet één gewenste kernconfiguratie zal voorkomen, maar een jaarlijks wisselende (overgangs)situatie. Zoals eerder opgemerkt, wordt voor iedere kernbelading van KCB een formele veiligheidsanalyse van het reactorbedrijf uitgevoerd. Hierbij worden alle relevante reactorparameters met gekwalificeerde computercodes berekend. De resultaten van deze analyse worden na goedkeuring door de EPZ RBVC conform de vergunning ter goedkeuring voorgelegd aan de Kernfysische Dienst van VROM. Alleen wanneer aantoonbaar geen voorgeschreven veiligheidsgrenswaarden overschreden worden, mag de betreffende kernbelading door EPZ samengesteld worden. Hiermee is gewaarborgd dat elke nieuwe kernbelading, met en zonder MOX- en/of c-ERU-elementen, voldoet aan de veiligheidslimieten die de overheid heeft voorgeschreven. Deze bestaande werkwijze zal bij toekomstig gebruik van c-ERU en MOX gehandhaafd blijven.

### 4.4 Alternatieven

In het MER dienen ook alternatieven voor de voorgenomen activiteit, die redelijkerwijs in beschouwing dienen te worden genomen, te worden beschreven. Deze zijn te onderscheiden in:

- nulalternatief
- uitvoeringsalternatieven
- het meest milieuvriendelijke alternatief (mma)

#### Nulalternatief

Het nulalternatief is het alternatief waarbij de beoogde brandstofdiversificatie niet plaats zal vinden. Deze situatie komt overeen met de bestaande situatie. Het nulalternatief fungeert

als een referentiekader om de gevolgen van de voorgenomen activiteit mee te vergelijken.

### **Uitvoeringsalternatieven**

De m.e.r. procedure verlangt van de vergunning-aanvrager ook alternatieve uitvoeringsvormen van het voornemen te beschrijven waarmee het beoogde doel, met een geringere belasting voor het milieu, kan worden bereikt. In hoofdstuk 2 is gemotiveerd dat er geen andere realistische manieren zijn om het doel, te weten kostenoptimalisatie, op een andere manier te bereiken dan door inzet van MOX en c-ERU. Daarom worden hieronder uitsluitend alternatieven voor deze beide opties nader onderzocht.

#### *MOX*

EPZ ziet een gelimiteerde inzet van MOX-elementen als mogelijkheid tot kostenbeheersing. De inzet van MOX-elementen brengt ook investeringen met zich mee, bijvoorbeeld met betrekking tot gereedschappen voor de hantering van deze elementen en met betrekking tot de meet- en regelsystemen. Deze investeringen zijn echter beperkt. Een 100% omschakeling op MOX zou evenwel significante installatiewijzigingen, zoals extra regelstaven, onvermijdelijk maken, hetgeen het economische voordeel van MOX-elementen teniet zou doen.

Het percentage MOX in de kern (het aantal MOX-elementen in relatie tot het totale aantal elementen) kan tot onderscheidende milieueffecten leiden. Immers de eigenschappen van MOX zijn niet identiek aan die van uranium. Het is daarom zinvol om als uitvoeringsalternatief naar uiteenlopende aantallen MOX-elementen in de kern te kijken.

Om redenen van kernsymmetrie worden herbeladingen van de kerncentrale Borssele altijd in veelvoud van 4 elementen ontworpen. Er kan, als rekenvoorbeeld in het kader van deze MER, met een hypothetische evenwichtskern een situatie worden bereikt waarbij 32 van de 121 splijtstofelementen uit MOX bestaan (een mengkern van 74% uranium en 26% MOX). In deze evenwichtssituatie worden jaarlijks 8 MOX-elementen in de reactor geladen en worden de oudste 8 MOX-elementen, die intussen 4 jaar energie hebben geproduceerd, ontladen (naast jaarlijks 20 uraniumelementen). Omdat met een MOX-percentage van 26% al veel ervaring is met elders vergunde en toegepaste MOX-meng-

kernen, is dit een zinnig te onderzoeken alternatief.

De volgende hypothetische evenwichtskern ontstaan bij jaarlijkse herbeladingen van 16 MOX/12 uraniumelementen. Bij een gebruik van MOX gedurende vier cycli leidt dit model tot 64 MOX-elementen (53%). Omdat EPZ op grond van voorstudies vermoedt dat het economische optimum tussen de voorgenomen activiteit (40% MOX) en 53% MOX in ligt, is dit model als één van de alternatieven bestudeerd. Omdat er internationaal ook ervaring is met 40% MOX inzet beschouwt EPZ dat als het voorkeursalternatief. Naar verwachting voldoet het voorkeursalternatief van 40% MOX aan de economische randvoorwaarde dat er geen omvangrijke investeringen aan de bedrijfssystemen nodig zijn.

Om inzicht te krijgen in de milieueffecten van een zeer intensief gebruik van MOX is tenslotte een rekenmodel gemaakt met een evenwichtskern waarbij jaarlijks 20 MOX-elementen worden geladen. Sommige daarvan worden, om modeltechnische redenen, nog een vijfde cyclus ingezet. Dat rekenmodel leidt tot een situatie van 88 MOX-elementen tegelijk in de reactor (73% MOX).

In tabel 4.4.1 zijn de alternatieve modellen aangegeven. De grijs gemarkeerde varianten zijn in detail geanalyseerd omdat daarmee de genoemde alternatieven: 26% MOX, 40% MOX, 53% MOX en 73% MOX worden aangegeven.

Deze modellen worden hier gehanteerd als 'referentiemodellen', hetgeen een gebruikelijke werkwijze biedt om veiligheids- en milieueffecten te onderzoeken. De term 'referentiemodel' betekent dat EPZ niet het voornemen heeft om exact de gemodelleerde kernontwerpen te gaan gebruiken. Concrete kernontwerpen worden bijvoorbeeld bepaald door de voorhanden voorraad aan splijtstofelementen en de gewenste bedrijfsvoering (zoals de lengte van de productiecycli, en daarmee het aantal nieuwe elementen).

Tabel 4.4.1 Overzicht van de alternatieven met diverse percentages MOX belading.

	Aantal MOX-elementen van de 28 per jaar	Aantal Uranium-elementen van de 28 per jaar	Resultierend percentage MOX (van totaal 121 elementen)	Ton natuurlijk uranium per GWe jaar	Ton SWU <sup>1)</sup> per GWe jaar	Ton verrijkt uranium per GWe jaar
huidige situatie	0	28	0%	170	126	19
alternatief 26% MOX	8	20	26%	126	93	14
voornemen 40% MOX	12	16	40%	102	76	11
alternatief 53% MOX	16	12	53%	80	59	9
alternatief 73% MOX	20	8	73%	49	34	5

1) *Separative work unit*: maat voor de scheidingsarbeid die nodig is om uranium te verrijken.

#### Samenvattend:

om na te gaan of de voorgenomen activiteit van maximaal 48 MOX-elementen (40%) vanuit de milieueffecten een optimale keuze is, zijn de volgende drie alternatieven onderzocht:

- alternatief 26%: een belading waarbij 32 van de 121 elementen MOX bevatten
- alternatief 53%: een belading waarbij 64 van de 121 elementen MOX bevatten
- alternatief 73%: een belading waarbij 88 van de 121 elementen MOX bevatten

In bovenstaande bestaat het complement van de in totaal 121 elementen in een kern uit uranium-elementen. Het onderzoek betreft onder meer de radiologische gevolgen op de omgeving, zowel bij normaal bedrijf als bij storingen en veronderstelde zware ongevallen. Milieueffecten in de splijtstofcyclus buiten de directe omgeving van de kerncentrale die beschouwd worden, zijn bijvoorbeeld de toename c.q. afname van de totale hoeveelheid plutonium (van belang voor het aspect proliferatie risico) en de toename c.q. afname van de benodigde mijnbouwactiviteit (van belang voor het aspect stralingsbelasting). Ook worden de effecten van transporten beschouwd.

#### c-ERU

Denkbare alternatieven voor de inzet van de voorgenomen hoeveelheid en respectievelijk de kwaliteit c-ERU zouden zijn:

- inzet van een hoger of lager percentage c-ERU-elementen in de reactorkern
- inzet van c-ERU met een hogere of lagere uranium-235 compensatie.

Uitgangspunt is dat het gecompenseerde ERU-element – om een gelijke eindopbrand te bereiken – zó ontworpen wordt dat de eigenschappen van het element overeenkomen met het nu gangbare splijtstofelement.

In paragraaf 2.5 werden de voor- en nadelen van een hogere en lagere verrijgingsgraad van ENU beschouwd. Geconcludeerd werd dat een verrijking van  $4,4 \pm 0,05$  gew % voor ENU met de bijbehorende waarden voor de opbrand de optimale keus is. Deze conclusie geldt ook voor c-ERU met een verrijgingspercentage van maximaal  $4,6 \pm 0,05$  gew % uranium-235.

Inzet van een hoger percentage c-ERU-elementen in de reactorkern leidt tot een lager percentage MOX-elementen in de kern. Dit heeft een negatieve invloed op één van de twee belangrijkste verschillen tussen verschillende alternatieven namelijk de proliferatie-aspecten. Indien er minder MOX in de kern wordt ingezet, wordt er netto minder plutonium verbruikt. Wordt er een lager percentage c-ERU in de kern ingezet dan leidt dit tot een verslechtering van het andere belangrijke milieuaspect namelijk de gevolgen voor de splijtstofcyclus en dan met name de mijnbouw. Bij de fabricage van c-ERU-

elementen wordt namelijk gebruik gemaakt van teruggewonnen uranium, waardoor er minder natuurlijk uranium uit de mijnen gedolven hoeft te worden. Niet alleen de milieubelasting rondom de mijnbouwlocaties verbetert door het gebruik van c-ERU, ook de stralingsbelasting van mijnbouwmedewerkers vermindert. Geconcludeerd kan worden dat, bij een maximering van de MOX inzet op 40% wegens stand der techniek, een inzet van maximaal 60% c-ERU in de kern een optimale keus is.

Concluderend zijn er geen zinvolle alternatieven voor het voorgenomen gebruik van gecompenseerd ERU om nader uit te werken.

#### **Meest Milieuvriendelijke Alternatief (MMA)**

Het meest milieuvriendelijke alternatief is een samenvoeging van die elementen uit de alternatieven die de beste mogelijkheden voor de bescherming van het milieu bieden. Dit alternatief zal in hoofdstuk 6 op basis van de milieu-effecten van de (deel-)alternatieven worden gedefinieerd.

# 5 Bestaande toestand van het milieu

# 5



De mogelijke radiologische milieueffecten van de huidige activiteit in de KCB zijn gekwantificeerd in een aantal analyses<sup>14</sup>. Hetzelfde is gebeurd voor de voorgenomen activiteit (zie Hoofdstuk 6). De gehanteerde methoden zijn conform de stand-der-techniek en de meest recente richtlijnen en kunnen verschillen van vroeger toegepaste methoden. Om de radiologische milieueffecten van de voorgenomen activiteit te kunnen vergelijken met die van de huidige activiteit zijn ook voor de huidige activiteit de analyses opnieuw uitgevoerd conform de stand-der-techniek en de meest recente richtlijnen.

In paragraaf 5.2 worden enkele relevante emissiegegevens bij normaal bedrijf vermeld en in paragraaf 5.3 wordt ingegaan op de situering van de KCB.

Een belangrijk onderwerp in dit hoofdstuk en in hoofdstuk 6 is 'veiligheid'. Dit is onlosmakelijk verbonden met het feit dat de belangrijkste beïnvloeding van het milieu bij kerncentrales zich voordoet bij ongevalsituaties. Paragraaf 5.4 behandelt dit onderwerp.

In de paragrafen 5.5, 5.6 en 5.7 worden de huidige radiologische dosisbijdragen gegeven die via lucht, water en bodem als gevolg van het bedrijven van de KCB ontstaan. In paragraaf 5.8 worden deze bijdragen gezamenlijk beschouwd en worden de effecten hiervan beoordeeld.

In paragraaf 5.9 wordt de huidige productie van radioactief afval besproken. Paragraaf 5.10

## 5.1 Inleiding

*De bestaande toestand van het milieu in een gebied met een straal van 10 km rond de KCB wordt beschreven voor de onderwerpen grondgebruik, veiligheid, luchtkwaliteit, waterkwaliteit en bodem. De onderwerpen geluid, geur, trillingen, licht en landschap worden niet beschreven omdat op voorhand duidelijk is dat de voorgenomen activiteit, inzet van c-ERU en MOX (met een maximale kernbelading van 40%), daar geen invloed op heeft.*

behandelt de non-proliferatie aspecten bij de huidige bedrijfsvoering. Tot slot worden in de laatste paragraaf van dit hoofdstuk de huidige transportrisico's beschreven.

Eventuele toekomstige (autonome) ontwikkelingen in het bestaande milieu zijn in dit MER niet meegenomen, omdat er geen sprake is van een vergunningsaanvraag.

## 5.2 Lozingen bij normaal bedrijf

Ten gevolge van diverse bedrijfsprocessen in de KCB worden radioactieve stoffen met de ventilatielucht meegevoerd. De lucht passeert een aantal filters en meeteenheden waarna de lucht gecontroleerd via de ventilatieschacht wordt geloosd. In Tabel 5.2.1 zijn de gemiddelde (kolom 2) en maximale (kolom 3) emissies van activiteit naar de atmosfeer over de periode 2000 t/m 2009 vermeld. Tevens zijn in deze tabel de vergunde emissies (kolom 4) volgens de geldende vergunning opgenomen.

Daarnaast vindt tijdens normaal bedrijf via batchgewijze afvoer van afvalwater emissie van radioactieve stoffen op het oppervlaktewater plaats. In Tabel 5.2.2 zijn de gemiddelde (kolom 2) en maximale (kolom 3) emissies van activiteit naar de Westerschelde over de periode 2000 t/m 2009 vermeld. Tevens zijn in kolom 4 van deze tabel de vergunde emissies volgens de geldende vergunning opgenomen.

<sup>14</sup> Onderbouwende Analyses van 4,4% ENU splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB, NRG, 2009.



Tabel 5.2.1 Gemiddelde, maximale en vergunde jaarlozingen in GBq per jaar (j) naar de atmosfeer in de periode 2000 t/m 2009.

	Gemiddelde emissie 2000-2009 [GBq/j]	Maximale emissie 2000-2009 [GBq/j]	Vergunde emissie [GBq/j]
Edelgassen	2.790	11.100	500.000
Aërosolen	0,0000201	0,00021	0,5
<sup>131</sup> I	0,020	0,123	5
Overige halogenen	0,0094	0,054	45
Tritium (als HTO <sup>1)</sup> )	256	320	2000
<sup>14</sup> C (als CO <sub>2</sub> )	118	156	300

<sup>1)</sup> HTO: getritieerd water; hierin is een waterstofatoom (H) vervangen door een tritiumatoom (3H). Tritium wordt verder afgekort als T.

Tabel 5.2.2 Gemiddelde, maximale en vergunde jaarlozingen in GBq per jaar naar de Westerschelde in de periode 2000 t/m 2009.

	Gemiddelde emissie 2000-2009 [GBq/j]	Maximale emissie 2000-2009 [GBq/j]	Vergunde emissie [GBq/j]
Tritium	7.120	8.860	30.000
β- en γ-activiteit	0,189	0,354	200
α-activiteit	0,000096	0,00049	0,200

Op basis van de lozingen tijdens normaal bedrijf kan de blootstelling van personen buiten de inrichtingsgrenzen van de KCB worden berekend. De maximale blootstelling als gevolg van lozing van radioactieve stoffen naar de Westerschelde betreft in principe, via de consumptie van zeevoedsel, de gehele bevolking. De maximale blootstelling als gevolg van lozingen naar de lucht betreft daarentegen de groep uit de bevolking op die locatie waar de hoogste concentratie in de lucht op leefniveau optreedt. De maximale blootstellingen ten gevolge van de gecontroleerde emissies worden in de paragrafen 5.5, 5.6 en 5.7 weergegeven.

### 5.3 Situering en grondgebruik

Het gebied dat in het MER beschouwd wordt omvat in hoofdlijnen het westelijk deel van Zuid-Beveland, het zuidoostelijk deel van Walcheren, een deel van de Westerschelde en een klein deel van Zeeuws-Vlaanderen (zie figuur 1.1). De locatie van de KCB is gelegen aan de zuid-oostzijde van het haven- en industriegebied Vlissingen-Oost ('Sloegebied'). Kenmerkend is daarbij verder de ligging aan de Westerschelde (zie verder paragraaf 5.6).

Ten noorden van de vestigingsplaats van de KCB ligt het Industrieterrain Vlissingen-Oost. De industrieën die grote hoeveelheden chemicaliën

en explosieve stoffen op hun terrein hebben, zijn geïnventariseerd en onderzocht ten aanzien van de mogelijke gevolgen voor de KCB. De hoofdvaargeul in de Westerschelde ten behoeve van de zeescheepvaart van en naar onder andere Antwerpen ligt op ongeveer 1,5 km afstand van de KCB. Uit de studie naar vervoer van gevaarlijke stoffen is gebleken dat het transport met het hoogste risico voor de KCB het LPG-transport over de Westerschelde betreft. De resultaten uit bovengenoemde inventarisatie en studie hebben laten zien dat de mogelijke invloed van de bij de industrieën aanwezige explosieve en toxische stoffen en het transport van deze stoffen per spoor en water in de omgeving, op het veilig functioneren van de KCB verwaarloosbaar is.

De internationale luchtverkeersroutes boven de provincie Zeeland liggen op voldoende hoogte en afstand van de KCB en leveren een minimaal risico op voor de centrale. Het lokale vliegverkeer is afkomstig van het vliegveld Midden-Zeeland, dat circa 10 km ten noorden van de centrale ligt. Voor dit vliegveld geldt een maximaal toelaatbaar vliegtuiggewicht van 6 ton. Het dichtstbijzijnde militaire vliegveld is Woensdrecht. Dit vliegveld is gelegen in de provincie Noord-Brabant op een afstand van circa 40 km in oost-noordoostelijke richting. Er lopen echter geen militaire vliegroutes boven de locatie Borssele. Zowel voor het burger als voor het militaire vliegverkeer is er geen

vliegverbod; wel geldt er het verbod om lager te vliegen dan 1500 voet (circa 450 m).

Op ongeveer 10 km afstand van de kerncentrale liggen de steden Vlissingen en Middelburg. De dichtstbijzijnde woonkern, gelegen op circa 1,4 km afstand van de centrale, is het dorp Borssele. Binnen een straal van 5 km liggen verder de dorpskernen 's-Heerenhoek en Nieuwdorp. Het totale aantal inwoners in het beschouwde gebied bedraagt circa 65.000 inclusief werknemers van de hierin gevestigde bedrijven. In het beschouwde gebied is akkerbouw de meest voorkomende vorm van grondgebruik.

Sinds 2003 is de vaste oeververbinding onder de Westerschelde operationeel. De aan- en afvoer-routes evenals de tunnel zelf, bevinden zich in het beschouwde gebied.

## 5.4 Veiligheid

### 5.4.1 Inleiding

#### Veiligheid bij normaal bedrijf en storingen

Ten aanzien van de veiligheid gedurende normaal bedrijf is het van belang dat de splijtstof-elementen bestand zijn tegen de mogelijk optredende mechanische en thermische belastingen. Daartoe worden aan de toegepaste materialen en de constructie van het splijtstofelement en het gedrag hiervan tijdens normaal bedrijf en storingen eisen gesteld. Volgens deze eisen dient het element bestand te zijn tegen de belastingen, zoals die kunnen optreden tijdens normaal bedrijf en storingen. Tevens wordt voor iedere kernbelading van KCB voor iedere bedrijfscyclus een formele veiligheidsanalyse van het reactorbedrijf uitgevoerd. Hierbij worden alle relevante reactorparameters met gekwalificeerde computercodes berekend. De resultaten van deze analyse worden na goedkeuring door de EPZ Veiligheidscommissie (RBVC) conform de vergunning ter goedkeuring voorgelegd aan de Kernfysische Dienst van VROM. Alleen wanneer aantoonbaar geen voorgeschreven veiligheidsgrenswaarden overschreden worden, mag de betreffende kernbelading door EPZ samengesteld worden. Hiermee is gewaarborgd dat elke nieuwe kernbelading voldoet aan de veiligheidslimieten die de overheid heeft voorgeschreven. Deze

reeds bestaande werkwijze zal bij toekomstig gebruik van c-ERU- en MOX-splijtstof gehandhaafd blijven.

#### Veiligheid met betrekking tot ongevallen

Het veiligheidsniveau van een kerncentrale wordt bepaald door de veiligheidseisen die aan het ontwerp ten grondslag hebben gelegen (de zogenaamde ontwerpbasis) en de wijze van bedrijfsvoering. Vanwege het specifieke karakter van een kerncentrale moet aan het ontwerp de eis gesteld worden dat de veiligheid voor de omgeving onder alle redelijkerwijs denkbare omstandigheden gewaarborgd moet zijn. In de nucleaire praktijk betekent dit, dat een aantal 'begingebourtenissen' (bijlage C) moet worden verondersteld, bijvoorbeeld het breken van een leiding of het optreden van een explosie van een gastanker op de Westerschelde. Vervolgens wordt (via ongevalsanalyses) aangetoond of met het ontwerp van de installatie de gevolgen van de veronderstelde begingebourtenissen worden beheerst. Beheersen betekent het halen van essentiële veiligheidsdoelen: afschakelen en afgeschakeld houden van de reactor, handhaven insluitfunctie en het afvoeren van vervalwarmte. Met een ongeval worden afwijkingen van normaal bedrijf of storingen bedoeld waarna het bedrijven van de installatie uit veiligheidstechnisch oogpunt niet zonder meer voortgezet kan worden, maar waarbij de afgifte van radioactieve stoffen binnen acceptabele limieten blijft. Een ontwerpungeval is een ongeval waartegen de kernenergiecentrale is ontworpen, overeenkomstig bepaalde ontwerp-criteria. Voor deze ontwerpungevallen geldt dat deze beheerst worden binnen de in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (art. 18.2) gestelde voorwaarden ten aanzien van o.a. doses bij bepaalde ongevalskansen (zie tabel 3.2.1).

Bij het ontwerp van een veilige kerncentrale dient rekening te worden gehouden met begingebourtenissen, die vanuit de installatie zelf (interne invloeden) en gebeurtenissen die van buitenaf op de installatie inwerken (externe invloeden).

Naast beheersing van de ontwerpungevallen is het van belang in kaart te brengen in hoeverre de gevolgen voor de omgeving van ontwerp-overschrijdende gebeurtenissen (buiten-ontwerp-ongevallen) kunnen worden beperkt. Bij de buiten-ontwerpungevallen moet worden voldaan

aan de in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (art. 18.3) gestelde voorwaarden ten aanzien van risico's voor individuen buiten de centrale (zie paragraaf 3.2.3.3).

Het veiligheidsrapport is de aangewezen plaats voor het beschrijven van de veronderstelde begingebourtenissen. In het veiligheidsrapport staan ook de bijbehorende uitgangspunten en randvoorwaarden, de reactie van de installatie (met andere woorden het ongevalsverloop) en de bewijsvoering dat de veiligheid inderdaad gewaarborgd is. De huidige ontwerpbasis van de kerncentrale Borssele is beschreven in het Veiligheidsrapport Kernenergie-eenheid centrale Borssele<sup>15</sup>.

Voor het beoordelen van de mate van beheersing van buiten-ontwerpongevallen en van beperking van de gevolgen ervan is de *Probabilistic Safety Assessment* (PSA) het aangewezen hulpmiddel. In de PSA worden namelijk de kans op kernschade en de radiologische beïnvloeding van de omgeving bepaald.

In de volgende paragrafen wordt ingegaan op de analytische onderbouwing (ongevalsanalyses) van de bescherming van de installatie tegen externe en interne invloeden, alsmede op de resultaten van de PSA voor de installatie. In het hierna volgend schema is te zien in welke paragrafen de lozingen die kunnen optreden bij bepaalde bedrijfssituaties, worden behandeld.

In paragraaf 5.4.5 wordt de onder alle omstandigheden vereiste onderkriticaliteit van de opgeslagen splijtstofelementen in het splijtstofopslagbassin (SOB) besproken.

## 5.4.2 Beschouwde ongevallen

In het ontwerp van de installatie zijn maatregelen voorzien ter voorkoming van ongevallen. Daarnaast is de installatie ontworpen voor de beheersing van de gevolgen van een aantal veronderstelde begingebourtenissen, die eventueel tot een ongeval zouden kunnen leiden.

Om aan te tonen dat de installatie bestand is tegen deze zogenaamde ontwerpongevallen worden thermohydraulische analyses uitgevoerd, waarbij de temperaturen en drukken worden bepaald die dan kunnen optreden.

De veronderstelde begingebourtenissen staan model voor incidenten met mogelijke radiologische consequenties voor de omgeving. De gevolgen van deze begingebourtenissen dienen te worden beheerst. Thermohydraulische en radiologische analyses leveren de bewijsvoering dat de gevolgen van de veronderstelde begingebourtenissen inderdaad door het ontwerp worden beheerst.

Een set van 21 begingebourtenissen is representatief en afdekkend voor KCB (zie Bijlage C). De gevolgen van deze begingebourtenissen zijn voor zowel de reactorinstallatie zelf als voor de omgeving geanalyseerd.

Tabel 5.4.1 Overzicht van de paragrafen waarin de lozingen die kunnen optreden bij bepaalde bedrijfssituaties worden behandeld.

Bedrijfssituatie	Beheersingsmethodiek	Beoordelingswijze	Paragraaf-behandeling
Storingen en ontwerpongevallen	Veiligheidssystemen	Ongevalsanalyses ontwerpongevallen	5.4.3
Buiten-ontwerpongevallen	Ongevalsmanagement en speciale systemen	PSA	5.4.4
Normaal bedrijf	Bedrijfssystemen	Beschouwing effecten reguliere lozingen	5.5 - 5.8

<sup>15</sup> EPZ, Veiligheidsrapport Kernenergie-eenheid centrale Borssele.

### 5.4.3 Ongevalsanalyses

#### 5.4.3.1 Inleiding

Aan het ontwerp van een kerncentrale ligt een groot aantal analyses ten grondslag. Dit betreft onder meer sterketechische berekeningen en beschouwingen van het neutronenfysische gedrag van de kern. Met behulp van ongevalsanalyses wordt aangetoond dat door het ontwerp de gevolgen van veronderstelde begingebourtenissen adequaat worden beheerst. De ongevalsanalyses worden veelal onderscheiden in thermohydraulische analyses (gedrag van de installatie) en radiologische analyses (gevolgen voor de omgeving).

#### 5.4.3.2 Kerninventaris

De grootste hoeveelheid in de installatie aanwezige radioactiviteit bevindt zich in de reactor kern. De verse splijstof bevat slechts een geringe hoeveelheid radioactiviteit, maar tijdens het bedrijf van de reactor wordt in de splijstof een grote hoeveelheid radioactiviteit gevormd. Deze radioactiviteit blijft in principe binnen de splijstofelementen opgesloten.

Daarnaast ontstaan radioactieve stoffen door activering van de constructiematerialen en van het hoofdkoelmiddel.

In bijlage D is een overzicht gegeven van de belangrijkste nucliden die aanwezig zijn in een evenwichtskern van verrijkt natuurlijk uranium (ENU) met een gemiddelde opbrand bij de huidige verrijkingsgraad van  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235. De gegeven hoeveelheid radioactiviteit is de hoeveelheid direct na afschakelen. Dit is de grootste hoeveelheid, door verval neemt die hoeveelheid af in de tijd. De gegeven nucliden zijn gekozen op basis van hun halveringstijd en hoeveelheid radioactiviteit. De kerninventaris is berekend met het computerprogramma ORIGEN.

Sedert 2003 zet EPZ ook splijstofelementen in met (niet gecompenseerde) *Enriched Reprocessed Uranium* (ERU) met een verrijkingspercentage gelijk aan de huidige verrijkingsgraad van  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235. De inhoud van de kern-inventaris wordt door de (gedeeltelijke) inzet van ERU niet zodanig beïnvloed dat er hierdoor verschillen ontstaan in de stralingsbelasting voor de omgeving en omwonenden die uitgaan boven de stralingsbelastingen bij de inzet van 100% gecompenseerd ERU (c-ERU). De resultaten voor

de stralingsbelastingen bij de inzet van 100% c-ERU zijn beschreven in hoofdstuk 6.

#### 5.4.3.3 Thermohydraulische analyses

Bij een thermohydraulische analyse wordt de reactorinstallatie in een computermodel 'vertaald'. Vervolgens wordt berekend hoe de respons van de installatie op de veronderstelde begingebourtenissen zal zijn. Het doel van dergelijke analyses is aan te tonen dat de gevolgen van veronderstelde begingebourtenissen worden beheerst.

De thermohydraulische analyses zijn uitgevoerd voor de begingebourtenissen uit bijlage C, volgens geldende voorschriften en met behulp van moderne, voor dat doel geschikte rekenprogramma's. Conservatieve aannames en uitgangspunten alsmede modellering van de installatie en processen vormen hierbij de basis. Conservatieve aannames en uitgangspunten zijn bijvoorbeeld:

- bedrijf met verhoogd vermogen
- negeren van het eerste afschakelsignaal van de reactor
- het meest effectieve regelement bevindt zich niet in de kern
- verhoogd of verlaagd vervalvermogen
- falen van het systeem dat de meest gunstige invloed op het ongevalsverloop heeft
- additioneel enkelvoudig falen van een component, die een functie vervult bij het beheersen van het ongeval
- het niet beschikbaar zijn van bedrijfssystemen
- noodstroomsituatie.

Waar relevant zijn behalve voor vermogensbedrijf ook ongevalssituaties beschouwd voor niet-vermogensbedrijf.

Met de thermohydraulische analyses is aangetoond dat de installatie na alle genoemde veronderstelde begingebourtenissen in een veilige toestand kan worden gebracht en gehouden. In het veiligheidsrapport zijn deze analyses en hun resultaten opgenomen.

#### 5.4.3.4 Radiologische analyses

##### Aanpak

In het algemeen leiden ontwerpgevallen niet tot lozingen van activiteit naar de omgeving. Het ontwerp is immers gebaseerd op het beheersen van ontwerpgevallen en dus het insluiten van de activiteit. Voor enkele ontwerpgevallen is echter gepostuleerd dat zij een lozing tot gevolg

hebben, die uitgaat boven de emissies als gevolg van de normale bedrijfsvoering. Met behulp van een radiologische analyse moet worden aangetoond dat de gevolgen van een dergelijke lozing beneden aanvaardbare grenzen blijven.

In een radiologische analyse worden de consequenties van een lozing voor de omgeving van de KCB berekend, alsmede de dosis die het gevolg is van externe bestraling door activiteit die zich in het reactorgebouw bevindt. (Het reactorgebouw fungeert dan als het ware als een radioactieve bron.) Er wordt bepaald hoeveel activiteit wordt geloosd en met behulp van een computermodel wordt berekend hoe deze activiteit zich in de omgeving verspreidt. Afhankelijk van de verspreiding van de activiteit worden de gevolgen voor de mensen in de omgeving berekend. Deze gevolgen worden uitgedrukt in twee waarden. Ten eerste de effectieve dosis (E), zijnde de maat voor het effect van de totale hoeveelheid straling die het menselijk lichaam over een bepaalde periode ontvangt. En ten tweede de schildklierdosis ( $H_{th}$ ), die specifiek betrekking heeft op de hoeveelheid straling die de schildklier ontvangt (dit is voornamelijk het gevolg van de opname van radioactief jodium). Representatieve begingebourtenissen die een radioactieve lozing tot gevolg

kunnen hebben, zijn gegeven in Bijlage C. Deze begingebourtenissen zijn verder geanalyseerd.

#### Berekening risico's en toetsing aan dosiscriteria

De resultaten van de bovengenoemde radiologische analyses van de representatieve veronderstelde begingebourtenissen zijn gegeven in tabel 5.4.1. Zowel de effectieve dosis (E) als de schildklierdosis ( $H_{th}$ ) zijn vermeld. Het betreft hier de maximale doses voor kinderen jonger dan 16 jaar op een afstand van 350 meter van de centrale. Het risico voor de groep eenjarige kinderen is het grootst. Daarom wordt voor de groep kinderen tot 16 jaar voor alle ontwerpgevallen de maximale dosis voor eenjarige kinderen berekend.

In de tabel is voor iedere begingebourtenis ook het dosiscriterium vermeld. Het dosiscriterium (E) is afhankelijk van de kans van optreden van de veronderstelde begingebourtenis (zie tabel 3.2.1). Ter vermijding van korte-termijn (deterministische) effecten geldt in alle gevallen een dosiscriterium van 500 mSv voor de schildklier ( $H_{th}$ ). Uit de tabel blijkt dat bij alle representatieve begingebourtenissen in ruime mate wordt voldaan aan de eisen met betrekking tot de betreffende dosiscriteria (zie paragraaf 3.2.3.2).

Tabel 5.4.2 Overzicht van de berekende 95-percentiel van de maximale doses [mSv] op 350 m van de centrale en de bijbehorende dosiscriteria.

Veronderstelde begingebourtenis		Berekende dosis bestaande situatie		Dosiscriteria	
		E(mSv)	$H_{th}$ (mSv)	E(mSv)	$H_{th}$ (mSv)
1.5.1	Langdurige uitval van de secundaire hoofdkoeling bij bedrijfslekage van stoomgeneratorpijpen.	0,024	0,466	0,4	500
7.1.2/ 7.2.2	Onbedoeld openen en weer sluiten/en open blijven van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder.	0,00080	0,0143	4	500
7.2.3	Breuk van de hoofdkoelmiddelleiding.	0,684	4,50	40	500
7.3.2.2	Bezwijken van stoomgeneratorpijpen met een noodstroomsituatie (kortstondig).	0,19	3,40	4	500
7.4.2	Lekkage van een meetleiding die hoofdkoelmiddel bevat buiten de veiligheidsomhulling.	0,12	2,42	4	500
8.2	Lekkage in een leiding van het afgassysteem.	0,0099	0,0111	0,04	500
8.4.1	Beschadigen van slijtstofelementen tijdens het hanteren.	0,0097	0,191	0,4	500
9.1.2	Gevolgen van een aardbeving op het reactorhulpgebouw.	0,20	0,717	4	500

#### 5.4.4 Probabilistic Safety Assessment (PSA)

##### 5.4.4.1 Inleiding

Een probabilistische veiligheidsanalyse (PSA) van een kerncentrale is een systematisch onderzoek naar de kans op optreden van kernbeschadiging en naar de gevolgen voor de omgeving. Daarbij behoren ook de reactiviteitongevallen<sup>16</sup>.

In een PSA worden de ongevallen behandeld, die kunnen leiden tot beschadiging (waaronder smelten) van de reactorkern alsmede tot lekkage of falen van de veiligheidsomhulling. Voor dergelijke ongevallen worden de consequenties van de radioactieve lozingen, die bij deze ongevallen optreden, berekend. Omdat deze ongevallen een zeer lage kans van optreden hebben, wordt de installatie hier niet op ontworpen. Deze ongevallen worden daarom buiten-ontwerpongevallen genoemd.

Als doelstellingen voor de ten behoeve van de KCB uitgevoerde PSA kunnen worden genoemd:

- Het bepalen van de kans op beschadiging van de kern.
- Het vaststellen van de dominante ongevalscenario's.
- Het nagaan in hoeverre de veiligheidsomhulling tijdens een ernstig ongeval voldoet aan zijn taak om de bij kernsmelten vrijkomende radioactieve stoffen te verhinderen buiten het reactorgebouw te geraken.
- Het bepalen van de risico's voor de omgeving.

Sinds 1990 beschikt EPZ voor de KCB over een PSA als ontwerp- en analysemethode. Omdat zowel de analysetechniek zich verder ontwikkelt als ook aanpassingen van de installatie plaatsvinden wordt deze PSA voortdurend overeenkomstig aangepast ('levend' gehouden). Dit betreft dan verbetering van de analysemodellen zelf, van de methodiek of aanpassing van het model aan wijzigingen van de installatie die binnen de geldende vergunning mogen worden doorgevoerd. Door toepassing van dit 'levend' KCB model blijven de resultaten die worden gepresenteerd ook 'levend' d.w.z. actueel. Als gevolg hiervan kunnen resultaten van dit MER enige verschillen vertonen met de resultaten van het voorgaande MER (2004), ook al worden in

principe dezelfde situaties beschouwd. Een van de actualisaties die sedert 2004 is doorgevoerd, is de aanpassing van het model aan de doorgevoerde technische wijzigingen van de centrale als gevolg van de laatste 10-jaarlijkse veiligheidsevaluatie. Om effecten van bepaalde wijzigingen zo zuiver mogelijk in beeld te kunnen krijgen, zijn de situaties die worden vergeleken steeds met identieke modellen geanalyseerd.

In de volgende paragraaf wordt kort ingegaan op de werkwijze bij het uitvoeren van een PSA. Vervolgens worden de resultaten van de opnieuw uitgevoerde PSA voor bedrijf met verrijkt natuurlijk uranium met een verrijkingsgraad van  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235 besproken.

##### 5.4.4.2 Werkwijze PSA

Een PSA begint met inventariseren van de mogelijke procesverstoringen. Net als bij de eerder beschreven ongevalanalyses van de ontwerpongevallen (zie paragraaf 5.4.3) gebeurt dat door begingebourtenissen te veronderstellen (N.b. dit is een andere set begin gebeurtenissen dan voor de ongevalsanalyses). Uit alle begingebourtenissen worden alleen die begingebourtenissen gekozen die leiden tot kernschade. Van deze begingebourtenissen worden alle mogelijke ongevalsverlopen bepaald die tot lozing van radioactieve stoffen kunnen leiden. Bij het bepalen van deze ongevalsverlopen spelen de in de kerncentrale aanwezige veiligheidssystemen, de mate van automatisering en het menselijk handelen een essentiële rol.

De probabilistische analyse van incidenten en processen die leiden tot ongevallen met consequenties voor het milieu is onderverdeeld in 3 niveaus:

- **Niveau 1:** Hierbij wordt de totale kans op ernstige beschadiging of smelten van de reactorkern bepaald.
- **Niveau 2:** Deze is er vooral op gericht te bepalen hoe groot de belasting op de veiligheidsomhulling wordt en wanneer de functie ervan verloren gaat. Belangrijk is dat de kenmerken van de ongevalslozingen nauwkeurig worden bepaald.

<sup>16</sup> Ongevallen waarbij de nucleaire kettingreactie te snel verloopt.

- **Niveau 3:** Uitgaande van de in de niveau 2 analyse bepaalde ongevalslozingen worden de radiologische gevolgen voor mens en milieu bepaald aan de hand van de verspreiding en depositie van radioactieve stoffen in de omgeving. Bij de mens worden de gevolgen onderscheiden in acute en late gezondheidseffecten. Samen met de kans op optreden resulteert dit in het risico.

#### 5.4.4.3 Resultaten PSA

##### Niveau 1

In de niveau 1 analyse zijn begingeburtenissen bepaald die een reactorafschakeling danwel een vermogensreductie of verlies van koeling kunnen veroorzaken en mogelijk leiden tot kernbeschadiging. Het betreft gebeurtenissen als gevolg van interne en externe invloeden en voor zowel vermogensbedrijf als niet-vermogensbedrijf. De reactie van de bedrijfs- en veiligheidssystemen op deze begingeburtenissen is door middel van allerlei combinaties van gebeurtenissen en falen van de systemen gemodelleerd tot verscheidene ongevalscenario's. De uiteindelijke waarde van de kans van optreden van kernbeschadiging, hierna de totale kernbeschadigingsfrequentie genoemd, als gevolg van interne en externe gebeurtenissen is berekend op  $2,12 \cdot 10^{-6}$  per jaar (waar ten behoeve van het voorgaande MER (2004) nog een waarde van  $4,3 \cdot 10^{-6}$  per jaar werd berekend).

##### Niveau 2

Omdat de tijdsduur tussen start ongeval en de eventuele lozing invloed heeft op de gevolgen van een ongeval is bij de berekening van lozingen in ongevalsituaties een indeling gemaakt in 4 lozingscategorieën:

- Vroege lozing (binnen 12 uur)
- Lozing op middenlange termijn (tussen 12 en 72 uur)
- Late lozing (na 72 uur)
- Geringe lozing (de veiligheidsomhulling blijft intact; er is sprake van een gepostuleerde continue lozing via normale ondichtheden).

De totale kernbeschadigingsfrequentie van  $2,12 \cdot 10^{-6}$  per jaar is als volgt onder te verdelen over de lozingscategorieën:

- 1% leidt tot vroege lozing
- 3% leidt tot lozing op middenlange termijn
- 75% leidt tot late lozing
- 21% leidt tot geringe lozing.

De analyse van het gedrag van de veiligheidsomhulling door middel van een beschouwing van alle mogelijke verlopen van elkaar opvolgende gebeurtenissen resulteert in 16 brontermgroepen. Deze brontermgroepen zijn geanalyseerd met betrekking tot thermohydraulisch gedrag van het reactorakoelsysteem en de veiligheidsomhulling. Hieruit volgt het tijdsverloop van de belangrijkste gebeurtenissen.

##### Niveau 3

In het Nederlandse risicobeleid zijn, zoals in paragraaf 3.2.3 is aangegeven, criteria voor het individueel risico en het groepsrisico vastgelegd. Het criterium voor het individueel risico bestaat uit het beschermen van individuele leden van de bevolking tot een aanvaardbaar niveau tegen het risico van fatale gezondheidseffecten als gevolg van straling. Het maximaal toelaatbare individueel risico voor overlijden als gevolg van het bedrijven van een bepaalde installatie bedraagt  $10^{-6}$  per jaar. Ten behoeve van de bepaling van het individueel risico wordt in overeenstemming met het Nederlandse risicobeleid als te beschouwen meest kwetsbare groep, de groep 1-jarige kinderen genomen.

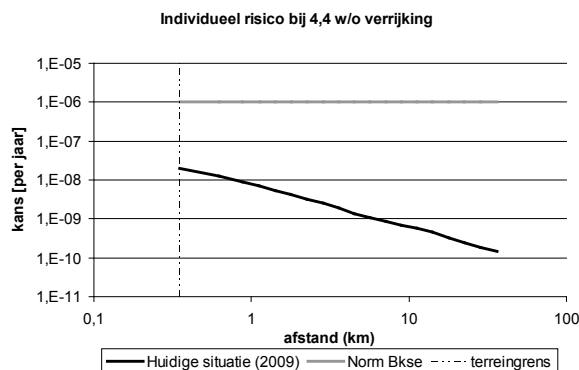
Tevens dient de bevolking als geheel te worden beschermd tot een aanvaardbaar niveau tegen het risico van maatschappelijke ontwrichting als gevolg van een ongeval (criterium voor het groepsrisico). Het groepsrisico is gedefinieerd als de kans op 10 of meer 'vroege' slachtoffers dat direct toegeschreven kan worden aan het ongeval. De kans moet lager zijn dan  $10^{-5}$  per jaar voor 10 slachtoffers, lager dan  $10^{-7}$  per jaar voor 100 slachtoffers, lager dan  $10^{-9}$  per jaar voor 1000 slachtoffers, etc. (zie ook paragraaf 3.2.3).

##### Individueel risico

Het individueel risico wordt berekend door het overlijdensrisico ten gevolge van korte en lange termijn effecten bij elkaar op te tellen. Het individueel risico is voor de kritieke groep (1-jarige kinderen) bepaald als functie van de afstand tot de KCB. Daarbij is aangenomen dat alleen het gebied buiten de terreingrens (350 meter tot de centrale) bewoond is. Verder zijn voor het berekenen van het individueel risico de uitvoering van de wettelijk verplichte voedselmaatregelen verondersteld. Deze maatregelen houden in dat landbouwproducten, die meer jodium, strontium, cesium en  $\alpha$ -stralers bevatten dan de vastgestelde grenswaarden, uit

de handel worden genomen. Andere mogelijke beschermingsmaatregelen zijn niet beschouwd. Het totale maximale individueel risico per jaar (voor 1-jarige kinderen) van alle brontermen tezamen is in Figuur 5.4.1 gepresenteerd als functie van de afstand tot de centrale. In de figuur is te zien dat het individueel risico afneemt naarmate de afstand tot de KCB groter wordt. Het totale maximale individueel risico, op de terreingrens (350 m van de ventilatieschacht) als gevolg van zowel vroege als late gezondheidseffecten voor alle brontermen tezamen is  $2,0 \cdot 10^{-8}$ /jaar (was  $3,5 \cdot 10^{-8}$ /jaar in het voorgaande MER (2004)) en ligt dus ruim beneden de maximaal toelaatbare waarde van  $10^{-6}$ /jaar. Door naast voedselmaatregelen ook de tegenmaatregelen 'evacuatie' en 'jodium-verstrekking' toe te passen kan het individueel risico nog verder gereduceerd worden.

**Figuur 5.4.1** Totaal maximaal individueel risico voor 1-jarige kinderen per jaar in de huidige situatie met voedselmaatregelen. Andere mogelijke beschermingsmaatregelen zijn niet verondersteld.



### Groepsrisico

Voor de bepaling van het groepsrisico is de omgeving van de KCB ingedeeld in segmenten. Elk segment bestaat uit een grondgebied dat gelegen is in een windroossector van  $45^\circ$  en begrensd is door 2 afstanden (figuur 5.4.2). Voor alle segmenten is voor elk van de brontermgroepen en voor een groot aantal representatieve weerssituaties het overlijdensrisico als gevolg van korte termijn effecten in verschillende maatgevende organen bepaald. Door de overlijdenskansen als gevolg van een bepaalde aandoening per segment te vermenigvuldigen met het aantal mensen dat in dat segment verblijft, krijgt men het aantal korte termijn sterftegevallen per bronterm en per segment bij een bepaalde weerssituatie als gevolg van die aandoening. Zowel aan de brontermgroepen als aan de weerssituaties zijn kansen van optreden verbonden.

**Figuur 5.4.2** Vereenvoudigde indeling in windroossectoren; locatie Borssele (figuur uit Milieujaarverslag 2004 EPZ).



De resultaten van de berekeningen van het groepsrisico worden gepresenteerd als een 'complementaire cumulatieve frequentie verdeling' (CCFD). In een dergelijke grafiek kan de kans worden afgelezen, dat het daarbij behorende effect wordt overschreden. In dit geval geeft de figuur weer hoe groot de kans (per jaar) is dat een bepaald aantal personen van de bevolking als gevolg van de mogelijke beschouwde ongevalsverlopen slachtoffer wordt. In Figuur 5.4.3 wordt het groepsrisico zoals berekend in de niveau 3 analyse weergegeven. Ook is het maximaal toelaatbare groepsrisico in de vorm van een schuine lijn in de figuur aangegeven. Bij de berekening van het groepsrisico is verondersteld dat directe maatregelen (zoals evacuatie en schuilen) niet binnen 24 uur worden uitgevoerd en dat 24 uur na de blootstelling personen in besmette gebieden worden gereloceed. Verder zijn voor de berekening van het groepsrisico de uitvoering van de wettelijk verplichte voedselmaatregelen verondersteld.

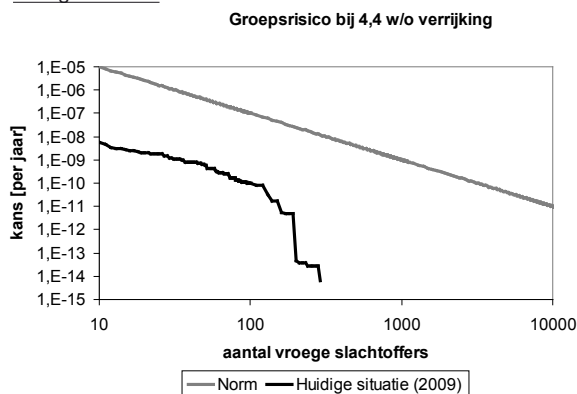
Figuur 5.4.3 toont aan dat het groepsrisico bij geen enkel aantal slachtoffers de grenswaarde-lijn ('norm') voor het toelaatbare groepsrisico overschrijdt.

### 5.4.5 Onderkriticaliteit in het splijfstofopslagbassin

In de splijstofelementen opgeslagen in het splijststofopslagbassin mag onder geen beding een kernreactie op gang komen. Er dient daarom aangetoond te worden dat te allen tijde de onderkriticaliteit van de splijstofelementen in het bassin is gewaarborgd. Er moet worden aangetoond



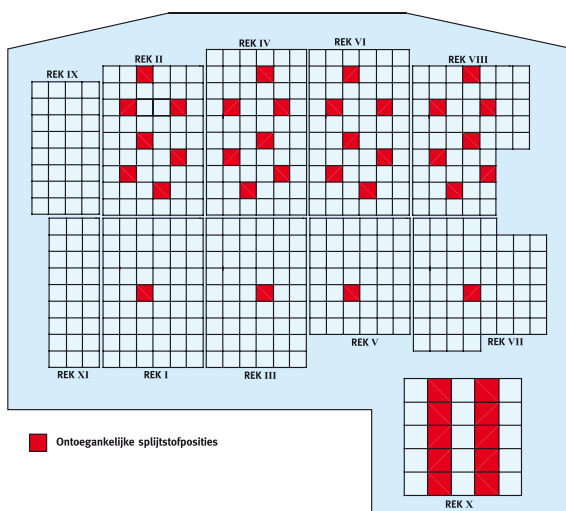
Figuur 5.4.3 Berekend groepsrisico vanwege de KCB in de huidige situatie.



dat de vermenigvuldigingsfactor van de neutronen,  $k_{eff}$ , (zie bijlage B) kleiner of gelijk is aan 0,95. Er wordt daarbij aangenomen dat alle posities in het bassin worden ingenomen door splijtstofelementen met de maximale verrijkingsgraad (4,4 + 0,05 gew % uranium-235) en dat er geen neutronenabsorberend boor-10 in het bassin aanwezig is.

In Figuur 5.4.4 is de huidige configuratie van het splijtstofopslagbassin weergegeven. Deze configuratie voldoet aan de kriticaliteitseisen.

Figuur 5.4.4 De huidige configuratie van het splijtstofopslagbassin van de KCB.



## 5.5 Luchtkwaliteit

### 5.5.1 Achtergrondconcentraties radioactieve nucliden en straling

Vanaf 1972, een jaar voordat de KCB in gebruik is genomen, zijn door KEMA (later NRG) maande-

lijks metingen verricht van de activiteitsconcentraties in de lucht en de stralingsniveaus in de omgeving van de centrale. De luchtkwaliteit wordt bewaakt door het meten van luchtstofmonsters op totaal- $\alpha$  en totaal- $\beta$  activiteit en de radionucliden jodium-131, cobalt-60 en cesium-137. In de afgelopen 10 jaar zijn geen verhogingen door het bedrijven van de installatie ten opzichte van de natuurlijke achtergrondconcentraties geconstateerd.

Het gemiddelde dosistempo van natuurlijke straling bedraagt in Nederland ongeveer  $40 \cdot 10^{-6}$  mSv/h (RIVM, 2003) met een variatie tussen  $10 \cdot 10^{-6}$  -  $70 \cdot 10^{-6}$  mSv/h ( $8,8 \cdot 10^{-2}$  -  $6,1 \cdot 10^{-1}$  mSv/j). De hoogste waarden worden gevonden boven plaatsen waar rivierklei of zeeleem is afgezet; de lagere waarden boven zandgronden. Daarboven komt een bijdrage als gevolg van de kosmische straling, die door het RIVM eveneens op  $40 \cdot 10^{-6}$  mSv/h ( $3,5 \cdot 10^{-1}$  mSv/j) wordt geschat. Het van nature aanwezige dosisequivalent bedraagt in Nederland derhalve  $50 \cdot 10^{-6}$  -  $110 \cdot 10^{-6}$  mSv/h ( $4,4 \cdot 10^{-1}$  -  $9,6 \cdot 10^{-1}$  mSv/j). De gemeten dosistemporen in de omgeving van de KCB vallen binnen deze range.

### 5.5.2 Bijdragen KCB aan de luchtkwaliteit

#### 5.5.2.1 Lozingen naar de lucht

In Tabel 5.2.1 zijn reeds de gemiddelde lozingen en de maximaal gemeten lozingen in de periode 2000-2009 vermeld, alsmede de in de bedrijfsvergunning opgegeven limietwaarden. Op basis hiervan zijn de gemiddelde en maximale dosisbijdrage via luchtgedragen activiteit berekend voor de belastingpaden inhalatie en externe straling vanuit de pluim. De resultaten zijn samengevat in kolom 2 respectievelijk kolom 3 van Tabel 5.5.1. Kolom 4 geeft de omgerekende dosis op basis van de vergunningslimiet. De vergunningslimieten van de lozingen uit Tabel 5.2.1 zijn hiertoe via verspreidingsberekeningen omgerekend naar dosisbijdragen. Uit de tabel blijkt dat de maximale lozing met  $9,4 \cdot 10^{-6}$  mSv/j ruim onder de vergunningslimiet van  $400 \cdot 10^{-6}$  mSv/j ligt.

Tabel 5.5.1 Berekende dosisbijdragen per jaar via luchtgedragen (inhalatie en pluim) activiteit gemiddeld over 2000-2009.

	Gemiddelde lozing [10 <sup>-6</sup> mSv/j]	Maximale lozing [10 <sup>-6</sup> mSv/j]	Omgerekende dosis o.b.v. vergunninglimiet [10 <sup>-6</sup> mSv/j]
Edelgassen	2,1	8,4	380
Aërosolen	0,000082	0,00085	2,0
<sup>3</sup> H	0,60	0,74	4,6
<sup>14</sup> C	0,093	0,12	0,24
<sup>131</sup> I	0,019	0,12	4,8
Overige halogenen	0,0010	0,0059	4,9
<b>Totaal</b>	<b>2,8</b>	<b>9,4</b>	<b>400</b>

### 5.5.2.2 Directe straling vanuit de KCB

Naast de dosisbijdragen als gevolg van emissies via de ventilatieschacht kunnen personen ook aan straling rechtstreeks uit de centrale blootstaan. De belangrijkste bronnen die bijdragen aan de externe stralingsdosis aan het hek zijn:

- activiteit in het reactorgebouw: dit betreft de inventaris van de reactorkern, activiteit in het hoofdkoelmiddel, activiteit in het splijststofopslagbassin en activiteit in de lucht van de installatieruimte
- activiteit in het afvalopslaggebouw: het betreft hier de activiteit in opgeslagen, voor afvoer naar COVRA, geconditioneerd afval.

Tabel 5.5.2 geeft de met behulp van afschermingsberekeningen geschatte maximale dosistempo aan de terreingrens.

Tabel 5.5.2 Het maximale dosistempo aan het hek als gevolg van externe bestraling door in de centrale aanwezige radioactieve stoffen.

	Dosistempo (mSv/jaar)
Reactorgebouw:	
■ kerninventaris	$<1 \cdot 10^{-13}$
■ splijststofopslagbassin	$3,7 \cdot 10^{-6}$
■ hoofdkoelmiddel ( <sup>16</sup> N)	$1,1 \cdot 10^{-4}$
■ lucht installatieruimte	$4,0 \cdot 10^{-10}$
Afvalopslaggebouw:	
■ geconditioneerd radioactief afval	$1,7 \cdot 10^{-2}$

In tabel 5.5.2 is het maximale dosistempo aan het hek weergegeven. Het is vrijwel ondenkbaar dat een persoon gedurende één jaar aan het hek van KCB verblijft. Bij het berekenen van

de actuele individuele dosis mogen daarom correctiefactoren (ABC-factoren) worden toegepast<sup>17</sup>. Deze correctiefactor bedraagt in dit geval 0,25. Daarmee komt de maximale dosis buiten de terreingrens door externe straling vanuit de KCB op  $4,3 \cdot 10^{-3}$  mSv/jaar. Dit is ruim lager dan de totale maximale jaardosis voor de bevolking van 0,1 mSv/jaar.

## 5.6 Waterkwaliteit

### 5.6.1 Algemene beschrijving

De Westerschelde is één van de laatste Nederlandse estuaria die niet door afsluitwerken is beïnvloed en die daardoor een hoge mate van natuurlijkheid heeft. Met name voor watervogels is de Westerschelde van internationaal belang, vooral omdat het estuarium dient als doortrek- en overwinteringsgebied. Daarnaast heeft de Westerschelde een belangrijke functie als kraamkamer voor vis, met name tong en garnalen. Door de getijdewerking zijn in het estuarium schorren, slikken en platen ontstaan, afgewisseld door diepe getijdegeulen. De Westerschelde heeft een groot aantal functies, met name: waterkeren, afvoer, hoofdtransportweg (het aantal scheepsbewegingen is circa 65.000 per jaar<sup>18</sup>), recreatievaart, oeverrecreatie, zwemwater, visserij, koelwater (onder andere voor de KCB).

In paragraaf 3.2.4 is reeds gewezen op de kwalificatie van de Westerschelde als Natura 2000 gebied ingevolge de Habitatrictlijn, respectievelijk de Vogelrichtlijn.

<sup>17</sup> Conform: Regeling van de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer van 16 januari 2002, nr. SAS/20012001144740, houdende analyse van de schadelijke gevolgen van ioniserende straling voor het milieu (Regeling analyse gevolgen ioniserende straling voor het milieu, mr-AGIS).

<sup>18</sup> Rijkswaterstaat dienst Zeeland, Scheepvaart in Zeeland 2006, RWS, 2007.

### 5.6.2 Biologische waterkwaliteit

Bij de KCB verschilt de biologische waterkwaliteit weinig van die van het Zeeuwse kustwater. Er is een goede zuurstofconcentratie, een fytoplankton (algen) diversiteit van ongeveer 50 soorten per m<sup>2</sup> en een zoöplankton diversiteit van ongeveer 45 soorten per m<sup>2</sup>. De afstand tussen KCB en de monding van de Westerschelde bedraagt ongeveer 10 km, terwijl de vloedweg ongeveer 15 km lang is. Bij eb passeert water de centrale dat bij vloed het middendeel van de Westerschelde had bereikt.

### 5.6.3 Radiologische waterkwaliteit

De radiologische waterkwaliteit bij de KCB wordt continu bewaakt door middel van de maandelijkse omgevingsmetingen. Hierbij worden de volgende compartimenten en radionucliden bemonsterd:

- Westerscheldewater op vier locaties: tritium en totaal- $\beta$  activiteit in water en totaal- $\beta$  activiteit in zwevend slib.
- wieren: cobalt-60, cesium-137 en jodium-131 activiteit.
- onderwatersediment: cobalt-60, cesium-137 en jodium-131.

In Tabel 5.6.1 is een overzicht gegeven van de gemiddelde activiteitsniveaus in de meetperiode 2000-2009. De gemeten concentraties zijn normale waarden voor Nederlands oppervlaktewater<sup>19</sup>.

Op basis van gemiddelde en maximale lozingen van radioactieve stoffen op de Westerschelde (kolom 2 respectievelijk kolom 3 van Tabel 5.2.2) zijn de dosisbijdragen voor de KCB berekend. Deze bijdragen zijn in Tabel 5.6.2 weergegeven, met in kolom 2 de gemiddelde en in kolom 3 de maximale waarde. Kolom 4 geeft de omgerekende dosis op basis van de vergunningslimiet. De vergunningslimieten van de lozingen uit Tabel 5.2.2 zijn hierbij via verspreidingsberekeningen omgerekend naar dosisbijdragen. In de tabel is te zien dat de dosisbijdragen ten gevolge van lozingen door de KCB ruim onder de daarvoor geldende vergunningslimiet blijven.

### 5.6.4 Ecologische effecten van radiologische bijdragen KCB

In Tabel 5.6.1 zijn de activiteitsniveaus in wieren uit de Westerschelde vermeld. Het betreft jodium-131, cesium-137 en cobalt-60 in de wiersoorten blaaswier (*Fucus vesiculosus*), gezaagde zee-eik (*Fucus serratus*) en knotswier (*Ascophyllum nodosum*). De wieren zijn verzameld in het uitlaatgebied van de KCB in de jaren 2000-2009. Deze gemeten activiteitsniveaus in biologisch materiaal hebben geen biologische consequenties voor de betreffende organismen en zijn te laag om via verdere opname in voedselketens concentraties te bereiken met biologische of ecologische consequenties.

Tabel 5.6.1 Gemiddelde activiteitsniveaus in de Westerschelde, gebaseerd op omgevingsmetingen in de periode 2000-2009.

	Westerscheldewater (Bq/l)		Wieren (Bq/kg)			Sediment (Bq/kg)		
	$\beta$ -activiteit	<sup>3</sup> H-activiteit	<sup>131</sup> I	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co	<sup>131</sup> I	<sup>137</sup> Cs	<sup>60</sup> Co
2,5 km NW	0,07	7,9						
0 km	0,06	7,8						
1,5 km ZO	0,06	7,7						
8,5 km O	0,06	7,5						
mengmonster			1,9	1,5	<3	< 0,3	1,2	0,4

Tabel 5.6.2 Individuele jaardosis ten gevolge van de gemiddelde en maximale lozingen van activiteit met het afvalwater en op basis van de gemiddelde consumptie van zeevoedsel uit de Zeeuwse kustwateren in de periode 2000-2009.

	Gemiddelde lozing [10 <sup>-6</sup> mSv/j]	Maximale lozing [10 <sup>-6</sup> mSv/j]	Omgerekende dosis o.b.v. vergunningslimiet [10 <sup>-6</sup> mSv/j]
<sup>3</sup> H	6,2·10 <sup>-3</sup>	7,8·10 <sup>-3</sup>	2,6·10 <sup>-2</sup>
$\beta/\gamma$ -activiteit	1,2·10 <sup>-2</sup>	2,4·10 <sup>-2</sup>	1,4·10 <sup>1</sup>
$\alpha$ -activiteit	0,3·10 <sup>-5</sup>	1,5·10 <sup>-5</sup>	6,0·10 <sup>-3</sup>
Totaal	1,8·10 <sup>-2</sup>	3,2·10 <sup>-2</sup>	1,4·10 <sup>1</sup>

<sup>19</sup> DG Rijkswaterstaat, Watersysteemverkenningen: *Radionuclides in Dutch Watersystems Research Project*, RWS, 1996.

## 5.7 Bodem: depositie van radioactieve stoffen

De belangrijkste weg waarlangs eventuele besmetting van de bodem kan plaatsvinden is door depositie (op de bodem neerkomen) van radioactiviteit, die via de ventilatieschacht wordt geloosd en vervolgens via de lucht wordt verspreid. Andere mogelijke besmettingspaden zijn irrigatie van landbouwgebieden met besmet oppervlaktewater of overstroming van buitendijks gelegen gronden. Aangezien het water van de Westerschelde brak is, en dus niet voor irrigatie wordt toegepast, en de buitendijkse gebieden niet voor landbouwdoeleinden worden gebruikt, kunnen de twee laatstgenoemde besmettingspaden buiten beschouwing worden gelaten. In Tabel 5.7.1 zijn voor de gemiddelde en de maximale waarden van de luchtlozingen in de periode 2000-2009 (zie Tabel 5.2.1) de dosisbijdragen ten gevolge van de gedeponeerde activiteit vermeld (kolom 2 respectievelijk kolom 3). De vergunningslimieten van de lozingen uit Tabel 5.2.1 zijn hierbij via verspreidingsberekeningen omgerekend naar dosisbijdragen (kolom 4). In de tabel is te zien dat de dosisbijdragen ten gevolge van depositie van radioactieve stoffen door de KCB ruim onder de daarvoor geldende vergunningslimiet blijven.

Tabel 5.7.1 Jaarlijkse dosisbijdragen KCB als gevolg van ingestie en externe bestraling van gedeponeerde activiteit, inclusief direct door de vegetatie opgenomen  $^3\text{H}$ - en  $^{14}\text{C}$  over 2000-2009 op basis van de gemiddelde en maximale lozingen.

	Gemiddelde lozing [ $10^{-6}$ mSv/j]	Maximale lozing [ $10^{-6}$ mSv/j]	Omgerekende dosis o.b.v. vergunningslimiet [ $10^{-6}$ mSv/j]
Aërosolen	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^3$
$^3\text{H}$	$5,6 \cdot 10^{-1}$	$7,1 \cdot 10^{-1}$	4,5
$^{14}\text{C}$	$1,9 \cdot 10^1$	$2,5 \cdot 10^1$	$5,0 \cdot 10^1$
$^{131}\text{I}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^1$
Overige halogenen	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^1$
<b>Totaal</b>	<b><math>2,0 \cdot 10^1</math></b>	<b><math>2,7 \cdot 10^1</math></b>	<b><math>2,0 \cdot 10^3</math></b>

Tabel 5.8.1 Dosisbijdragen via de diverse belastingspaden als gevolg van lozingen door KCB.

Blootstellingspad	Dosis ( $10^{-6}$ mSv/j)			Meest belastende nucliden
	Gemiddelde lozing 2000-2009	Maximale lozing 2000-2009	Waarde op basis van Vergunninglimiet	
<b>A LUCHTLOZINGEN</b>				Edelgassen $^{60}\text{Co}$ $^3\text{H}$ , $^{131}\text{I}$ $^{14}\text{C}$
Extern pluim	2,1	8,4	$3,8 \cdot 10^2$	
Extern bodem	$5,8 \cdot 10^{-2}$	1,3	$2,0 \cdot 10^3$	
Inwendig inhalatie	$7,1 \cdot 10^{-1}$	1,0	$1,5 \cdot 10^1$	
Inwendig ingestie	$1,9 \cdot 10^1$	$2,7 \cdot 10^1$	$7,2 \cdot 10^1$	
<b>B WATERLOZINGEN</b>				$^{60}\text{Co}$
Inwendig ingestie	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^1$	
<b>TOTAAL (afgerond)</b>	<b><math>2,2 \cdot 10^1</math></b>	<b><math>3,8 \cdot 10^1</math></b>	<b><math>2,5 \cdot 10^3</math></b>	

<sup>20</sup> Het SN is een niveau waaronder de invulling van het ALARA-beginsel vanuit de overheid geen prioriteit heeft en de verantwoordelijkheid voor het toepassen hiervan bij de vergunninghouder wordt gelegd. De vergunninghouder heeft de verplichting om het ALARA-beginsel in de praktijk door te voeren.

## 5.8.2 Gemiddelde stralingsbelasting in Nederland

Verschillende stralingsbronnen leveren een bijdrage aan de stralingsbelasting van een individu. In Tabel 5.8.2 is een opsomming gegeven van alle bronnen die een bijdrage leveren aan de gemiddelde stralingsbelasting van een lid van de Nederlandse bevolking. Deze gegevens zijn afkomstig uit het RIVM-rapport *'Ionising Radiation Exposure in the Netherlands'*<sup>21</sup>. Voor de bijdrage van de KCB is de in Tabel 5.8.1 gegeven dosisbijdrage ten gevolge van de gemiddelde jaarlijkse lozingen over de periode 2000-2009 genomen.

Tabel 5.8.2 Gemiddelde stralingsbelasting in Nederland (RIVM, 2003) en bijdrage in de woonomgeving nabij de KCB.

Bron	Dosis-bijdrage [mSv/j]
Radon en thoron in het binnenmilieu	0,82
Medische diagnostiek	0,59
Inwendige bestraling door nat. radionucliden	0,37
Technologisch verhoogde natuurlijke straling <sup>2</sup>	0,36
Kosmische straling	0,27
Terrestrische straling	0,04
Fall out (Chernobyl)	0,02
Kerncentrale Borssele (jaargemiddeld)	0,00002
<b>Totaal</b>	<b>2,5</b>

De totale stralingsbelasting bedraagt 2,5 mSv/jaar, voornamelijk tengevolge van ioniserende straling van natuurlijke oorsprong, inclusief technologisch verhoogde straling. Bijdragen als gevolg van menselijk handelen zijn in het algemeen zeer laag, met uitzondering van de medische toepassingen. De bijdrage van de KCB in het geheel is uitermate gering (minder dan 0,001%).

## 5.8.3 Gevolgen van straling en toetsing aan dosiscriteria

Bij de lage doses en lage dosistempo's waarvan in het onderhavige geval bij normaal bedrijf sprake is, treden geen directe effecten op. Er kunnen echter wel gemuteerde cellen ontstaan, die later kunnen uitgroeien tot een tumor (late effecten). De kans van optreden van deze late effecten wordt gegeven door de

risicofactor. Internationaal wordt aangenomen dat de kans op overlijden aan een door straling geïnduceerde tumor 0,05 per 1000 mSv effectieve dosis bedraagt (Bs, 2001). Deze risicofactor is afgeleid voor relatief hoge doses en dosistempo's, maar wordt veiligheidshalve ook in het lage dosisgebied gehanteerd. Door de Nederlandse overheid is aangegeven dat doses beneden 0,001 mSv/jaar (voor lucht- en waterlozingen), vanwege het geringe risico als secundair mogen worden beschouwd (zie voetnoot 20). De maximale individuele doses afkomstig van reguliere lozingen door KCB liggen hier met 0,00002 mSv/jaar (gemiddeld in de periode 1998-2007) ruimschoots onder. Het mogelijke overlijdensrisico ten gevolge van deze lozingen bedraagt  $1.10^{-9}$ /jaar.

## 5.9 Radioactief afval en (gebruikte) splijtstoffen

Een kerncentrale produceert gedurende het bedrijf een bepaalde hoeveelheid radioactief afval. Dit radioactieve afval kan onderverdeeld worden in gasvormige, vloeibare en vaste stoffen. De gebruikte splijtstofelementen worden meestal als een aparte categorie beschouwd.

De radioactieve stoffen in gassen en vloeistoffen worden zo goed als mogelijk door reiniging en filtering verwijderd, waardoor enkel kleine hoeveelheden activiteit worden afgevoerd naar de atmosfeer en de Westerschelde, zie paragrafen 5.5 en 5.6. Deze hoeveelheden voldoen aan de limieten uit de vergunning. Het vaste afval (inclusief genoemde filters) wordt verpakt en afgevoerd naar een centrale opslag van de COVRA (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval).

Ten behoeve van de elektriciteitsproductie van de KCB moet jaarlijks een aantal verse (nieuwe) splijtstofelementen worden aangevoerd en ongeveer een gelijk aantal opgebruikte splijtstofelementen worden afgevoerd. Aanvoer vindt plaats over de weg, terwijl afvoer over de weg, (eerste deel) en over het spoor (tweede deel van het traject) plaatsvindt. Hierbij bevinden de splijtstofelementen zich in type-goedgekeurde containers. Voor deze transporten worden vergunningen afgegeven door het ministerie van VROM.

<sup>21</sup> RIVM, *Ionising Radiation Exposure in the Netherlands*. Rapport nr. RIVM 861020002/2003, 2003.

Verse splijtstofelementen vormen voor wat betreft de transporten een verwaarloosbaar radiologisch risico. Het ontwerp van de transportcontainers is er vooral op gericht voldoende onderkriticiteit te garanderen. Het optreden van een nucleaire kettingreactie is dan ook in alle situaties uitgesloten. Daarnaast is ervoor gezorgd dat tijdens transport de effecten van een eventueel verkeersongeval op de structuur van de splijtstofelementen worden beperkt (bedrijfseconomisch risico). Er gelden veilige limietwaarden voor het dosistempo aan de buitenkant van de transportcontainers, maar voor verse splijtstof ligt het feitelijke dosistempo altijd ver onder deze limieten.

De splijtstofelementen worden na enige jaren gebruik definitief verwijderd uit het reactorvat en gedurende een aantal jaren opgeslagen in het splijtstofopslagbassin. In deze tijd neemt de activiteit van de elementen door radioactief verval af. De duur van deze afkoelperiode wordt bepaald door de maximaal toegelaten warmtebelasting van de aftransportverpakkingen.

Na de afkoelperiode in het splijtstofopslagbassin worden de elementen afgevoerd voor verwerking met het oog op recycling. Het transport vindt plaats in speciaal voor dit doel ontworpen transportcontainers. Deze containers zijn op basis van richtlijnen van het IAEA ontworpen en worden op grond van formele veiligheidsrapporten voor gebruik gecertificeerd. De transportcontainers voor gebruikte splijtstofelementen worden zodanig ontworpen dat

- de straling wordt afgeschermd tot beneden het wettelijk vereiste niveau;
- de door de elementen ontwikkelde warmte wordt afgevoerd;
- de onderkriticiteit wordt gegarandeerd;
- deze bestand zijn tegen een transportongeval, om uit te sluiten dat er radioactieve stoffen in het milieu terecht komen.

De splijtstofelementen worden afgevoerd naar de opwerkingsfabriek van AREVA NC in La Hague (Frankrijk) waar de gebruikte splijtstof wordt gescheiden in waardevolle, herbruikbare materialen (uranium en plutonium) en radioactieve afvalstoffen, die worden verpakt met het oog op veilige opslag en geologische eindberging. Iedere jaarlijkse bedrijfscyclus worden gemiddeld 28 splijtstofelementen definitief uit de kern

verwijderd. De precieze aantallen zijn afhankelijk van de details van het kernontwerp voor die specifieke splijtstofwisseling. De meeste gebruikte elementen zijn bij definitieve ontlading gedurende vier of vijf jaar in de kern geweest. De nuclideninventaris van de ontladen splijtstofelementen is gegeven in bijlage E. Hierin wordt per splijtstofelement aangegeven wat de activiteit (Bq) van ieder nuclide is. Dit is gedaan voor de splijtstofelementen op het moment van ontladen uit de kern (drie dagen na afschakeling van de reactor) en op het moment dat de elementen kunnen worden afgevoerd uit het splijtstofopslagbassin (circa 500 dagen na afschakeling van de reactor). Hierbij zijn de belangrijkste nucliden met betrekking tot radiologische effecten in de tabel opgenomen.

Het radioactieve afval dat na recycling van de splijtstoffen uranium en plutonium overblijft, wordt op basis van gesloten verdragen<sup>22</sup> tussen Nederland en Frankrijk, naar Nederland teruggevoerd en wordt uiteindelijk opgeslagen bij COVRA. Dit afval bestaat uit twee typen verpakkingen:

- Een 180 liter standaard vat gevuld met circa 160 liter verglaasde hoog radioactieve kernsplijtingsproducten. Als gevolg van de hoge concentratie aan radioactieve stoffen produceren deze vaten aanvankelijk nog warmte, ongeveer 1 kW per stuk. Ze moeten daarom gedurende de eerste jaren na productie gekoeld worden.
- Een 180 liter standaard vat dat voornamelijk gevuld is met samengeperste metallische resten van de splijtstofelementen en samengeperst technologisch afval van het opwerkingsproces. Deze 'compacted residues' produceren geen warmte.

COVRA heeft de vergunningen en voorzieningen om beide soorten afval op te slaan. Jaarlijks resulteert het recyclen van de KCB splijtstofelementen in La Hague in de productie van circa 8 tot 9 vaten met kernsplijtingsafval in glas ( $2,7 \cdot 10^{-3}$  liter radioactief glas per GWe.jaar) en ongeveer 8 vaten ( $2,5 \cdot 10^{-3}$  liter per GWe.jaar) met de gecompacteerd overige resten. Per afvaltransport worden 20 tot 48 vaten van La Hague naar COVRA vervoerd (afhankelijk van het type gebruikte transportverpakking).

<sup>22</sup> Notawisseling van 29-05-1979; trb 1979-116; notawisseling van 09-02-2009; trb 2009-41.

## 5.10 Risico's inzake de verspreiding van kernwapens

Kernenergie voor de productie van elektriciteit wordt voornamelijk in verband gebracht met risico's inzake de verspreiding van kernwapens wegens het gebruik van nucleaire materialen, zoals verrijkt uranium en plutonium.

Allereerst dient te worden opgemerkt dat de KCB volledig onder het toezicht valt van de EU (Euratom) en het Internationale Atoom Energie Agentschap te Wenen (IAEA). Dit toezicht omvat onder andere de bewaking van de gebruikte splijtstoffen. Het toezicht door deze organisaties vloeit voort uit het Euratomverdrag (1957) en het Non-proliferatieverdrag (1968) met bijbehorende Waarborgenovereenkomst en Additioneel Protocol. In het kader van dit toezicht levert EPZ aan deze organisaties relevante informatie betreffende de aanwezige splijtstoffen en vinden regelmatige inspecties in de installatie plaats door het IAEA in samenwerking met Euratom. De meeste installaties waar EPZ haar gebruikte splijtstof(elementen) laat bewerken bevinden zich in Frankrijk. Dit land heeft haar commerciële splijtstofcyclusinstallaties, waaronder de opwerkingsfabriek in La Hague en de MELOX splijtstoffabriek, eveneens onder volledig Euratom en IAEA toezicht geplaatst<sup>23</sup>. Verder laat EPZ opgewerkte splijtstoffen buiten het Euratom gebied bewerken. Het betreft de verrijking van opgewerkt uranium in Rusland. Daarbij blijven ook deze splijtstoffen volledig onder IAEA toezicht. De veiligheid van uraniumsplijtstof is gewaarborgd door uitvoering van alle bepalingen van het 'Verdrag voor de Fysieke Beveiliging van Nucleaire Materialen en Nucleaire Installaties', waar alle landen van de Europese Unie bij aangesloten zijn<sup>24</sup>. Hierdoor kan er op vertrouwd worden dat EPZ's splijtstoffen door de cyclus heen beveiligd worden overeenkomstig internationaal vastgestelde eisen.

De KCB gebruikt nu uranium met een verrijkingsgraad van  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235. Plutonium is momenteel niet in verse splijtstofelementen aanwezig. Gebruikte elementen bevatten circa 1 gew % plutonium. Kort na ontlading uit de reactor is dit plutonium

'beschermd' door de hoog-radioactieve splijttingsproducten in de gebruikte splijtstof. Deze 'zelf beschermende' functie van de splijtstof neemt in de loop van de tijd af door radioactief verval. Opgeslagen gebruikte splijtstofelementen blijven onder Euratom en IAEA toezicht.

Om het plutonium uit de gebruikte splijtstof beschikbaar te kunnen maken voor nuttig hergebruik, laat EPZ de splijtstof opwerken in de opwerkingsfabriek van La Hague. Dit plutonium heeft een typische samenstelling zoals aangegeven in Tabel 5.10.1.

Tabel 5.10.1 Gemiddelde hoeveelheden plutonium in jaarlijks te ontladen splijtstofelementen in de bestaande situatie in kg/jaar.

Pu-238	2,5
Pu-239	48
Pu-240	23
Pu-241	12
Pu-242	8,0
<b>Totaal</b>	<b>93</b>

In de opwerkingsfabriek in La Hague wordt het geproduceerde plutonium in veilige opslag gehouden tot het moment waarop het voor de productie van MOX-splijtstof gebruikt gaat worden. De productie van MOX vindt ook op Frans grondgebied plaats.

## 5.11 Huidig transport van splijtstofelementen bij KCB

### 5.11.1 Overzicht van de risico's

Transport van splijtstofelementen heeft, naast de conventionele milieueffecten van emissies van CO<sub>2</sub>, fijn-stof en geluidsoverlast, ook blootstelling aan ioniserende straling tot gevolg. In het kader van dit MER zal bij de beoordeling van de milieueffecten van de transporten alleen dit laatste milieueffect worden beschouwd omdat het aantal transportkilometers verbonden met de splijtstofcyclus in verhouding tot het totale vrachttransport over de weg verwaarloosbaar is.

<sup>23</sup> IAEA Annual Safeguards Implementation Statement 2008.

<sup>24</sup> Besluit 2007/513/Euratom van 10 juli 2007 terzake van de toetreding tot de Convention on the Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities.

# 5

De risico's van het transport van de splijtstofelementen kunnen onderscheiden worden in risico's verbonden met de aanvoer van verse splijtstofelementen, de afvoer van gebruikte splijtstofelementen en het terugtransport van het kernsplijttingsafval voor tussen- of eindberging in Nederland. Omdat de risico's van afvaltransporten en transporten van gebruikte splijtstof vergelijkbaar zijn zullen deze niet apart behandeld worden.

Aan het ontwerp van de transportcontainers zijn stringente, internationaal aanvaarde eisen met betrekking tot het bestand zijn tegen externe belastingen gesteld. Door middel van testen, waaronder botsproeven en langdurige blootstelling aan brand, is aangetoond dat genoemde externe belastingen niet leiden tot het vrijkomen van stoffen uit de containers. Het ontwerp van de transportcontainers voorkomt dus emissies van radioactieve en andere toxische stoffen.

## 5.11.2 Dosis bij regulier transport

Bij regulier, dus ongevalvrij, transport is de stralingsdosis die personen ontvangen evenredig met de blootstellingduur en het dosistempo. Bij elk transport is het dosistempo op 2 meter afstand van de buitenzijde van het transportvoertuig op 0,1 mSv/uur verondersteld. Het dosistempo direct aan de buitenzijde van het transportvoertuig is gelijk verondersteld aan 2 mSv/uur. Deze conservatieve veronderstellingen gaan uit van wettelijk maximaal toegestane dosistempowaarden voor transport van radioactieve stoffen die in de praktijk niet worden bereikt.

### Aanvoer van verse splijtstofelementen

In de huidige praktijk worden jaarlijks 28 elementen in de kern vervangen door verse

elementen. Deze elementen worden elk jaar aangevoerd door middel van 7 splijtstoftransporten. Voor dit aantal transporten is voor omwonenden, treinreizigers en weggebruikers de maximale jaarlijkse individuele dosis bij regulier transport van verse uranumelementen bepaald (zie Tabel 5.11.1). De dosis van EPZ-medewerkers is bepaald middels meetwaarden van persoonlijke dosimeters van het personeel van EPZ. Hieruit blijkt dat de collectieve dosis voor een tiental medewerkers van EPZ, betrokken bij de aanvoer van uranumelementen, minder dan 1 mens mSv/jaar bedraagt. Deze collectieve dosis ligt zeer ruim onder de individuele dosislimiet van 20 mSv/j voor iedere radiologisch werker.

Uit Tabel 5.11.1 kan geconcludeerd worden dat de individuele dosis van omwonenden en weggebruikers bij regulier aantransport van verse uranumelementen ruim lager is dan de dosislimiet voor leden van de bevolking zoals opgenomen in het Besluit stralingsbescherming, te weten 0,1 mSv/jaar.

### Afvoer van gebruikte splijtstofelementen en afvaltransporten

Voor regulier transport van gebruikte uranumelementen is aangenomen dat dit transport zesmaal<sup>25</sup> per jaar plaatsvindt. De splijtstofelementen worden vervoerd in daarvoor gecertificeerde containers, type TN17/2 (type B-verpakking), die maximaal 7 elementen per container zullen bevatten.

Voor omwonenden, weggebruikers en treinreizigers is met behulp van deze gegevens de maximale jaarlijkse dosis bij regulier transport van gebruikte uranumelementen bepaald (zie Tabel 5.11.2). De dosisbelasting voor EPZ-werknemers is bepaald op basis van EPZ ervaringen. Bekend is dat de collectieve dosis

Tabel 5.11.1 Overzicht van de conservatief bepaalde maximale jaarlijkse individuele dosis (mSv per jaar) bij regulier aantransport van verse uranumelementen.

Soort transport	Aantal transporten per jaar	Kritieke groep		
		Omwonenden	Treinreizigers	Weggebruikers
Aanvoer uranium	7	$2,2 \cdot 10^{-5}$	n.v.t. <sup>1)</sup>	$7,0 \cdot 10^{-4}$

<sup>1)</sup> Er vindt geen transport per spoor plaats.

<sup>25</sup> Het vermelde aantal transporten biedt de mogelijkheid om de actuele achterstand in transporten weg te werken. Zodra de achterstand weggewerkt is dienen er jaarlijks 28 elementen afgevoerd te worden, dus vier containers per jaar.



van een twaalfstal medewerkers ongeveer 2-3 mens mSv per container bedraagt. Dit resulteert bij 18 containers per jaar<sup>26</sup> in een jaarlijkse collectieve dosis van 36-54 mens mSv (zie ook voetnoot 25). Deze collectieve dosis bestaat vooral uit de bijdrage van de personen die smeerprouven uitvoeren. Dit zijn verplichte prouven om de buitenkant van de container te controleren op radioactieve besmettingen. Hierbij wordt enige tijd dicht op de container gewerkt. Medewerkers van overslagbedrijven, die elders op de transportroute handelingen met containers uitvoeren, zullen lagere doses ontvangen dan de EPZ medewerkers. In de praktijk blijkt de dosis van deze medewerkers onder de detectiegrens van hun persoonlijke dosimeters te liggen.

Uit Tabel 5.11.2 kan geconcludeerd worden dat de individuele dosis van omwonenden en treinreizigers bij het reguliere aftransport van gebruikte uranium-elementen ruim lager is dan de dosislimiet voor leden van de bevolking zoals opgenomen in het Besluit stralingsbescherming, te weten 0,1 mSv/jaar.

### 5.11.3 Risico's bij transportongevallen

Voor de beschouwing van een ongeval tijdens transport zijn drie scenario's beschouwd:

- ongevallen met een onbeschadigde container.
- ongevallen met beschadigde container zonder lozing.
- ongevallen met beschadigde container met lozing.

De risico's als gevolg van een ongeval met een onbeschadigde container zijn het grootst. Reden hiervoor is ondermeer dat de kans op een ongeval met een onbeschadigde container vele malen groter is dan de kans

op een ongeval met lozing. In Tabel 5.11.3 is een overzicht weergegeven van de maximale risico's op late sterfte per jaar voor omwonenden, transportmedewerkers, treinreizigers en weggebruikers ten gevolge van transportongevallen met verse en gebruikte uraniumelementen. Uit Tabel 5.11.3 blijkt dat het individueel risico van late sterfte door een stralingsdosis ontvangen als gevolg van transportongevallen met uraniumelementen kleiner is dan het maximaal toelaatbare risico ( $10^{-6}$  per jaar).

Tabel 5.11.3 Overzicht van de conservatief bepaalde risico's van late sterfte ten gevolge van transportongevallen bij transporten met uraniumelementen.

Kritieke groep	Maximaal individueel risico per jaar
Omwonenden/ transportmedewerkers	$2,3 \cdot 10^{-12}$
Treinreizigers	$1,1 \cdot 10^{-12}$
Weggebruikers	$9,1 \cdot 10^{-10}$

Tabel 5.11.2 Overzicht van de conservatief bepaalde maximale jaarlijkse individuele dosis (mSv per jaar) bij regulier aftransport van gebruikte uraniumelementen.

Soort transport	Aantal transporten per jaar	Kritieke groep		
		Omwonenden	Treinreizigers	Weggebruikers
Afvoer uranium	6	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.v.t. <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Er vindt geen transport per spoor plaats.

<sup>26</sup> Per transport kunnen 3 containers met splijstofelementen worden afgevoerd. Uitgaande van maximaal 6 transporten per jaar kunnen er dus maximaal 18 containers afgevoerd worden.

# 6 Vergelijking milieugevolgen van de voorgenomen activiteit

# 6



De voorgenomen activiteit bestaat uit het mogelijk maken van de inzet van aanvullende soorten splijtstof; c-ERU-elementen tot maximaal  $4,6 \pm 0,05$  gew % uranium-235 verrijking en MOX-elementen met een gemiddeld gehalte van  $5,41$  gew %  $Pu_{fiss}$  tot een kernbelading van 40%.

In dit hoofdstuk komen evenals in hoofdstuk 5 de aspecten lozingen bij normaal bedrijf (6.3), veiligheid bij ongevallen (6.4), radioactief afval (6.5), transport (6.6) en risico's inzake de verspreiding van kernwapens ter sprake (6.7). De andere milieuaspecten, zoals geluid en thermische waterlozingen, wijzigen niet. Bovendien zal ingegaan worden op de wijze waarop de MOX- en c-ERU-splijtstofelementen betrouwbaar en veilig opgeslagen kunnen worden in het splijtstofopslagbassin (6.2.3) en zal aandacht besteed worden aan de veranderingen in de splijtstofcyclus (6.8).

Waar dit relevant is, zal tevens de invloed van de in hoofdstuk 4 beschreven alternatieven, een belading met 26% MOX- en 74% uranium-elementen, een belading met 53% MOX- en 47% uraniumelementen en een belading met 73% MOX- en 27% uraniumelementen, worden aangegeven.

Op grond van vergelijking van de verschillende alternatieven wordt het meest milieuvriendelijke alternatief (MMA) beschouwd (6.10).

## 6.1 Inleiding

*In hoofdstuk 5 is de bestaande toestand van het milieu beschreven inclusief het zogenaamde nulalternatief, waarbij de voorgestelde inzet van MOX-elementen (tot een kernbelading van 40%) en van c-ERU-elementen niet worden uitgevoerd.*

*In dit hoofdstuk wordt allereerst de toestand van het milieu beschreven bij uitvoering van de voorgenomen activiteit.*

## 6.2 Veiligheid

### 6.2.1 Beschouwing van de reactor-fysische wijzigingen en hun invloed op de veiligheid bij inzet van MOX-splijtstof

De inzet van MOX-splijtstof leidt er toe dat de bijdrage aan de energieproductie door splijting van plutonium-239 toe neemt ten koste van de bijdrage door splijting van uranium-235. Aan het begin van een cyclus met een volledige kern met 3,3 gew % ENU (begin jaren negentig) bedroeg de bijdrage van uranium-235 splijting aan de totale energieproductie ongeveer 70% en de bijdrage van plutonium-239 splijting ongeveer 20%. Aan het eind van de cyclus was de bijdrage van uranium-235 splijting afgenomen tot ongeveer 48% terwijl de bijdrage van plutonium-239 was toegenomen tot ongeveer 38%. Door verhoging van de opbrand van de splijtstofelementen gedurende de afgelopen 15 jaar is de bijdrage van uranium-235 splijting aan de totale energieproductie aan het begin van de cyclus afgenomen tot ongeveer 60% terwijl de bijdrage van plutonium-239 splijting is toegenomen tot ongeveer 28%. Aan het eind van de cyclus bedraagt de bijdrage van uranium-235 splijting ongeveer 42% terwijl de bijdrage van plutonium-239 splijting ongeveer 40% bedraagt.

Bij inzet van MOX zal de bijdrage van uranium-235 splijting aan de totale energieproductie aan het begin van de cyclus verder dalen tot ongeveer

33% terwijl de bijdrage van plutonium-239 splijting verder zal stijgen tot ongeveer 44%. Aan het eind van de cyclus zal de uranium-235 bijdrage ongeveer 24% bedragen terwijl de plutonium-239 bijdrage dan ongeveer 49% zal bedragen.

De reactorfysische eigenschappen van plutonium-239 zijn anders dan die van uranium-235. De toenemende bijdrage van de splijting van plutonium-239 aan de totale energieproductie heeft daardoor invloed op het gedrag van de reactor tijdens normaal bedrijf en storingsen. De relevante verschillen tussen plutonium-239 en uranium-235 worden hieronder benoemd en de gevolgen voor de veiligheid van de reactor worden benoemd.

#### **Fractie nakomende neutronen**

Een klein deel van de neutronen die vrijkomen bij de splijting van uranium-235 of plutonium-239 is afkomstig van verval van radioactieve splijtingsproducten. Deze nakomende neutronen worden feitelijk gebruikt om de reactor te regelen. Aan het begin van de jaren negentig bedroeg de fractie nakomende neutronen aan het begin van de cyclus ongeveer 0,65% en aan het eind van de cyclus 0,55%. Door toenemende opbrand is de fractie nakomende neutronen aan het begin van de cyclus afgenomen tot ongeveer 0,61 terwijl de fractie aan het eind van de cyclus vrijwel onveranderd is (0,55%). Door verdere verhoging van de opbrand zal de fractie nakomende neutronen verder dalen tot ongeveer 0,60% aan het begin van de cyclus en tot ongeveer 0,54% aan het eind van de cyclus. Bij inzet van MOX zal de fractie nakomende neutronen vervolgens verder dalen tot ongeveer 0,51% aan het begin van de cyclus en tot ongeveer 0,48% aan het eind van de cyclus.

De fractie nakomende neutronen zal bij de inzet van MOX dus verder afnemen, maar zij zal niet veel lager worden dan de fractie nakomende neutronen aan het eind van de cyclus in de huidige situatie (0,48% MOX v.s. 0,55% actueel). De afname van de fractie nakomende neutronen sinds begin jaren negentig heeft niet geleid tot merkbare verschillen voor de bedrijfsvoering met de reactor. Ook de verdere afname van de fractie nakomende neutronen bij inzet van MOX zal niet leiden tot merkbare verschillen voor de bedrijfsvoering met de reactor. Er is aangetoond dat de reactor veilig bedreven kan worden wanneer de

fractie nakomende neutronen minimaal voldoet aan bepaalde limieten. Door te toetsen aan de daartoe te stellen limieten ( $\lambda > 0,485\%$  aan het begin van de cyclus en  $\lambda > 0,427\%$  aan het eind van de cyclus) is zekegesteld dat de afname van de fractie nakomende neutronen ook geen negatieve gevolgen heeft voor de veiligheid van de reactor in ongevalsituaties.

#### **Neutronenspectrum**

Bij inzet van MOX-splijtstof is het neutronenspectrum harder dan bij inzet van uranium-splijtstof. De hogere energie van de vrijkomende neutronen bij splijting van plutonium-239 in combinatie met de grotere vangstdoorsnede voor thermische neutronen van plutonium-239 ten opzichte van uranium-235 leidt er toe dat de gemiddelde energie van de neutronen in de reactor bij inzet van MOX hoger is dan bij inzet van uranium splijtstof.

Het hardere neutronenspectrum leidt ertoe dat de werkzame doorsneden voor neutronenabsorptie van zowel de regelstaven als het boor verminderen. Zo is bijvoorbeeld de boor effectiviteit (20% boor-10) voor MOX aan het begin van de cyclus (BOC) direct na de opstart -5.3 pcm/ppm terwijl die voor een 4,4% verrijkte UO<sub>2</sub> kern -7.5 pcm/ppm is. Voor het einde van de cyclus (EOC) is dat resp. -7.5 pcm/ppm voor MOX en -8.8 pcm/ppm voor UO<sub>2</sub>. Door de verminderde reactiviteitswaarde van zowel het niet-verrijkte boor als de regelstaven reageert de reactor op een aantal gepostuleerde ongevallen bij inzet van MOX wat anders dan bij inzet van alleen uraniumsplijtstof. Door middel van thermohydraulische en radiologische analyses is getoetst of de reactor bij alle gepostuleerde ongevallen voldoet aan de beschermingsdoelen, zie paragraaf 6.4.

De analyses tonen aan dat het nodig is om het automatisch invallen van regelstaven in geval van hoofdkoelmiddelpompafschakeling wat anders in de tijd te laten plaatsvinden en om de werking van het boor te versterken door toepassing van verrijkt boor (32 gew % boor-10 in plaats van natuurlijk boor met 20% boor-10). Het hardere neutronenspectrum bij inzet van MOX kan ook gevolgen hebben voor de levensduur van het reactorvat. Om falen van het reactorvat door brosse breuk in alle situaties te voorkomen moet de taaiheid van het reactorvat voldoen aan strenge eisen. Door bestraling met hoogenergetische neutronen verliest het reactorvat aan taaiheid (het wordt dus brosser).

Conservatief uitgevoerde berekeningen tonen aan dat de maximale toename van de snelle neutronenflux ongeveer 17% bedraagt. Voor bedrijfstijd tot 2034 is berekend dat de fluentie van neutronen met een energie  $> 1$  MeV toeneemt van  $3,22E19$   $1/cm^2$  voor natuurlijk uranium tot  $3,4E19$   $1/cm^2$  bij gebruik van MOX. De geëxtrapoleerde fluentie blijft ook bij de inzet van MOX onder de ontwerpwaarde van  $3,5E19$   $1/cm^2$ .

### Reactiviteitscoëfficiënten

De koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt en dampbelcoëfficiënt zijn voor MOX sterker negatief dan die voor uranium. Hierdoor wordt gedurende die fasen van een storing of ongeval die gekenmerkt worden door een sterke temperatuursdaling, er meer reactiviteit toegevoegd. Dat, gekoppeld aan een verminderde werkzaamheid van zowel de regelstaven als het boor, geeft aanleiding tot een kortdurende re-kritikaliteit bij die ontwerpgevallen die gekenmerkt worden door een sterke afkoeling. Deze re-kritikaliteit treedt overigens ook op bij  $UO_2$  kernen en vormt geen bedreiging voor de integriteit van de reactor. De splijfstoftemperatuurcoëfficiënt wordt voornamelijk bepaald door de resonantie absorptie van uranium-238. Meer dan 90% van de MOX-splijfstofstaven bestaat uit uranium-238. Net als voor uraniumsplijstofelementen is voor MOX-splijstofelementen de splijfstoftemperatuurcoëfficiënt daardoor negatief. Wanneer de temperatuur van de splijstof stijgt wordt daardoor negatieve reactiviteit toegevoerd en bij voldoende stijging van de splijfstoftemperatuur zal de splijtingsreactie daarom stoppen.

### Gedrag van de splijstof bij ongevallen met verlies van hoofdkoelmiddel en ongevallen met toename van reactiviteit

De afgelopen decennia is een aanzienlijke wereldwijde onderzoeksinspanning geleverd op het gebied van experimentele en numerieke modellering van het gedrag van drukwaterreactorsplijststoffen in ongevalscondities, in het bijzonder voor splijstof met hoge opbrand. Dit onderzoek omvatte twee typen relevante ongevallen, te weten LOCA-ongevallen (*Loss Of Coolant Accidents*) en RIA-ongevallen (*Reactivity Initiated Accidents*). Het gedrag van een MOX-splijstofstaaf met hoge opbrand specifiek tijdens RIA en LOCA-ongevallen wordt hieronder in meer detail besproken.

Het belangrijkste effect van de inzet van MOX is dat de in de splijstoftabletten opgeslagen energie hoger is dan in die van uranium-elementen. Het vrijkomen van deze hogere opgeslagen energie tijdens een LOCA zou kunnen leiden tot onacceptabele splijstfomhullings-temperaturen en als gevolg daarvan tot schade aan de splijstofstaaf. Conservatief uitgevoerde thermohydraulische analyses laten zien dat voor alle opbranden de maximale splijstfomhullings-temperatuur lager blijft dan de ontwerpwaarde.

Hoge opbrand speelt ook een rol bij grote koelmiddelverliesongevallen (LOCA). Met name de oxidelaagdikte die met toenemende opbrand ook toeneemt, is daarbij een parameter. Gedurende een LOCA, neemt de temperatuur van de splijstfomhulling toe tot boven de  $1000^\circ C$ . Als de temperatuur boven de  $800^\circ C$  komt, verandert zgn.  $\alpha$ -fase zirconium in  $\beta$ -fase zirconium, terwijl tegelijkertijd de oxidatie versneld toeneemt. Het zuurstof dat in het metaal opgelost is stabiliseert weer de  $\alpha$ -fase. Een laag  $\alpha$ -fase zirconium met een hoog gehalte aan zuurstof vormt zich tussen de oxide laag en de  $\beta$ -fase zirconium laag. Deze laag is redelijk bros. Daarom wordt er een grenswaarde gesteld aan de dikte van deze zuurstofrijke  $\alpha$ -fase zirconiumlaag. De dikte van deze laag is sterk afhankelijk van de oxidelaagdikte die tijdens de LOCA bereikt wordt. De oxidatiesnelheid van M5 materiaal is dermate laag, dat voor de te bereiken opbranden in Borssele er geen enkel probleem is.

Er zijn aanwijzingen dat MOX-splijstfostaven bij hoge opbrand minder goed bestand zouden zijn tegen ongevallen met reactiviteits toevoer dan uraniumsplijstfostaven. Dit zou komen door stijging van de edelgasdruk in de splijstfostaven ten gevolge van een toename van de vorming van splijtingsgassen. Dit wordt veroorzaakt doordat bij splijting van plutonium-239 een andere samenstelling van splijtingsproducten ontstaat dan bij splijting van uranium-235. Daarnaast heeft de slechtere warmtegeleidbaarheid van de plutoniumoxide deeltjes binnen de MOX-splijstoftabletten mogelijk een negatieve invloed op het gedrag van hoog opgebrande MOX-elementen tijdens regelstaafuitworpingen.

Een eventueel effect van MOX op de kwetsbaarheid van hoog opgebrande splijstfostaven bij ongevallen met toevoer van reactiviteit is onderwerp van lopend wetenschappelijk onderzoek.

Dit onderzoek heeft duidelijk gemaakt dat het niet nodig is om een eventueel effect van MOX op deze ongevallen te beschouwen zo lang de enthalpie toename die kan optreden bij het beschouwde reactiviteits verhogingsincident (in casu staaftuitworp) significant veel lager is dan 50 cal/g is. Bij zo beperkte enthalpie toename zal zeker geen schade optreden in geval van een ongeval met reactiviteitstoename. Voor de KCB is conservatief berekend dat de maximaal mogelijke enthalpie toename kleiner is dan 30 cal/g. De enthalpie verhoging die bij KCB maximaal op kan treden (30 cal/g) is dus significant veel lager dan de grenswaarde van 50 cal/g waarboven een eventueel MOX-effect zou moeten worden beschouwd.

### **Wijziging vervalwarmte bij inzet van MOX**

Bij splijting van plutonium-239 ontstaat een andere samenstelling van splijtingsproducten dan bij splijting van uranium-235. De grotere bijdrage van de splijting van plutonium-239 aan de geproduceerde energie leidt dus tot een andere samenstelling van splijtingsproducten. Deze veranderde samenstelling leidt tot een wijziging in de vervalwarmte van de kern. De eerste 46 uur na afschakeling van de reactor is de vervalwarmte van een MOX-kern lager dan die van een uraniumkern. Langer dan 46 uur na afschakeling is de vervalwarmte van een MOX-kern groter dan die van een uraniumkern. Bij de buiten ontwerpgevallen waarbij kernschade kan optreden wordt deze kernschade veroorzaakt doordat de vervalwarmte uit de kern niet kan worden afgevoerd. Het verschil in vervalwarmte tussen een MOX-kern en een uraniumkern is echter zo gering dat er geen significant effect is op het verloop van de buiten ontwerpgevallen.

## **6.2.2 Bedrijfsvoering**

Het MOX-element dat EPZ wil toepassen is, zoals in hoofdstuk 4.2.3 is aangegeven, speciaal voor EPZ ontworpen. Dit element heeft een gemiddeld gehalte van 5,41 gew %  $Pu_{fiss}$ . Voor dit element is met behulp van een analyse van een hypothetische evenwichtskern de beoogde 'opbrandequivalentie' aangetoond. Dit wil zeggen dat bij een jaarlijks repeterend herladingspatroon (en de tussenliggende

configuraties) is aangetoond dat de MOX-elementen een vergelijkbare opbrand bereiken als de uranumelementen zonder dat optredende belastingen en bedrijfswaarden toegestane limieten overschrijden<sup>27</sup>.

Uitgangspunt bij de inzet van c-ERU is eveneens 'opbrandequivalentie'. Voor de c-ERU-elementen betekent dit dat de elementen een hogere verrijking mogen bezitten dan de ENU-elementen ( $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235), mits aangetoond is dat de initiële reactiviteit van deze elementen kleiner of gelijk blijft aan die van de thans vergunde elementen. De maximaal toe te passen verrijking van een c-ERU-element bedraagt  $4,6 \pm 0,05$  gew % uranium-235. Door middel van een ERU-haaltbaarheidsstudie is aangetoond dat de inzet van niet gecompenseerde ERU-elementen, verkregen door vermenging van gerecycled uranium met middel/hog verrijkt uranium, geen neutronenfysische verschillen vertoont ten opzichte van de inzet van ENU-elementen. Dit geldt vooral als voor de neutronenabsorptie als gevolg van de aanwezigheid van uranium-236 in verse ERU wordt gecompenseerd door een verhoging van het uranium-235 gehalte. Als gevolg hiervan zullen bij de inzet van c-ERU-elementen de optredende belastingen en bedrijfswaarden de toegestane limieten niet overschrijden<sup>28</sup>.

Tevens is door middel van diverse analyses aangetoond dat voor de voorgenomen inzet van MOX en c-ERU aan alle in het Veiligheidsrapport genoemde veiligheidscriteria wordt voldaan. De reactor kan tijdens normaal bedrijf en storingen met de beoogde kernconfiguratie veilig worden bedreven. Nogmaals dient te worden opgemerkt dat voor iedere kernbelading een formele veiligheidsanalyse van het reactorbedrijf wordt uitgevoerd. Hierbij worden alle relevante reactorparameters met gekwalificeerde computercodes berekend. Alleen wanneer aantoonbaar geen voorgeschreven veiligheidsgrenswaarden overschreden worden, mag de betreffende kernbelading door EPZ samengesteld worden. Hiermee is gewaarborgd dat elke nieuwe kernbelading, met en zonder MOX- en/of c-ERU-elementen, voldoet aan de veiligheidslimieten.

<sup>27</sup> AREVA A1C-1334644-0 KCB Reaktorphysikalische Machbarkeitsstudie zum Einsatz von MOX-Brennelementen.

<sup>28</sup> AREVA A1C-1311067-0 KCB-Reaktorphysikalische Verträglichkeitsstudie zum Einsatz von ERU-brennelementen.

### 6.2.3 Onderkriticaliteit in het splijstfopslagbassin

In de splijstfoelementen in het splijstfopslagbassin (SOB) mag onder geen beding een kernsplijtingsproces op gang komen. Daarom dient aangetoond te worden dat de onderkriticaliteit van de splijstfoelementen in het bassin is gewaarborgd. De vermenigvuldigingsfactor van de neutronen ( $K_{\text{eff}}$ ) dient daartoe kleiner dan of gelijk aan 0,95 te zijn.

#### Inzet MOX

Kriticaliteitsberekeningen<sup>29</sup> voor de inzet van verse MOX-elementen in het splijstfopslagbassin tonen aan dat de configuratie met deze MOX-elementen minder reactief is dan die met verse  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU-elementen. Bij handhaving van het aantal afgesloten posities in het SOB (zie paragraaf 5.4.5) resulteert het plaatsen van MOX-elementen in het SOB dus in een kleinere  $K_{\text{eff}}$  en leidt daarmee tot meer marge in de onderkriticaliteit. MOX-elementen vereisen een één à twee jaar langere afkoelperiode in het SOB ten opzichte van de uranumelementen. De opslagcapaciteit van het SOB is echter voldoende om het langere verblijf in het SOB te kunnen garanderen.

#### Inzet c-ERU

Het ontwerp van c-ERU-elementen is gericht op het bereiken van een initiële reactiviteit gelijk aan die van elementen van verrijkt natuurlijk uranium. Bij handhaving van het aantal afgesloten posities in het SOB (zie paragraaf 5.4.5) is de marge in de onderkriticaliteit voor verse c-ERU-elementen daardoor gelijk aan die van de huidige reeds vergunde elementen. Aangezien de onderkriticaliteit voor de huidige elementen aan de eisen voldoet, geldt dat ook voor de c-ERU-elementen.

## 6.3 Lozingen en stralingsbelasting bij normaal bedrijf

### 6.3.1 Stralingsbelasting via lozing naar de omgevingslucht

Bij toepassing van een andere splijstf in de KCB kan de samenstelling van de activiteit in

de geloosde ventilatielucht en daarmee de jaardosis ten gevolge van luchtlozingen wijzigen. In de huidige situatie wordt de jaardosis ten gevolge van lozingen naar de omgevingslucht voor meer dan 80% bepaald door de emissie van koolstof-14. Daarnaast dragen edelgassen (14%), tritium (5%) en jodium-131 (1%) bij aan de jaardosis. De totale bijdrage van overige nucliden is minder dan 1%.

#### Inzet 40% MOX

Bij de inzet van 40% MOX zal de koolstof-14-productie, als gevolg van een ander neutronenspectrum bij MOX dan bij uranium splijstf, met minimaal 10% afnemen. Dit betekent dat de emissies van koolstof-14 en bijgevolg de dosisbijdrage van koolstof-14 eveneens met 10% verminderen.

Edelgassen vertonen bij de inzet van MOX-elementen een wisselend beeld: de productie van kryptonisotopen neemt af, die van de xenonisotopen toe. Door weging van deze effecten met de dosisconversiefactoren voor externe blootstelling wordt duidelijk dat de afname van kryptonisotopen de toename van de xenonisotopen meer dan compenseert, waardoor de dosisbijdrage van edelgassen bij de inzet van 40% MOX afneemt. Deze afname bedraagt ongeveer 7%.

Tritium komt in zeer geringe mate vrij als splijtingsproduct en door activering van in het koelwater opgeloste substanties. Verreweg de grootste bron van tritium wordt gevormd door de activering van boor-10 dat als boorzuur in het koelwater is opgelost. De tritiumproductie is hierdoor vrijwel evenredig met de boor-10 concentratie in het hoofdkoelmiddel. Bij de toepassing van MOX-elementen neemt deze concentratie af ten opzichte van de huidige situatie<sup>31</sup>. Toepassing van MOX-elementen leidt dus tot een afname van de tritiumlozing en daarmee tot een verlaging van de dosisbijdrage.

<sup>30</sup> De reactiviteit van MOX-elementen is lager dan die van uranumelementen. Daartegenover staat dat de effectiviteit van <sup>10</sup>B bij inzet van MOX lager is. Deze twee effecten hebben een tegengesteld gevolg voor de vereiste <sup>10</sup>B concentratie in het hoofdkoelmiddel. De balans van deze tegengestelde effecten is zodanig dat bij gebruik van MOX splijstf tijdens normaal bedrijf de maximale en gemiddelde <sup>10</sup>B concentraties lager zijn. Onder ongevalscondities dient de <sup>10</sup>B concentratie juist hoger te zijn (zie ook paragraaf 4.2.3).

<sup>29</sup> Kriticaliteitsanalyses splijstf opslag bassin, NRG, 2008.

De massieke<sup>31</sup> activiteit van jodium-131 in het hoofdkoelmiddel neemt toe bij het gebruik van MOX. Voor de inzet van MOX bedraagt deze toename (en bijgevolg de toename van de dosisbijdrage) ongeveer 2%.

Indien de dosisveranderingen ten gevolge van de lozingen naar de omgevingslucht worden gesommeerd blijkt dat de inzet van 40% MOX tot een dosisreductie van ongeveer 10% leidt<sup>32</sup>.

#### **Inzet c-ERU**

Bij de inzet van 100% c-ERU-elementen zal de koolstof-14 productie kleiner zijn dan of gelijk zijn aan de koolstof-14 productie bij de inzet van de huidige  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU-elementen. Dit betekent dat de emissie van koolstof-14 en bijgevolg de dosisbijdrage van koolstof-14 afneemt of gelijk zal blijven.

De productie van het edelgas Krypton zal bij de inzet van 100% c-ERU met maximaal 7% toenemen, terwijl de productie van Xenon nagenoeg gelijk blijft aan de productie bij de inzet van  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU. Dit resulteert dus in een toename van de dosis ten gevolge van edelgasen.

De tritiumproductie is evenredig met de boorconcentratie in het hoofdkoelmiddel. Bij het gebruik van 100% c-ERU-elementen dient de boorconcentratie maximaal 10% hoger te zijn dan bij het gebruik van  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU. Toepassing van c-ERU-elementen leidt dus tot een toename van de tritium lozing en daarmee tot een verhoging van deze dosisbijdrage.

De productie van relevante jodiumradionucliden is bij de inzet van 100% c-ERU nagenoeg gelijk aan die bij het gebruik van  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU. Bij gevolg zal de dosisbijdrage ook nagenoeg gelijk zijn.

De bijdrage van koolstof-14 is de dominante component (80%) in de jaardosis ten gevolge van lozingen naar de omgevingslucht. Sommerend kan hier dus gezegd worden dat de jaardosis bij de inzet van 100% c-ERU-elementen niet

of nauwelijks zal afwijken van de huidige jaardosis<sup>33</sup>.

### **6.3.2 Stralingsbelasting via lozing naar de Westerschelde**

Bij toepassing van een andere splijtstof in de KCB kan de activiteit in het koelwater wijzigingen. De jaardosis ten gevolge van koelwaterlozingen op de Westerschelde wordt voornamelijk bepaald door bèta/gamma stralers en tritium in het hoofdkoelmiddel. De bèta/gamma stralers zijn voornamelijk corrosieproducten en de concentratie daarvan in het hoofdkoelmiddel verandert niet bij de verandering van de splijtstof.

#### **Inzet 40% MOX**

De dosisbijdrage van tritium neemt, zoals eerder besproken, bij de inzet van MOX-elementen af. De totale stralingsbelasting ten gevolge van lozingen naar de Westerschelde zal bij de inzet van MOX dus ook afnemen.

#### **Inzet c-ERU**

Bij de inzet van 100% c-ERU-elementen neemt de hoeveelheid tritium in het hoofdkoelmiddel met maximaal 10% toe. Hierdoor zal de (zeer lage) totale stralingsbelasting door lozingen naar de Westerschelde bij de inzet van c-ERU met minder dan 2% toenemen. De toename van de totale stralingsbelasting door lozingen op de Westerschelde is niet significant.

### **6.3.3 Biologische waterkwaliteit**

De voorgenomen splijtstofdiversificatie zal de biologische waterkwaliteit van de Westerschelde niet beïnvloeden. Zowel de hoeveelheid koelwater als de hoeveelheid warmte die middels het koelwater aan de Westerschelde wordt afgegeven, wijzigt namelijk niet omdat het geleverde vermogen bij de voorgenomen splijtstofdiversificatie niet wijzigt. De biologische waterkwaliteit zal daarom in dit MER niet apart worden beschouwd.

<sup>31</sup> Activiteit per hoeveelheid massa.

<sup>32</sup> 22276/08.90048, Onderbouwende Analyses van MOX Splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB, NRG, december 2009.

<sup>33</sup> 22276/09.97387, Onderbouwende Analyses van ERU Splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB, NRG, oktober 2009.

### 6.3.4 Stralingsbelasting via directe externe straling

De belangrijkste bronnen die bijdragen aan de externe stralingsdosis aan het hek zijn:

- activiteit in het reactorgebouw afkomstig van: de inventaris van de reactorkern, activiteit in het hoofdkoelmiddel, activiteit in het splijtstofopslagbassin en activiteit in de lucht van de installatieruimte.
- activiteit in het afvalopslaggebouw afkomstig van de activiteit in geconditioneerde afval dat bestemd is voor afvoer naar COVRA.

Bij de inzet van 40% MOX en c-ERU-elementen kunnen veranderingen optreden in de directe stralingsdoses aan de terreingrens. Door ondermeer een gewijzigde nuclidensamenstelling van de reactorkern en de aanwezigheid van andere splijtstofelementen in het splijtstofopslagbassin wijzigt namelijk de externe stralingsdosis.

#### Inzet 40% MOX

De stralingsbelasting via directe straling vanuit de reactorkern is zoals in hoofdstuk 5 beschreven relatief klein en zal dit bij het gebruik van MOX ook blijven. De dosisbijdrage van het splijtstofopslagbassin is relatief groot en daarom apart geanalyseerd. De analyse toont aan dat er ten opzichte van het huidige bedrijf met een  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU kern geen significante verandering is van de externe stralingsdosis afkomstig van het splijtstofopslagbassin. De toename van de dosisbijdrage vanuit het hoofdkoelmiddel, alleen van belang voor de zuidwest grens, wordt geschat op 20% en bedraagt daarmee  $0,00013$  mSv/jaar. Deze bijdrage is afkomstig van de conservatief geschatte (dat wil zeggen dat het een overschatting betreft) toename van de productie van stikstof-16 in het hoofdkoelmiddel als gevolg van een ander neutronenspectrum bij MOX- dan bij uraniumsplijtstof. Deze dosis is bovendien gering in vergelijking met de dosisbijdrage vanuit het afvalopslaggebouw van  $0,0043$  mSv/jaar aan de noord-oost grens. De dosisbijdrage van het in het afvalopslaggebouw opgeslagen radioactieve afval is berekend op basis van het maximaal toegestane dosistempo op de buitenkant van een afvalvat en zal, bij een gelijk blijvende hoeveelheid afval, derhalve niet wijzigen bij het gebruik van MOX. De dosisbijdrage vanuit de lucht in de installatieruimte zal door de voorgenomen inzet van MOX naar verwachting

nauwelijks veranderen. De maximale dosis buiten de terreingrens door externe straling vanuit de KCB blijft daarmee op  $4,3 \cdot 10^{-3}$  mSv/jaar waarbij gecorrigeerd is voor de verblijftijd aan het hek (ABC-factoren).

#### Inzet c-ERU

Evenals voor de inzet van MOX is voor de inzet van c-ERU de dosisbijdrage van het splijtstofopslagbassin apart geanalyseerd. Deze analyse toont aan dat er bij gebruik van c-ERU-elementen ten opzichte van het huidige bedrijf met een  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU kern geen significante verandering is van de externe stralingsdosis afkomstig van het splijtstofopslagbassin. Ook de dosisbijdrage vanuit het hoofdkoelmiddel en de lucht in de installatieruimte zullen door de voorgenomen inzet van c-ERU niet significant veranderen.

De dosisbijdrage van het in het afvalopslaggebouw opgeslagen radioactieve afval is berekend op basis van het maximaal toegestane dosistempo op de buitenkant van een afvalvat en zal, bij een gelijk blijvende hoeveelheid afval, daarom niet wijzigen bij de inzet van c-ERU.

## 6.4 Veiligheidsaspecten bij storingen van het bedrijf

### 6.4.1 Inleiding

Als gevolg van de toepassing van MOX- en c-ERU-splijtstof veranderen de neutronen- en warmtehuishouding van de reactorkern. Hierdoor is het mogelijk dat de optredende belastingen van de splijtstofelementen gedurende het verloop van de in paragraaf 5.4 beschouwde ongevallen en de radiologische gevolgen van deze ongevallen wijzigen. In de volgende paragrafen wordt ten aanzien van deze zogenoemde ontwerpongevallen de invloed op de resultaten van de thermohydraulische en radiologische analyses besproken. Ten aanzien van de buitenontwerpongevallen wordt de invloed op de verschillende niveaus van de PSA behandeld.

De representatieve begingebourtenissen die door de installatie inclusief de voorgenomen inzet van MOX en c-ERU moeten worden beheerst zijn dezelfde als bij de bestaande situatie (bijlage C).



## 6.4.2 Ongevalsanalyses

In deze paragraaf wordt de invloed van de inzet van MOX- en c-ERU-elementen op de kerninventaris (samenstelling van de reactorkern) beschreven. De kerninventaris wordt als invoergegeven gebruikt voor de bepaling van de invloed van ongevallen op het milieu (radiologische analyse). De radiologische analyses van de ontwerpongevallen, evenals de thermohydraulische analyses van de ontwerpongevallen voor MOX en c-ERU, worden behandeld.

### 6.4.2.1 Kerninventaris

De initiële samenstellingen van ENU-, MOX- en c-ERU-elementen zijn verschillend waardoor de kerninventarissen eveneens verschillen.

#### Inzet ENU

Een typische initiële samenstelling van het uranium in de huidige ENU-elementen, bij een verrijkingsgraad van  $4,4 \pm 0,05$  gew %, is gegeven in Tabel 6.4.1.

Tabel 6.4.1 Typische initiële nucliden samenstelling van het uranium in een ENU-element.

Nuclide	Massa [kg]	Massa percentage [%]
U-234	0,124	0,039
U-235	14,1	4,39
U-238	307	95,6
<b>Totaal Zware Metalen</b>	<b>321</b>	<b>100</b>

Tabel 6.4.2 Initiële nucliden samenstelling van de zware metalen per type MOX-splijfstofstaaf en de totale massa zware metalen (ZM) per element.

	$Pu_{\text{fiss}}/ZM = 2,6 \text{ gew } \%$	$Pu_{\text{fiss}}/ZM = 3,6 \text{ gew } \%$	$Pu_{\text{fiss}}/ZM = 6,4 \text{ gew } \%$	Element
<b>Aantal staven</b>	<b>12</b>	<b>56</b>	<b>137</b>	<b>205</b>
<b>Nuclide</b>	<b>Massa [kg]</b>	<b>Massa [kg]</b>	<b>Massa [kg]</b>	<b>Massa [kg]</b>
U-234	0,0000115	0,0000113	0,0000108	0,00225
U-235	0,00375	0,00369	0,00352	0,734
U-238	1,50	1,47	1,40	293
Pu-238	0,00174	0,00241	0,00429	0,744
Pu-239	0,0348	0,0482	0,0858	14,9
Pu-240	0,0161	0,0223	0,0396	6,87
Pu-241	0,00606	0,00840	0,0149	2,58
Pu-242	0,00483	0,00671	0,0119	2,06
Am-241	0,000966	0,00134	0,00238	0,412
<b>Totaal</b>	<b>1,57</b>	<b>1,57</b>	<b>1,57</b>	<b>321</b>

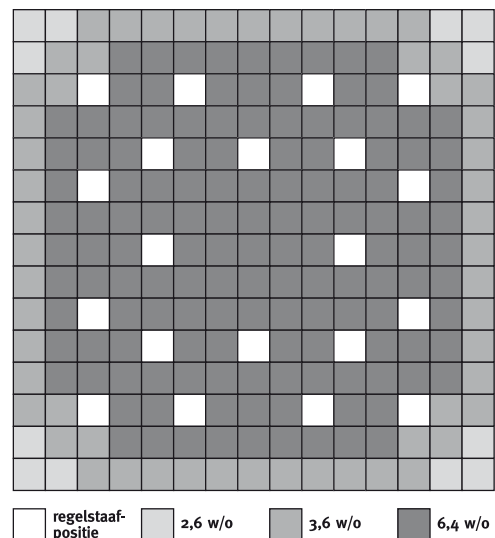
De massa's van de verschillende nucliden zijn in drie significante cijfers weergegeven. Door afronding kunnen kleine verschillen ontstaan in de optellingen.

#### Inzet MOX

Een MOX-element bestaat uit aantallen splijfstofstaven die een verschillend massapercentage aan plutonium bevatten, aangevuld met verarmd uranium (0,25 gew % uranium-235). Tabel 6.4.2 geeft de initiële samenstelling van een MOX-element weer. Figuur 6.4.1 toont de positie van de diverse splijfstofstaven. Met deze verdeling wordt beoogd een zo uniform mogelijke vermogensverdeling over het element te bereiken.

De initiële samenstellingen van MOX-elementen en ENU-elementen zijn verschillend, waardoor eveneens de kerninventaris aan het begin van de cyclus verschillend is. Het verschil in totale hoeveelheid radioactiviteit is kort na het

Figuur 6.4.1 Schema van de positie van verschillende MOX-splijfstofstaven in een MOX-element.



afschakelen van de reactor klein (zie Bijlage D). Na langere vervaltijden ontstaan grotere activiteitsverschillen wegens verschillen in de hoeveelheden langlevende nucliden (zie Bijlage E).

#### Inzet c-ERU

Tabel 6.4.3 geeft een typische initiële samenstelling van het uranium in het c-ERU-element weer. De verrijkingsgraad van het uranium in deze elementen is  $4,6 \pm 0,05$  gew %.<sup>34</sup>

Tabel 6.4.3 Typische initiële nucliden samenstelling van het uranium in een c-ERU-element.

Nuclide	Massa [kg]	Massa percentage [%]
U-232	0,0000048	0,0000015
U-234	0,642	0,2
U-235	14,8	$\leq 4,6$
U-236	1,93	$\pm 0,6$
U-238	304	$\pm 94,6$
<b>Totaal Zware Metalen</b>	<b>321</b>	<b>100</b>

De feitelijke isotopensamenstelling hangt af van de voorgeschiedenis van de opgewerkte splijtstof en van de toegepaste verrijkmethode.

Doordat de inventarissen van een c-ERU kern en een ENU-kern aan het begin van een cyclus verschillen, verschillen deze ook aan het einde van een cyclus. Het verschil in totale hoeveelheid radioactiviteit is kort na het afschakelen klein (zie bijlage D). Ook na langere vervaltijden blijven de activiteitsverschillen klein (zie bijlage E).

Tabel 6.4.4 Overzicht van de maximale effectieve en schildklier dosis (mSv) ontvangen buiten de terreingrens, berekend voor kinderen tot 16 jaar, en bijbehorende criteria voor de representatieve ontwerpgevallen.

	Bestaande situatie		26% MOX		40% MOX	
	E	H <sub>th</sub>	E	H <sub>th</sub>	E	H <sub>th</sub>
1.5.1	0,024	0,466	0,024	0,465	0,025	0,475
7.2.2	0,00080	0,0143	0,00080	0,0142	0,00082	0,147
7.2.3	0,684	4,50	0,690	4,48	0,695	4,58
7.3.2.2	0,19	3,40	0,19	3,40	0,19	3,48
7.4.2	0,12	2,42	0,12	2,42	0,13	2,47
8.2	0,0099	0,0111	0,0097	0,0109	0,010	0,0112
8.4.1	0,0097	0,191	0,0097	0,191	0,0099	0,196
9.1.2	0,20	0,717	0,20	0,720	0,20	0,733

<sup>1)</sup> Bij ongevalslozingen, waaraan over het algemeen alle leeftijdscategorieën van de omwonende bevolking worden blootgesteld, is het risico voor de groep 1-jarige kinderen het grootst. Daarom wordt voor de groep kinderen tot 16 jaar voor alle ontwerpgevallen de maximale dosis voor 1-jarige kinderen berekend.

<sup>34</sup> Voor de ongevals- en milieuanalyses is uitgegaan van 4,9 gew % <sup>235</sup>U, 1,5 gew % <sup>236</sup>U en 93,5 gew % <sup>238</sup>U. De verrijking van 4,9 gew % <sup>235</sup>U is conservatief en daarmee afdekkend voor de voorgenomen activiteit.

#### 6.4.2.2 Thermohydraulische analyses

Zoals beschouwd in 6.2 heeft de inzet van MOX- en c-ERU-elementen invloed op de volgende parameters van de reactorkern:

- snelheidsparameters van de neutronen (onder andere levensduur van de snelle neutronen het aandeel van de vertraagde neutronen)
- de vervalwarmte
- reactiviteitscoëfficiënten (factoren die de invloed van grootheden als temperatuur en druk op de reactiviteit aangeven)
- werkzaamheid van de regelementen
- werkzaamheid van het borium
- parameters van de splijtstofstaven (warmteoverdracht, druk in de splijtstofstaaf).

Deze parameters zouden van invloed kunnen zijn op het verloop en de beheersing van de ontwerpgevallen. Om deze invloed vast te stellen zijn alle begingebourtenissen uit bijlage C opnieuw beschouwd.

De inzet van MOX- en c-ERU-splijtstof heeft invloed

op zowel de ontwerpgevallen waarbij koelmiddelverlies optreedt als op de ontwerpgevallen waarbij geen koelmiddelverlies optreedt. Voor de bestudering van het verloop van ontwerpgevallen waarbij koelmiddelverlies optreedt, speelt de in de splijtstof opgeslagen energie een grote rol terwijl bij de ontwerpgevallen waarbij

geen verlies van hoofdkoelmiddel optreedt, de snelheidsparameters van de neutronen en de reactiviteitscoëfficiënten een belangrijke rol spelen.

Om aan te tonen dat de ontwerpgevallen worden beheerst bij de inzet van MOX en c-ERU, is in eerste instantie nagegaan of de verandering van de kernparameters valt binnen de waarden die in de uitgevoerde analyses voor de bestaande situatie gebruikt zijn. Indien dit het geval is, blijven de bestaande analyses en de resultaten geldig. In de gevallen dat de bestaande analyses niet toepasbaar waren, zijn de betreffende ongevallen opnieuw geëvalueerd. Gebleken is dat voor alle te beschouwen ontwerpgevallen de installatie in een veilige toestand kan worden gebracht en gehouden<sup>35</sup>.

### 6.4.2.3 Radiologische analyses van ontwerp-ongevallen

#### Inzet 40% MOX

Uit de hiervoor beschreven thermohydraulische evaluaties is gebleken dat slechts het verloop van enkele ontwerpgevallen beïnvloed wordt door het toepassen van MOX-elementen. Deze ontwerpgevallen behoren niet tot de categorie ongevallen die een lozing van radioactiviteit naar de omgeving tot gevolg hebben. Dat betekent dat de ontwerpgevallen waarvan aangenomen is dat ze wel een lozing van radioactieve stoffen

tot gevolg hebben in hun verloop niet worden beïnvloed door de toepassing van MOX-elementen en dus nog steeds representatief zijn.

De voorgenomen activiteit (inzet van 40% MOX) leidt echter wel tot veranderingen in de radioactiviteit van de verschillende nucliden in de kerninventaris. Deze veranderingen leiden ertoe dat ook de lozingen naar de omgeving als gevolg van de beschouwde ontwerpgevallen zullen wijzigen. De ontwerpgevallen met radiologische consequenties uit bijlage C zijn daarom voor de voorgenomen activiteit en de drie alternatieven opnieuw beschouwd.

In Tabel 6.4.4 is een overzicht gegeven van de berekende maximale doses voor de representatieve ontwerpgevallen voor de voorgenomen activiteit en de drie alternatieven. Ook zijn de bijbehorende criteria weergegeven. Het betreft de effectieve dosis (E) en schildklierdosis ( $H_{th}$ ) op een afstand van 350 meter voor de referentie-groep kinderen tot 16 jaar.

Uit Tabel 6.4.4 blijkt dat zowel bij de voorgenomen activiteit als bij de onderzochte varianten de maximale doses voor de voor KCB representatieve ontwerpgevallen beneden de wettelijke grenzen blijven. De verschillen in de berekende maximale doses tussen de verschillende varianten zijn klein, in het procentenbereik. Tabel 6.4.4 laat geen

53% MOX		73% MOX		Dosis criterium <sup>1)</sup>	
E	$H_{th}$	E	$H_{th}$	E	$H_{th}$
0,025	0,475	0,026	0,489	0,4	500
0,00081	0,0145	0,00084	0,0151	4	500
0,689	4,58	0,698	4,74	40	500
0,19	3,46	0,20	3,59	4	500
0,13	2,47	0,13	2,58	4	500
0,0098	0,0111	0,010	0,0114	0,04	500
0,0099	0,196	0,010	0,203	0,4	500
0,20	0,733	0,20	0,752	4	500

<sup>35</sup> Aanvulling op het Veiligheidsrapport Kernenergie-eenheid centrale Borssele (EPZ, 2010).

verband zien tussen het percentage MOX in de kern en de berekende maximale dosis. Tevens bestaan er geen/nauwelijks verschillen tussen de maximale doses voor KCB representatieve ontwerpgevallen bij de inzet van MOX en de bestaande situatie.

#### Inzet c-ERU

De neutronenfysica bij de inzet van c-ERU-elementen wijkt nauwelijks af van de neutronenfysica bij de inzet van ENU-elementen. De thermohydraulische analyses uitgevoerd voor  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU zijn daarom afdekkend voor c-ERU<sup>36</sup>. Het verloop van de ontwerpgevallen wordt dus niet beïnvloed door het toepassen van c-ERU-elementen.

De voorgenomen activiteit leidt echter wel tot veranderingen in de radioactiviteit van de verschillende nucliden in de kerninventaris. Deze veranderingen leiden ertoe dat ook de lozingen naar de omgeving als gevolg van de beschouwde ontwerpgevallen zullen wijzigen. De ontwerpgevallen met radiologische consequenties uit bijlage C zijn daarom voor de inzet van c-ERU opnieuw beschouwd.

In Tabel 6.4.5 is een overzicht gegeven van de berekende maximale doses en de bijbehorende criteria voor de representatieve ontwerpgevallen. Het betreft de effectieve (E) en schildklierdosis ( $H_{th}$ ) op een afstand van 350 meter voor de referentiegroep kinderen tot 16 jaar (zie 1) onder tabel 6.4.4).

Uit Tabel 6.4.5 blijkt dat de maximale doses bij de voor de KCB representatieve ontwerpgevallen bij de inzet van c-ERU nauwelijks verschillen van de maximale doses in de bestaande situatie. De maximale doses voor c-ERU blijven beneden de wettelijke grenzen.

### 6.4.3 Probabilistic safety assessment (psa)

#### 6.4.3.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt de invloed van de voorgenomen activiteit op de veiligheid bij buitenontwerp-ongevallen gegeven. Hiertoe worden de resultaten van de PSA gepresenteerd. Er wordt volstaan met een bespreking van de verschillen van de resultaten ten opzichte van de bestaande situatie.

Door de inzet van MOX- en c-ERU-elementen kunnen de volgende aspecten beïnvloed worden:

- nuclide-samenstelling
- vervalwarmte
- reactiviteitsverloop

Deze aspecten komen per PSA niveau aan de orde.

#### 6.4.3.2 Resultaten

##### Niveau 1

In de niveau 1 analyses worden begingebourtenissen gedefinieerd die in principe kunnen leiden tot kernbeschadiging. Het betreft gebeurtenissen als gevolg van interne en externe invloeden en voor zowel vermogensbedrijf als niet-vermogensbedrijf. De reactie van bedrijfs- en veiligheidssystemen op deze begingebourtenissen wordt vervolgens door middel van allerlei combinaties van al dan niet falen van deze systemen gemodelleerd tot verscheidene ongevalsscenario's.

De inzet van MOX- en c-ERU-elementen resulteert in een gewijzigde kerninventaris (paragraaf 6.4.2.1). De definitie van de begingebourtenissen

Tabel 6.4.5 Overzicht van de maximale effectieve en schildklier dosis (mSv) ontvangen buiten de terreingrens, berekend voor kinderen tot 16 jaar, en bijbehorende criteria voor de representatieve ontwerpgevallen.

Begin-gebeurtenis	Bestaande situatie		C-ERU		Dosis criterium	
	E	$H_{th}$	E	$H_{th}$	E	$H_{th}$
1.5.1	0,024	0,466	0,024	0,466	0,4	500
7.2.2	0,00080	0,0143	0,00081	0,0142	4	500
7.2.3	0,684	4,50	0,696	4,51	40	500
7.3.2.2	0,19	3,40	0,19	3,41	4	500
7.4.2	0,12	2,42	0,12	2,42	4	500
8.2	0,0099	0,0111	0,010	0,0115	0,04	500
8.4.1	0,0097	0,191	0,0097	0,191	0,4	500
9.1.2	0,20	0,717	0,20	0,717	4	500

<sup>36</sup> Übertragbarkeit der Ergebnisse der U/MOX-Analysen auf den Einsatz von ERU-Brennelementen (BE), AREVA, 11 december 2008.

is hiervan echter niet afhankelijk. Een gewijzigde kerninventaris heeft ook geen invloed op de werking van de bedrijfs- en veiligheids systemen van de centrale

Gedurende de in de PSA beschouwde periode (voor alle ongevalsverlopen tot een maximum van 72 uur) is de vervalwarmte-inhoud bij de inzet van MOX-elementen in geringe mate lager dan bij de inzet van  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU elementen. In de veiligheidsanalyse wordt voor de vervalwarmte een waarde gekozen die representatief (omhullend) is voor de verschillende bedrijfssituaties. Daarom wordt hiervoor de vervalwarmte aan het einde van de cyclus gebruikt. De marge die in deze benadering ligt is groot ten opzichte van de invloed van MOX. De vervalwarmte van c-ERU-splijtstof verschilt weinig van die van ENU-splijtstof. Hierdoor blijven voor zowel de inzet van MOX- als van c-ERU-elementen de betreffende uitgangspunten gehandhaafd.

De kans op een reactiviteitsongeval en de beschikbaarheid van beheersende systemen (zoals het boorinjectiesysteem) wijzigen niet door de inzet van MOX en c-ERU. De mate van het gebruik van de beheersende systemen wijzigt wel. Dit heeft invloed op het tijdsverloop van een ongeval ten gevolge van een gebeurtenis. Uit de analyses van de ontwerpongevallen (zie paragraaf 6.4.2) kan worden afgeleid dat deze veranderingen binnen de marges van de toegepaste en toe te passen criteria blijven. Daardoor verandert de kans op kernbeschadiging niet.

De kernbeschadigingsfrequentie als gevolg van interne en externe gebeurtenissen is dan ook bij de voorgenomen inzet van MOX- en c-ERU-elementen gelijk aan die bij de huidige situatie, te weten  $2,12 \cdot 10^{-6}$  per jaar.

### **Niveau 2**

In de niveau 2 analyse worden de thermohydraulische verschijnselen en het fysische en chemische gedrag van de splijtingsproducten in het reactorcoelsysteem en in de veiligheidsomhulling bepaald, om zo de belasting op de veiligheidsomhulling vast te stellen.

De uitgangspunten van niveau 2 analyses bestaan hoofdzakelijk uit toestanden van de installatie tijdens het ongeval, de volgorde van de gebeurtenis in de reactorinsluiting en de kansen op deze gebeurtenissen. De niveau 2 analyse levert de bronterm van het ongeval.

Een beperkte wijziging in de vervalwarmte heeft alleen invloed op de lozingsfracties en de warmte-inhoud van de bronterm via de thermohydraulische verschijnselen in de veiligheidsomhulling. Bij de inzet van MOX- en c-ERU-elementen is de vervalwarmte-inhoud tot 120 uur na afschakeling van de reactor gelijk aan of lager dan de vervalwarmte-inhoud in de huidige situatie. Daarna genereert de kern met MOX-elementen meer warmte. Deze veranderde vervalwarmte-inhoud heeft, in verhouding tot de onzekerheden in de thermohydraulische verschijnselen zelf, slechts geringe verschillen in de uitkomsten van de niveau 2 analyses tot gevolg. Daarom kan worden gesteld dat de niveau 2 analyses voor de inzet van MOX- en c-ERU-elementen qua vervalwarmte geen significant andere resultaten leveren dan voor de momenteel gebruikte ENU-elementen.

De reactiviteit van de splijtstof heeft geen invloed op de uitkomsten van de niveau 2 analyses, te weten de frequenties, de lozingsfracties en de warmte-inhoud van de brontermen. Ook de gewijzigde kernsamenstelling als gevolg van de inzet van MOX- en c-ERU-elementen heeft daarop geen invloed.

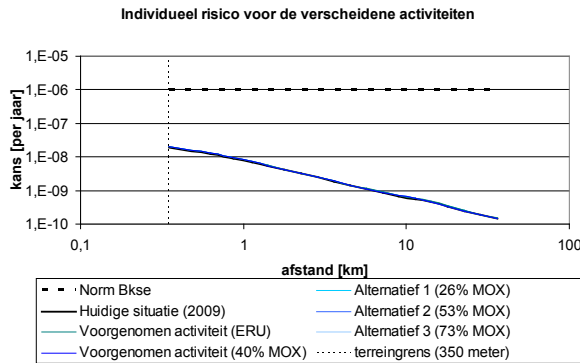
Gezien bovenstaande blijven de resultaten van de PSA niveau 2 analyses representatief en behoeven deze daarom niet opnieuw te worden beschouwd.

### **Niveau 3**

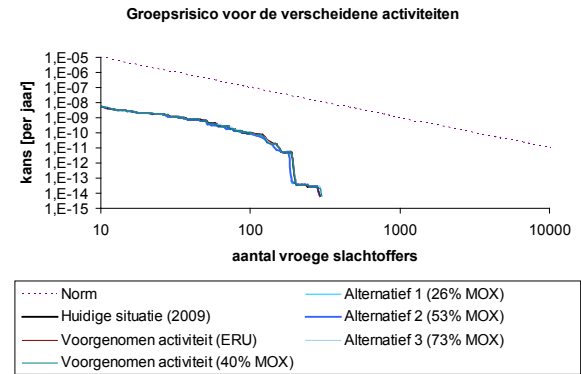
De PSA niveau 3 analyse is voor de inzet van MOX en c-ERU afzonderlijk uitgevoerd met als resultaat een voor MOX en c-ERU individueel en groepsrisico. Het individueel risico als functie van de afstand is voor de huidige situatie, de voorgenomen activiteiten (inzet MOX en c-ERU) en de drie alternatieven in Figuur 6.4.2 weergegeven. De figuur laat zien dat er geen significante verschillen zijn tussen het maximaal individueel risico in de huidige situatie, de voorgenomen activiteiten en de drie alternatieven.

Tabel 6.4.6 geeft het maximaal individueel risico aan de terreingrens voor een 1-jarige voor alle beschouwde situaties. De waarden liggen voor alle afstanden ruimschoots onder de Bkse-norm van  $10^{-6}$  per jaar.

**Figuur 6.4.2** Totaal maximaal individueel risico voor 1-jarige kinderen per jaar in de huidige situatie, de voorgenomen activiteiten en de alternatieven. Verondersteld zijn voedselmaatregelen. Andere mogelijke beschermingsmaatregelen zijn niet beschouwd.



**Figuur 6.4.3** Groepsrisico voor de huidige situatie, de voorgenomen activiteiten en de alternatieven.



Het groepsrisico voor de huidige situatie, de voorgenomen activiteiten (inzet MOX en c-ERU), de alternatieven en het maximaal toelaatbare groepsrisico zijn weergegeven in Figuur 6.4.3. Deze figuur toont aan dat het groepsrisico bij geen enkel risiconiveau de grenswaardelijnen van het criterium voor het toelaatbare groepsrisico overschrijft. Daarnaast is te zien dat het groepsrisico ten gevolge van elk van de voorgenomen activiteiten niet significant verschilt van de huidige situatie en de alternatieven. Dit is consistent met de resultaten voor het individueel risico. Tabel 6.4.7 geeft het groepsrisico voor 10 slachtoffers voor de beschouwde situaties. De berekende waarden liggen voor alle situaties en alternatieven zeer ruim onder de toegestane waarde van  $10^{-5}$ .

Kort samengevat kan uit de PSA geconcludeerd worden dat het individueel risico en het groepsrisico bij elk van de voorgenomen activiteiten (inzet van 40% MOX en c-ERU) nauwelijks verschillen van het individueel risico en het groepsrisico in de huidige situatie en ruimschoots onder de grenswaarden blijven.

## 6.5 Radioactief afval en gebruikte splijtstofelementen

Het radioactief afval dat tijdens het bedrijven van de KCB ontstaat, kan onderverdeeld worden in bedrijfsafval, gecompecteerd metaalafval en kernsplijtingsafval.

In de volgende paragrafen wordt aan elk van deze soorten afval afzonderlijk aandacht besteed. Aangenomen is dat één cyclus gemiddeld één kalenderjaar duurt.

**Tabel 6.4.6** Overzicht van het maximaal individueel risico aan de terreingrens voor 1-jarige kinderen in de huidige situatie, de voorgenomen activiteiten en de alternatieven met voedselmaatregelen. Andere mogelijke beschermingsmaatregelen zijn niet beschouwd.

	Bestaande situatie	Alternatief 1: 26% MOX	Voorgenomen activiteit: 40% MOX	Alternatief 2: 53% MOX	Alternatief 3: 73% MOX	Voorgenomen activiteit: C-ERU
Max individueel risico (per jaar)	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$2,0 \cdot 10^{-8}$

**Tabel 6.4.7** Overzicht van het groepsrisico in de bestaande situatie, de voorgenomen activiteiten en de alternatieven met voedselmaatregelen. Andere mogelijke beschermingsmaatregelen zijn niet beschouwd.

	Bestaande situatie	Alternatief 1: 26% MOX	Voorgenomen activiteit: 40% MOX	Alternatief 2: 53% MOX	Alternatief 3: 73% MOX	Voorgenomen activiteit: C-ERU
Groepsrisico bij 10 slachtoffers (per jaar)	$5,6 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$5,6 \cdot 10^{-9}$	$5,4 \cdot 10^{-9}$	$5,8 \cdot 10^{-9}$	$5,6 \cdot 10^{-9}$

Tabel 6.5.1 Aantal definitief uit de kern te ontladen gebruikte splijtstofelementen per jaar en hun gemiddelde opbrand afhankelijk van de samenstelling van de reactorkern.

Samenstelling reactorkern	Aantal ontladen splijtstofelementen		Gemiddelde opbrand (MWd/kgZM)
	gemiddeld per jaar	ENU(c-ERU)/ MOX)	
ENU	28	28/0	53
26% MOX	28	20/8	53
40% MOX	28	16/12	53
53% MOX	28	12/16	53
73% MOX	28	8/20 <sup>1)</sup>	53
c-ERU	28	28/0	53

<sup>1)</sup> Inclusief 'vijf-jarige' MOX-elementen.

### 6.5.1 Bedrijfsafval

De voorgenomen activiteit heeft geen gevolgen voor de productie van radioactief bedrijfsafval bij de KCB. De bedrijfsprocessen bij de inzet van MOX-elementen of c-ERU-elementen wijzigen namelijk niet op onderdelen die consequenties hebben voor de hoeveelheid bedrijfsafval.

### 6.5.2 Gecompacteerd metaalafval

De voornaamste wijziging ten aanzien van radioactief afval treedt op bij de gebruikte splijtstofelementen. In Tabel 6.5.1 zijn voor de beschouwde kernsamenstellingen met MOX en c-ERU de gemiddelde aantallen jaarlijks definitief te ontladen splijtstofelementen en de gemiddelde opbrandwaarden van deze elementen gegeven. In de tabel is aangegeven dat het aantal gemiddeld te ontladen elementen onafhankelijk is van de samenstelling van de reactorkern. Zowel bij de inzet van  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU-elementen als bij de inzet van MOX- en c-ERU-elementen dienen jaarlijks gemiddeld 28 elementen te worden vervangen.

Door het jaarlijks te ontladen aantal elementen bij de voorgenomen activiteit en de drie alternatieven niet wijzigt ten opzichte van de bestaande situatie, wijzigt ook de hoeveelheid gecompacteerd metaalafval die bij COVRA opgeborgen moet worden niet.

### 6.5.3 Kernsplijtingsafval

De hoeveelheid radioactiviteit in het kernsplijtingsafval is onafhankelijk van de kernsamenstelling. Dit is een gevolg van het feit dat de hoeveelheid splijtingsproducten evenredig is met de geproduceerde energie. Aangezien de jaarlijks geproduceerde hoeveelheid energie gelijk blijft (het thermische vermogen van de reactor en de nagestreefde bedrijfstijd per cyclus veranderen niet) blijft de hoeveelheid jaarlijks af te voeren splijtingsproducten in alle varianten eveneens gelijk.

Door AREVA NC worden verbruikte splijtstoffen van verschillende reactoren verwerkt. Van het vrijgekomen afval wordt een deel op pro rata basis toegewezen aan EPZ. Dit afval wordt vervolgens naar Nederland getransporteerd voor berging bij COVRA. Het aldus aan COVRA aangeboden afval blijft binnen de door de overheid goedgekeurde specificaties. Deze praktijk blijft ten opzichte van de huidige situatie ongewijzigd bij de voorgenomen wijziging.

De samenstelling van het kernsplijtingsafval wijzigt bij de voorgenomen activiteit (en de alternatieven) wel enigszins (zie bijlage E). Het afval afkomstig van MOX-elementen bevat meer langlevende nucliden, waardoor de hoeveelheid radioactiviteit van het kernsplijtingsafval bij de inzet van MOX minder snel afneemt. Dit heeft echter geen significante gevolgen voor de samenstelling en de hoeveelheid radioactiviteit van het geconditioneerde afval dat bij de COVRA wordt opgeslagen. De toewijzing van afvalverpakkingen afkomstig van de opwerkingsfabriek aan EPZ en andere

buitenlandse klanten gebeurt namelijk op basis van een geformaliseerd pro-rato principe<sup>37</sup>. De inhoud van de afvalverpakkingen is daarom niet exclusief afkomstig van EPZ splijtstoffen maar is representatief voor de gemiddelde eigenschappen van de splijtstof die in La Hague in een bepaalde periode is verwerkt. Omdat de hoeveelheid splijtstof uit KCB minder dan één procent omvat van de omzet van de opwerkingsfabriek, heeft een geringe wijziging van de eigenschappen van EPZ's splijtstof geen effect op het geproduceerde afval. Het verpakte afval zal te allen tijde blijven voldoen aan de door de Nederlandse overheid goedgekeurde specificaties.

Aangezien de energieproductie gelijk blijft, zullen ook de hoeveelheden en de hoeveelheden radioactiviteit van het afval per MWe.jaar gelijk blijven.

#### 6.5.4 Directe opslag van splijtstof-elementen

Momenteel worden gebruikte splijtstofelementen afgevoerd naar de opwerkingsfabriek van AREVA NC in La Hague. Hier wordt de gebruikte splijtstof gescheiden in herbruikbare materialen (uranium en plutonium) en radioactieve afvalstoffen. De laatste worden vervolgens verpakt met het oog op veilige opslag en geologische eindberging. Dit radioactieve afval dat overblijft wordt terug naar Nederland getransporteerd en bij COVRA opgeslagen.

Zoals eerder vermeld zou in de toekomst na het aflopen van de huidige contracten met AREVA in theorie de situatie kunnen ontstaan dat EPZ haar gebruikte splijtstoffen niet langer in La Hague kan laten opwerken. In dat geval zal de gebruikte splijtstof direct als hoogradioactief afval moeten worden opgeslagen. Nederland kent momenteel geen regels voor de directe opslag van gebruikte splijtstofelementen. De voorzieningen bij COVRA zijn niet uitgerust voor directe opslag. Hoewel voor de Nederlandse situatie locaties, faciliteiten en vergunningen voor directe opslag van gebruikte splijtstofelementen ontbreken, zijn in beginsel de technische opties hiervoor wel bekend, namelijk onder water of in droge opslagverpakkingen.

Opslag volgens deze opties is in diverse andere landen waaronder België, Zwitserland en Duitsland al gerealiseerd.

Uit deze buitenlandse ervaring blijkt dat de voorgenomen activiteiten geen significante gevolgen voor de directe opslag van gebruikte splijtstof met zich meebrengen. In gebruikte MOX-elementen zal de warmteproductie wel minder snel afnemen dan in gebruikte uranium-elementen, omdat er meer langlevende nucliden in de splijtstof aanwezig zijn. Opslagvoorzieningen worden echter ontworpen op de hoogst mogelijke warmtebelasting. Deze treedt op in de beginperiode van opslag. De langzamere afname van de warmteproductie bij MOX-elementen heeft dus geen gevolgen voor de specificaties van de opslagvoorzieningen.

## 6.6 Transport

Door het gebruik van MOX- en/of c-ERU-elementen zouden de transportrisico's beïnvloed kunnen worden. Er is daarom een analyse uitgevoerd waarin de risico's van de aan- en afvoertransporten van MOX- en c-ERU-elementen gekwantificeerd zijn. De onderdelen van de transporten die in paragraaf 5.11 behandeld zijn, worden hier opnieuw onder de loep genomen

### 6.6.1 Dosis bij regulier transport

#### Aanvoer van verse splijtstofelementen

Verse MOX-elementen zijn wegens het verval van plutoniumisotopen radioactiever dan ENU-elementen. Ook hebben de MOX-elementen een grotere warmteproductie dan verse uranium-splijtstof. Voor MOX-elementen zijn daarom speciale transportverpakkingen beschikbaar. Het bedrijf TN International heeft speciaal voor transport van verse MOX de MX6 container ontworpen. Deze container is door de daartoe bevoegde instanties gecertificeerd en biedt een hoge beveiliging tegen de gevolgen van ongevallen of sabotage. Hoewel het besluit nog niet definitief is om voor KCB de MX6 container te gaan gebruiken (er zijn alternatieven in

<sup>37</sup> Het pro-rato principe houdt in dat na opwerking een hoeveelheid afval wordt teruggezonden die in evenredige verhouding staat tot de hoeveelheid aangeleverde splijtstof.



ontwikkeling), is deze MX6 verpakking voldoende representatief voor de hierna volgende beschouwingen. Alternatieve oplossingen zullen aan minimaal dezelfde veiligheidseisen voldoen. De MX6 container valt in de klasse van de Type B verpakkingen, wat betekent dat de faalkans van deze verpakking bij een verkeersongeval zeer klein is.

Voor regulier transport van verse MOX- en  $UO_2$ -splijtstofelementen is aangenomen dat dit transport maximaal 14 maal per jaar per jaar plaatsvindt. Verondersteld is dat de MOX-splijtstof batchgewijs aangemaakt wordt en dat deze batch van 36 MOX-elementen door middel van 6 transporten in 1 jaar naar de KCB wordt getransporteerd. Daarnaast wordt conservatief verondersteld dat in hetzelfde jaar ook een batch van 32 verse  $UO_2$ -elementen wordt aangevoerd.

In de praktijk kan het dosistempo aan de buitenzijde van het transportvoertuig variëren, maar het dosistempo zal altijd lager moeten zijn dan de maximaal toegestane dosistempowaarden voor transport van radioactieve stoffen. Het maximale dosistempo aan het oppervlak van het transportvoertuig zal bij het transport van verse MOX- en c-ERU-elementen dus niet verschillen van het transport van verse ENU-elementen. Bij het transport van MOX is, evenals bij ENU, het dosistempo op 2 meter afstand van de buiten-

zijde van het transportvoertuig op 0,1 mSv/uur verondersteld en het dosistempo direct aan de buitenzijde van het transportvoertuig is gelijk verondersteld aan 2 mSv/uur, zijnde de wettelijk toegestane maximale waarden.

Op basis van het maximaal aantal benodigde transporten en het dosistempo is de maximale jaarlijkse dosis voor omwonenden en weggebruikers voor de voorgenomen activiteiten en de alternatieven berekend. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in Tabel 6.6.1. Er is conservatief gerekend met het maximale aantal transporten dat in één jaar te verwachten is. Vergelijking van deze maximale jaardosis met de maximale jaardosis bij regulier transport van verse ENU-elementen laat zien dat de dosis ten gevolge van MOX voor omwonenden en weggebruikers toeneemt als gevolg van het grotere aantal transportbewegingen. De maximale jaarlijkse individuele dosis voor omwonenden en weggebruikers bij regulier transport van verse splijtstof voor de bestaande situatie, de voorgenomen activiteiten en de drie alternatieven is lager dan de dosislimiet voor leden van de bevolking zoals opgenomen in het Besluit stralingsbescherming, te weten 0,1 mSv/jaar.

Het aantransport van MOX-elementen zal voor transportmedewerkers niet tot verandering in

**Tabel 6.6.1** Overzicht van de maximale jaarlijkse individuele dosis (mSv per jaar) bij regulier aantransport van verse splijtstof voor de bestaande situatie, de voorgenomen activiteiten en de drie alternatieven.

Soort transport	Aantal transporten/jaar	Kritieke groep		
		Omwonenden	Treinreizigers	Weggebruikers
<b>Bestaande situatie</b>				
Aanvoer ENU	7	$2,2 \cdot 10^{-5}$	n.v.t. <sup>1)</sup>	$7,0 \cdot 10^{-4}$
<b>Alternatief 1: 26% MOX</b>				
Aanvoer ENU (c-ERU)/MOX	14	$4,5 \cdot 10^{-5}$	n.v.t.	$1,4 \cdot 10^{-3}$
<b>Voorgenomen activiteit: 40% MOX</b>				
Aanvoer ENU (c-ERU)/MOX	14	$4,5 \cdot 10^{-5}$	n.v.t.	$1,4 \cdot 10^{-3}$
<b>Alternatief 2: 53% MOX</b>				
Aanvoer ENU (c-ERU)/MOX	14	$4,5 \cdot 10^{-5}$	n.v.t.	$1,4 \cdot 10^{-3}$
<b>Alternatief 3: 73% MOX</b>				
Aanvoer ENU (c-ERU)/MOX	14	$4,5 \cdot 10^{-5}$	n.v.t.	$1,4 \cdot 10^{-3}$
<b>Voorgenomen activiteit: c-ERU</b>				
Aanvoer c-ERU	8	$2,6 \cdot 10^{-5}$	n.v.t.	$8,0 \cdot 10^{-4}$

<sup>1)</sup> Er vindt geen transport per spoor plaats.

hun individuele doses leiden aangezien het maximale dosistempo aan het oppervlak van het transportvoertuig bij het transport van verse MOX- en c-ERU-elementen niet verschilt van het transport van verse ENU-elementen.

Bij het transport van MOX en c-ERU is, evenals bij ENU, het dosistempo op 2 meter afstand van de buitenzijde van het transportvoertuig op 0,1 mSv/uur begrensd en het dosistempo direct aan de buitenzijde van het transportvoertuig is begrensd op 2 mSv/uur, zijnde de wettelijk toegestane maximale waarden.

Het aantransport van MOX- of c-ERU-elementen zal voor personeel van EPZ naar verwachting in een hogere dosis resulteren dan het aantransport van ENU-elementen. Uit berekeningen van de leverancier van de transportcontainer blijkt dat in een jaar waarin een aantransport van verse MOX-splijstof wordt uitgevoerd, een maximale collectieve stralingsdosis van alle bij de aanvoer van deze splijstofelementen betrokken EPZ-werknemers van minder dan 10 mSv te verwachten is. Het betreft een tiental medewerkers. Deze berekeningen zijn gebaseerd op de voorgeschreven handelingen met de MOX-elementen, zoals visuele inspecties tijdens het ontladen. Dit beeld wordt bevestigd door ervaringsgegevens van Duitse en andere centrales, waaronder centrales die ook de MX6 container gebruiken. De voorspelde collectieve dosis is relatief laag ten opzichte van andere routinematige werkzaamheden voor werknemers in de kerncentrale. De jaarlijkse individuele dosis ontvangen tijdens deze werkzaamheden wordt voor de betrokken medewerkers verhoogd van <0,05 naar <1,0 mSv/jaar. Hoe hoger de inzet van MOX, hoe hoger de ontvangen dosis. Echter voor alle MOX-alternatieven blijft de dosis <1,0 mSv/jaar. Deze individuele doses blijven ruim onder de wettelijke limiet van 20 mSv per jaar voor werknemers en de interne limiet van 3 mSv per jaar die EPZ hanteert.

De maximale jaarlijkse dosis voor medewerkers van de KCB zal bij het aantransport van c-ERU-elementen naar verwachting beperkt hoger zijn in vergelijking met het aantransport van ENU-elementen. Uit ervaringsgegevens van EPZ blijkt dat de collectieve stralingsdosis van alle

betrokken medewerkers van een aantransport van niet gecompenseerde ERU-elementen in 2007 0,67 mSv bedroeg (ter vergelijking: de collectieve dosis van EPZ medewerkers bij transport van ENU-elementen bedroeg 0,25 mSv). Het betreft een tiental medewerkers. De individueel opgelopen dosis wordt voor deze medewerkers verhoogd van <0,05 naar <0,1 mSv/jaar. Deze individuele doses blijven ruim onder de wettelijke limiet van 20 mSv per jaar voor werknemers en de interne limiet van 3 mSv per jaar die EPZ hanteert.

### **Afvoer van gebruikte splijstofelementen en afvaltransporten**

Voor regulier transport van gebruikte MOX- en ENU- of c-ERU-elementen is aangenomen dat dit transport zesmaal<sup>38</sup> per jaar plaatsvindt. Voor het afvoeren van gebruikte splijstofelementen, zowel voor ENU als c-ERU als MOX, wordt gebruik gemaakt van een gekwalificeerde type B transportverpakking. Verwacht wordt dat het maximale aantal transporten dat voor het afvoeren van de elementen noodzakelijk is door de inzet van MOX en c-ERU niet verandert. Bij het ontwerp van de toekomstige transportverpakking wordt rekening gehouden met de aard van de handelingen die door het EPZ-personeel aan de container moeten worden verricht. Zo gaat het ontwerp van de container uit van een volledig glad oppervlak van de container in plaats van de huidige container met vinnen ten behoeve van de koeling van de container waardoor b.v. de verwijdering van uitwendige besmettingen zeer vereenvoudigd wordt. Zo wordt ook de wand van de container geoptimaliseerd om een betere stralingsafscherming te verzorgen. Het gevolg is wel dat de gebruikte MOX-elementen 1 – 2 jaar langer in het splijstofopslagbassin dienen te worden opgeslagen om verder af te koelen. Als gevolg van het gewijzigde ontwerp van de toekomstige transportverpakking zal de dosis voor de EPZ-medewerkers betrokken bij het aftransport, niet negatief beïnvloed worden bij de afvoer van gebruikte MOX- en/of c-ERU-elementen.

Ook het maximale dosistempo aan het oppervlak van het transportvoertuig zal bij het transport

<sup>38</sup> Het vermelde aantal transporten biedt de mogelijkheid om de actuele achterstand in transporten weg te werken. Per transport kunnen 3 containers met splijstofelementen worden afgevoerd. Uitgaande van maximaal 6 transporten per jaar kunnen er dus maximaal 18 containers afgevoerd worden. Zodra de achterstand weggewerkt is dienen er jaarlijks 28 elementen afgevoerd te worden, dus 4 containers per jaar.

Tabel 6.6.2 Overzicht van de maximale jaarlijkse individuele dosis (mSv per jaar) bij regulier aftransport van gebruikte splijtstof voor de bestaande situatie, de voorgenomen activiteiten en de drie alternatieven.

Soort transport	Aantal transporten/jaar	Kritieke groep		
		Omwonenden	Treinreizigers	Weggebruikers
<b>Bestaande situatie</b>				
Afvoer ENU	6	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.v.t. <sup>1)</sup>
<b>Alternatief 1: 26% MOX</b>				
Afvoer ENU (c-ERU)/MOX	6	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.v.t.
<b>Voorgenomen activiteit: 40% MOX</b>				
Afvoer ENU (c-ERU)/MOX	6	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.v.t.
<b>Alternatief 2: 53% MOX</b>				
Afvoer ENU (c-ERU)/MOX	6	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.v.t.
<b>Alternatief 3: 73% MOX</b>				
Afvoer ENU (c-ERU)/MOX	6	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.v.t.
<b>Voorgenomen activiteit: c-ERU</b>				
Afvoer c-ERU	6	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	n.v.t.

<sup>1)</sup> Er vindt geen transport over de weg plaats.

van gebruikte MOX- en c-ERU-elementen niet verschillen van die bij het transport van gebruikte ENU-elementen. Immers er moet te allen tijde voldaan worden aan de wettelijk maximaal toegestane dosistempowaarden voor het transport van radioactieve stoffen. Bij het transport van MOX is daarom, evenals bij ENU, het dosistempo op 2 meter afstand van de buitenzijde van het transportvoertuig op 0,1 mSv/ uur verondersteld en het dosistempo direct aan de buitenzijde van het transportvoertuig is gelijk verondersteld aan 2 mSv/uur.

Op basis van het maximale dosistempo en het aantal transportbewegingen is de jaarlijkse dosis voor omwonenden, treinreizigers en medeweggebruikers voor de voorgenomen activiteiten en de alternatieven bepaald. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 6.6.2.

Uit Tabel 6.6.2 kan geconcludeerd worden dat het radiologisch risico van omwonenden en treinreizigers bij het afvoeren van de elementen, in termen van ontvangen stralingsdosis, onafhankelijk is van de splijtstof. Tevens blijft de maximale jaarlijkse individuele dosis ruim lager dan de dosislimiet gesteld in het Besluit stralingsbescherming, te weten 0,1 mSv voor leden van de bevolking.

Het aftransport van gebruikte MOX- of c-ERU-elementen zal voor transportmedewerkers

niet tot verandering in hun individuele doses leiden aangezien het maximale dosistempo aan het oppervlak van het transportvoertuig bij het transport van gebruikte MOX- en c-ERU-elementen niet verschilt van het transport van gebruikte ENU-elementen. Bij het aftransport van MOX en c-ERU is, evenals bij ENU, het dosis-tempo op 2 meter afstand van de buitenzijde van het transportvoertuig op 0,1 mSv/uur begrensd en het dosistempo direct aan de buitenzijde van het transportvoertuig is begrensd op 2 mSv/uur, zijnde de wettelijk toegestane maximale waarden.

## 6.6.2 Risico's bij transportongevallen

Uit de beschouwing van de transportongevallen blijkt dat de radiologische risico's het grootste zijn bij een ongeval met een onbeschadigde container omdat de kans op beschadiging van een container bij een ongeval zeer gering is. In Tabel 6.6.3 is een overzicht gegeven van de maximale risico's op late sterfte per jaar behorende bij de voorgenomen activiteiten en de alternatieven. Er is conservatief gerekend met het maximale aantal transporten dat in één jaar te verwachten is. Vergelijking van deze risico's met de risico's bij transport in de huidige situatie (zie Tabel 5.11.3) laat zien dat de risico's voor omwonenden/transportmedewerkers, treinreizigers en weggebruikers toenemen bij het

Tabel 6.6.3 Overzicht van de maximale individuele risico's per jaar ten gevolge van transportongevallen voor de voorgenoemde activiteiten en de drie alternatieven.

Soort transport	Maximaal aantal transporten per jaar				
	Alternatief 1: 26% MOX	Voorgenomen activiteit: 40% MOX	Alternatief 2: 53% MOX	Alternatief 3: 73% MOX	Voorgenomen activiteit: c-ERU
Aanvoer elementen	14	14	14	14	8
Afvoer elementen	6	6	6	6	6
Kritieke groep	Maximaal individueel risico per jaar				
Omwonenden/ transportmedewerkers	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^{-12}$
Treinreizigers	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$
Weggebruikers	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$

gebruik van MOX. Deze toename hangt samen met het grotere aantal transportbewegingen. De risico's bij c-ERU blijven gelijk aan de huidige risico's. Voor alle situaties geldt echter dat het individueel risico ruim (een factor 300.000 of meer) kleiner is dan het maximaal toelaatbare risico ( $10^{-6}$  per jaar).

De beheersing van ongevallen met transporten op de locatie van EPZ in Borssele is beschreven in een Alarmplan. Voor de beheersing van transportongevallen met splijtstoffen van en naar de KCB buiten de locatie zijn eveneens calamiteitenplannen opgesteld. De risico's van deze transportongevallen bij het voorgenoemde gebruik van MOX zullen door toename van het aantal transporten weliswaar toenemen, maar blijven zoals boven beschreven minimaal een factor 300.000 lager dan het maximaal toelaatbare risico. Daarom is het niet noodzakelijk de betreffende calamiteitenplannen te modificeren naar aanleiding van de voorgenoemde wijziging.

## 6.7 Risico's inzake de verspreiding van kernwapens

Zoals vermeld in hoofdstuk 5, wordt kernenergie voor de productie van elektriciteit voornamelijk met risico's inzake de verspreiding van kernwapens in verband gebracht wegens het gebruik van nucleaire materialen, zoals verrijkt uranium

en plutonium. Risico's ten aanzien van verspreiding van technologische kennis zijn in het kader van de voorgenoemde activiteit niet relevant, omdat hierin geen verandering plaatsvindt. Verder dient te worden opgemerkt dat de KCB, in het bijzonder alle daarin gebruikte nucleaire materialen, ook bij de voorgenoemde activiteit onverminderd onder volledig toezicht van Euratom en de IAEA blijven vallen. Dit geldt ook voor de waarborgen voor de beveiliging van plutonium en plutoniumproducten zoals MOX-splijtstof. De veiligheid van plutonium en plutoniumproducten is gewaarborgd door uitvoering van alle bepalingen van het 'Verdrag voor de Fysieke Beveiliging van Nucleaire Materialen en Nucleaire Installaties', waar alle landen van de Europese Unie bij aangesloten zijn<sup>39</sup>. Hierdoor kan er op vertrouwd worden dat EPZ's MOX-splijtstof door de cyclus heen beveiligd wordt overeenkomstig internationaal vastgestelde eisen.

### Inzet van MOX

Bij het gebruik van uraniumsplijtstof wordt plutonium geproduceerd uit uranium-238. Een gedeelte van de aldus geproduceerde splijtbare plutoniumisotopen wordt direct gebruikt in het splijttingsproces. Het overige deel komt bij opwerking van de gebruikte splijtstof beschikbaar. Dit is het plutonium (afkomstig van opgewerkte civiele kernbrandstoffen) dat EPZ op het oog heeft voor de aanschaf en het gebruik van MOX-elementen (paragraaf 4.2.3).

<sup>39</sup> Besluit 2007/513/Euratom van 10 juli 2007 terzake van de toetreding tot de *Convention on the Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities*.

Tabel 6.7.1 Gemiddelde hoeveelheid plutonium in de jaarlijks nieuw in te zetten en definitief te ontladen batches elementen en de netto productie van plutonium als functie van de kernsamenstelling.

		Massa Pu-isotoop (kg/jaar) in herlading verse elementen	Massa Pu-isotoop (kg/jaar) in definitief te ontladen elementen	Netto productie van Pu-isotoop (kg/jaar)
<b>Bestaande situatie</b>	Pu-238	0	2,5	2,5
	Pu-239	0	48	48
	Pu-240	0	23	23
	Pu-241	0	12	12
	Pu-242	0	8,0	8,0
	<b>Totaal Pu</b>	<b>0</b>	<b>93</b>	<b>93</b>
<b>Alternatief 1: 26% MOX</b>	Pu-238	6,0	7,4	1,5
	Pu-239	120	81	-38
	Pu-240	55	62	7,0
	Pu-241	21	30	9,5
	Pu-242	17	28	11
	<b>Totaal Pu</b>	<b>220</b>	<b>210</b>	<b>-9,4</b>
<b>Voorgenomen activiteit: 40% MOX</b>	Pu-238	8,9	9,7	0,8
	Pu-239	180	98	-82
	Pu-240	82	81	-1,7
	Pu-241	31	39	7,9
	Pu-242	25	37	12
	<b>Totaal Pu</b>	<b>330</b>	<b>260</b>	<b>-63</b>
<b>Alternatief 2: 53% MOX</b>	Pu-238	12	12	-0,1
	Pu-239	240	110	-130
	Pu-240	110	99	-11
	Pu-241	41	47	5,2
	Pu-242	33	46	13
	<b>Totaal Pu</b>	<b>430</b>	<b>310</b>	<b>-120</b>
<b>Alternatief 3: 73% MOX</b>	Pu-238	15	14	-0,78
	Pu-239	300	130	-170
	Pu-240	140	120	-20
	Pu-241	52	55	3,4
	Pu-242	41	55	14
	<b>Totaal Pu</b>	<b>540</b>	<b>370</b>	<b>-170</b>

Bij de inzet van de MOX-elementen in KCB wordt plutonium verspleten. Tevens wordt nieuw plutonium gevormd uit uranium-238. De hoeveelheden aan verschillende plutoniumisotopen, die zich gemiddeld in de jaarlijks te ontladen splijtstof-elementen bevinden, zijn voor de verschillende kernsamenstellingen in Tabel 6.7.1 weergegeven. In de laatste kolom van de tabel is de netto productie van plutonium, als resultante van de productie uit de omzetting van uranium-238 en het verbruik door andere kernreacties, weergegeven.

Kort geformuleerd valt uit Tabel 6.7.1 af te leiden dat er in de huidige situatie jaarlijks 93 kg

plutonium uit de kern wordt ontladen. Uit Tabel 6.7.1 blijkt verder dat bij het gebruik van MOX-elementen bij aanvang meer plutonium in de reactor aanwezig is (kolom 3) dan in de huidige situatie. Bij de voorgenomen activiteit (inzet 40% MOX) en bij de alternatieven vindt echter netto verbruik van plutonium plaats, waardoor de totale hoeveelheid plutonium afneemt met circa 63 kg per jaar, in plaats van de jaarlijkse toename met 93 kg in de bestaande situatie. Hoewel bij het gebruik van MOX-splijtstof sprake is van inzet van plutonium is dit plutonium wegens de samenstelling niet geschikt voor de productie van kernwapens. Dit wordt

voornamelijk bepaald door het gehalte aan het isotoop plutonium-240, dat voor gebruikte ENU-splijtstof afkomstig uit de KCB 25 gew % bedraagt. Plutonium met een dermate hoog gehalte aan plutonium-240 wordt algemeen geacht ongeschikt te zijn voor toepassing in kernwapens, waarvoor een drempelwaarde van maximaal 7 gew % plutonium-240 wordt genoemd. Het gehalte aan plutonium-240 neemt toe met toenemende opbrand en is daardoor hoger in gebruikte dan in verse MOX splijtstofelementen.

Wanneer EPZ in de MELOX fabriek in Zuid-Frankrijk MOX-splijtstof laat maken, zoals het voornemen is, dan zullen er transporten van plutonium-oxide plaatsvinden vanuit de opwerkingsfabriek in La Hague naar de MELOX fabriek. De gevolgen van deze transporten op de omgeving kunnen geacht worden aanmerkelijk lager te zijn dan in hoofdstuk 6.6.1 is beschreven voor de gebruikte MOX-elementen. De voorgenomen activiteit brengt bovendien met zich mee dat verse MOX-elementen van Zuid-Frankrijk naar Borssele worden getransporteerd. Deze transporten zullen over de openbare weg plaatsvinden. Het betreft voor de voorgenomen activiteit jaarlijks gemiddeld 12 MOX-elementen. Controle en toezicht van de onafhankelijke splijtstofbewakingsregimes van Euratom en van de IAEA houden omtrent plutoniumtransporten onder andere in dat deze verzegeld plaatsvinden en dat de getransporteerde hoeveelheden plutonium door deze instanties nauwlettend worden bewaakt. Deze splijtstofbewakingsregimes zijn voor de betreffende splijtstofcyclusfaciliteiten

en transporten operationeel. De IAEA legt verantwoording af over haar betreffende activiteiten in publiek toegankelijke verslagleggingen.

Aan het vervoer van plutoniumhoudende stoffen over de openbare weg worden ook anderszins zwaardere beveiligingseisen gesteld dan aan het vervoer van verse ENU-elementen. Dit komt doordat plutonium in een andere beveiligingsklasse valt dan uranium. Daarnaast zijn verse MOX-elementen radioactiever dan verse ENU-elementen. MOX-elementen zullen daarom in een speciaal type transportverpakking, met een hoge bestendigheid tegen de gevolgen van transportongevallen en sabotagepogingen, naar de KCB worden getransporteerd. De basisvereisten voor de beveiliging van deze transporten zijn vastgelegd door het Internationaal Atoombureau te Wenen (IAEA)<sup>40</sup>. Deze vereisten zijn verder uitgewerkt in nationale voorschriften en richtlijnen die om beveiligingsredenen als *'restricted'* zijn geclassificeerd.

#### Inzet c-ERU

Verse c-ERU-elementen bevatten maximaal  $4,6 \pm 0,05$  gew % uranium-235. Daarbij kan worden opgemerkt dat de afgelopen jaren het mengen van RepU met ex-militair hoogverrijkt uranium tot laagverrijkt uranium de meest gangbare techniek is om ERU voor reactorsplijtstof te produceren. Sinds 2003 maakt EPZ ook gebruik van dit procédé. Hierdoor worden ex-militaire voorraden hoogverrijkt uranium verminderd en gebruikt voor energieopwekking.

Tabel 6.7.2 Gemiddelde hoeveelheid plutonium in de jaarlijks nieuw in te zetten en definitief te ontladen batches elementen en de netto productie van plutonium als functie van de kernsamenstelling.

		Massa Pu-isotoop (kg/jaar) in herlading verse elementen	Massa Pu-isotoop (kg/jaar) in definitief te ontladen elementen	Netto productie van Pu-sotoop (kg/jaar)
<b>Bestaande situatie</b>	Pu-238	0	2,5	2,5
	Pu-239	0	48	48
	Pu-240	0	23	23
	Pu-241	0	12	12
	Pu-242	0	8,0	8,0
	<b>Totaal Pu</b>	<b>0</b>	<b>93</b>	<b>93</b>
<b>Inzet 100% c-ERU</b>	Pu-238	0	7,3	7,3
	Pu-239	0	51	51
	Pu-240	0	23	23
	Pu-241	0	13	13
	Pu-242	0	7,9	7,9
	<b>Totaal Pu</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

<sup>40</sup> INFCIRC 225, Rev.5; IAEA publicatie NSS-9 'Security in the Transport of Radioactive Materials'.

Bij gebruik van c-ERU wordt netto plutonium geproduceerd (Tabel 6.7.2). De totale geproduceerde hoeveelheid plutonium neemt bij de voorgenomen activiteit licht toe ten opzichte van de bestaande situatie. Het percentage plutonium-240 in dit plutonium is ruim een factor drie hoger dan de bovengrens die algemeen voor de kwaliteit van plutonium voor de vervaardiging van kernwapens wordt aangehouden.

Ook bij de inzet van c-ERU blijft het plutonium van EPZ ongewijzigd onder controle en toezicht van de Euratom en IAEA veiligheidsinspectie.

### Conclusies

Kort samengevat kan worden gesteld dat de effecten van de inzet van MOX voor de voorgenomen activiteit en de alternatieven, de risico's voor verspreiding van kernwapens verminderen. De totale hoeveelheid plutonium neemt af en de militaire bruikbaarheid van het plutonium neemt af door een toename van het percentage plutonium-240.

De effecten van de voorgenomen inzet van c-ERU zijn uit het oogpunt van non-proliferatie niet significant. Wanneer de hoeveelheid vrij beschikbaar plutonium op de lange termijn als een aandachts-punt voor non-proliferatie wordt gezien, dan dient in ogenschouw te worden genomen dat door de inzet van MOX in de KCB in alle mogelijke varianten deze hoeveelheid plutonium gelijk blijft of zelfs significant minder wordt.

## 6.8 Veranderingen in de splijfstofcyclus

De splijfstofcyclus van de KCB is beschreven in Bijlage A. De inzet van MOX- en c-ERU-elementen heeft niet alleen gevolgen voor de bedrijfsvoering van KCB; er treden ook enkele veranderingen op in de splijfstofcyclus. Dit zijn veranderingen in de leveringsketen van de brandstof (*front-end*) en in de keten van de afvoer (*back-end*). Hoewel EPZ geen formele verantwoordelijkheid voor de veiligheidseffecten en milieugevolgen van *front-* en *back-end* activiteiten heeft, wordt in het navolgende kort inzichtelijk gemaakt wat de effecten van de voorgenomen activiteit erop zijn. Het merendeel

van deze activiteiten vindt plaats in het buitenland, is daar vergund en valt onder de verantwoordelijkheid van andere bedrijven en nationale overheden. EPZ heeft als beleid dat zij zaken doet met bedrijven die voldoen aan de lokale vergunningsverplichtingen en beschikken over een gecertificeerd milieuzorgsysteem.

Naar aanleiding van de Richtlijnen behandelt deze paragraaf de veranderingen in de splijfstofcyclus ten gevolge van de inzet van MOX- en c-ERU-elementen. In deze paragraaf is de behandeling grotendeels kwalitatief. In paragraaf 6.10 worden kwantitatieve gegevens verstrekt.

### 6.8.1 Ertswinning en extractie

De productie van uraniumerts en de zuivering ervan tot *yellowcake* levert ten opzichte van de andere onderdelen van de splijfstofcyclus een relatief grote radiologische belasting voor de omgeving en voor de werknemers (bijlage A). Door de inzet van 40% MOX en c-ERU heeft EPZ minder natuurlijk uranium en dus ook minder uraniumerts nodig. In een scenario waarin de reactorkern alleen nog maar bestaat uit MOX-elementen en c-ERU-elementen, is de behoefte aan natuurlijk uranium zelfs nul.

Kwalitatief kan daarom gesteld worden dat de voorgenomen activiteiten een positief effect hebben op de radiologische belasting van de omgeving en van de medewerkers in de ertswinning en extractie industrie<sup>41</sup>.

### 6.8.2 Splijststofproductie (Conversie, verrijking en fabricage splijststof-elementen)

De radiologische belastingen van omgeving en medewerkers door conversie-, verrijkings- en fabricage stappen in de splijfstofcyclus zijn relatief beperkt (bijlage A). Het gebruik van gerecyclede materialen (c-ERU en MOX) levert voor werknemers additionele risico's op. Die worden echter in de industrie effectief beheerst (extra stralingsafscherming, handschoenenkasten, processen met afstandbediening). Bijgevolg zijn de radiologische gevolgen van de

<sup>41</sup> OECD/NEA, *Radiological Impacts of Spent Fuel Management Options*; OECD/NEA, Paris (2000).

voorgenomen activiteiten voor de individuele medewerkers in de splijtstofproductie niet significant.

Op basis van de milieujarverslagen van de splijtstofleverancier kan worden geconcludeerd dat de collectieve dosis voor medewerkers in de splijtstofproductie bij de productie van MOX hoger is dan bij de productie van uranium splijtstofelementen. Voor de productie van 12 MOX-splijtstofelementen bedraagt de collectieve dosis ongeveer 50 mSv.

### 6.8.3 Opwerking splijtstof

Wat betreft de opwerkingsfabriek van La Hague in Frankrijk zullen de voorgenomen activiteiten geen invloed hebben op de bedrijfsprocessen, de gevolgen voor werknemers of voor de omgeving. In de bestaande situatie wordt ook al MOX- en c-ERU splijtstof opgewerkt; daarbij zijn er geen veranderingen in de radiologische effecten ten opzichte van het opwerken van ENU.

De hoeveelheid splijtstof die per jaar ter verwerking wordt aangeboden (28 elementen, circa 9 ton) verandert niet. Daarom kunnen de consequenties van het gebruik van MOX en c-ERU verwaarloosd worden. De milieueffecten van de opwerkingsfabriek van La Hague worden jaarlijks gedetailleerd gerapporteerd door AREVA<sup>42</sup>.

### 6.8.4 Transport

Wanneer EPZ in de MELOX fabriek in Zuid-Frankrijk MOX splijtstof laat maken, zoals het voornemen is, dan zullen er transporten van plutoniumoxide plaatsvinden vanuit de opwerkingsfabriek in La Hague naar de MELOX fabriek. De gevolgen van deze transporten op de omgeving kunnen geacht worden aanmerkelijk

Figuur 6.8.1 Plutoniumtransport in Frankrijk (foto ANP).



<sup>42</sup> Rapport *environnemental social et societal 2008*, AREVA NC.

lager te zijn dan in hoofdstuk 6.6.1 is beschreven voor de gebruikte MOX-elementen. De gevolgen zullen binnen alle van toepassing zijnde internationale normen vallen. De Franse overheid zal voor deze transporten specifieke regels voorschrijven en op de naleving hiervan toezien.

Uit de opgave van AREVA NC valt op te maken dat er jaarlijks tussen de 100 en 200 plutonium transporten vanuit La Hague naar de MELOX fabriek plaatsvinden. De MELOX fabriek heeft een capaciteit van 195 ton per jaar; de voorgenomen activiteit houdt in dat EPZ hiervan gemiddeld 3 ton gaat afnemen. De voorgenomen activiteit heeft dus een relatief milieueffect van 1 à 2% op de gevolgen van de reeds gangbare transporten. De (milieu)effecten voor de transporten van MOX-elementen vanuit Zuid Frankrijk naar Borssele zijn reeds beschreven in de paragrafen 6.6.1 en 6.6.2.

## 6.9 Toetsing aan beschermingsbepalingen Westerschelde

### 6.9.1 Structuurschema Groene Ruimte (SGR)

Centraal in het SGR staat de basisbescherming van de Ecologische Hoofdstructuur (EHS). Deze basisbescherming richt zich op het handhaven van bestaande kenmerken als bodemopbouw, -structuur en -reliëf, waterhuishouding, natuurlijke processen, sedimentatie- en erosieprocessen, landschapsstructuur en de ontsluiting en rust. Ook de kwaliteit van bodem, water en lucht moet gehandhaafd worden. In de paragrafen 5.6 en 6.3.2 is aangetoond dat noch in de bestaande situatie, noch in relatie tot de voorgenomen diversificatie van brandstof sprake is van een wezenlijke radiologische aantasting van de bestaande kenmerken en waarden van de Westerschelde.

### 6.9.2 Natuurbeschermingswet

Grote delen van de Westerschelde zijn door de Nederlandse overheid aangewezen als natuurbeschermingsgebied ('Natura 2000-gebied'). Hierop is het afwegingskader uit de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn (artikel 6, tweede lid) en de Natuurbeschermingswet 1998 van toepassing. Dit houdt in dat voor de besluitvorming over nieuwe activiteiten die significante gevolgen kunnen hebben voor te beschermen flora en fauna, een passende beoordeling plaats moet vinden. Er kan slechts toestemming worden



gegeven indien zekerheid is verkregen dat de natuurlijke kenmerken van het gebied niet worden aangetast. Alleen bij een dringende maatschappelijke noodzaak en bij afwezigheid van alternatieven, mag aantasting van de natuurlijke kenmerken plaatsvinden, waarbij alle nodige compenserende maatregelen dienen te worden genomen. Samengevat komen de bepalingen dus neer op bescherming van de leefgebieden van vogels en bepaalde aangewezen faunasoorten, alsmede van gebieden met bijzondere types natuurlijke habitats.

Gezien het feit dat de voorgenomen activiteit, diversificatie van brandstof, geen wijziging van de bestaande milieusituatie met zich meebrengt, kan de conclusie geen andere zijn dan dat het voornemen geen effect heeft voor (beschermd) vogels, zeehonden en andere faunasoorten, alsmede voor de habitattypes waarvoor de Westerschelde als Natura 2000-gebied is aangewezen.

## 6.10 Overzicht effecten en definitie meest milieuvriendelijke alternatief

### 6.10.1 Overzicht effecten en conclusies

In Tabel 6.10.1 is een overzicht gegeven van de milieueffecten van de bestaande situatie, de voorgenomen activiteiten (inzet 40% MOX en c-ERU) en de drie alternatieven. Op basis van deze tabel wordt in paragraaf 6.10.2 het meest milieuvriendelijke alternatief (MMA) beschouwd.

Ten aanzien van de voorgenomen activiteiten en de alternatieven kan het volgende geconcludeerd worden:

- De individuele dosis van omwonenden ten gevolge van lozingen en de dosis ten gevolge van directe straling tijdens normaal bedrijf blijven bij de inzet van MOX- en c-ERU-elementen gelijk ten opzichte van de huidige situatie.
- De variaties in de maximale doses voor de bevolking bij de ontwerpgevallen voor de verschillende MOX-varianten en voor c-ERU zijn klein. Zij blijven beneden de wettelijke grenzen.

- De maximale effectieve dosis en de maximale schildklierdosis voor de bevolking bij de ontwerpgevallen vertonen voor de verschillende splijtstofvarianten geen significante variaties.
- De kans op kernsmelten is onafhankelijk van de mate waarin de MOX-elementen en/of c-ERU-elementen worden ingezet.
- De invloed van de voorgenomen activiteiten op de risico's van buiten-ontwerpgevallen is zeer gering. Het individueel risico en het groepsrisico bij elk van de voorgenomen activiteiten (inzet van 40% MOX en c-ERU) verschillen nauwelijks van het individueel risico en het groepsrisico in de huidige situatie en blijven ruimschoots onder de grenswaarden.
- Het aantal opgebrachte splijtstofelementen per jaar blijft bij het gebruik van MOX- en c-ERU-elementen gelijk aan de bestaande situatie, te weten 28. Op het moment van ontladen is de hoeveelheid radioactiviteit in het ontladen splijtstofelement onafhankelijk van de kernsamenstelling.
- De medewerkers van EPZ die een rol spelen bij de ontvangst en 'handling' van de nieuwe elementen ontvangen een hogere stralingsbelasting. Het betreft een tiental medewerkers. De jaarlijkse individuele dosis ontvangen tijdens deze werkzaamheden wordt voor deze medewerkers verhoogd van <math>0,05</math> mSv/jaar naar <math>0,1</math> en <math>1,0</math> mSv/jaar voor de aanvoer van respectievelijk c-ERU- en MOX-elementen. Hoe hoger de inzet van MOX, hoe hoger de ontvangen dosis. Echter voor alle MOX-alternatieven blijft de dosis <math>1,0</math> mSv/jaar.
- De hoeveelheid radioactiviteit in de gebruikte splijtstofelementen 500 dagen na afschakeling neemt bij de inzet van MOX met circa 30% toe ten opzichte van de huidige elementen. Door langere afkoeling en toepassing van een ander ontwerp van de transportverpakking zal de stralingsbelasting van het personeel van EPZ niet negatief beïnvloed worden.

Tabel 6.10.1 Vergelijking van de milieueffecten van de bestaande situatie met de voorgenomen activiteit en de alternatieven.

Milieu-effect c.q. bedrijfsaspect	Samenstelling reactorkern					
	Bestaande situatie	Alternatief 1: 26% MOX	Voorgenomen activiteit: 40% MOX	Alternatief 2: 53% MOX	Alternatief 3: 73% MOX	Voorgenomen activiteit: c-ERU <sup>3)</sup>
<i>Normaal bedrijf (mSv/jaar):</i>						
- Max. individuele dosis bij gem. lozing	2,2·10 <sup>-5</sup>	< 2,2·10 <sup>-5</sup>	< 2,2·10 <sup>-5</sup>	< 2,2·10 <sup>-5</sup>	< 2,2·10 <sup>-5</sup>	ca. 2,2·10 <sup>-5</sup>
- Max. individuele dosis bij max. lozing	3,8·10 <sup>-5</sup>	< 3,8·10 <sup>-5</sup>	< 3,8·10 <sup>-5</sup>	< 3,8·10 <sup>-5</sup>	< 3,8·10 <sup>-5</sup>	ca. 3,8·10 <sup>-5</sup>
- Directe straling	4,3·10 <sup>-3</sup>	ca. 4,3·10 <sup>-3</sup>	ca. 4,3·10 <sup>-3</sup>	ca. 4,3·10 <sup>-3</sup>	ca. 4,3·10 <sup>-3</sup>	ca. 4,3·10 <sup>-3</sup>
<i>Ontwerpgevallen (mSv):</i>						
- Max. effectieve dosis	0,68	0,69	0,70	0,69	0,70	0,70
- Max. schildklierdosis	4,5	4,5	4,6	4,6	4,7	4,5
<i>Buiten-ontwerpgevallen (per jaar):</i>						
- Kans op kernsmelten	2,12·10 <sup>-6</sup>	2,12·10 <sup>-6</sup>	2,12·10 <sup>-6</sup>	2,12·10 <sup>-6</sup>	2,12·10 <sup>-6</sup>	2,12·10 <sup>-6</sup>
- Max. individueel risico	1,9·10 <sup>-8</sup>	2,0·10 <sup>-8</sup>	2,0·10 <sup>-8</sup>	2,0·10 <sup>-8</sup>	2,0·10 <sup>-8</sup>	2,0·10 <sup>-8</sup>
- Groepsrisico bij 10 slachtoffers	5,6·10 <sup>-9</sup>	5,5·10 <sup>-9</sup>	5,6·10 <sup>-9</sup>	5,4·10 <sup>-9</sup>	5,8·10 <sup>-9</sup>	5,6·10 <sup>-9</sup>
<i>Kriticaliteit SOB</i>	<i>Gelijke reactiviteit</i>	<i>Lagere reactiviteit ten opzichte van uranumelementen</i>				<i>Gelijke reactiviteit</i>
	Voldoet bij afsluiting posities <sup>3)</sup>	Voldoet bij afsluiting posities	Voldoet bij afsluiting posities	Voldoet bij afsluiting posities	Voldoet bij afsluiting posities	Voldoet bij afsluiting posities
<i>Radioactief afval</i>						
- Opgebrachte elementen (per jaar)						
- ENU(c-ERU)-elementen	28	20	16	12	8	28
- MOX-elementen	0	8	12	16	20	0
- Activiteit van 1 element 3 dagen na afschakelen (Bq)						
- ENU(c-ERU)-elementen	4,72·10 <sup>17</sup>	4,70·10 <sup>17</sup> <sup>2)</sup>	4,70·10 <sup>17</sup>	4,75·10 <sup>17</sup>	4,68·10 <sup>17</sup>	4,73·10 <sup>17</sup>
- MOX-elementen	-	4,22·10 <sup>17</sup>	4,22·10 <sup>17</sup>	4,30·10 <sup>17</sup>	4,30·10 <sup>17</sup>	-
- Activiteit van 1 element 500 dagen na afschakelen (Bq)						
- ENU(c-ERU)-elementen	2,74·10 <sup>16</sup>	2,74·10 <sup>16</sup>	2,74·10 <sup>16</sup>	2,81·10 <sup>16</sup>	2,67·10 <sup>16</sup>	2,80·10 <sup>16</sup>
- MOX-elementen	-	3,34·10 <sup>16</sup>	3,34·10 <sup>16</sup>	3,52·10 <sup>16</sup>	3,52·10 <sup>16</sup>	-
- Netto productie plutonium (kg/jr)	93	-9,4	-63	-120	-170	100
<i>Regulier transport</i>						
- Max individuele jaardosis (mSv) behorende bij de aanvoer van verse splijtstofelementen						
- Omwonenden	2,2·10 <sup>-5</sup>	4,5·10 <sup>-5</sup>	4,5·10 <sup>-5</sup>	4,5·10 <sup>-5</sup>	4,5·10 <sup>-5</sup>	2,6·10 <sup>-5</sup>
- Treinreizigers	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
- Weggebruikers	7,0·10 <sup>-4</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>	8,0·10 <sup>-4</sup>
- EPZ-personeel	< 0,05	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 0,1
- Max individuele jaardosis (mSv) behorende bij de afvoer van gebruikte splijtstofelementen						
- Omwonenden	1,6·10 <sup>-2</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>	1,6·10 <sup>-2</sup>
- Treinreizigers	1,0·10 <sup>-3</sup>	1,0·10 <sup>-3</sup>	1,0·10 <sup>-3</sup>	1,0·10 <sup>-3</sup>	1,0·10 <sup>-3</sup>	1,0·10 <sup>-3</sup>
- Weggebruikers	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
- EPZ-personeel <sup>3)</sup>	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
<i>Transportongevallen</i>						
- Max individueel risico op late sterfte ten gevolge van transportongevallen						
- Omwonenden/transportmedewerkers	2,3·10 <sup>-12</sup>	3,6·10 <sup>-12</sup>	3,6·10 <sup>-12</sup>	3,6·10 <sup>-12</sup>	3,6·10 <sup>-12</sup>	2,5·10 <sup>-12</sup>
- Treinreizigers	1,1·10 <sup>-12</sup>	1,1·10 <sup>-12</sup>	1,1·10 <sup>-12</sup>	1,1·10 <sup>-12</sup>	1,1·10 <sup>-12</sup>	1,1·10 <sup>-12</sup>
- Weggebruikers	9,1·10 <sup>-10</sup>	1,8·10 <sup>-9</sup>	1,8·10 <sup>-9</sup>	1,8·10 <sup>-9</sup>	1,8·10 <sup>-9</sup>	1,0·10 <sup>-9</sup>
<i>Splijtstofcyclus<sup>4)</sup></i>						
- Genormaliseerde collectieve dosis bevolking (mens mSv per GWe.jaar)						
- Ertswinning & extractie	0,24·10 <sup>3</sup>			< 0,24·10 <sup>3</sup>		
- Splijtstof-productie	0,3·10 <sup>5</sup>			ca. 0,3·10 <sup>5</sup>		
- Opwerking splijtstof	0,13·10 <sup>3</sup>			ca. 0,13·10 <sup>3</sup>		
- Genormaliseerde collectieve dosis medewerkers (mens mSv per GWe.jaar)						
- Ertswinning & extractie	1,83·10 <sup>3</sup>			< 1,83·10 <sup>3</sup>		
- Splijtstofproductie	0,12·10 <sup>3</sup>			≥ 0,12·10 <sup>3</sup>		
- Opwerking splijtstof	3,0·10 <sup>3</sup>			ca. 3,0·10 <sup>3</sup>		

<sup>1)</sup> Zie Hoofdstuk 5 onder paragraaf 5.4.5.

<sup>2)</sup> Hoeveelheid radioactiviteit in een ENU- en/of c-ERU-element bij een kern met 26% MOX en 74% ENU en/of c-ERU 3 dagen na afschakelen.

<sup>3)</sup> Op dit moment is er een achterstand in het aftransporteren van gebruikte splijtstofelementen. Zodra de achterstand is weggewerkt, dienen er jaarlijks 28 elementen te worden afgevoerd, dus 4 containers per jaar. De vermelde individuele dosis voor EPZ-personeel is gebaseerd op de jaarlijkse afvoer van 28 gebruikte elementen.

<sup>4)</sup> Gegevens afkomstig van UNSCEAR 2000, Sources and effects of ionizing radiation.

- Bij de vier MOX-kernvarianten wordt er netto plutonium verbruikt, terwijl in de huidige situatie en bij het gebruik van c-ERU netto plutonium wordt geproduceerd. Bij een toename van de inzet van de hoeveelheid MOX, neemt de hoeveelheid verbruikt plutonium toe.
- De effecten van de inzet van MOX voor de voorgenomen activiteit en de alternatieven verminderen de risico's voor verspreiding van kernwapens. De totale hoeveelheid plutonium neemt af en de mogelijke militaire bruikbaarheid van het plutonium verslechtert door een toename van het percentage plutonium-240. De effecten van de voorgenomen inzet van c-ERU zijn uit het oogpunt van non-proliferatie niet significant.
- Qua transport is het grootste risico gelegen in de afvoer van gebruikte elementen. Dit risico (maximale individuele jaardosis voor diverse risicogroepen en individueel risico op late sterfte bij transportongevallen) is voor alle splijfstofvarianten nagenoeg gelijk en laag.
- Door de inzet van MOX- en c-ERU-elementen is er minder natuurlijk uranium en dus ook minder uraniumerts nodig dan bij gebruik van ENU. De voorgenomen activiteiten hebben daardoor een positief effect op de radiologische belasting van de bevolking en medewerkers ten gevolge van ertswinning en extractie.
- Het gebruik van gerecyclede materialen (c-ERU en MOX) levert voor werknemers additionele risico's op. Die worden echter in de industrie effectief beheerst (extra stralingsafscherming, handschoenenkasten, processen met afstand-bediening). Bijgevolg zijn de radiologische gevolgen van de voorgenomen activiteiten voor de splijfstofproductie niet significant.

### 6.10.2 Meest milieuvriendelijke alternatief

Het meest milieuvriendelijke alternatief is het alternatief met de minste milieubelasting. Uit Tabel 6.10.1 blijkt dat de verschillen in milieubelasting voor de omgeving rondom KCB en in belasting voor het KCB-personeel tussen de verschillende alternatieven zeer klein zijn. De belangrijkste verschillen lijken de proliferatie

aspecten en de gevolgen voor de splijfstofcyclus, met name mijnbouw, te zijn. Beide worden hieronder behandeld.

#### Non proliferatie

Het recyclen van plutonium bij het gebruik van MOX heeft het voordeel dat er netto plutonium wordt verbruikt in plaats van geproduceerd. Het netto verbruik neemt toe naar mate de hoeveelheid plutonium in de kern toeneemt.

#### Splijststofcyclus

Bij de inzet van MOX- en c-ERU-elementen vermindert de milieubelasting rondom mijnbouwlocaties. MOX- en c-ERU-elementen maken namelijk gebruik van teruggewonnen, splijtbaar plutonium en uranium, waardoor er minder natuurlijk uranium uit de mijnen gedolven hoeft te worden. Niet alleen de milieubelasting rondom de mijnbouwlocaties verbetert door het gebruik van MOX en c-ERU, ook de stralingsbelasting van mijnbouwmedewerkers vermindert.

Recycling van plutonium en uranium zorgt er echter wel voor dat de belasting van medewerkers in de splijststofproductie iets hoger kan worden.

Deze verhoging kan echter door voorzorgsmaatregelen (bijvoorbeeld het aanbrengen van stralingsafscherming) worden beheerst.

#### MMA

De milieuverschillen tussen de alternatieven ten aanzien van de bedrijfsvoering, proliferatie en de splijststofcyclus zijn gering. De alternatieven zijn wat betreft de beïnvloeding van het milieu min of meer gelijkwaardig. Het aandragen en behandelen van een meest milieu vriendelijk alternatief brengt vanwege deze geringe verschillen geen extra inzicht.

# 7 Leemten in kennis en evaluatieprogramma



## 7.1 Inleiding

*De gevolgen van de voorgenomen activiteit zijn in het algemeen voldoende uitgebreid onderzocht om de milieueffecten te kunnen beschrijven. Daarbij is steeds gewerkt met modellen en methodieken zoals die anno 2010 in brede kring zijn aanvaard als 'stand van de techniek'.*

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op die onderdelen waarvoor de invloeden en gevolgen voor het milieu (nog) niet of niet voldoende zeker kunnen worden vastgesteld.

Tenslotte wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de evaluaties van voorgaande MER's en op het evaluatieprogramma van de onderhavige milieueffectrapportage.

## 7.2 Leemten in kennis

### 7.2.1 Ervaring in het gebruik van MOX-splijstof

In de KCB is momenteel nog geen MOX en gecompenseerde ERU-splijstof toegepast. Er zijn daarom nog geen gegevens over de emissies in lucht en oppervlaktewater bij gebruik van deze splijstoffen in de KCB beschikbaar<sup>43</sup>. Dergelijke gegevens zijn wel ruimschoots beschikbaar bij het gebruik van verrijkt natuurlijk uranium. Op basis van deze praktijkgegevens en uitgebreide basiskennis van de productiemechanismen van de radionucliden in deze emissies, zijn gefundeerde conservatieve schattingen van de te verwachten emissies bij gebruik van MOX- en c-ERU-splijstof in de KCB mogelijk.

Zowel MOX- als c-ERU-splijstoffen worden gedurende vele (bedrijfs)jaren in andere kerncentrales in de wereld toegepast. Onder deze

centrales bevinden zich met de KCB vergelijkbare centrales. Er is dus van elders informatie beschikbaar die relevant is voor de verwachte emissies in lucht en oppervlaktewater bij gebruik van MOX- en c-ERU-splijstoffen in de KCB. Uit deze gegevens blijkt dat de dosisbelasting van werknemers en bevolking bij deze centrales vergelijkbaar is met die bij gebruik van verrijkt natuurlijk uraniumoxide splijstof. Bij inzet van genoemde splijstoffen zullen vooral dosisbelasting van werknemers en bevolking in het evaluatieprogramma gevolgd worden.

### 7.2.2 Ontwikkelingen in richtlijnen en regelgeving betreffende stralingsrisico's

#### 7.2.2.1 De ICRP richtlijnen

Sinds de publicatie van de Milieueffectrapportage van de KCB in 2004, heeft de *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) een aantal nieuwe aanbevelingen gedaan betreffende de bepaling van de gezondheidsrisico's voor mens en leefmilieu van blootstelling aan radioactieve stoffen en ioniserende straling.

De ICRP heeft onder meer in 2006 een verfijnder rekenmodel<sup>44</sup> aanbevolen voor de bepaling van de stralingsdosis bij de mens door ingestie van radioactieve stoffen. Dit model is een verfijning van het model dat de ICRP in 1979 in

<sup>43</sup> Niet gecompenseerd ERU wordt sinds 2003 wel gebruikt bij KCB.

<sup>44</sup> ICRP Publication 100, *Annals of the ICRP*, Vol. 36, (1-2), 2006 en ICRP Publication 101, *Annals of the ICRP*, Vol. 36 (3), 2006.

publicatie 30 heeft aanbevolen<sup>45</sup>. Ook heeft de ICRP recentelijk<sup>46</sup> nieuwe aanbevelingen gedaan op het gebied van de stralingsbescherming, zoals voor de bepaling van de effectieve dosis en de risico's van optreden van kanker en erfelijke effecten als gevolg van deze dosis. De belangrijkste conclusie van de ICRP is dat voor lage doses (lager dan 100 mSv) de veronderstelde evenredigheid tussen de kans van optreden van nadelige effecten en de effectieve dosis die bij blootstelling is ontvangen, zonder drempel waarde, van toepassing blijft. De nieuwe ICRP aanbevelingen zullen niet leiden tot strengere limitering<sup>47</sup> van de jaarlijks toegestane dosis van de werknemers en overige leden van de bevolking.

Het model dat voor het huidige MER is toegepast is gebaseerd op de aanbevelingen van de ICRP uit 1996 en 1997. Deze aanbevelingen zijn door de Europese Commissie overgenomen (Richtlijn nr. 96/29/Euratom en Richtlijn nr. 97/43/Euratom). Vervolgens zijn deze in 2001 in de Nederlandse wetgeving vastgelegd in het Besluit stralingsbescherming. Als de nieuwe aanbevelingen van de ICRP worden toegepast, kunnen geringe afwijkingen in de doseswaarden, die berekend zijn voor dit MER, ontstaan. Het betreft doses voor de bevolking door ingestie van radioactieve stoffen afkomstig van emissies van de KCB. Verwacht wordt dat de nieuwe aanbevelingen van de ICRP worden overgenomen door de Europese Commissie en dat de resultaten van het nieuwe rekenmodel voor de ingestie-dosis beschikbaar komen in een revisie van de richtlijnen uit 1996 en 1997. Deze gereviseerde richtlijnen zullen vervolgens in de Nederlandse wetgeving worden vastgelegd. Bij het evaluatieprogramma van het onderhavige MER en de evaluatie van de milieueffectrapportage zal men hier rekening mee dienen te houden.

Een nieuwe ontwikkeling bij de ICRP is dat naast de referentiemens ook de referentiedieren en -planten zijn voorgesteld om de effecten van de blootstelling van plant en dier aan radioactieve stoffen in het milieu te kunnen kwantificeren<sup>48</sup>. Het is niet de bedoeling van de

ICRP dat deze ontwikkelingen als richtlijn voor nieuw beleid worden toegepast. Overigens is de ICRP van mening dat het huidige systeem van stralingsbescherming dat gebaseerd is op de bescherming van mensen voldoende waarborg biedt voor de bescherming van het milieu.

### 7.2.2.2 De UNSCEAR richtlijnen

Sinds het voorgaande MER (2004), heeft de *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR) na haar publicatie in 2000<sup>49</sup>, in 2006 een nieuwe schatting gemaakt van het optreden van kanker na blootstelling aan straling<sup>50</sup>. Als vervolg op de publicatie in 2000 zijn ook nieuwe schattingen gemaakt van de blootstelling van leden van bevolking aan diverse bronnen van ioniserende straling, waaronder de emissies van kerncentrales en andere faciliteiten uit de splijtstofcyclus. Uit deze schattingen blijkt dat in de afgelopen jaren de collectieve dosis voor de lokale en regionale bevolking rond kerncentrales is afgenomen van 440 mens.mSv per GWe.jaar (UNSCEAR 2000) tot 270 mens.mSv per GWe.jaar. Deze afname is mede het resultaat van de verbeterde bedrijfsvoering van kerncentrales waardoor de jaarlijkse emissies van radioactieve stoffen in het milieu zijn afgenomen. In lijn met deze verbetering blijkt ook de blootstelling van het personeel van kerncentrales de afgelopen jaren (sinds 1994) te zijn afgenomen. Deze trend werd ook al in UNSCEAR 2000 aangegeven.

Uit de (nieuwe) schattingen van UNSCEAR valt af te leiden dat de dosis, die jaarlijks per hoofd van de lokale en regionale bevolking rond kerncentrales wordt ontvangen, minder dan 0,01 mSv bedraagt. Dit is minder dan een half procent van de individuele dosis van 2,4 mSv die ieder lid van de wereldbevolking gemiddeld jaarlijks zou ontvangen vanwege de blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling. Voor de KCB is de gemiddelde dosisbijdrage op basis van de lozingen in de periode 2000-2009 circa  $0,022 \cdot 10^{-3}$  mSv per jaar. De maximale dosisbijdrage bedraagt circa

<sup>45</sup> ICRP Publication 30, *Annals of the ICRP*, Vol. 2, (3-4), 1979.

<sup>46</sup> ICRP Publication 103, *Annals of the ICRP*, Vol. 37, (2-4), 2007.

<sup>47</sup> Zie ICRP Supporting Guidance 5, *Annals of the ICRP*, Vol. 36 (4), 2006.

<sup>48</sup> ICRP Publication 108, *Annals of the ICRP*, Vol. 38 (4-6), 2008.

<sup>49</sup> Rapportage van UNSCEAR aan de leden van de assemblee van de Verenigde Naties, 2000.

<sup>50</sup> 'Effects of ionizing radiation', Rapportage van UNSCEAR aan leden van de assemblee van de Verenigde Naties, 2006.

0,038-10<sup>-3</sup> mSv per jaar. Dit is beduidend lager dan waarden vermeld in UNSCEAR 2000. Hierin worden voor een aantal reactor sites individuele doses in de range van 1-500.10<sup>-3</sup> mSv per jaar gerapporteerd.

### 7.2.2.3 *Andere internationale organisaties*

In navolging van de ICRP heeft de IAEA als opvolger van eerdere wetenschappelijke samenwerkingsprojecten op het gebied van de overdracht en verspreiding van radioactieve stoffen in het ecosysteem in 2003 het project EMRAS (*Environmental Modelling for Radiation Safety*) ingesteld. In het kader van dit project richt een werkgroep zich sinds 2004 op modellen voor de berekening van de doses van een aantal referentiedieren door blootstelling aan radioactieve stoffen in het milieu, zoals die door de ICRP zijn aanbevolen (zie ICRP publication 108; 2008). Hiermee wordt bedoeld een model van een plant of een dier, dat analoog aan het gebruik van de referentiepersoon als model voor blootstelling van de mens, als representatief organisme gebruikt wordt om de dosisbelasting van plant en dier in een bepaald leefmilieu bij verschillende blootstellingsituaties (zoals concentraties aan radioactieve stoffen) te berekenen. Als voorbeeld van een representatief organisme in kustwateren wordt bruin zeewier genoemd. Voor het leefmilieu rivier of meer wordt de forel genoemd. Deze modellen geven ook een beter begrip van de wijze waarop de mens via de voedselketen wordt blootgesteld aan radioactieve stoffen die door bijvoorbeeld een kerncentrale in het milieu worden geloosd.

Door de Europese Commissie (EC) zijn naar aanleiding van de aanbevelingen van de ICRP en rapporten van UNSCEAR sinds 2004 geen nieuwe richtlijnen voorgesteld ter beperking van de blootstelling aan ioniserende straling bij handelingen en andere werkzaamheden met radioactieve stoffen en ioniserende straling. Wel is de richtlijn 2003/122/EURATOM inzake de controle op hoogactieve ingekapselde radioactieve bronnen en weesbronnen, die op 22 december 2003 is gepubliceerd, door de Nederlandse Overheid ingevoerd.

Ook zijn door de Europese Commissie en Parlement voorstellen gedaan (januari 2004) voor het opstellen van richtlijnen op het gebied

van de beveiliging van nucleaire installaties en een richtlijn inzake het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval. Deze richtlijnen zijn nog niet goedgekeurd. Ook de geamendeerde richtlijn voor de beveiliging van nucleaire installaties van 2008 is nog niet goedgekeurd. Deze richtlijnen zijn vooral gericht op verdere harmonisatie van de regelgeving binnen Europa. Verwacht wordt dat dit niet leidt tot ingrijpende wijzigingen van de Nederlandse regelgeving.

### 7.2.2.4 *Conclusies*

Uit het bovenstaande kan worden geconcludeerd dat de ontwikkelingen in de internationale inzichten in de stralingsrisico's samenhangend met het bedrijven van kerncentrales en in de daarop gebaseerde regelgevingen en richtlijnen, geen effect hebben op de keuze van de te gebruiken splijtstof.

## 7.3 *Evaluatieprogramma milieueffectrapportage*

### 7.3.1 *Opzet evaluatie MER's*

Het bevoegd gezag dient een evaluatie uit te voeren wanneer een activiteit waarover een milieueffectrapport is geschreven wordt ondernomen. De initiatiefnemer moet daaraan medewerking verlenen. Het doel van de evaluatie is de daadwerkelijk optredende milieueffecten te vergelijken met de in het MER voorspelde effecten. Om een aantal redenen kunnen verschillen optreden, bijvoorbeeld door:

- het tekortschieten van voorspellingsmethoden
- het niet voorzien van bepaalde effecten
- het optreden van leemten in kennis en informatie
- het elders optreden van onvoorziene, maar invloedrijke ontwikkelingen.

De laatste evaluatie van een MER betreffende de KCB betreft de evaluatie van het MER 'Optimalisatie splijtstof kernenergie-eenheid Borssele' en dateert uit 1996.

De conclusies en aanbevelingen uit deze evaluatie zijn verwerkt in het huidige MER en het daarvoor meest recente MER voor de KCB uit 2004. Voor dit laatste MER is nog geen evaluatie uitgevoerd. Vanuit deze optiek ontbreekt de mogelijkheid om

van nieuwe leerpunten gebruik te maken. In paragraaf 7.3.3 wordt een aanzet voor het evaluatieprogramma voor dit MER gegeven.

### 7.3.2 Andere evaluaties

Los van de evaluatie van het MER schrijft de huidige vergunning voor dat er om de twee jaar een evaluatie moet plaatsvinden. Hierin worden de technische, organisatorische, personele en administratieve voorzieningen met betrekking tot de nucleaire veiligheid en de stralenbescherming beoordeeld in het licht van de van kracht zijnde vergunning. De resultaten worden verstrekt aan de Directeur van de Kernfysische Dienst en de Hoofdinspecteur van de Volksgezondheid belast met het toezicht op de Hygiëne van het Milieu van het Ministerie van VROM. Zij keuren ook eventuele voorgestelde maatregelen goed.

### 7.3.3 Evaluatieprogramma van het onderhavige MER

Teneinde de verwachte effecten zoals in het onderhavige MER omschreven, te verifiëren is EPZ voornemens de volgende activiteiten uit te (blijven) voeren:

1. De bestaande (emissie)meetprogramma's worden onverkort voortgezet. Dit betreft de radioactieve emissies naar lucht en water (van in het bijzonder tritium en koolstof-14) en de afvoer van radioactief afval en splijtstofelementen. Rapportage van deze metingen vindt periodiek plaats.
2. Eventueel optredende storingen en afwijkingen bij de KCB en bij andere centrales zullen ook in de toekomst systematisch worden vastgelegd en geanalyseerd op mogelijke verbanden met de voorgenomen activiteit. Conform de daarvoor geldende procedures zal melding aan de Kernfysische Dienst blijven plaatsvinden.
3. Het bestaande meetprogramma in de omgeving van de KCB zal gecontinueerd worden. Rapportage van deze metingen vindt periodiek plaats.
4. De ontvangen dosis voor medewerkers wordt bij de KCB continu geregistreerd. Hierbij zal specifiek de dosis opgelopen bij de ontvangst

van nieuwe MOX-splijtstofelementen geregistreerd worden.

5. De kennis inzake het gebruik van MOX-splijtstofelementen bij andere centrales (bijvoorbeeld ten aanzien van de stralingsbelasting) zal bijgehouden worden.

# 8 Conclusies

# 8



## 8.1 Voorgenomen activiteit

De voorgenomen activiteit bestaat uit het mogelijk maken van de inzet van twee aanvullende soorten splijtstof:

1. mengoxide (MOX)
2. uraniumoxide

1. **mengoxide (MOX)** met een gehalte van maximaal gemiddeld 5,41 gew %  $Pu_{fiss}$  (plutonium-239 + plutonium-241), waarmee eenzelfde eindopbrand (zelfde vermogensproductie) kan worden bereikt als met het reeds vergunde  $4,4 \pm 0,05$  gew % verrijkte natuurlijk uraniumoxide.

Het aandeel aan mengoxide-elementen in de kern wordt beperkt tot maximaal 40%, hetgeen overeenkomt met 48 van de in totaal 121 elementen van een KCB kern.

2. **uraniumoxide** op basis van gerecycled uranium met een zodanige verrijking, tot een maximum van  $4,6 \pm 0,05$  gew % uranium-235, dat deze qua reactiviteit equivalent is aan die van  $4,4 \pm 0,05$  gew % verrijkt natuurlijk uranium (*compensated enriched recycled uranium: c-ERU*).

Uitgangspunt hierbij is dat, bij gelijkblijvende bedrijfsvoering, de gemiddelde opbrand van de definitief te ontladen splijtstofelementen hetzelfde blijft als bij de definitief te ontladen elementen met verrijkt natuurlijk uranium.

## 8.2 Toetsing voorgenomen activiteit aan EPZ randvoorwaarden

In paragraaf 2.10 zijn de belangrijke randvoorwaarden voor EPZ als volgt geformuleerd:

■ het veiligheidsniveau van de bedrijfsvoering mag niet aangetast worden:	Zoals in hoofdstuk 6.4 (Veiligheidsaspecten bij storingen van het bedrijf) wordt beschreven, wordt aan deze voorwaarde voldaan.
■ significante installatiewijzigingen (extra regelstaven of dergelijke) worden uitgesloten:	Zoals in hoofdstuk 6.4.2 (Ongevalsanalyses) wordt beschreven, wordt aan deze voorwaarde voldaan.
■ zo laag als redelijkerwijs mogelijke milieubelasting:	Zoals in hoofdstuk 6.10.2 (Meest milieuvriendelijke alternatief) wordt beschreven, zijn alle alternatieven gelijkwaardig voor het milieu.
■ geen wijzigingen in de splijtstofinzet (gelijkblijvende cyclusduur, gelijke gemiddelde eindopbrand):	Dit is de input voor alle alternatieven die beschouwd zijn.
■ geen veranderingen voor de <i>back-end</i> (transport en opwerken):	Zoals in hoofdstuk 6.8 (Veranderingen in de splijtstofcyclus) is beschreven, zijn er geen significante veranderingen.
■ geen significante invloed op de geplande ontmanteling na 2034:	Zoals in hoofdstuk 4.2 (Voorgenomen activiteit: inzet van verschillende soorten splijtstof) is beschreven, is er geen gevolg voor de geplande ontmanteling.



Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de voorgenomen activiteit voldoet aan de EPZ randvoorwaarden.

### 8.3 Veiligheid en consequenties voor mens en milieu

Op basis van de voorgaande hoofdstukken wordt geconcludeerd dat:

1. de voorgenomen activiteit (inzet 40% MOX en c-ERU) wat betreft veiligheid niet noemenswaardig verschilt van de bestaande activiteit en de alternatieven. Het voornemen zal de aangevane verplichting om tot de 25% meest veilige kerncentrales van de westerse landen te behoren, niet in de weg staan.
2. de voorgenomen activiteit (inzet 40% MOX en c-ERU) de samenstelling en de hoeveelheid radioactiviteit van het hoogradioactief afval dat bij COVRA wordt opgeslagen, niet doet veranderen.
3. bij de inzet van 40% MOX jaarlijks netto geen plutonium wordt geproduceerd; er wordt daarentegen netto 63 kg plutonium per jaar verbruikt. Bij de inzet van 100% c-ERU wordt netto 100 kg plutonium per jaar geproduceerd. Dit is een toename van ca 8 kg vergeleken met de bestaande activiteit.
4. de inzet van MOX en c-ERU een positieve bijdrage levert aan de milieubelasting rondom mijnbouwlocaties en voor de stralingsbelasting van mijnbouwmedewerkers. De dosisbijdrage van medewerkers in de splijtstofproductie kan door de inzet van MOX en c-ERU in geringe mate toenemen.

Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de verschillende splijtstofopties (inzet  $4,4 \pm 0,05$  gew % ENU, c-ERU en MOX) betreffende veiligheid en consequenties voor mens en milieu onderling vergelijkbaar zijn.

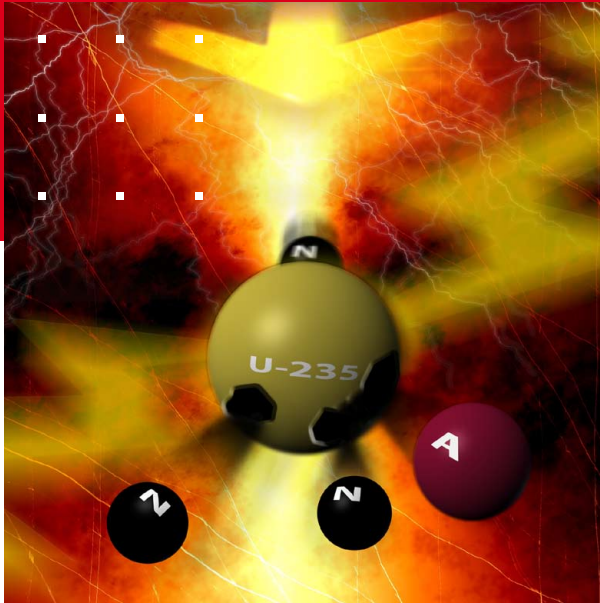
De leemten in kennis (zie hoofdstuk 7) blijken niet zodanig dat deze conclusies daardoor beïnvloed worden.

Mede op grond van de voorgaande conclusies vraagt EPZ vergunning aan voor de inzet in alle mogelijke mengvormen van de volgende brandstoffen:

1. uraniumoxide op basis van natuurlijk uranium met een verrijkingsgraad van  $4,4 \pm 0,05$  gew % (ENU) (huidige situatie; reeds vergund).
2. mengoxide (MOX) met een gemiddeld gehalte van 5,41 gew %  $Pu_{fiss}$  (plutonium-239 + plutonium-241) en 0,25 gew % uranium-235, waarbij het aandeel aan MOX-elementen in de kern wordt beperkt tot maximaal 40%.
3. gecompenseerd uraniumoxide op basis van gerecycled uranium (c-ERU) met een maximale verrijking van  $4,6 \pm 0,05$  gew % uranium-235 en die qua reactiviteit equivalent is aan de momenteel gangbare ENU-elementen.

## 9 Verklarende woordenlijst

# 9



### Begrippen

#### Actiniden

De groep chemische elementen met atoomnummers 89 tot en met 103.

#### Activiteit

Het aantal spontane atoomkernmutaties in een hoeveelheid radioactieve stof per seconde (eenheid: becquerel, Bq).

#### Begingebuurtenis

(Veronderstelde) gebeurtenis die het begin kan zijn van een ongeval.

#### Beladingsplan

Plan dat aangeeft hoe (met welke elementen op welke kernposities) de reactor voor een bepaalde cyclus beladen zal worden.

#### Boringssystemen

Systemen die borium aan het koelmiddel van de kern toevoegen om de reactiviteit te beheersen.

#### Bronterm

Hoeveelheid en soort radioactieve stoffen die geloosd kunnen worden, inclusief gegevens over moment, lozingsduur, warmte-inhoud, lozingshoogte en kans van optreden.

#### Buiten-ontwerp ongeval

Een verondersteld ongeval waarvoor de installatie niet is ontworpen.

#### Compensatieprincipe

Bij toepassing van verrijkt gerecycled uranium: het hoger verrijken van het gerecycled uranium dan verrijkt natuurlijk uranium, ter compensatie van niet natuurlijke uraniumisotopen die het kernsplijtingsproces minder efficiënt maken.

#### Compactrek

Rek in het splijtstofopslagbassin voorzien van neutronenabsorberend materiaal waarin splijtstofelementen op compacte wijze worden opgeslagen.

#### Deterministisch

Acute gezondheidseffecten als gevolg van hoge stralingsdoses.

#### DNB-verhouding

De verhouding tussen de kritieke warmteflux, waarbij de overgang van kiemkoken naar filmkoken optreedt en de aan de splijtstofomhulling optredende warmteflux. De minimale DNB-verhouding is een maatstaaf voor de beveiliging tegen filmkoken.

#### Dosis

Geabsorbeerde stralingsenergie per massa-eenheid (eenheid: Gray, Gy).

#### Drukwaterreactor

Reactor waarin de opgewekte warmte door koelwater dat onder druk staat (en daardoor niet kookt) en via een stoomgenerator wordt overgedragen aan een secundair systeem waarin stoom ontstaat die een turbine aandrijft.

#### Edelgassen

Gassen die geen chemische verbinding met andere elementen kunnen vormen.

#### Effectieve dosis

Maat voor de globale dosis van het lichaam als geheel.

#### Element

Zie splijtstofelement.

#### Emissie

Uitworp (lozing) van stoffen in het milieu.

#### Enriched Natural Uranium

Verrijkt natuurlijk uranium.

### Enriched Reprocessed Uranium

Verrijkt gerecycled uranium. Dit uranium is in het algemeen hoger verrijkt uranium dan verrijkt natuurlijk uranium, ter compensatie van niet natuurlijke uraniumisotopen die het kernsplijtingsproces minder efficiënt maken.

### Evenwichtskern

Kern waarbij ieder jaar sprake is van (ont)laden van hetzelfde aantal elementen met dezelfde eigenschappen.

### Filmkoken

Bij filmkoken vormen aan het verwarmd oppervlak de afzonderlijke dampbellen een aaneengesloten film. De warmte-overdracht van het verwarmd oppervlak aan de vloeistof vindt via deze stoomfilm plaats.

### Heetkanaalfactor

De verhouding tussen het meest belaste ('heet') koelkanaal en het gemiddeld belaste ('normaal') koelkanaal; bepaald als de verhouding tussen maximaal staafvermogen en gemiddeld staafvermogen over de kern.

### Ioniserende straling

Straling die opname of afgifte van elektronen door atomen of moleculen kan veroorzaken.

### Isotopen

Nucliden met hetzelfde aantal protonen (van hetzelfde chemische element) maar met verschillend aantal neutronen.

### Kernsplijting

Het splijten van een atoomkern in twee (lichtere) delen.

### Kiemkoken

Bij kiemkoken worden aan het verwarmd oppervlak afzonderlijke dampbellen gevormd. Het verwarmd oppervlak blijft hierbij volledig door de vloeistof bevochtigd.

### Kriticaliteit

Toestand van de reactor ten opzichte van de kritieke toestand.

### Mengoxide

Een splijtstof samengesteld uit een mengsel van uraniumdioxide en plutoniumdioxide.

### Neutron

Ongeladen deeltje uit atoomkernen.

### Normaal bedrijf

Onder normaal bedrijf valt het bedrijf binnen gespecificeerde bedrijfslimieten en -condities, inclusief het uitbedrijf zijn, opstarten, vermogensbedrijf, afschakelen, onderhoud, testen en splijtstofwisselen.

### Nuclide

Een soort atoomkern gekenmerkt door het aantal protonen en het aantal neutronen in de kern.

### Onderkriticaliteit

Mate waarin een hoeveelheid splijtstof zich beneden de kritieke toestand bevindt

### Ongeval

Met een ongeval wordt een afwijking van normaal bedrijf of storingen bedoeld waarna het bedrijven van de installatie uit veiligheidstechnisch oogpunt niet zonder meer voortgezet kan worden.

### Ongevalsanalyse

Formele studie omtrent het verloop van een ongeval (bij ontwerpongevallen).

### Ontwerpcode(s)

Analysemethode(n) waarmee de samenstelling van een reactorkern kan worden ontworpen en waarmee aangetoond kan worden dat de ontworpen kern aan de gestelde veiligheids-technische eisen voldoet.

### Ontwerpongeval

Ongeval waarop de installatie is ontworpen en dus tegen bestand is en waarbij de afgifte van radioactieve stoffen dus binnen acceptabele limieten blijft.

### Opbrand

Versplijtingsgraad. Een maat voor de fractie van het splijtbaar materiaal dat is verspleten, uitgedrukt in de totale hoeveelheid energie opgewekt per massa-eenheid zwaar metaal. De opbrand kan gezien worden per (deel van de) splijtstofstaaf, per splijtstofelement dan wel voor de gehele of het ontladen deel van de kern.

**Plausibiliteitsverklaring**

Kwalitatieve beschouwing van de effecten van gewijzigde, voor het kernontwerp kenmerkende, (neutronenfysische) parameters zoals onder andere van toepassing bij inzet van MOX-elementen. Door deze beschouwing kan worden aangetoond dat, ook met de gewijzigde parameters, een bestaande analyse nog steeds voldoet aan de acceptatiecriteria voor het beschouwde ontwerpongeval. In dat geval is een nieuwe ongevalsanalyse niet nodig.

**Pu-splijtbaar**

Het massagehalte van de splijtbare isotopen plutonium-239 en plutonium-241 in verse MOX splijtstof uitgedrukt als fractie van de massa van alle zware metalen.

**Reactiviteitsongeval**

Een ongeval in een kerncentrale waarbij de kernsplijtingsreactie niet meer kan worden beheerst en exponentieel in intensiteit toeneemt.

**Reactiviteit**

Mate waarin de kettingreactie in een kernreactor voortgang vindt.

**Reactiviteitscoëfficiënt**

Geeft invloed weer van een variabele (bijvoorbeeld druk of temperatuur) op de reactiviteit.

**Reactor**

Installatie waarbinnen een beheerste kettingreactie van kernsplijtingen op gang gehouden wordt.

**Regelement/staven**

Een regelementstaven steekt in een splijtstofelement. Door het regelement/staven meer of minder in het splijtstofelement te steken kan het vermogen van de reactor worden geregeld en kan deze worden afgeschakeld.

**Regelstaafwerkzaamheid**

Effectiviteit van de regelstaven om neutronen in te vangen.

**Risico**

Ongewenste gevolgen van een bepaalde gebeurtenis verbonden met de kans dat deze zich zullen voordoen.

**Splijtstof**

Stoffen waarmee in een kernreactor een kettingreactie van kernsplijtingen in stand kan worden gehouden.

**Splijtstofelement**

Constructie van aan elkaar gemonteerde splijtstofstaven.

**Splijtstofopslagbassin**

Met geboreerd water gevuld bassin waarin gebruikte en nieuwe splijtstofelementen tijdelijk worden opgeslagen.

**Splijtstofelementskelet**

Het skelet van het splijtstofelement bestaat uit de afstandshouders, de geleidingsbuizen en de kop en voet van het splijtstofelement. Aan de kop van het splijtstofelement zijn de geleidingsbuizen vastgelast of vastgeschroefd en aan de voet zijn zij vastgeschroefd.

**Splijtstofstaaf**

Buis waarin de splijtstof zich bevindt in de vorm van een stapel tabletten splijtstof.

**Splijtstofstaafomhulling**

Buis waarin de splijtstoftabletten gestapeld worden.

**Splijtstoftabletten**

Tabletten van splijtstof waarmee, in een kolom gestapeld, splijtstofstaven gevuld worden.

**Splijtstofwisseling**

Verwisseling van gebruikte splijtstofelementen onderling of door verse elementen.

**Stochastisch**

Gebruikt bij gezondheidseffecten: effecten op lange termijn als gevolg van straling.

**Storing**

Onder een storing worden alle bedrijfstoestanden gerekend die afwijken van normaal bedrijf en waarvan verwacht kan worden dat ze eens of enkele malen gedurende de bedrijfsperiode van de installatie op kunnen treden. Als gevolg van voorzieningen in het ontwerp veroorzaken deze toestanden geen wezenlijke schade aan veiligheidsrelevante onderdelen en leiden zij niet tot een ongeval.

### Vermenigvuldigingsfactor

Factor die aangeeft hoeveel neutronen door kernsplijting vrijkomen als gevolg van één vrijkomend neutron.

### Verrijking

Het proces ter verhoging van de concentratie van het werkzame (b.v. splijtbaar) materiaal in een stof (b.v. splijtstof).

### Verrijkingsgraad

Massapercentage splijtbaar materiaal in een splijtstof, meestal het gewichtspercentage uranium-235 van de totale massa aan uranium in uranium splijtstof.

### Vervalwarmte

De warmte die door verval van radioactieve splijtingsproducten vrijkomt nadat de reactor is afgeschakeld.

### Zircaloy

Legering waarin onder meer het element zirkonium wordt toegepast.

### Zwaar Metaal

Hier: uranium, plutonium en americium.

# 9

## Afkortingen

<b>Bkse</b>	Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen
<b>c-ERU</b>	<i>Compensated Enriched Recycled Uranium</i>
<b>DNB</b>	<i>Departure from Nucleate Boiling</i>
<b>ENU</b>	<i>Enriched Natural Uranium</i>
<b>EPZ</b>	N.V. Elektriciteits-Productie-maatschappij Zuid-Nederland
<b>ERU</b>	<i>Enriched Recycled Uranium</i>
<b>HTP</b>	Merknaam voor modern type splijtstofelement ontwerp
<b>KCB</b>	Kernenergiecentrale Borssele
<b>KEW</b>	Kernenergiewet
<b>KFD</b>	Kernfysische Dienst
<b>LOCA</b>	<i>Loss of Coolant Accident</i>
<b>MER</b>	Milieu-effectrapport
<b>MW</b>	Megawatt
<b>MOX</b>	Mengoxide ( <i>Mixed Oxide</i> ) van plutonium en uranium

<b>M5</b>	Merknaam van een gangbaar type zircaloy
<b>NRG</b>	<i>Nuclear Research &amp; consultancy Group</i>
<b>N.V. EPZ</b>	N.V. Elektriciteits-Productie-maatschappij Zuid-Nederland EPZ
<b>PIE</b>	<i>Postulated Initiating Event; begingeburtenis</i>
<b>RePu</b>	<i>Reprocessed Uranium</i>
<b>RESA</b>	Reactorsnelafschakeling
<b>RIA</b>	<i>Reactivity Initiated Accident</i>
<b>SOB</b>	Splijtstofopslagbassin
<b>TUSA</b>	Turbine Snel Afschakeling
<b>VR</b>	Veiligheidsrapport
<b>VROM</b>	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
<b>VLD</b>	Vollastdagen
<b>ZM</b>	Zwaar metaal

**Symbolen, eenheden**

°C	Graad Celcius	N	Newton; de kracht die een massa van 1 kg een versnelling van 1 m/s <sup>2</sup> geeft
F	Frequentie	pcm	per cent mille (10 <sup>-5</sup> )
E	Effectieve dosis	ppm	parts per million (10 <sup>-6</sup> )
Gew %	percentage in massa uitgedrukt, in splijtstof betrekking hebbend op de zware metalen	Sv	Sievert; eenheid van dosis-equivalent uitgedrukt in energie per massa-eenheid
h	( <i>hour</i> ) uur	%	percentage, in splijtstof-samenstelling toegepast als percentage in massa uitgedrukt
H <sub>th</sub>	schildklierdosis	w/o	percentage in massa uitgedrukt
K	graad Kelvin	μ	mikro
k <sub>eff</sub>	vermenigvuldigingsfactor		
kg	kilogram		
m	meter		
MWd/kgZM	MegaWattdag per kilogram Zwaar Metaal (eenheid voor opbrand van splijtstof)		

**Elementen**

Am	Americium
B	Borium
C	Koolstof
H	Waterstof
I	Jodium
Pu	Plutonium
Tl	Thallium
U	Uranium

## 1 Inleiding

De splijtstofcyclus omvat de industriële processen waarmee nieuwe kernsplijtstof wordt geproduceerd, het gebruik van splijtstof in de kernreactor, de processen waarmee de verbruikte splijtstof weer uit de kerncentrale wordt verwijderd, het al dan niet recyclen van het uranium en plutonium en tenslotte het beheer van de radioactieve residuen. De kosten van de splijtstofcyclus zijn een substantieel deel van de totale exploitatiekosten van een kerncentrale.

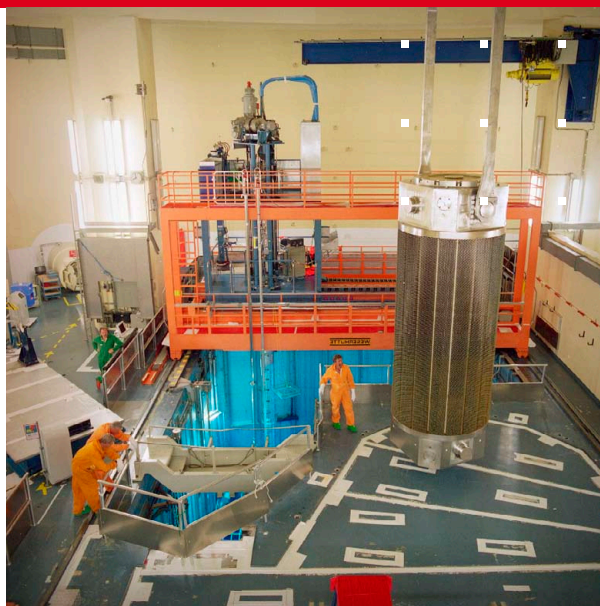
EPZ heeft op dit moment een zogenaamde ‘gesloten’ splijtstofcyclus. Dat wil zeggen dat gebruikte splijtstof in een opwerkingsfabriek wordt verwerkt (‘opgewerkt’) en dat de producten uranium en plutonium opnieuw worden gebruikt. Een ‘open’ splijtstofcyclus is in principe ook mogelijk. In die situatie wordt de gebruikte splijtstof niet meer hergebruikt maar als radioactief afval behandeld.

## 2 Gesloten splijtstofcyclus

Voor de Nederlandse kerncentrales (Borssele en Dodewaard) is in de jaren zeventig gekozen voor de gesloten splijtstofcyclus, wat inhoudt dat de materialen uranium en plutonium na gebruik in de kerncentrale opnieuw worden verwerkt tot splijtstof. In Figuur 2.1.1 is een vereenvoudigde afbeelding van de gesloten splijtstofcyclus weergegeven. Deze cyclus wordt in de volgende paragrafen verder uitgewerkt. De nummers in de koppen van de paragrafen verwijzen steeds naar de nummers in Figuur 2.1.1.

### 2.1 Ertswinning 1

De splijtstofcyclus begint met de winning van uraniumerts en de zuivering ervan tot  $U_3O_8$ , een chemisch product dat wordt verhandeld als ‘yellowcake’ of ‘uranium concentrate’. Dit product is een stabiele, korrelige, geelgekleurde stof



Hijzen van container voor afvoeren van gebruikte splijtstof-elementen

Figuur 2.1.2 Opslag van yellowcake drums bij producent.



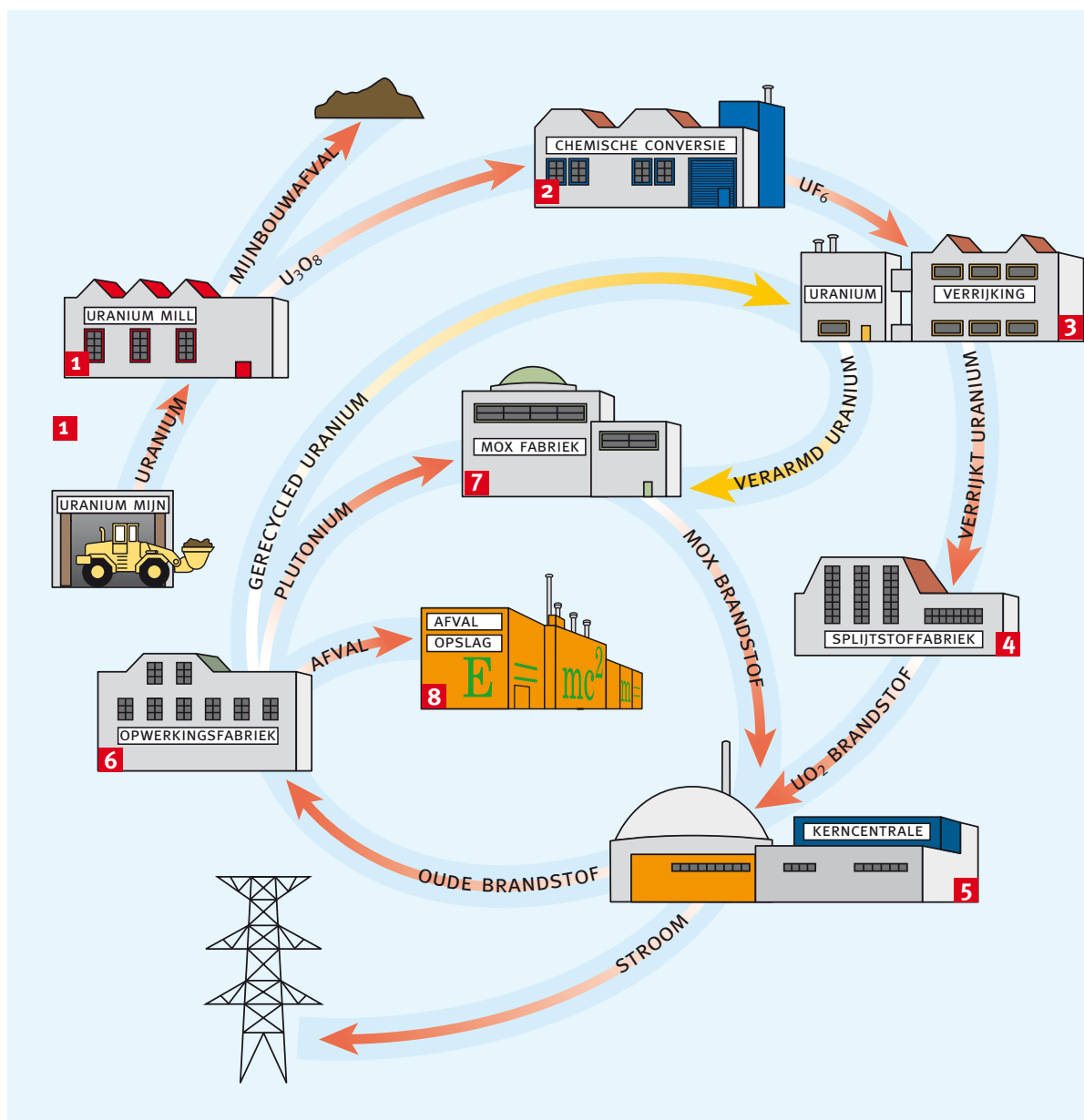
die gewoonlijk in stalen 200 liter drums wordt verhandeld<sup>51</sup>.

Uraniumhoudend erts wordt ondergronds of bovengronds gewonnen en in zogenaamde ‘ore mills’ tot poeder vernalen, waarna langs chemische weg het uranium er uit gewonnen wordt. Het achterblijvende verpulverde moedergesteente, de zogenaamde tailings, wordt als mijnbouwafval zorgvuldig beheerd omdat dit afval nog natuurlijke radioactieve stoffen bevat.

In een andere technologie van mijnbouw, *in-situ leaching* (‘oplossingsmijnbouw’) genoemd, wordt gebruik gemaakt van het feit dat sommige uraniumhoudende aardlagen poreus zijn. Door water waaraan een oplosmiddel is toegevoegd in boorgaten te injecteren kan een uraniumhoudende oplossing naar boven gepompt worden zonder de noodzaak het erts zelf te delven.

<sup>51</sup> Deze industrie wordt gedetailleerd beschreven in het rapport “Uraniumwinning. Voorzieningszekerheid, Milieu- en gezondheids effecten en Relevantie voor Nederland” dat in Oktober 2006 door het Clingendael Instituut is uitgegeven in opdracht van het Ministerie van VROM.

Figuur 2.1.1 Vereenvoudigde weergave van de gesloten splijtstofcyclus.



Dit *in-situ leaching*, dat bijvoorbeeld in Kazakstan grootschalig wordt toegepast, resulteert in relatief weinig afval en maakt het mogelijk om zelfs arme ertsen met een lage uraniumconcentratie op economisch verantwoorde wijze te ontginnen.

De circa 441 in bedrijf zijnde kerncentrales in de wereld hebben jaarlijks 67.000 ton<sup>52</sup> natuurlijk uranium nodig om hun behoefte aan brandstof te dekken<sup>53</sup>. Per jaar wordt wereldwijd ongeveer 41.000 ton zogenaamd primair uranium in de mijnbouw gewonnen, waarbij de belangrijkste

producerende landen in tabel 2.1.1 zijn weergegeven. Canada, Australië en Kazakstan zijn de belangrijkste leveranciers op deze zogenaamde primaire markt.

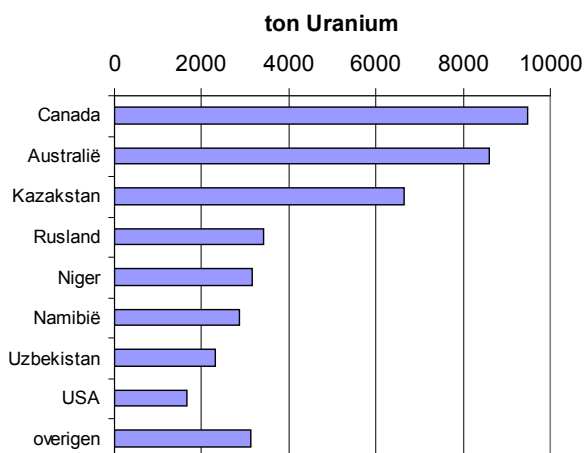
Nast het primaire uranium wordt per jaar meer dan 25.000 ton zogenaamd secundair uranium verhandeld dat afkomstig is van afbouw van strategische voorraden, van herverrijkt verarmd uranium (*tails*) en van afgedankte militaire voorraden (tezamen de zogenaamde secundaire uraniummarkt genoemd).

<sup>52</sup> Indien over een hoeveelheid uranium wordt gesproken betreft het de hoeveelheid zwaar metaal (U).

<sup>53</sup> Bron: IAEA/OECD 2008: 'Uranium 2007: Resources, Production and Demand'.



Tabel 2.1.1 Wereldproductie van natuurlijk uranium in 2007.



Figuur 2.3.1 Een verpakking voor verrijkt uraniumhexafluoride.



## 2.2 Chemische Conversie 2

Natuurlijk uranium bevat altijd 0,7% uranium-235 (splijtbaar uranium). Voor een efficiënte bedrijfsvoering met de kerncentrale moet dit gehalte verhoogd worden door verrijking. Om uranium te verrijken moet het eerst in gasvormige toestand gebracht worden. Daartoe wordt het  $U_3O_8$  in een aantalchemische processtappen omgezet in uraniumhexafluoride,  $UF_6$ . Uraniumhexafluoride is de enige bekende verbinding van uranium die bij omgevingtemperaturen gasvormig is. Het omzetten gebeurt in zogenaamde conversiefabrieken.

Het uraniumhexafluoride wordt gewoonlijk opgeslagen en getransporteerd in standaard 48" cilinders, die ieder circa 12 ton uranium bevatten. Vaak wordt natuurlijk uranium verhandeld in de vorm van hexafluoride, waarbij de afnemer dus in één keer betaalt voor de grondstof zelf en voor de service van conversie.

## 2.3 Uranium verrijking 3

Het verrijken van uranium gebeurt met fysische processen die het minimale massaverschil benutten tussen  $UF_6$  moleculen die het zwaardere uranium-238 bevatten, en die met het lichtere (splijtbaar) uranium-235. Oudere verrijkingfabrieken gebruiken het gasdiffusieproces, dat veel energie vraagt. Nieuwere installaties zijn vrijwel alle gebaseerd op de meer efficiënte ultracentrifuge technologie.

Een nevenproduct van de uraniumverrijking is verarmd uranium (*tails*). In verarmd uranium is het aandeel van het splijtbaar uranium-235 verlaagd, zodat een restpercentage van 0,2 à 0,3 gew % uranium-235 overblijft. Het verarmde uranium wordt veelal in de vorm van  $UF_6$  in 48" cilinders opgeslagen bij wijze van strategische reserve, omdat het (bij geschikte economische condities) onder andere als grondstof kan dienen voor latere verrijking en productie van verrijkt uranium. Deze zogenaamde *'re-enriched tails'* dekken in de Europese Unie jaarlijks tussen de 2% en 8% van de totale behoefte aan uranium<sup>54</sup>. Het verarmde uranium kan ook gebruikt worden voor de productie van mengoxide (MOX), waarover meer in paragraaf 2.7.

Een bijzonder procedé voor uraniumverrijking, dat ongeveer 10% van de wereldbehoefte en 4% van de vraag in Europa afdekt, is het *'HEU downblending'* proces. Dat betreft het omzetten van ex-militaire overschotten hoog verrijkt uranium (HEU) in laag verrijkt uranium (4 à 4,5 gew % uranium-235) door vermenging met verarmd of natuurlijk uranium. Voor deze bewerking kan zowel uraniumhexafluoride als uraniumoxide ingezet worden. Dit *'HEU downblending'* is mogelijk geworden door de Amerikaans-Russische ontwapeningsverdragen, waarbij beide partijen waren overeengekomen om aanzienlijke hoeveelheden ex-militair HEU om te zetten in reactorbrandstof voor vreedzame toepassingen (het *'Megatons to Megawatts'* programma genoemd). Naar verwachting zijn over enkele jaren de ex-militaire HEU

<sup>54</sup> Bronnen: Euratom Supply Agency "Annual Report 2007"; IAEA/OECD 2008: 'Uranium 2007: Resources, Production and Demand'.

overschotten zover gereduceerd, dat dit procedé dan geen significante rol meer speelt op de verrijkingmarkt.

## 2.4 Productie van splijtstofelementen **4**

Het verrijkte uraniumhexafluoride wordt in standaard 30” cilinders (zie Figuur 2.3.1) vervoerd naar de fabriek voor splijtstoffabricage. In deze fabriek wordt het fluor van het uraniumhexafluoride gestript, waarbij het  $UF_6$  wordt omgezet in uraniumoxide,  $UO_2$ . Het uraniumoxide (een grijs poeder) wordt in tabletten geperst en in ovens tot een keramische substantie gebakken ('gesinterd').

Deze keramische tabletten ('pellets') zijn de bouwstenen van het splijtstofelement. De tabletten worden in een meterslange stapel opgesloten in buizen van een speciale metaallegering, Zircaloy<sup>55</sup>. Deze buizen worden dichtgelast en vormen zo de splijtstofstaaf, waarvan er voor de KCB 205 gebundeld worden tot een splijtstof element (voor bijzonderheden over de bouw van splijtstofelementen zie bijlage B, hoofdstuk 3).

**Figuur 2.4.1** Aankomst van een nieuw brandstofelement in de kerncentrale Borssele.



## 2.5 Versplijting van uranium in kerncentrale **5**

Per jaar heeft een kerncentrale een aantal splijtstofelementen nodig om verbruikte elementen, die enkele jaren energie geleverd hebben, te vervangen. Die verbruikte elementen worden meestal 'gebruikte' splijtstofelementen genoemd.

Gebruikte splijtstofelementen bevatten nog ongeveer 94% van het oorspronkelijke gewicht aan uranium met een restverrijking van 0,6 à 0,8 gew % uranium-235, vergelijkbaar met natuurlijk uranium. Verder bevatten zij

circa 1% aan plutonium en voor het overige radioactieve splijttingsproducten en actiniden (radioactieve zware metalen zoals americium). Een deel van de radioactieve splijttingsproducten heeft een korte halveringstijd, waarbij zij na ontlading uit de reactor nog een aanzienlijke hoeveelheid warmte produceren. Nadat de gebruikte splijtstofelementen circa twee jaar in het splijtstofopslagbassin onder water bewaard zijn, is deze warmteproductie zodanig afgenomen dat de elementen in een speciale transportcontainer veilig van de kerncentrale naar de opwerkingsfabriek overgebracht kunnen worden. In de opwerkingsfabriek worden ze dan gerecycled.

## 2.6 Opwerking van de splijtstofelementen **6**

Er zijn in de wereld verschillende installaties voor het opwerken van kernsplijtstoffen, voornamelijk in Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk, Rusland, India en Japan. EPZ heeft sinds 1976 een commerciële relatie met de installatie van AREVA NC in La Hague (Frankrijk) (zie Figuur 2.6.1). De splijtstofelementen worden in speciaal ontworpen transportcontainers van Nederland naar Frankrijk vervoerd. In de opwerkingsfabriek worden de splijtstofelementen in stukken geknipt, zodat de tabletten toegankelijk worden om met een zuuroplossing te worden uitgeloozd. In een aantal chemische processtappen worden daarna het uranium en het plutonium afgescheiden en aan de eigenaar of derden ter beschikking gesteld met het oog op hergebruik.

**Figuur 2.6.1** Opwerkingsfabriek van AREVA NC in La Hague (Frankrijk).



<sup>55</sup> Legering waarin onder meer het element zirkonium wordt toegepast.

## 2.7 Recycling 7

### RepU<sup>56</sup>

Het uranium dat de opwerkingsfabriek van La Hague produceert wordt in een installatie in Pierrelatte (Frankrijk) omgezet in hexafluoride ( $UF_6$ ) of oxide ( $U_3O_8$ ) afhankelijk van welke wijze van hergebruik gekozen wordt. Uraniumoxide is voor EPZ de geëigende grondstof voor het 'downblending' proces en  $UF_6$  is geschikt voor verrijking van RepU in een centrifuge-installatie.

### Plutonium

In tegenstelling tot RepU wordt het plutonium dat in de opwerkingsfabriek van La Hague teruggewonnen wordt, door AREVA NC niet fysiek aan klanten teruggeleverd. Om reden van beveiliging wordt het plutonium in La Hague veilig opgeslagen in afwachting van het daadwerkelijke hergebruik. Op het moment dat een partij plutonium nodig is voor de productie van mengoxide (MOX) wordt het uit de kluis van La Hague overgebracht naar de MELOX fabriek in Zuid-Frankrijk (zie Figuur 2.7.1). Hiervoor worden speciale, sterk beveiligde transporten over de weg uitgevoerd.

Er zijn wereldwijd meerdere MOX fabrieken in bedrijf. De MELOX fabriek van AREVA NC is de grootste en modernste. Deze heeft een capaciteit van 195 ton mengoxide per jaar (overeenkomend met circa 14 ton plutonium). Mengoxide wordt geproduceerd door plutoniumoxide ( $PuO_2$ ) te vermengen met verarmd uraniumoxide ( $UO_2$ ). Dit gebeurt in van de buitenlucht geïsoleerde ruimten (z.g. handschoenenkasten), met het oog op de toxiciteit van het plutonium. Het mengoxide

Figuur 2.7.1 MELOX fabriek in Frankrijk (bron: AREVA NC).



wordt in tabletten geperst die worden gebakken ('gesinterd') in een proces dat verder geheel analoog is aan de fabricage van splijtstof uit verrijkt uranium. In de afgelopen 10 jaar is er, volgens gegevens van Euratom uit 2007, in de Europese Unie 104,4 ton plutonium gerecycled waarmee 12.550 ton natuurlijk uranium en 8.350 ton SWU<sup>57</sup> verrijkingsarbeid werden uitgespaard<sup>58</sup>.

## 2.8 Radioactief afval 8

### Hoogradioactief afval

Bij het recyclen van gebruikte brandstofelementen blijven, naast het bruikbare uranium en plutonium, niet-bruikbare radioactieve reststoffen over. Die vallen uiteen in twee categorieën:

1. Hoog radioactieve kernsplijtingsproducten, die 4 à 5% van het oorspronkelijke gewicht uitmaken. Deze worden verglaasd, zodat radioactieve stoffen niet kunnen ontsnappen (uitlogen) en in standaard 180 liter canisters verpakt. Als gevolg van de hoge concentratie aan radioactieve stoffen produceren deze canisters aanvankelijk nog warmte, ongeveer 1 kW per stuk. Ze moeten daarom gedurende de eerste jaren gekoeld worden.
2. Afval, bestaande uit de metaaldelen van de splijtstofelementen, met minder dan 0,1% van het totaal aan radioactieve stoffen. Deze stukjes lege splijtstofstaaf (zie Figuur 2.8.1), kop- en voetstukken enz. worden onder hoge druk samengeperst en eveneens in standaard 180 liter canisters verpakt. Deze categorie afval wordt 'compacted residue' genoemd. Deze verpakkingen hebben geen koeling nodig.

Figuur 2.8.1 Verknijpte splijtstofstaven in de opwerkingsfabriek.



<sup>56</sup> Uit het Engels: *Reprocessed Uranium*.

<sup>57</sup> *The Separative Work Unit (SWU)*: een maat voor de hoeveelheid energie (scheidingsarbeid) die nodig is voor het scheiden van <sup>235</sup>U en <sup>238</sup>U. De SWU wordt uitgedrukt in kilo of ton.

<sup>58</sup> *Euratom Supply Agency 'Annual Report 2007'*.

Het afval wordt geconditioneerd (verglaasd) in standaard verpakkingscontainers (*canisters*) met het oog op veilig transport en langdurige opslag. Per jaar resulteert het recyclen van EPZ's gebruikte splijtstoffen in circa 8,5 canisters verglaasd kernsplijtingsafval en circa 8 canisters met *compacted residues*<sup>59</sup>, tezamen een totaal afvalvolume van minder dan 3 m<sup>3</sup> per jaar.

### Opslag van radioactief afval

COVRA is de organisatie die door de Nederlandse overheid is belast met het beheer van radioactief afval. Het licht- en middenactieve radioactieve bedrijfsafval dat bij bedrijfsvoering van de kerncentrale Borssele ontstaat, wordt door EPZ direct aan COVRA aangeboden. Voor de ontvangst en opslag van de canisters met kernsplijtingsafval en met compacted residues, is in een speciaal gebouw voorzien: het HABOG (Hoogactief Afval Behandeling- en Opslag Gebouw) (zie Figuur 2.8.2).

Het HABOG heeft een gedeelte waarin het warmteproducerende verglaasde afval wordt bewaard, dat door natuurlijke convectie van lucht wordt afgekoeld. In een ander gedeelte van het HABOG worden niet warmteproducerende *canisters* (*compacted residues*) opgeslagen. Beide soorten *canisters* zijn ontworpen met het oog op langdurige opslag; ze bestaan uit duurzame materialen zoals roestvast staal en glas. Voorafgaande aan toekomstige geologische opberging zal ook geen nabewerking van het opwerkingsafval meer nodig zijn. De opslag van afval in HABOG kan als inherent veilig worden omschreven, d.w.z. dat geen menselijk ingrijpen nodig is.

Figuur 2.8.2 Het Hoogactief Afval, Behandeling- en Opslag Gebouw te Borssele.



COVRA heeft van de Nederlandse overheid de opdracht om het afval tenminste 100 jaar bovengronds op te slaan. In die 100 jaar neemt, door spontaan radioactief verval, de activiteit van het afval en daarmee ook de warmteproductie met 90% af. Dat vereenvoudigt de toekomstige hantering van het afval, met het oog op eindberging, aanzienlijk.

De Nederlandse overheid heeft als beleid dat de eindberging van radioactief afval in de diepe ondergrond terugneembaar dient te worden uitgevoerd. Voor de realisatie van een eindberging zijn fondsen gereserveerd die gevormd zijn uit bijdragen van de leveranciers van hoog radioactief afval, zoals EPZ. De relatief lange wachttijd van 100 jaar wordt mede gerechtvaardigd door de verhoudingsgewijs geringe hoeveelheden radioactief afval in Nederland. Dit beleidsstandpunt is sinds 1993 ongewijzigd. COVRA heeft de opdracht gekregen om nader onderzoek naar de eindberging te verrichten.

In andere landen waar de hoeveelheden afval groter zijn, is het onderzoek naar eindberging van radioactief afval verder gevorderd. In Frankrijk is wettelijk vastgelegd dat in 2015 een keus gemaakt moet worden voor de locatie van eindberging, en dat deze eindberging in 2025 in bedrijf moet zijn. Er is inmiddels een ondergronds laboratorium in graniet om de geschiktheid van deze geologische laag te evalueren. In België is een ondergronds laboratorium in de Boomse Klei, bij Mol. In Duitsland is de Konrad-mijn in bedrijf genomen voor de eindberging van niet warmteproducerend afval. In Zweden is het besluit genomen bij Forsmark een eindberging in graniet te realiseren. In Finland is nabij Olkiluoto een eindberging in aanleg.

<sup>59</sup> De huidige productie van metallisch afval is lager dan in het verleden; dat is een gunstig gevolg van de geleidelijke verhoging van de verrijkingsgraad en de hogere opbrand van splijtstof.

## 2.9 Directe opslag van gebruikte splijstof

### De 'open' splijstofcyclus

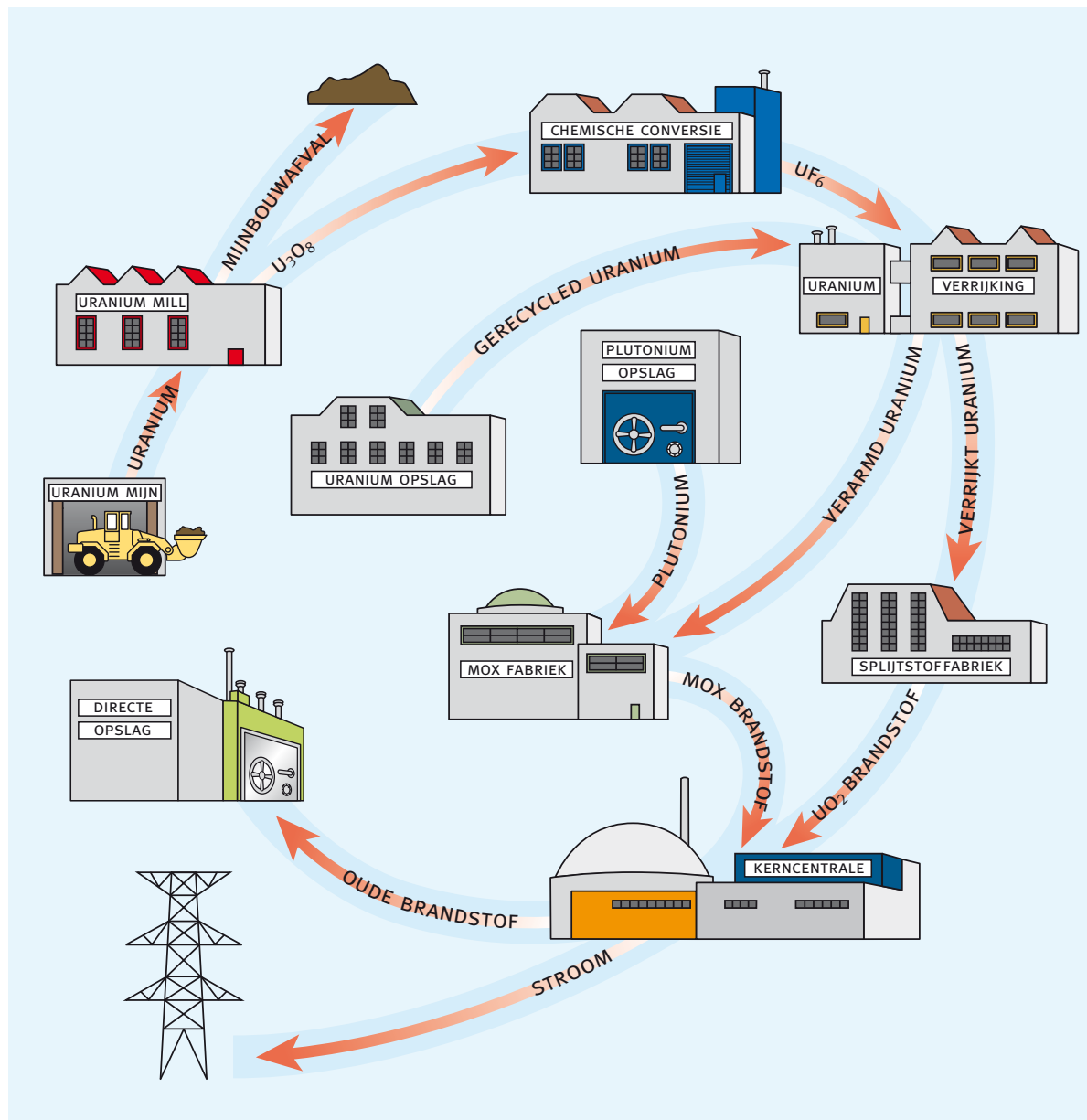
Er is ook een andere splijstofcyclus denkbaar, waarbij gebruikte splijstofelementen afkomstig van de KCB niet worden gerecycled maar waarbij ze direct als hoog radio-actief afval worden behandeld. Figuur 2.9.1 geeft een schematische weergave van deze open cyclus.

Zou EPZ in de toekomst besluiten het opwerken van splijstof in Frankrijk niet voort te zetten, dan moet de gebruikte splijstof vanuit de

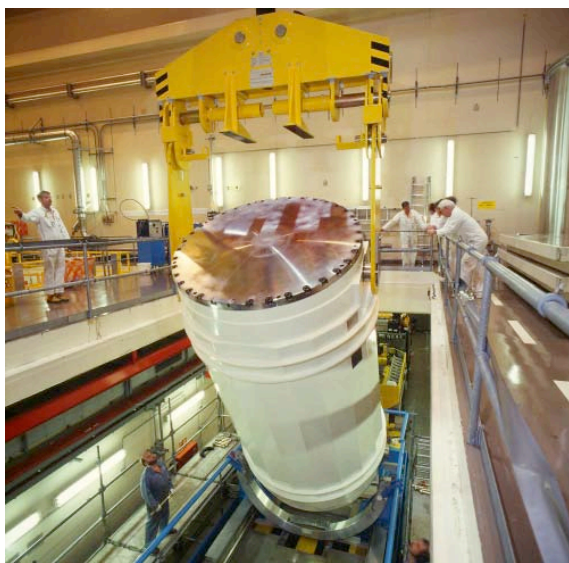
kerncentrale naar een alternatieve locatie worden getransporteerd. De KCB zelf is namelijk niet geschikt om langdurig splijstofelementen op te slaan: het interne opslagbassin heeft onvoldoende capaciteit en de vergunning laat het ook niet toe. De huidige opslagfaciliteit van COVRA is er niet geschikt voor, zodat een nieuwe faciliteit gecreëerd zou moeten worden voor ontvangst, verwerking en (interim) opslag van splijstofelementen.

Elders in de wereld komen globaal twee typen directe opslag voor: onder water in bassins (wat de meest toegepaste methode is; bijvoorbeeld in Duitsland en België); of in zware droge

Figuur 2.9.1 Vereenvoudigde weergave van de open splijstofcyclus.



Figuur 2.9.2 Hijsen van een opslagcontainer voor gebruikte splijfstofelementen.



opslagcontainers (bijvoorbeeld in Duitsland en België). Voor beide varianten (nat en droog) is een zwaar omhullend gebouw vereist om bescherming te bieden tegen overstromingen, vliegtuigongevallen en andere bedreigingen. Op de nu bekende locaties zijn dergelijke opslagfaciliteiten niet voorhanden.

Bij de keus voor directe opslag als verwerkingsmethode van splijfstof moet rekening gehouden worden met een extra bewerkingsstap voorafgaande aan eindberging. Splijfstofelementen zijn niet ontworpen als afvalverpakking; afhankelijk van de nog te kiezen geologische omstandigheden (bijvoorbeeld klei of zout) is een extra behandeling (verpakking) nodig om stabiliteit over lange periodes te waarborgen. Voor de Nederlandse situatie is nog niet bekend waaruit die behandeling zou moeten bestaan. In Zweden en Finland, waar men voor eindopslag in graniet gekozen heeft, worden de splijfstofelementen in koperen blokken verpakt. Voor de Nederlandse situatie komt die techniek overigens niet in aanmerking omdat geschikte granietvoorkomens ontbreken.

Ook al zou EPZ haar eigen gebruikte splijfstofelementen niet langer laten opwerken, dan kan het bedrijf toch splijfstof laten maken uit plutonium of RepU. Als gevolg van het opwerken van splijststoffen van andere kerncentrales in de opwerkingsfabriek van La Hague, is er sprake van voorraden gerecycled uranium en plutonium bij AREVA en bij andere bedrijven.

Die kunnen op commerciële basis door EPZ worden overgenomen voor de productie van MOX splijstofelementen of voor elementen van verrijkt RepU. EPZ heeft al eerder hoeveelheden RepU van marktpartijen overgenomen om splijstofelementen te kunnen maken voor de KCB, als haar eigen RepU voorraden niet toereikend waren. In de afgelopen jaren hebben andere marktpartijen EPZ's plutonium overgenomen om zelf MOX te maken. Het is geen voorwaarde voor het gebruik van c-ERU of plutonium als alternatieve splijststof om zelf te recycleren.

### 3 Risico's van de splijststofcyclus

In hoofdstuk 2 zijn de verschillende stadia van de splijststofcyclus behandeld. In het onderhavige hoofdstuk worden de radiologische risico's behorende bij deze splijststofcyclus beschreven. Hierbij dient opgemerkt dat activiteiten in de leveringsketen van de splijststof (*front-end*) en in de keten van afvoer en verwerking van de splijststof (*back-end*) meestal zijn vergund in andere landen en onder de verantwoordelijkheid van andere nationale overheden staan. EPZ heeft in de leveringsketen van de splijststof (*front-end*) en in de keten van afvoer en verwerking van de splijststof (*back-end*) formeel geen verantwoordelijkheid voor de veiligheidseffecten of de milieugevolgen. Van de bedrijven waarmee EPZ een directe contractuele relatie heeft, is uit jaarlijkse openbare milieu- en veiligheidsverslagen bekend dat zij bedrijf voeren binnen de wettelijke limieten, die (net als in Nederland) zijn afgeleid van Europese regelgeving. De beschikbare informatie over deze onderdelen van de leverings- en afvoerketens is echter minder diepgaand dan de kennis van de eigen activiteiten met KCB.

#### 3.1 Radiologische risico's bevolking

In Tabel 3.1.1 zijn voor verschillende fasen van de splijststofcyclus de collectieve effectieve dosis per GigaWatt elektrisch vermogen en per jaar voor de bevolking vermeld. Deze doses zijn berekend op basis van de lozingen die wereldwijd gerapporteerd zijn van 1995 tot 1997. Deze cijfers worden – bij gebrek aan meer recente, wereldwijde informatie - als bovengrens bruikbaar geacht omdat de industriële processen niet wezenlijk veranderd zijn en men het ALARA

principe ook bij deze processen steeds stringenter is gaan toepassen. In het algemeen zijn de milieupraktijken van de nucleaire industrie (in ieder geval van de installaties waarmee EPZ contractuele relaties heeft) in de afgelopen 15 jaar sterk verbeterd, zodat deze gegevens als een conservatieve schatting moeten worden gezien.

De tabel toont dat globaal gesproken ertswinning en extractie, reactorbedrijf en opwerking van splijtstof de belangrijkste bronnen van doses zijn.

### 3.2 Radiologische risico's personeel

Tabel 3.2.1 toont de genormaliseerde collectieve effectieve dosis en de gemiddelde individuele effectieve dosis voor medewerkers die werkzaam zijn in één van de fasen van de splijtstofcyclus. Deze doses zijn berekend op basis van de gemeten blootstellingen over de periode 1990 tot 1994. Deze cijfers worden nog steeds representatief geacht bij gebrek aan meer

recente gegevens wereldwijd. Ook voor deze gegevens geldt dat ze als conservatief moeten worden gewaardeerd omdat in vrijwel alle takken van industrie de praktijken in de afgelopen 15 jaar aanzienlijk zijn verbeterd.

Op basis van de genormaliseerde collectieve doses kan geconcludeerd worden dat er in de keten van de splijtstofcyclus niet-verwaarloosbare radiologische gevolgen bestaan, vooral voor werknemers. Deze gevolgen zijn echter acceptabel in het licht van de daarvoor ontwikkelde internationale normen volgens ICRP (*International Commission on Radiological Protection*).

### 3.3 Radiologische risico's voor de verschillende fasen van de splijtstofcyclus

In deze paragraaf worden de radiologische gevolgen in meer detail besproken volgens de nummering van figuur 2.1.1.

Tabel 3.1.1 Genormaliseerde collectieve effectieve dosis voor de bevolking t.g.v. de splijtstofcyclus (1995-1997)<sup>1)</sup>.

Bron	Genormaliseerde collectieve effectieve dosis (mens mSv per GWe.j)
Ertswinning en extractie	240
Splijtstofproductie	3
Reactorbedrijf <sup>2)</sup>	
Atmosfeer	400
Oppervlaktewater	40
Opwerking splijtstof	
Atmosfeer	40
Oppervlaktewater	90
Transport	< 100
<b>Totaal</b>	<b>910</b>

Tabel 3.2.1 Genormaliseerde collectieve effectieve en de gemiddelde individuele effectieve dosis voor medewerkers in de splijtstofcyclus (1990-1994)<sup>1)</sup>.

Bron	Genormaliseerde collectieve effectieve dosis (mens.mSv per GWe.j)	Gemiddelde individuele effectieve dosis (mSv per GWe.j) van de gemonitorde medewerkers (ICRP-limiet: 20 mSv/j)
Ertswinning en extractie	1.830	7,8
Splijtstofproductie	120	1,15
Reactorbedrijf	3.900	1,4 <sup>3)</sup>
Opwerking splijtstof	3.000	1,5
Onderzoek	1.000	0,78
<b>Gemiddelde totaal</b>	<b>9.800</b>	<b>1,75 <sup>4)</sup></b>

<sup>1)</sup> UNSCEAR 2000, *Sources and effects of ionizing radiation*.

<sup>2)</sup> De door UNSCEAR bepaalde genormaliseerde collectieve effectieve dosis voor de bevolking tijdens reactorbedrijf is twee ordegrotten hoger dan EPZ zelf voor haar feitelijke lozingen van de KCB rapporteert.

<sup>3)</sup> Voor de radiologisch medewerkers van EPZ bedraagt de gemiddelde effectieve dosis: 0,7 mSv per GWe.j.

<sup>4)</sup> De totale gemiddelde effectieve dosis van alle gemonitorde medewerkers is de gemiddelde dosis van een medewerker die werkzaam is in de splijtstofcyclus. Het is dus geen optelling van de afzonderlijke gemiddelden.

### Ertswinning en extractie **1**

Uranium is zwak radioactief en vervalt in de loop van miljoenen jaren. Het heeft miljoenen jaren in stabiele ertslagen gezeten en de natuurlijke (radioactieve) vervalproducten bevinden zich in hetzelfde gesteente als het uraniumerts zelf. Na de winning van het uranium uit het erts blijven de natuurlijke radioactieve dochters, met name radium, in het restgesteente achter. Bij verval van radium komt het edelgas radon vrij. Het vrijkomende radongas en haar vervalproducten zijn verantwoordelijk voor het grootste deel van de stralingsbelasting.

Bij ertsmolens wordt het vermalen gesteente in bezinkbekkens (*'tailing ponds'*) onder water opgeslagen. Hierdoor wordt verspreiding van radon naar de atmosfeer tegengegaan. Na einde van de exploitatie van de mijn worden de bezinkbekkens afgedekt met klei, of wordt de inhoud gerecycled om bruikbare materialen te herwinnen (zoals zware metalen) en wordt het restant onder de grond gebracht. Bij moderne, goed beheerde mijnen wordt zo de radiologische belasting voor de omgeving tot aanvaardbare waardes gereduceerd. Bij in *situ-leaching* mijnbouw wordt geen erts boven de grond gebracht en zijn de hoeveelheden afval bijgevolg aanmerkelijk geringer. EPZ heeft als beleid dat het alleen uranium betreft van mijnbouwbedrijven die een milieucertificaat ISO14001 hebben<sup>60</sup>.

Voor werknemers van de mijnen ontstaan de grootste radiologische gevolgen door blootstelling aan uitwasemingen van het erts en het stof van erts. In open mijnen is de natuurlijke ventilatie gewoonlijk voldoende om de concentraties laag te houden. In ondergrondse mijnen is geforceerde ventilatie vereist evenals maatregelen om mensen tegen stof te beschermen. Bij in *situ-leaching* mijnbouw is er geen sprake van blootstelling van medewerkers aan stof en radongas.

In de gecertificeerde uranium mijnbouw is het inmiddels goed gebruik dat de blootstelling van medewerkers permanent wordt gemeten en bewaakt en wordt zeker gesteld dat die onder wettelijke limieten blijft.

### Splijstofproductie (conversie, verrijking en fabricage splijstofelementen)

#### Conversie **2**

Bij de chemische conversie van  $U_3O_8$  worden geringe hoeveelheden uraniumisotopen en radongas geloosd. De belangrijkste dosisbijdrage ( $\geq 90\%$ ) wordt volgens het UNSCEAR rapport geleverd door inhalatie van uraniumisotopen.

#### Verrijking **3**

De emissies van verrijkingsfabrieken zijn onder normale bedrijfsomstandigheden zeer klein. Volgens UNSCEAR is wat betreft lozingen van uranium naar de atmosfeer de collectieve dosis ten gevolge van het verrijkingproces slechts 1% van die van het conversieproces. Voor lozingen naar oppervlaktewater bedraagt de bijdrage van het verrijkingproces 10% van die van het conversieproces.

#### Fabricage splijstofelementen **4**

De collectieve dosis ten gevolge van lozingen naar de atmosfeer bedraagt slechts 0,25% van die van conversie. De dosisbijdrage ten gevolge van lozingen naar het oppervlaktewater wordt daarentegen een factor twee groter geschat dan bij conversie.

Door het gebruik van plutonium in de vorm van MOX, als alternatief voor elementen uit verrijkt uranium, kan de productie van uraniumelementen worden verminderd. Er zullen echter meer MOX-elementen geproduceerd worden. Het UNSCEAR rapport bevat daarover geen specifieke informatie. De door EPZ beoogde leverancier van MOX-elementen, AREVA-MELOX heeft een productiecapaciteit van 195 ton MOX per jaar. MELOX geeft aan dat bij de productie van 125 ton in het jaar 2007 (jaarverslag MELOX) de lozingen leidden tot een individuele effectieve dosis voor de omwonenden van 0,0017 mSv. Dat is gering ten opzichte van de achtergrondstraling. De door MELOX medewerkers opgelopen dosis in 2007 bedroeg gemiddeld 1,6 mSv per medewerker, met een maximum van 10 mSv voor één medewerker. Dit is meer dan de gemiddelde effectieve dosis voor een gemonitorde medewerker werkzaam in de splijstofproductie (zie Tabel 3.2.1) maar ruim binnen de ICRP norm van 20 mSv per medewerker per jaar.

<sup>60</sup> Informatie op [www.epz.nl](http://www.epz.nl) onder 'de oorsprong van EPZ's uranium'.



## Versplijting van brandstof in een kerncentrale **5**

Tijdens reactorbedrijf wordt de collectieve dosis door zowel lozingen naar de atmosfeer als naar het oppervlaktewater veroorzaakt.

Op basis van de informatie die momenteel beschikbaar is, kan gesteld worden dat er geen significant verschil bestaat tussen de lozingen van centrales die uraniumelementen gebruiken en centrales die MOX-elementen gebruiken. Tijdens het reactorbedrijf worden dus geen gevolgen van het gebruik van alternatieve splijtstoffen voor het milieu verwacht.

## Opwerking splijtstof **6**

De opwerkingsfabrieken lozen naar de atmosfeer en naar het oppervlaktewater. Deze lozingen tezamen bepalen de collectieve dosis. Tabel 3.1.1 geeft de wereldwijde gegevens volgens UNSCEAR. In het specifieke geval van EPZ betreft het de opwerkingsfabriek van AREVA NC in La Hague. Hiervan zijn de radiologische gevolgen in detail bekend, omdat die jaarlijks worden gepubliceerd en door onafhankelijke instanties worden gecontroleerd<sup>61</sup>.

Deze gevolgen zijn nagenoeg onafhankelijk van het soort splijtstof dat wordt opgewerkt: gebruikte uraniumelementen of gebruikte MOX-elementen. In La Hague worden zowel gebruikte splijtstofelementen van verrijkt natuurlijk uranium, van verrijkt gerecycleerd uranium als van MOX opgewerkt.

Het opwerkingsproces begint na afloop van een afkoelperiode van enkele jaren, waardoor de kortlevende radioactieve stoffen in de gebruikte splijtstof door natuurlijk verval zijn verdwenen. Bij het in stukken knippen van de splijtstofstaven, waardoor de insluiting van de splijtstoftabletten wordt verbroken, kunnen gasvormige radioactieve stoffen ontwijken. Deze gasvormige stoffen worden met filters afgevangen. Echter, edelgassen (zoals Krypton-85) worden door filters niet tegengehouden en komen uiteindelijk via de schoorsteen in de omgeving terecht. Bij het chemische proces om het uranium en plutonium terug te winnen wordt een fractie van de radioactieve stoffen in het afvalwater niet uitgefilterd en deze wordt in zee geloosd.

Beide lozingswegen, via de atmosfeer en via het oppervlaktewater, leveren een radiologische belasting voor het milieu op. Volgens het milieujaarverslag van La Hague over 2007<sup>62</sup> was de stralingsbelasting voor de theoretisch meest blootgestelde vissers aan de kust nabij de installatie 0,0056 mSv per jaar en voor de theoretisch meest blootgestelde boeren 0,0088 mSv per jaar. Dat is gering ten opzichte van de achtergrondstraling die ter plaatse circa 3 mSv per jaar bedraagt.

Werknemers van de opwerkingsfabriek worden ook blootgesteld aan straling, zowel via mogelijke inwendige besmetting als via uitwendige bestraling. Deze opgelopen dosis wordt permanent gemeten en bewaakt. Volgens het jaarverslag van La Hague over 2008 was de gemiddelde dosis van de gemonitorde medewerkers 0,15 mSv, dat is een ordegrrootte lager dan wat UNSCEAR rapporteert als wereldwijd gemiddelde voor opwerkingsinstallaties (tabel 3.2.1).

## Transport

Tussen de installaties van de splijtstofcyclus vindt transport van grondstoffen, halffabrikaten, eindproducten en afval plaats. De dosisbijdrage van het transport voor de omgeving is ten opzichte van de totale dosis voor de gehele splijtstofcyclus relatief klein (Tabel 3.1.1). Het gebruik van gerecyclede materialen zal hier weinig aan veranderen, omdat daarvoor dezelfde dosislimieten en bijgevolg dezelfde stralingsniveaus van de transportcontainers worden voorgeschreven als voor niet-gerecyclede materialen.

<sup>61</sup> [www.aveva-nc.com](http://www.aveva-nc.com)

<sup>62</sup> *Etablissement de La Hague, Rapport environmental, social et sociétal 2007.*



## 1 Algemene beschrijving

De kerncentrale Borssele (KCB) bevindt zich circa 1,4 kilometer ten noordwesten van het dorp Borssele, in de provincie Zeeland (zie Figuur B.1). De centrale is direct achter de zeedijk gesitueerd op het terrein van de N.V. EPZ.

Op dit terrein bevinden zich tevens een elektriciteitscentrale die als brandstoffen kolen, gas en biomassa gebruikt en een aantal windturbines.

Figuur B.1 Ligging van de kerncentrale Borssele (KCB).



De KCB is een lichtwater/drukwaterreactor met een thermisch vermogen van circa 1365 MW en een netto elektrisch vermogen van 480 MW. De centrale bestaat uit een reactor met een reactorkoelsysteem (het primaire systeem), een conventioneel gedeelte (het secundaire systeem), dat voor de opwekking van de elektriciteit en de afvoer van de warmte zorgt en de benodigde nucleaire hulp- en neveninstallaties. Tabel B.1 beschrijft enkele karakteristieken van de KCB.

Tabel B.1 Karakteristieke gegevens van de KCB

Netto elektrisch vermogen	480 MW <sub>e</sub>
Bruto thermisch vermogen van de reactor	1365 MW <sub>th</sub>
Netto rendement	36%
<b>Primair systeem</b>	
Systeemdruk	155 bar
Gemiddelde temperatuur	305 °C
<b>Secundair systeem</b>	
Stoomdruk	58 bar
Stoomtemperatuur	260 °C

Figuur B.2 geeft het prinsipeschema van de centrale. De werking is als volgt: in de kern **1** van de reactor, die ondergebracht is in het reactorvat **2**, wordt een gecontroleerde kettingreactie in stand gehouden waarbij door splijting warmte wordt geproduceerd (zie hoofdstuk 2 van deze bijlage). Deze warmte wordt overgedragen aan het koelmiddel, dat uit water bestaat waaraan borium is toegevoegd. Dit koelmiddel wordt in een kringloop, de primaire kringloop genoemd, rondgepompt.

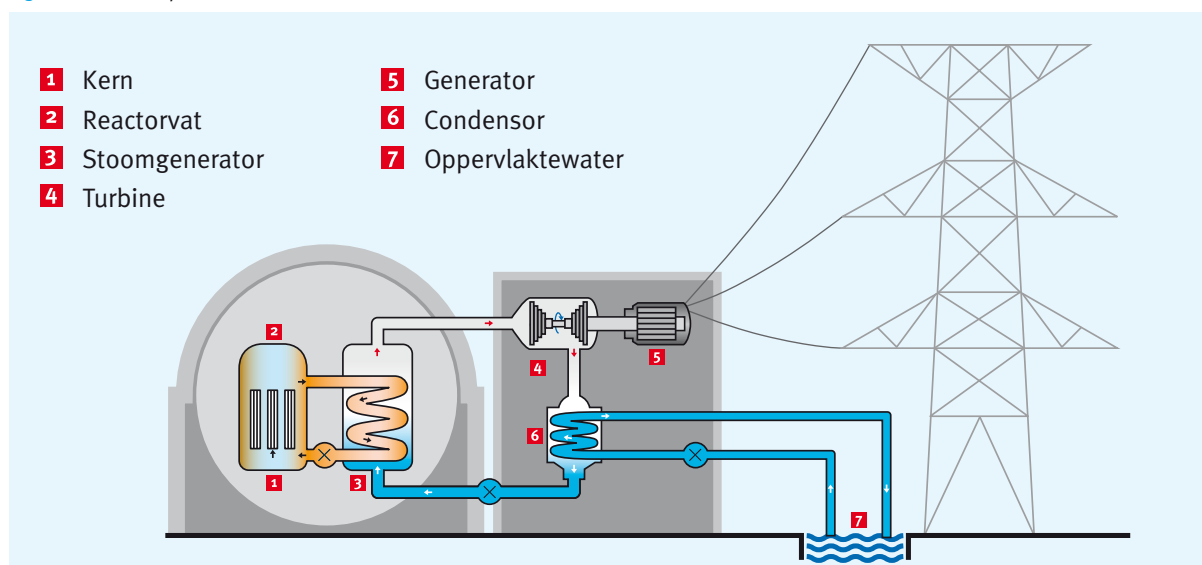
Het koelmiddel staat daarbij onder een zodanige druk dat het bij het opnemen van de geproduceerde warmte niet gaat koken. Het koelmiddel staat de warmte weer af aan een tweede (secundaire) kringloop. Eventuele radioactiviteit blijft in de primaire kringloop en wordt niet doorgegeven naar de secundaire kringloop.

De warmte-overdracht vindt plaats in twee stoomgeneratoren **3**, waar het water uit de secundaire kringloop in stoom wordt omgezet. Na afschakeling van de reactor, waarbij het splijtingsproces stopt, blijft de kern door de aanwezigheid van kortlevende radioactieve splijtingsproducten nog enige tijd warmte produceren. Deze warmte (vervalwarmte), die enkele procenten van het vermogen bij volle belasting bedraagt, dient dus na afschakeling van de reactor nog te worden afgevoerd.

De in de stoomgeneratoren geproduceerde stoom drijft een stoomturbine **4** aan, die op haar beurt een elektriciteitsgenerator (dynamo) **5** aandrijft, die de elektriciteit produceert. De uitlaatstoom van de turbine condenseert tot water in drie condensoren **6**, die met water uit de Westerschelde **7** worden gekoeld.

In de primaire kringloop is een drukhouder opgenomen, waarmee door sproeien of door elektrisch verwarmen de druk in deze kringloop wordt geregeld. De drukhouder is voorzien van veiligheidskleppen, die bij een te hoge druk in de primaire kringloop worden geopend.

Figuur B.2 Prinsipeschema van de installatie.



Nadat de splijtstofelementen grotendeels zijn verbruikt, worden de elementen na afschakeling van de reactor uit de kern gehaald en in een splijtstofopslagbassin, dat voorzien is van een eigen koelsysteem, geplaatst. Nadat de gebruikte splijtstofelementen enkele jaren in het splijtstofopslagbassin onder water bewaard zijn, waarin een deel van de radioactiviteit is vervallen, is de warmteproductie zodanig afgenomen dat de elementen in een speciale transportcontainer veilig van de kerncentrale naar de opwerkingsfabriek overgebracht kunnen worden.

## 2 Het kernsplijtingsproces

Als ‘brandstof’ voor de KCB dient uranium. Bij splijting van de kern van een uraniumatoom komt energie vrij. In de kernreactor wordt door middel van een gecontroleerde kettingreactie dit kernsplijtingsproces in stand gehouden waardoor de kernreactor vermogen levert. In de natuur voorkomend uranium bestaat uit de isotopen uranium-238, uranium-234 en uranium-235. Alleen de atoomkern van het laatstgenoemde isotoop is splijtbaar met behulp van thermische neutronen, zodat alleen dit isotoop bruikbaar is voor het splijtingsproces in een thermische lichtwaterreactor. Het gehalte van dit isotoop in natuurlijk uranium bedraagt 0,7 gew %. Dit gehalte is te laag om in een lichtwaterreactor een kettingreactie gaande te houden en wordt daarom kunstmatig verhoogd. Dit wordt het verrijken van de splijtstof genoemd. Het percentage uranium-235 van de totale hoeveelheid uranium wordt de verrijkingsgraad genoemd. Wanneer de verrijking minder dan 5% bedraagt, spreekt men van licht verrijkt uranium. In de kerncentrale Borssele wordt uitsluitend deze licht verrijkte splijtstof toegepast (nu tot 4,4%).

Tijdens het kernsplijtingsproces wordt er warmte geproduceerd. Deze warmte komt tot stand doordat de kern van het instabiele uranium-235, indien het door een neutron wordt getroffen, uiteenvalt in twee lichtere kernen. Deze kernen worden zogenaamde splijtingsproducten genoemd en zijn radioactief. Bij het splijten van een kern komen naast de splijtingsproducten ook enkele neutronen vrij. De vrijgekomen neutronen kunnen op hun beurt weer kernsplijtingen bij andere

uraniumatomen veroorzaken. Op die wijze ontstaat een continu splijtingsproces. De reactor is dan kritisch<sup>63</sup>. Om de neutronen geschikt te maken voor het splijtingsproces moeten ze worden afgeremd (modereren). Dit gebeurt bij de KCB met behulp van water. Het water dient tevens voor de afvoer van de opgewekte warmte. Boorzuur, dat neutronen absorbeert, wordt toegevoegd aan het koelwater om de hoeveelheid splijtingen in de reactorkern te kunnen reguleren. De gevormde activerings- en splijtingsproducten vervallen onder uitzending van ioniserende straling uiteindelijk naar stabiele, niet-radioactieve atomen. Dit wordt radioactief verval genoemd. Hierbij komt eveneens een hoeveelheid warmte vrij, echter veel minder dan bij de kernsplijting zelf.

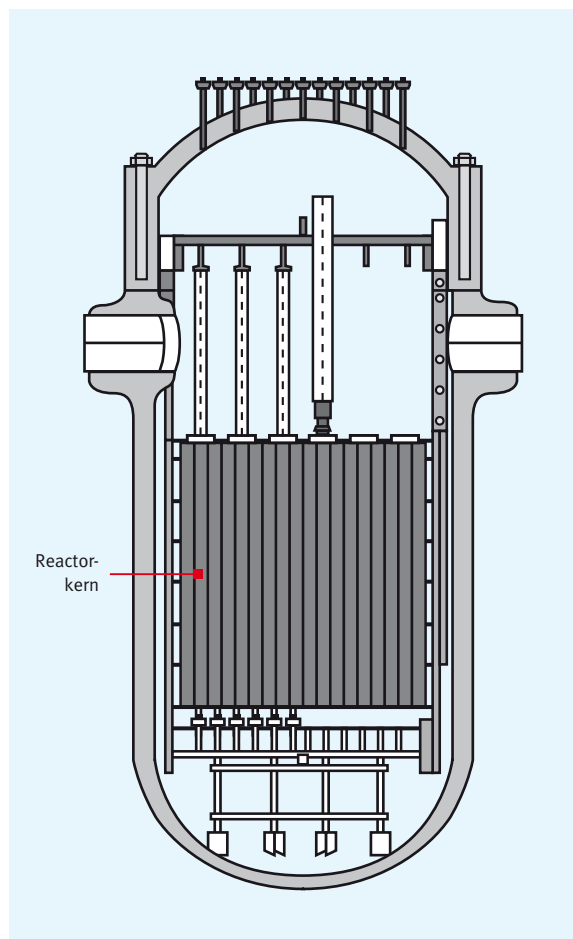
Bij afschakeling van de reactor wordt een zodanig percentage neutronen weggenomen dat het overblijvende aantal te gering is om een continu splijtingsproces in stand te houden. Het proces stopt dan in zeer korte tijd waarbij de reactor onderkritisch wordt. Als gevolg van radioactief verval geven de aanwezige splijtings- en activeringsproducten nog enige tijd warmte af nadat het splijtingsproces is stopgezet. De warmteproductie neemt steeds verder af naarmate de tijd vordert. Zij bedraagt al kort na afschakeling nog maar enkele procenten van het volle reactorvermogen. Verse splijtstof bevat slechts een geringe hoeveelheid radioactiviteit. Tijdens het bedrijf van de reactor wordt in de splijtstof een grote hoeveelheid radioactiviteit gevormd door splijtings- en activeringsproducten. Deze producten blijven binnen de splijtstofelementen opgesloten.

## 3 Splijtstofelementen

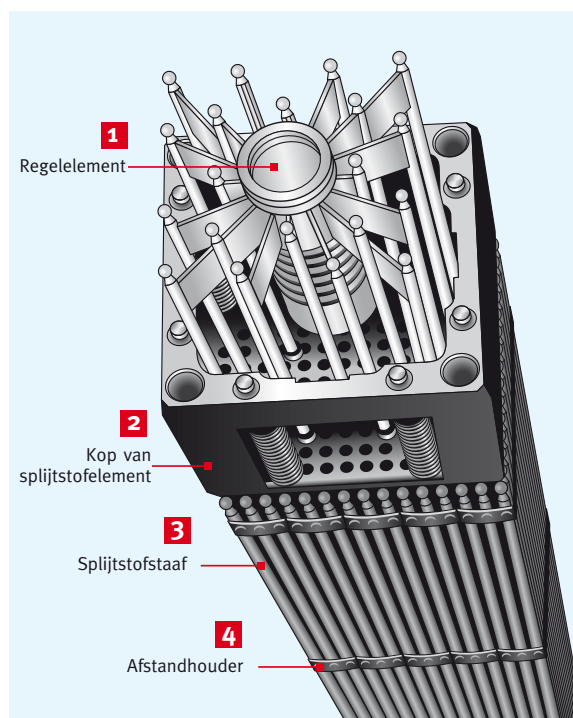
De reactorkern (zie Figuur B.3) van de KCB bevat maximaal circa 39 ton uranium. Momenteel heeft het uranium de vorm van UO<sub>2</sub>-tabletten waarin het uranium tot 4,4 ± 0,05 gew % uranium-235 is verrijkt. De tabletten zijn geplaatst in een dichtgelaste metalen huls en vormen daarmee één splijtstofstaaf. Een gebundeld aantal van 205 splijtstofstaven, met in het skelet ruimte voor 20 regelstaafgeleidenbuizen, vormt één splijtstofelement (zie Figuur B.4). De reactorkern bestaat in totaal uit 121 van deze splijtstofelementen.

<sup>63</sup> Een reactor is kritisch als per seconde evenveel (langzame) neutronen worden gevormd als verbruikt, ofwel de neutronen van één splijting veroorzaken één nieuwe splijting.

Figuur B.3 Reactorvat met daarin de reactorkern.



Figuur B.4 Bovenste gedeelte van een splijstofelement met regelement.



**1 Regelement:** hiermee kan het vermogen van de reactor worden geregeld en kan deze worden afgeschakeld.

**2 Kop van het splijstofelement:** elk element is opgebouwd uit een skelet bestaande uit afstandhouders, geleidingsbuizen en een kop en een voet. In het skelet staan in totaal 205 splijfstofstaven.

**3 Splijstofstaaf:** buis waarin splijstoftabletten met uraniumoxide zijn opgestapeld.

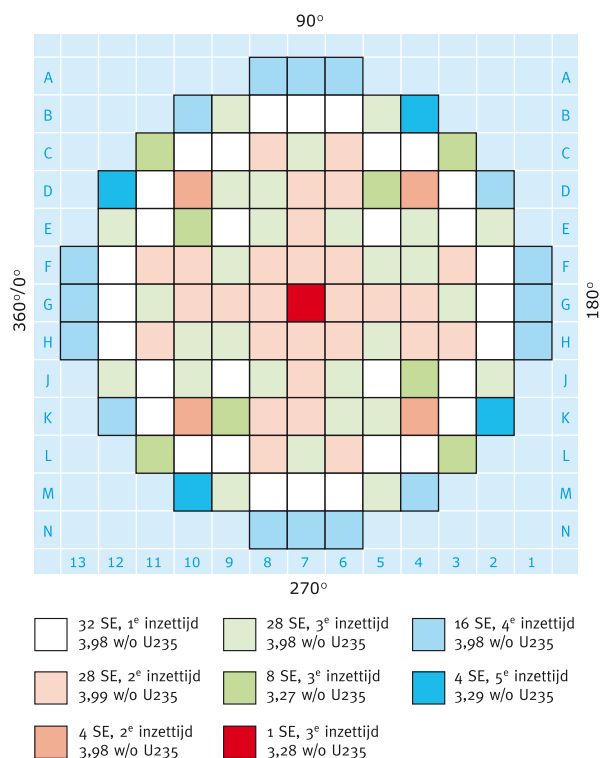
**4 Afstandhouder:** klemt op verschillende hoogtes van het splijstofelement de splijstofstaven vast zodat de onderlinge afstand tussen de staven gelijk blijft.

Na een cyclus van ongeveer één jaar wordt een deel van de splijstofelementen uit de kern verwijderd en vervangen door nieuwe elementen. Hiertoe wordt de reactorkern na iedere cyclus opnieuw beladen. De elementen waarvan de splijstof zo goed als geheel is opgebrand worden definitief verwijderd. De mogelijkheid bestaat dat een aantal splijstofelementen, die slechts deels zijn opgebrand, niet direct wordt teruggeplaatst in de kern maar pas bij een latere cyclus weer terug geplaatst wordt. Dit is afhankelijk van de optimale toepassing van de splijstofelementen. Het zo optimaal mogelijk beladen van de reactorkern vindt plaats volgens een vooraf vastgesteld beladingsplan waarbij een deel van de splijstofelementen op andere plaatsen wordt gezet en ongeveer een vierde deel wordt ontladen en vervangen door nieuwe elementen. De elementen die definitief worden ontladen zijn elementen die gedurende vier of vijf cycli zijn gebruikt. Bij een splijstofwisseling worden de nieuwe splijstofelementen vanuit het splijstofopslagbassin in het reactorvat geplaatst en worden de opgebrande elementen vanuit de kern in het splijstofopslagbassin geplaatst. Het verwisselen van de elementen gebeurt onder water om straling naar de omgeving te voorkomen en stralingsniveaus voor het bedienend personeel onder aanvaardbare en toegestane waarden te houden.

Voor iedere kernbelading van KCB (zie voor een voorbeeld Figuur B.5) voor iedere bedrijfscyclus wordt een formele veiligheidsanalyse van het reactorbedrijf uitgevoerd. Hierbij worden alle relevante reactorparameters met gekwalificeerde

b

**Figuur B.5** Voorbeeld van een beladingsplan  
SE = splijstofelement; w/o: gewichtspercentage.



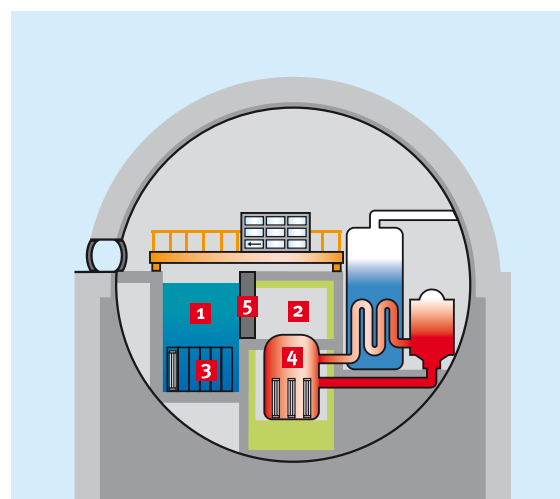
computer codes berekend. De resultaten van deze analyse worden na goedkeuring door de RBVC<sup>64</sup> conform de vergunning ter goedkeuring voorgelegd aan de Kernfysische Dienst van VROM. Alleen wanneer aantoonbaar geen voorgeschreven veiligheidsgrenswaarden overschreden worden, mag de betreffende kernbelading door EPZ samengesteld worden. Hiermee is gewaarborgd dat elke nieuwe kernbelading voldoet aan de veiligheidslimieten die de overheid heeft voorgeschreven. Deze werkwijze zal bij toekomstig gebruik van andere splijststoffen gehandhaafd blijven.

## 4 Opslag splijstofelementen

### 4.1 Opslag van nieuwe splijstofelementen

Nieuwe, verse uraniumsplijstofelementen zijn nauwelijks radioactief en produceren geen warmte. Opslag, afscherming en koeling van deze elementen vragen daarom minder aandacht dan van gebruikte elementen. Niettemin worden

**Figuur B.6** Situering splijststofopslagbassin (verticale doorsnee).



- 1** Splijststof opslagbassin
- 2** Reactorbassin
- 3** Splijststofopslagrekken
- 4** Reactorvat
- 5** Sluisdeur

ook nieuwe splijstofelementen in principe bij aankomst in de centrale in het splijststofopslagbassin (zie Figuur B.6) geplaatst teneinde het aantal handelingen met nieuwe splijstofelementen zo beperkt mogelijk te houden. De materialen van de opslagrekken en de afstand tussen de splijstofelementen in deze rekken zijn zo gekozen, dat zelfs wanneer alle plaatsen bezet zijn door nieuwe splijstofelementen, en het water in het bassin per ongeluk geen neutronenabsorberend boorzuur zou bevatten, geen kernsplijtingsproces op gang kan komen. De zogenaamde onderkriticaliteit van de splijstofelementen is dan gewaarborgd. De verhouding tussen de geproduceerde en de geabsorbeerde neutronen is dan duidelijk kleiner dan 1, namelijk  $K_{eff} < 0,95$ . Normaal is het water wel voorzien van boorzuur en is slechts een gedeelte van de beschikbare plaatsen daadwerkelijk door nieuwe splijstofelementen bezet, zodat de onderkriticaliteit met een zeer ruime marge is gewaarborgd.

<sup>64</sup> Reactor Bedrijfs Veiligheids Commissie.

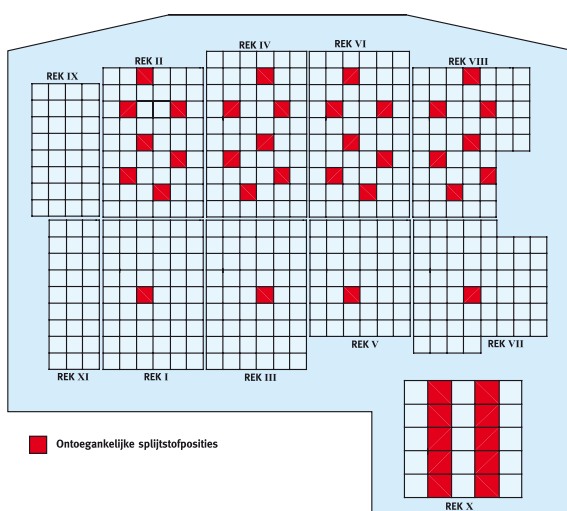
## 4.2 Opslag van gebruikte splijstof-elementen

Gebruikte splijstofelementen worden in het splijstofopslagbassin bewaard totdat ze opnieuw in de reactor kern gebruikt worden of afgevoerd worden uit de centrale. Het splijstofopslagbassin bevindt zich binnen de veiligheidssomhulling en is door middel van een afsluitbare sluis verbonden met het reactorbassin (zie Figuur B.6). Het geboreerde water in het splijstofopslagbassin dient om de gebruikte splijstofelementen te koelen. Verder dient het ter afscherming van de ioniserende straling van de gebruikte splijstofelementen.

Voordat een splijstofwisseling plaatsvindt, wordt het reactorbassin gevuld met geboreerd water. Op deze wijze wordt de noodzakelijke afscherming tegen ioniserende straling tijdens het transport van de splijstofelementen van het reactorvat naar het splijstofopslagbassin verzorgd.

In het splijstofopslagbassin bevinden zich zogenaamde compactrekken waarin 520 splijstofelementen kunnen worden opgeslagen (zie Figuur B.7). Deze rekken zijn voorzien van neutronenabsorberend materiaal tussen de posities waar de elementen staan, ter waarborging van de ondercriticaliteit. Door posities af te sluiten, zijn de rekken voor hogere verrijkingsgraden tot  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235 geschikt gemaakt<sup>65</sup>.

**Figuur B.7** Schematisch bovenaanzicht van de huidige geometrie van het splijstofopslagbassin voor  $4,4 \pm 0,05$  gew % uranium-235verrijking inclusief de afgesloten posities (rood).



## 5 Veiligheidsvoorzieningen

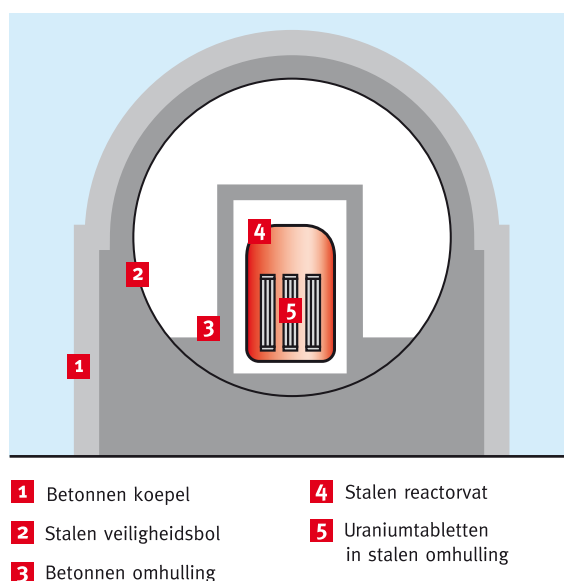
Aangezien er bij kernsplijting ioniserende straling vrijkomt en radioactieve stoffen worden gevormd, dienen er maatregelen getroffen te worden ter bescherming van de omgeving en het personeel. Het doel van deze bescherming is de stralingsbelasting zo laag als redelijkerwijs mogelijk (ALARA) te houden en de radioactieve stoffen veilig op te sluiten.

Het veilig insluiten van de radioactiviteit die tijdens de kernsplijting ontstaat, wordt gerealiseerd met behulp van een systeem van vijf, in hun werking achter elkaar geschakelde barrières. Deze zijn aangegeven in Figuur B.8. De integriteit van de barrières wordt bewaakt door het meten van de radioactiviteit in de verschillende kringlopen en ruimten. De barrières worden bovendien periodiek op hun goede staat gecontroleerd.

Indien barrière 3 wordt doorbroken treden automatisch actieve veiligheidssystemen in werking. Deze dienen te voorkomen dat oververhitting van de kern optreedt, waarbij grotere hoeveelheden radioactiviteit uit de kern zouden kunnen komen. Om deze situatie te kunnen beheersen zijn de volgende drie functies gewaarborgd:

- afschakelen van de reactor
- handhaven insluitfunctie
- afvoeren van vervalwarmte.

**Figuur B.8** Activiteitsbarrières.



- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>1</b> Betonnen koepel       | <b>4</b> Stalen reactorvat                    |
| <b>2</b> Stalen veiligheidsbol | <b>5</b> Uraniumtabletten in stalen omhulling |
| <b>3</b> Betonnen omhulling    |   |

<sup>65</sup> In het splijstofopslagbassin kunnen 520 – 42 afgedekte posities gebruikt worden, netto 478.

In een storingssituatie kan de reactor snel afgeschakeld worden door het **reactorsnelafschakelsysteem** (zie hierna). Een tweede, langzamere methode is het toedienen van boorzuur in de reactorkern. Dit kan, afhankelijk van de storingssituatie, gebeuren door verschillende systemen namelijk door het volumeregelsysteem, het kerninundatie- en nakoelsysteem en het primaire reservesuppletiesysteem. Voor de koeling van de kern is het noodzakelijk dat deze in alle situaties (bijvoorbeeld bij grote lekkages in het primaire systeem) gevuld blijft met water.

De veiligheidsomsluiting dient om de omgeving te beschermen tegen het ontoelaatbaar vrijkomen van radioactieve stoffen en tegen directe straling tijdens normaal bedrijf en bij mogelijke ongevallen. De bolvormige veiligheidsomhulling vormt een drukbestendige en gasdichte barrière. Ze is ontworpen op belastingen ten gevolge van overdruk en temperatuur die zich na het doorbreken van barrière 3 zouden voordoen. Indien barrière 3 wordt doorbroken, worden alle doorvoeringen van de veiligheidsomhulling van systemen die niet noodzakelijk zijn voor de beheersing van het ongeval automatisch afgesloten.

De afvoer van de vervalwarmte vindt ook in storingssituaties in eerste instantie via de stoomgeneratoren plaats. Deze kunnen worden gevoed door de secundaire veiligheidssystemen. De gevormde stoom wordt eventueel afgeblazen naar de omgeving. Indien warmte-afvoer via de stoomgeneratoren niet meer mogelijk is omdat de temperatuur tot 120 °C verlaagd is, dan wordt het kerninundatie- en nakoelsysteem ingeschakeld.

Samenvattend kent de KCB de volgende veiligheidsvoorzieningen:

- **primairzijdige (in directe verbinding met de reactor) veiligheidsvoorzieningen:**
  - reactorsnelafschakelsysteem
  - kerninundatie- en nakoelsysteem
  - primair reservesuppletiesysteem
- **secundairzijdige veiligheidsvoorzieningen:**
  - noodvoedingswatersysteem
  - secundair reservesuppletiesysteem
  - stoom afblaassysteem
- **algemene veiligheidsvoorzieningen:**
  - reactorbeveiligingssysteem
  - noodstroomvoorziening
  - veiligheidsomhulling.

Met het **reactorsnelafschakelsysteem** kan de reactor door de regelementen in de kern te laten vallen, in enkele seconden worden afgeschakeld.

Met het **kerninundatie- en nakoelsysteem** kan bij een lekkage van het primaire systeem koelmiddel worden aangevuld en restwarmte worden afgevoerd. Het systeem wordt, evenals het splitsstofopslagbassin, gekoeld door het nucleair tussenkoelwatersysteem, dat op haar beurt weer door het nood- en nevenkoelwatersysteem, waardoor Westerscheldewater stroomt, wordt gekoeld. Aan het kerninundatie- en nakoelsysteem zijn voorraadtanks met geboreerd koelmiddel verbonden. Ook kan water, in geval van een grote lekkage, uit de onder het reactorvat gelegen put terug in de reactor worden gepompt.

Het **primaire reservesuppletiesysteem** is aangesloten op de primaire kringloop. Uit voorraadbassins kan in geval van uitvallen van bepaalde bedrijfssystemen, met name door invloeden van buitenaf, boorzuurvoeding en compensatie van lekkage plaatsvinden.

Met het **noodvoedingswatersysteem** kan, in het geval het gewone voedingswatersysteem uitvalt, water in de secundaire zijde van de stoomgeneratoren worden gepompt om tijdelijk de koeling over te nemen tot de druk en temperatuur in het primaire systeem zover zijn gedaald dat het kerninundatie- en nakoelsysteem de verdere koeling kan overnemen.

Het **secundaire reservesuppletiesysteem** bestaat uit voedingswaterstrangen met voorraadbassins, die aan de stoomgeneratoren zijn gekoppeld. Hiermee kan bij het uitvallen van het noodvoedingswatersysteem de geproduceerde warmte worden afgevoerd.

Met het **stoom afblaassysteem** kan de door de stoomgeneratoren gevormde stoom worden afgeblazen naar de omgeving.

Het **reactorbeveiligingssysteem** meet een aantal grootheden van het proces. De gemeten waarden worden door het systeem vergeleken met ingestelde en toelaatbaar geachte grenswaarden. Bij overschrijding van de grenswaarden worden beveiligingssignalen geïnitieerd, die leiden tot acties, zoals het afschakelen van de reactor en/of de turbine en het inschakelen van veiligheidssystemen. Als gevolg van deze acties wordt



ervoor gezorgd dat de toestand van de reactorinstallatie binnen veilige grenzen blijft. De diverse delen van het reactorbeveiligingssysteem zijn zekerheidshalve ondergebracht in drie verschillende gebouwen: het reservesuppletiegebouw, het reserveregelzaalgebouw en in het schakelgebouw.

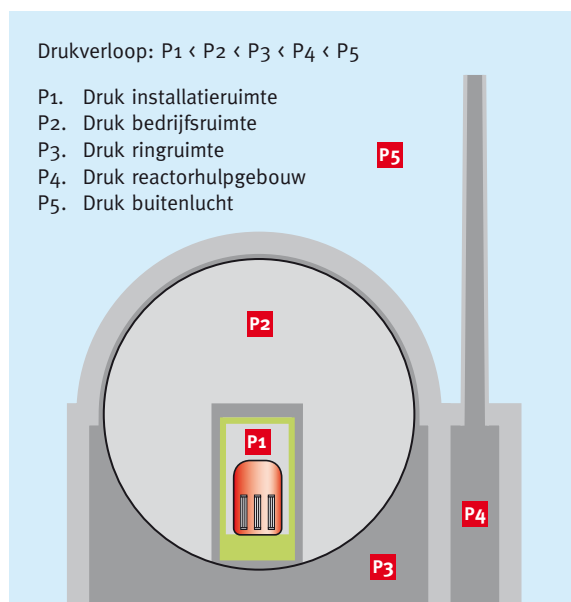
De **noodstroomvoorziening**, die uit twee noodstroomnetten met dieselgeneratoren bestaat, dient om in geval de externe 150 kV-stroomvoorziening uitvalt, de apparatuur die nodig is voor het veilig uit bedrijf nemen en in een veilige toestand houden van de installatie, van spanning te voorzien.

De **veiligheidsomhulling** houdt de activiteit vast na falen van barrière 1 t/m 3 en is voorzien van een **klep**, die gebruikt kan worden ter bescherming tegen te hoge druk. Door toepassing van een filter wordt bereikt dat bij afblazen de lucht uit de veiligheidsomhulling in belangrijke mate wordt ontdaan van radioactieve stoffen voordat deze wordt afgevoerd naar de buitenlucht. Alleen na het doorlopen van een procedure mag de klep worden geopend.

## 6 Overige relevante systemen en voorzieningen

De KCB is uitgerust met een speciaal ventilatiesysteem. Met behulp van ventilatoren wordt in de verschillende ruimten binnen het reactorgebouw

Figuur B.9 Drukverloop binnen de gebouwen.



een van buiten naar binnen toenemende onderdruk in stand gehouden (zie Figuur B.9). Daardoor kunnen bij normaal bedrijf slechts naar binnen gerichte lekkages optreden en kan er geen radioactiviteit ongecontroleerd in het milieu terechtkomen. De afgezogen lucht wordt door uiterst effectieve filtersystemen geleid, voordat zij via de ventilatieschacht ('schoorsteen') naar de omgeving wordt afgevoerd.

De afgevoerde lucht uit bovengenoemde ruimten alsmede de luchtafvoer door de ventilatieschacht worden bewaakt op radioactiviteit. Tevens wordt in de ventilatieschacht de doorstromende hoeveelheid lucht gemeten. Bij een te grote toename van de radioactiviteit in de lucht binnen de veiligheidsomhulling wordt de toe- en afvoer van de lucht bij de doorvoeringen van de veiligheidsomhulling direct en automatisch afgesloten.

Om de lozing van radioactieve stoffen via de ventilatieschacht en het koelwater te kunnen bewaken, kwantificeren en registreren is de KCB uitgerust met meetapparatuur.

Op het terrein en in de omgeving van de KCB is tevens meetapparatuur geïnstalleerd om de stralingsniveaus te kunnen vaststellen. Thans worden op 17 punten de exposietempo's (een maat voor de hoeveelheid straling in een bepaalde periode ten gevolge van radioactieve stoffen) gemeten en op 5 punten de activiteitsconcentratie van de lucht en van het gras. De activiteit in het water en in wier in de Westerschelde worden op 4 punten bepaald.

Voor de brandbestrijding zijn er diverse branddetectie- en brandblussystemen aanwezig.

## 7 Bedrijfservaringen KCB

De KCB levert sinds medio 1973 elektriciteit aan het Nederlandse elektriciteitsnet. Gedurende de bedrijfstijd is een grote hoeveelheid ervaring opgedaan in het veilig en economisch bedrijven van de centrale. Vanaf de inbedrijfstelling worden de bedrijfservaringen vastgesteld en geëvalueerd en worden de (achterliggende) oorzaken van storingen opgespoord. Deze bedrijfservaringen hebben ertoe geleid dat de bedrijfsvoering geoptimaliseerd is ten aanzien van de veiligheid. Hierbij is tevens gebruik gemaakt van bedrijfservaringen van andere kerncentrales.

b

## Representatieve begingebourtenissen voor ongevallen bij de KCB

Nummer	Veronderstelde begingebourtenis	Analyse
1.4	Onbedoeld openen van appendages (bijvoorbeeld omloopafsluiters, afblaasregelkleppen, veiligheidskleppen)	Thermohydraulisch
1.5.1	Langdurige uitval van de secundaire hoofdkoeling bij bedrijfslekkage van stoomgeneratorpijpen	Radiologisch
1.5.4	Breuk in de hoofdstoomleiding tussen de veiligheidsomhulling en de hoofdstoomafsluiters	Thermohydraulisch
2.3.2	Turbinesnelafschakeling zonder opening van de turbine-omloopleiding	Thermohydraulisch
2.5.2	Langdurige noodstroomsituatie (> 30 minuten)	Thermohydraulisch
2.6.1	Uitval van de hoofd- en noodvoedingswaterpompen	Thermohydraulisch
3.2	Blokkeren van een hoofdkoelmiddelpomp of breuk van een hoofdkoelmiddelpompas	Thermohydraulisch
5.2	Uitworp van het meest effectieve regelement	Thermohydraulisch
7.1.1	Onbedoeld openen en weer sluiten van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder	Thermohydraulisch
7.1.2	Onbedoeld openen en open blijven van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder	Thermohydraulisch
7.2.2	Lekkage van het primaire systeem binnen de veiligheidsomhulling	Thermohydraulisch Radiologisch
7.2.3	Breuk van de hoofdkoelmiddelleiding	Thermohydraulisch Radiologisch
7.3.2	Bezwijken van stoomgeneratorpijpen	Thermohydraulisch
7.3.2.2	Bezwijken van stoomgeneratorpijpen met een noodstroomsituatie (kortstondig)	Radiologisch
7.4.2	Lekkage van een meetleiding die hoofdkoelmiddel bevat buiten de veiligheidsomhulling	Radiologisch
8.2	Lekkage in een leiding van het afgassysteem	Radiologisch
8.4.1	Beschadigingen van splijtstofelementen tijdens het hanteren	Radiologisch
9.1.1	Lekkage van hoofdstoomleidingen in geval van een aardbeving	Thermohydraulisch
9.1.2	Gevolgen van een aardbeving op het reactorhulpgebouw	Radiologisch
10.2	Overtoerental van een hoofdkoelmiddelpomp tijdens een lekkage van het primaire systeem binnen de veiligheidsomhulling	Thermohydraulisch
10.5	Bedrijfstransienten waarbij een hypothetisch uitvallen van het systeem voor snelle afschakeling wordt verondersteld (ATWS)	Thermohydraulisch

## Belangrijkste nucliden voor verschillende kernen

Tabel d.1 Hoeveelheid radioactiviteit van de kerninventaris na volledige opbrand en na o dagen verval (Bq). Ter vergelijking zijn in kolom 'ENU' de berekende hoeveelheid radioactiviteit van de huidige situatie opgenomen.

Nuclide	MOX-26%	MOX-40%	MOX-53%	MOX-73%	c-ERU	ENU
Kr-83m	1,36E+17	1,36E+17	1,25E+17	1,19E+17	1,57E+17	1,55E+17
Kr-85m	3,2E+17	3,2E+17	2,84E+17	2,65E+17	3,82E+17	3,74E+17
Kr-85	1,61E+16	1,61E+16	1,36E+16	1,17E+16	1,95E+16	1,81E+16
Kr-87	5,42E+17	5,42E+17	4,78E+17	4,42E+17	6,54E+17	6,41E+17
Kr-88	7,33E+17	7,33E+17	6,43E+17	5,93E+17	8,88E+17	8,70E+17
Rb-86	2,36E+15	2,36E+15	1,96E+15	1,68E+15	2,84E+15	2,68E+15
Rb-88	7,56E+17	7,56E+17	6,63E+17	6,13E+17	9,12E+17	8,95E+17
Rb-89	1,02E+18	1,02E+18	8,89E+17	8,14E+17	1,25E+18	1,22E+18
Sr-89	1,07E+18	1,07E+18	9,28E+17	8,36E+17	1,32E+18	1,29E+18
Sr-90	1,16E+17	1,16E+17	9,45E+16	7,78E+16	1,44E+17	1,33E+17
Sr-91	1,35E+18	1,35E+18	1,20E+18	1,12E+18	1,62E+18	1,58E+18
Sr-92	1,47E+18	1,47E+18	1,34E+18	1,28E+18	1,71E+18	1,68E+18
Sr-93	1,67E+18	1,67E+18	1,56E+18	1,51E+18	1,88E+18	1,86E+18
Y-90m	9,41E+13	9,41E+13	7,39E+13	5,89E+13	1,12E+14	1,12E+14
Y-90	1,21E+17	1,21E+17	9,78E+16	8,03E+16	1,50E+17	1,39E+17
Y-91m	6,92E+17	6,92E+17	6,16E+17	5,74E+17	8,25E+17	8,10E+17
Y-91	1,44E+18	1,44E+18	1,27E+18	1,16E+18	1,73E+18	1,70E+18
Y-92	1,48E+18	1,48E+18	1,35E+18	1,29E+18	1,71E+18	1,69E+18
Y-93	1,70E+18	1,70E+18	1,60E+18	1,55E+18	1,92E+18	1,89E+18
Zr-89	6,34E+10	6,34E+10	6,72E+10	9,31E+10	9,66E+10	7,68E+10
Zr-93	2,86E+12	2,86E+12	2,55E+12	2,31E+12	3,29E+12	3,06E+12
Zr-95	2,09E+18	2,09E+18	2,00E+18	1,96E+18	2,29E+18	2,27E+18
Zr-97	2,02E+18	2,02E+18	1,99E+18	2,01E+18	2,14E+18	2,12E+18
Nb-93m	2,22E+11	2,22E+11	1,92E+11	1,68E+11	2,53E+11	2,23E+11
Nb-94m	2,01E+12	2,01E+12	2,01E+12	2,25E+12	1,97E+12	1,95E+12
Nb-94	4,11E+08	4,11E+08	4,28E+08	4,36E+08	3,98E+08	3,71E+08
Nb-95m	2,32E+16	2,32E+16	2,23E+16	2,18E+16	2,54E+16	2,52E+16
Nb-95	2,11E+18	2,11E+18	2,01E+18	1,96E+18	2,32E+18	2,29E+18
Nb-97	2,03E+18	2,03E+18	2,00E+18	2,02E+18	2,15E+18	2,13E+18
Mo-99	2,33E+18	2,33E+18	2,33E+18	2,38E+18	2,41E+18	2,40E+18

d

Nuclide	MOX-26%	MOX-40%	MOX-53%	MOX-73%	c-ERU	ENU
Mo-101	2,21E+18	2,21E+18	2,26E+18	2,35E+18	2,22E+18	2,22E+18
Tc-99m	2,04E+18	2,04E+18	2,04E+18	2,08E+18	2,11E+18	2,10E+18
Tc-99	2,33E+13	2,33E+13	2,27E+13	2,23E+13	2,48E+13	2,30E+13
Tc-101	2,21E+18	2,21E+18	2,26E+18	2,35E+18	2,22E+18	2,22E+18
Ru-103	2,08E+18	2,08E+18	2,26E+18	2,42E+18	1,90E+18	1,92E+18
Ru-105	1,53E+18	1,53E+18	1,74E+18	1,93E+18	1,29E+18	1,32E+18
Ru-106	9,07E+17	9,07E+17	1,11E+18	1,26E+18	6,86E+17	6,88E+17
Rh-103m	2,08E+18	2,08E+18	2,26E+18	2,42E+18	1,90E+18	1,92E+18
Rh-105	1,47E+18	1,47E+18	1,69E+18	1,88E+18	1,23E+18	1,25E+18
Ag-108m	5,59E+09	5,59E+09	8,00E+09	9,52E+09	3,20E+09	2,81E+09
Ag-110m	7,16E+15	7,16E+15	9,26E+15	1,1E+16	4,36E+15	4,70E+15
Ag-110	2,16E+17	2,16E+17	2,70E+17	3,11E+17	1,39E+17	1,53E+17
Ag-111	8,72E+16	8,72E+16	1,04E+17	1,17E+17	6,81E+16	7,00E+16
Sb-124	1,59E+15	1,59E+15	1,87E+15	2,12E+15	1,27E+15	1,25E+15
Sb-125	2,64E+16	2,64E+16	3,22E+16	3,66E+16	2,01E+16	1,97E+16
Sb-126	1,15E+15	1,15E+15	1,30E+15	1,43E+15	9,76E+14	9,95E+14
Sb-127	1,31E+17	1,31E+17	1,48E+17	1,63E+17	1,12E+17	1,14E+17
Sb-128l	1,86E+16	1,86E+16	2,04E+16	2,2E+16	1,67E+16	170E+16
Sb-129	3,83E+17	3,83E+17	4,07E+17	4,32E+17	3,64E+17	3,66E+17
Sb-130l	4,41E+17	4,41E+17	4,51E+17	4,66E+17	4,46E+17	4,45E+17
Sb-131	1,04E+18	1,04E+18	1,06E+18	1,09E+18	1,06E+18	1,06E+18
Te-125m	5,66E+15	5,66E+15	6,93E+15	7,91E+15	4,27E+15	4,17E+15
Te-127m	1,2E+16	1,2E+16	1,53E+16	1,77E+16	9,06E+15	8,74E+15
Te-127	1,19E+17	1,19E+17	1,36E+17	1,51E+17	1,01E+17	1,02E+17
Te-129m	6,98E+16	6,98E+16	7,44E+16	7,86E+16	6,63E+16	6,67E+16
Te-129	4,13E+17	4,13E+17	4,39E+17	4,66E+17	3,91E+17	3,93E+17
Te-131m	1,88E+17	1,88E+17	1,97E+17	2,07E+17	1,82E+17	1,83E+17
Te-131	1,13E+18	1,13E+18	1,15E+18	1,19E+18	1,13E+18	1,13E+18
Te-132	1,75E+18	1,75E+18	1,78E+18	1,83E+18	1,78E+18	1,78E+18
Te-133m	1,3E+18	1,3E+18	1,3E+18	1,33E+18	1,34E+18	1,33E+18
Te-133	1,23E+18	1,23E+18	1,23E+18	1,25E+18	1,28E+18	1,28E+18
Te-134	2,17E+18	2,17E+18	2,13E+18	2,15E+18	2,30E+18	2,28E+18
I-129	5,87E+10	5,87E+10	6,29E+10	6,61E+10	5,53E+10	5,19E+10
I-130	3,66E+16	3,66E+16	3,36E+16	3,15E+16	3,76E+16	3,82E+16

Nuclide	MOX-26%	MOX-40%	MOX-53%	MOX-73%	c-ERU	ENU
I-131	1,28E+18	1,28E+18	1,31E+18	1,36E+18	1,28E+18	1,28E+18
I-132	1,78E+18	1,78E+18	1,81E+18	1,86E+18	1,81E+18	1,81E+18
I-133	2,51E+18	2,51E+18	2,53E+18	2,59E+18	2,58E+18	2,57E+18
I-134	2,71E+18	2,71E+18	2,72E+18	2,79E+18	2,81E+18	2,79E+18
I-135	2,41E+18	2,41E+18	2,43E+18	2,50E+18	2,47E+18	2,46E+18
Xe-131m	1,38E+16	1,38E+16	1,42E+16	1,47E+16	1,38E+16	1,38E+16
Xe-133m	7,63E+16	7,63E+16	7,71E+16	7,92E+16	7,80E+16	7,77E+16
Xe-133	2,54E+18	2,54E+18	2,56E+18	2,62E+18	2,60E+18	2,60E+18
Xe-135m	5,39E+17	5,39E+17	5,55E+17	5,77E+17	5,36E+17	5,36E+17
Xe-135	7,68E+17	7,68E+17	9,48E+17	1,09E+18	6,48E+17	5,98E+17
Xe-138	2,16E+18	2,16E+18	2,14E+18	2,16E+18	2,28E+18	2,26E+18
Cs-134m	6,05E+16	6,05E+16	5,68E+16	5,43E+16	6,41E+16	6,39E+16
Cs-134	2,62E+17	2,62E+17	2,45E+17	2,29E+17	2,73E+17	2,60E+17
Cs-135	8,38E+11	8,38E+11	9,95E+11	1,11E+12	7,43E+11	6,46E+11
Cs-136	7,04E+16	7,04E+16	7,74E+16	8,38E+16	6,54E+16	6,06E+16
Cs-137	1,86E+17	1,86E+17	1,82E+17	1,79E+17	1,95E+17	1,83E+17
Cs-138	2,37E+18	2,37E+18	2,37E+18	2,40E+18	2,48E+18	2,47E+18
Ba-139	2,18E+18	2,18E+18	2,14E+18	2,15E+18	2,32E+18	2,30E+18
Ba-140	2,15E+18	2,15E+18	2,13E+18	2,16E+18	2,27E+18	2,26E+18
La-140	2,23E+18	2,23E+18	2,19E+18	2,21E+18	2,35E+18	2,34E+18
La-141	1,99E+18	1,99E+18	1,97E+18	1,99E+18	2,09E+18	2,08E+18
La-142	1,94E+18	1,94E+18	1,93E+18	1,95E+18	2,04E+18	2,03E+18
Ce-141	2,06E+18	2,06E+18	2,04E+18	2,04E+18	2,17E+18	2,16E+18
Ce-143	1,87E+18	1,87E+18	1,82E+18	1,81E+18	2,02E+18	2,00E+18
Ce-144	1,60E+18	1,60E+18	1,51E+18	1,46E+18	1,78E+18	1,73E+18
Pr-143	1,87E+18	1,87E+18	1,82E+18	1,81E+18	2,02E+18	2,01E+18
Pr-145	1,29E+18	1,29E+18	1,26E+18	1,26E+18	1,37E+18	1,36E+18
Nd-147	8,22E+17	8,22E+17	8,23E+17	8,39E+17	8,53E+17	8,48E+17
Pm-147	2,79E+17	2,79E+17	2,80E+17	2,81E+17	3,15E+17	2,79E+17
Pm-148m	5,19E+16	5,19E+16	5,75E+16	6,35E+16	4,52E+16	4,58E+16
Pm-148	2,15E+17	2,15E+17	2,06E+17	2,07E+17	2,09E+17	2,23E+17
Pm-149	6,58E+17	6,58E+17	6,49E+17	6,6E+17	6,62E+17	6,79E+17
Pm-151	2,54E+17	2,54E+17	2,72E+17	2,89E+17	2,39E+17	2,40E+17

d

d

Nuclide	MOX-26%	MOX-40%	MOX-53%	MOX-73%	c-ERU	ENU
Eu-152m	1,89E+14	1,89E+14	2,52E+14	3,05E+14	1,35E+14	1,22E+14
Eu-152	5,22E+12	5,22E+12	8,81E+12	1,17E+13	2,02E+12	1,63E+12
Eu-154	1,66E+16	1,66E+16	1,79E+16	1,88E+16	1,52E+16	1,43E+16
Eu-155	8,90E+15	8,90E+15	1,08E+16	1,23E+16	6,98E+15	6,54E+15
Eu-156	3,04E+17	3,04E+17	3,04E+17	3,03E+17	2,85E+17	2,90E+17
Po-210	9,49E+02	9,49E+02	5,94E+02	3,18E+02	1,23E+04	1,00E+03
Ra-226	2,99E+04	2,99E+04	1,99E+04	1,19E+04	2,06E+05	3,52E+04
U-234	1,57E+12	1,57E+12	1,15E+12	8,56E+11	1,09E+13	2,06E+12
U-235	2,83E+10	2,83E+10	1,98E+10	1,40E+10	4,52E+10	3,95E+10
U-238	4,43E+11	4,43E+11	4,37E+11	4,33E+11	4,39E+11	4,50E+11
Np-237	3,59E+11	3,59E+11	2,62E+11	1,88E+11	1,32E+12	4,27E+11
Np-238	3,47E+17	3,47E+17	2,42E+17	1,63E+17	1,24E+18	4,33E+17
Np-239	2,17E+19	2,17E+19	2,04E+19	1,97E+19	2,20E+19	2,33E+19
Pu-236	3,18E+11	3,18E+11	2,6E+11	2,24E+11	1,19E+12	3,32E+11
Pu-238	1,69E+16	1,69E+16	2,95E+16	3,88E+16	1,21E+16	3,74E+15
Pu-239	9,33E+14	9,33E+14	1,39E+15	1,72E+15	4,76E+14	4,53E+14
Pu-240	2,13E+15	2,13E+15	3,61E+15	4,71E+15	6,11E+14	6,02E+14
Pu-241	4,50E+17	4,50E+17	7,46E+17	9,65E+17	1,52E+17	1,46E+17
Pu-242	1,36E+13	1,36E+13	2,42E+13	3,21E+13	2,69E+12	2,71E+12
Am-241	1,63E+15	1,63E+15	3,07E+15	4,14E+15	1,86E+14	1,67E+14
Am-242m	7,93E+13	7,93E+13	1,52E+14	2,06E+14	6,49E+12	5,76E+12
Am-242	4,00E+17	4,00E+17	6,99E+17	9,29E+17	9,35E+16	9,14E+16
Am-243	1,24E+14	1,24E+14	2,19E+14	2,92E+14	2,76E+13	2,71E+13
Cm-242	2,95E+17	2,95E+17	5,31E+17	7,09E+17	5,69E+16	5,49E+16
Cm-243	1,50E+14	1,50E+14	2,81E+14	3,83E+14	2,15E+13	2,04E+13
Cm-244	2,21E+16	2,21E+16	4,00E+16	5,44E+16	4,29E+15	4,14E+15
Cm-245	3,14E+12	3,14E+12	5,97E+12	8,31E+12	4,06E+11	3,68E+11
Cm-246	8,23E+11	8,23E+11	1,53E+12	2,06E+12	1,52E+11	1,41E+11
Cm-247	3,68E+06	3,68E+06	7,15E+06	9,55E+06	5,47E+05	4,93E+05
Cm-248	1,43E+07	1,43E+07	2,84E+07	3,66E+07	2,27E+06	1,98E+06

## Nuclide-inventaris van ontladen splijtstofelementen na 3 en 500 dagen verval

Tabel e.1 Hoeveelheid radioactiviteit van de radionuclide-inventaris van één element na volledige opbrand en na 3 dagen verval (Bq). Ter vergelijking zijn in kolom 'ENU' de berekende hoeveelheden radioactiviteit van de huidige situatie opgenomen.

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		c-ERU	ENU
	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
Ag109m	1.98e+14	1.46e+14	1.98e+14	1.46e+14	2.00e+14	1.50e+14	2.00e+14	1.43e+14	1.37e+14	1.46e+14
Ag110	1.30e+12	1.04e+12	1.30e+12	1.04e+12	1.67e+12	1.13e+12	1.67e+12	9.37e+11	8.74e+11	1.05e+12
Ag110m	9.74e+13	7.80e+13	9.74e+13	7.80e+13	1.26e+14	8.50e+13	1.26e+14	7.05e+13	6.57e+13	7.91e+13
Ag111	9.88e+14	7.84e+14	9.88e+14	7.84e+14	1.00e+15	7.98e+14	1.00e+15	7.67e+14	7.39e+14	7.86e+14
Ag112	5.88e+13	4.67e+13	5.88e+13	4.67e+13	5.89e+13	4.72e+13	5.89e+13	4.60e+13	4.45e+13	4.67e+13
Am241	4.24e+13	1.99e+12	4.24e+13	1.99e+12	4.11e+13	1.98e+12	4.11e+13	2.01e+12	2.05e+12	1.94e+12
Am242	5.52e+14	7.23e+13	5.52e+14	7.23e+13	5.45e+14	7.27e+13	5.45e+14	7.16e+13	7.28e+13	7.11e+13
Am242m	2.14e+12	7.00e+10	2.14e+12	7.00e+10	2.06e+12	6.95e+10	2.06e+12	7.04e+10	7.59e+10	6.70e+10
Am243	4.44e+12	6.43e+11	4.44e+12	6.43e+11	4.59e+12	6.84e+11	4.59e+12	6.05e+11	5.75e+11	6.52e+11
Am244	1.23e+14	3.19e+13	1.23e+14	3.19e+13	1.25e+14	3.38e+13	1.25e+14	2.96e+13	2.56e+13	3.21e+13
As76	1.03e+10	1.79e+10	1.03e+10	1.79e+10	1.41e+10	2.02e+10	1.41e+10	1.54e+10	1.60e+10	1.77e+10
As77	9.99e+12	9.92e+12	9.99e+12	9.92e+12	9.98e+12	9.89e+12	9.98e+12	9.93e+12	1.00e+13	9.92e+12
Ba135m	2.19e+11	6.12e+11	2.19e+11	6.12e+11	3.22e+11	6.92e+11	3.22e+11	5.16e+11	5.44e+11	6.10e+11
Ba137m	2.01e+15	2.18e+15	2.01e+15	2.18e+15	2.10e+15	2.22e+15	2.10e+15	2.13e+15	2.22e+15	2.19e+15
Ba139	4.83e+00	5.10e+00	4.83e+00	5.10e+00	4.82e+00	5.08e+00	4.82e+00	5.11e+00	5.14e+00	5.09e+00
Ba140	1.71e+16	1.75e+16	1.71e+16	1.75e+16	1.70e+16	1.74e+16	1.70e+16	1.75e+16	1.76e+16	1.74e+16
Br82	2.09e+12	3.60e+12	2.09e+12	3.60e+12	2.54e+12	3.88e+12	2.54e+12	3.24e+12	3.36e+12	3.55e+12
Br83	9.09e+05	1.10e+06	9.09e+05	1.10e+06	9.08e+05	1.09e+06	9.08e+05	1.12e+06	1.15e+06	1.10e+06
Cd113m	2.33e+10	5.87e+09	2.33e+10	5.87e+09	2.34e+10	6.05e+09	2.34e+10	5.76e+09	4.93e+09	5.72e+09
Cd115	8.60e+13	6.90e+13	8.60e+13	6.90e+13	8.63e+13	6.97e+13	8.63e+13	6.79e+13	6.61e+13	6.90e+13
Cd115m	8.26e+12	6.89e+12	8.26e+12	6.89e+12	8.74e+12	7.05e+12	8.74e+12	6.70e+12	6.62e+12	6.90e+12
Cd117	1.50e+05	1.29e+05	1.50e+05	1.29e+05	1.51e+05	1.30e+05	1.51e+05	1.28e+05	1.25e+05	1.29e+05
Cd117m	3.37e+07	2.92e+07	3.37e+07	2.92e+07	3.37e+07	2.95e+07	3.37e+07	2.89e+07	2.80e+07	2.93e+07
Ce139	1.34e+10	3.61e+10	1.34e+10	3.61e+10	2.55e+10	4.37e+10	2.55e+10	2.96e+10	3.10e+10	3.51e+10
Ce141	1.73e+16	1.83e+16	1.73e+16	1.83e+16	1.77e+16	1.83e+16	1.77e+16	1.83e+16	1.84e+16	1.83e+16
Ce143	3.64e+15	3.86e+15	3.64e+15	3.86e+15	3.64e+15	3.85e+15	3.64e+15	3.87e+15	3.93e+15	3.86e+15
Ce144	1.27e+16	1.46e+16	1.27e+16	1.46e+16	1.29e+16	1.46e+16	1.29e+16	1.45e+16	1.51e+16	1.46e+16
Cm242	9.09e+15	1.08e+15	9.09e+15	1.08e+15	9.27e+15	1.11e+15	9.27e+15	1.05e+15	1.08e+15	1.08e+15
Cm243	5.89e+12	4.95e+11	5.89e+12	4.95e+11	6.10e+12	5.25e+11	6.10e+12	4.67e+11	4.69e+11	5.01e+11

e

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		c-ERU	ENU	
	T=3d	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
Cm244		1.06e+15	1.33e+14	1.06e+15	1.33e+14	1.15e+15	1.47e+14	1.15e+15	1.21e+14	1.09e+14	1.33e+14
Cm245		1.79e+11	1.31e+10	1.79e+11	1.31e+10	1.96e+11	1.46e+10	1.96e+11	1.17e+10	1.19e+10	1.27e+10
Cm246		5.38e+10	6.72e+09	5.38e+10	6.72e+09	6.35e+10	7.81e+09	6.35e+10	5.76e+09	4.75e+09	6.77e+09
Cs132		5.89e+11	7.40e+11	5.89e+11	7.40e+11	6.66e+11	7.79e+11	6.66e+11	7.35e+11	7.16e+11	7.01e+11
Cs134		3.16e+15	4.28e+15	3.16e+15	4.28e+15	3.41e+15	4.45e+15	3.41e+15	4.12e+15	4.17e+15	4.34e+15
Cs134m		2.52e+07	3.74e+07	2.52e+07	3.74e+07	2.64e+07	3.81e+07	2.64e+07	3.58e+07	3.48e+07	3.78e+07
Cs136		1.05e+15	9.25e+14	1.05e+15	9.25e+14	1.10e+15	9.59e+14	1.10e+15	9.16e+14	9.06e+14	9.34e+14
Cs137		2.12e+15	2.31e+15	2.12e+15	2.31e+15	2.22e+15	2.35e+15	2.22e+15	2.25e+15	2.35e+15	2.32e+15
Dy165		9.59e+03	1.14e+04	9.59e+03	1.14e+04	1.16e+04	1.27e+04	1.16e+04	1.01e+04	9.85e+03	1.16e+04
Dy166		2.42e+12	1.43e+12	2.42e+12	1.43e+12	2.44e+12	1.46e+12	2.44e+12	1.39e+12	1.36e+12	1.43e+12
Eu152		8.76e+10	9.03e+09	8.76e+10	9.03e+09	9.51e+10	8.93e+09	9.51e+10	9.17e+09	1.62e+10	8.54e+09
Eu152m		1.62e+10	5.24e+09	1.62e+10	5.24e+09	1.57e+10	5.28e+09	1.57e+10	5.22e+09	6.87e+09	5.12e+09
Eu154		2.96e+14	2.25e+14	2.96e+14	2.25e+14	3.16e+14	2.32e+14	3.16e+14	2.19e+14	2.42e+14	2.26e+14
Eu155		1.68e+14	9.85e+13	1.68e+14	9.85e+13	1.76e+14	1.01e+14	1.76e+14	9.60e+13	7.45e+13	9.81e+13
Eu156		4.12e+15	5.65e+15	4.12e+15	5.65e+15	4.40e+15	5.86e+15	4.40e+15	5.41e+15	4.78e+15	5.78e+15
Eu157		2.59e+13	2.98e+13	2.59e+13	2.98e+13	2.65e+13	3.08e+13	2.65e+13	2.85e+13	2.49e+13	3.04e+13
Ga72		2.71e+11	2.11e+11	2.71e+11	2.11e+11	2.71e+11	2.13e+11	2.71e+11	2.08e+11	2.03e+11	2.11e+11
Gd153		3.03e+11	4.77e+10	3.03e+11	4.77e+10	3.28e+11	4.67e+10	3.28e+11	4.88e+10	7.22e+10	4.52e+10
Gd159		1.90e+13	1.29e+13	1.90e+13	1.29e+13	1.94e+13	1.31e+13	1.94e+13	1.25e+13	1.18e+13	1.31e+13
Ge77		3.06e+11	3.04e+11	3.06e+11	3.04e+11	3.06e+11	3.03e+11	3.06e+11	3.05e+11	3.07e+11	3.04e+11
H3		1.42e+12	2.28e+12	1.42e+12	2.28e+12	2.01e+12	2.58e+12	2.01e+12	1.97e+12	2.24e+12	2.28e+12
Ho166		3.48e+12	2.39e+12	3.48e+12	2.39e+12	3.62e+12	2.53e+12	3.62e+12	2.24e+12	2.20e+12	2.39e+12
I130		9.66e+11	2.95e+12	9.66e+11	2.95e+12	1.38e+12	3.37e+12	1.38e+12	2.53e+12	2.51e+12	3.04e+12
I131		1.03e+16	1.01e+16	1.03e+16	1.01e+16	1.03e+16	1.02e+16	1.03e+16	1.01e+16	1.01e+16	1.02e+16
I132		9.45e+15	9.49e+15	9.45e+15	9.49e+15	9.44e+15	9.49e+15	9.44e+15	9.49e+15	9.44e+15	9.49e+15
I133		2.30e+15	2.31e+15	2.30e+15	2.31e+15	2.31e+15	2.31e+15	2.31e+15	2.32e+15	2.32e+15	2.31e+15
I135		1.26e+13	1.24e+13	1.26e+13	1.24e+13	1.26e+13	1.24e+13	1.26e+13	1.24e+13	1.24e+13	1.24e+13
In115m		9.40e+13	7.53e+13	9.40e+13	7.53e+13	9.44e+13	7.62e+13	9.44e+13	7.43e+13	7.22e+13	7.54e+13
In117		4.36e+07	3.78e+07	4.36e+07	3.78e+07	4.35e+07	3.81e+07	4.35e+07	3.73e+07	3.63e+07	3.79e+07
In117m		1.75e+06	1.50e+06	1.75e+06	1.50e+06	1.74e+06	1.52e+06	1.74e+06	1.49e+06	1.45e+06	1.51e+06
Kr83m		3.88e+06	4.70e+06	3.88e+06	4.70e+06	3.87e+06	4.64e+06	3.87e+06	4.75e+06	4.88e+06	4.68e+06
Kr85		1.43e+13	3.09e+13	1.43e+13	3.09e+13	1.99e+13	3.44e+13	1.99e+13	2.74e+13	3.20e+13	3.08e+13
Kr85m		3.03e+10	3.92e+10	3.03e+10	3.92e+10	3.02e+10	3.86e+10	3.02e+10	3.98e+10	4.14e+10	3.91e+10



Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		c-ERU	ENU
	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
Kr88	1.05e+08	1.39e+08	1.05e+08	1.39e+08	1.05e+08	1.37e+08	1.05e+08	1.42e+08	1.49e+08	1.39e+08
La140	1.88e+16	1.93e+16	1.88e+16	1.93e+16	1.88e+16	1.92e+16	1.88e+16	1.93e+16	1.94e+16	1.92e+16
La141	6.09e+10	6.30e+10	6.09e+10	6.30e+10	6.08e+10	6.28e+10	6.08e+10	6.32e+10	6.35e+10	6.29e+10
La142	1.11e+02	1.13e+02	1.11e+02	1.13e+02	1.11e+02	1.13e+02	1.11e+02	1.14e+02	1.14e+02	1.13e+02
Mo99	1.04e+16	1.06e+16	1.04e+16	1.06e+16	1.04e+16	1.06e+16	1.04e+16	1.06e+16	1.06e+16	1.06e+16
Nb95	1.57e+16	1.84e+16	1.57e+16	1.84e+16	1.64e+16	1.84e+16	1.64e+16	1.83e+16	1.87e+16	1.84e+16
Nb95m	1.83e+14	2.06e+14	1.83e+14	2.06e+14	1.86e+14	2.06e+14	1.86e+14	2.06e+14	2.10e+14	2.06e+14
Nb96	1.71e+13	2.58e+13	1.71e+13	2.58e+13	1.79e+13	2.59e+13	1.79e+13	2.50e+13	2.39e+13	2.54e+13
Nb97	9.64e+14	1.00e+15	9.64e+14	1.00e+15	9.63e+14	1.00e+15	9.63e+14	1.01e+15	1.01e+15	1.00e+15
Nb97m	9.09e+14	9.48e+14	9.09e+14	9.48e+14	9.09e+14	9.45e+14	9.09e+14	9.51e+14	9.56e+14	9.47e+14
Nd147	6.57e+15	6.57e+15	6.57e+15	6.57e+15	6.56e+15	6.56e+15	6.56e+15	6.58e+15	6.62e+15	6.57e+15
Nd149	1.43e+03	1.39e+03	1.43e+03	1.39e+03	1.42e+03	1.40e+03	1.42e+03	1.39e+03	1.38e+03	1.39e+03
Np238	3.59e+14	3.34e+15	3.59e+14	3.34e+15	3.76e+14	3.45e+15	3.76e+14	3.24e+15	7.58e+15	3.32e+15
Np239	8.18e+16	1.20e+17	8.18e+16	1.20e+17	8.19e+16	1.22e+17	8.19e+16	1.20e+17	1.08e+17	1.21e+17
Pd109	1.98e+14	1.46e+14	1.98e+14	1.46e+14	2.00e+14	1.50e+14	2.00e+14	1.43e+14	1.36e+14	1.46e+14
Pm147	2.66e+15	2.34e+15	2.66e+15	2.34e+15	2.68e+15	2.34e+15	2.68e+15	2.35e+15	2.75e+15	2.34e+15
Pm148	1.51e+15	1.74e+15	1.51e+15	1.74e+15	1.60e+15	1.77e+15	1.60e+15	1.77e+15	1.65e+15	1.76e+15
Pm148m	6.23e+14	3.69e+14	6.23e+14	3.69e+14	6.41e+14	3.73e+14	6.41e+14	3.81e+14	2.97e+14	3.64e+14
Pm149	2.70e+15	3.12e+15	2.70e+15	3.12e+15	2.75e+15	3.15e+15	2.75e+15	3.13e+15	3.04e+15	3.14e+15
Pm150	5.10e+05	1.27e+06	5.10e+05	1.27e+06	5.34e+05	1.29e+06	5.34e+05	1.24e+06	1.05e+06	1.30e+06
Pm151	5.16e+14	4.73e+14	5.16e+14	4.73e+14	5.15e+14	4.77e+14	5.15e+14	4.70e+14	4.61e+14	4.72e+14
Pr142	6.15e+13	1.37e+14	6.15e+13	1.37e+14	6.43e+13	1.41e+14	6.43e+13	1.31e+14	1.24e+14	1.41e+14
Pr143	1.52e+16	1.61e+16	1.52e+16	1.61e+16	1.52e+16	1.61e+16	1.52e+16	1.62e+16	1.64e+16	1.61e+16
Pr144	1.27e+16	1.46e+16	1.27e+16	1.46e+16	1.29e+16	1.46e+16	1.29e+16	1.45e+16	1.51e+16	1.46e+16
Pr144m	1.90e+14	2.19e+14	1.90e+14	2.19e+14	1.93e+14	2.20e+14	1.93e+14	2.19e+14	2.26e+14	2.20e+14
Pr145	2.77e+12	2.90e+12	2.77e+12	2.90e+12	2.77e+12	2.89e+12	2.77e+12	2.92e+12	2.95e+12	2.90e+12
Pu237	1.10e+11	1.69e+10	1.10e+11	1.69e+10	1.16e+11	1.80e+10	1.16e+11	1.60e+10	4.20e+10	1.53e+10
Pu238	4.20e+14	7.01e+13	4.20e+14	7.01e+13	4.18e+14	7.28e+13	4.18e+14	6.74e+13	1.82e+14	6.83e+13
Pu239	1.31e+13	3.95e+12	1.31e+13	3.95e+12	1.25e+13	3.93e+12	1.25e+13	3.97e+12	3.56e+12	3.87e+12
Pu240	4.65e+13	7.47e+12	4.65e+13	7.47e+12	4.56e+13	7.53e+12	4.56e+13	7.39e+12	7.96e+12	7.34e+12
Pu241	9.96e+15	1.78e+15	9.96e+15	1.78e+15	9.80e+15	1.80e+15	9.80e+15	1.77e+15	1.76e+15	1.74e+15
Pu242	3.90e+11	5.14e+10	3.90e+11	5.14e+10	3.95e+11	5.38e+10	3.95e+11	4.90e+10	4.85e+10	5.24e+10
Pu243	1.11e+12	3.73e+11	1.11e+12	3.73e+11	1.12e+12	4.01e+11	1.12e+12	3.59e+11	3.35e+11	3.87e+11

e

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		c-ERU		ENU
	T=3d	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
Rb86		2.82e+12	5.95e+12	2.82e+12	5.95e+12	3.55e+12	6.64e+12	3.55e+12	5.30e+12	5.76e+12	5.98e+12
Rb88		1.17e+08	1.56e+08	1.17e+08	1.56e+08	1.17e+08	1.54e+08	1.17e+08	1.59e+08	1.66e+08	1.55e+08
Rh102		2.15e+10	1.99e+10	2.15e+10	1.99e+10	2.98e+10	2.23e+10	2.98e+10	1.77e+10	1.77e+10	1.93e+10
Rh102m		8.67e+10	7.29e+10	8.67e+10	7.29e+10	1.12e+11	7.89e+10	1.12e+11	6.72e+10	6.43e+10	7.02e+10
Rh103m		2.32e+16	2.07e+16	2.32e+16	2.07e+16	2.34e+16	2.08e+16	2.34e+16	2.05e+16	2.02e+16	2.07e+16
Rh105		5.61e+15	4.53e+15	5.61e+15	4.53e+15	5.62e+15	4.58e+15	5.62e+15	4.48e+15	4.42e+15	4.53e+15
Rh106		4.77e+15	5.28e+15	4.77e+15	5.28e+15	6.28e+15	5.82e+15	6.28e+15	4.72e+15	5.07e+15	5.30e+15
Rh106m		2.77e+04	5.38e+04	2.77e+04	5.38e+04	2.82e+04	5.50e+04	2.82e+04	5.20e+04	3.94e+04	5.50e+04
Ru103		2.33e+16	2.07e+16	2.33e+16	2.07e+16	2.34e+16	2.08e+16	2.34e+16	2.06e+16	2.02e+16	2.07e+16
Ru105		2.79e+11	2.37e+11	2.79e+11	2.37e+11	2.78e+11	2.40e+11	2.78e+11	2.34e+11	2.25e+11	2.37e+11
Ru106		4.77e+15	5.28e+15	4.77e+15	5.28e+15	6.28e+15	5.82e+15	6.28e+15	4.72e+15	5.07e+15	5.30e+15
Sb122		2.14e+12	3.42e+12	2.14e+12	3.42e+12	2.98e+12	3.96e+12	2.98e+12	2.99e+12	3.08e+12	3.48e+12
Sb124		3.77e+12	6.04e+12	3.77e+12	6.04e+12	5.61e+12	6.99e+12	5.61e+12	5.09e+12	5.51e+12	6.13e+12
Sb125		8.65e+13	1.05e+14	8.65e+13	1.05e+14	1.20e+14	1.18e+14	1.20e+14	9.20e+13	1.01e+14	1.06e+14
Sb126		1.15e+13	1.07e+13	1.15e+13	1.07e+13	1.16e+13	1.09e+13	1.16e+13	1.06e+13	1.02e+13	1.08e+13
Sb127		1.03e+15	8.61e+14	1.03e+15	8.61e+14	1.03e+15	8.70e+14	1.03e+15	8.52e+14	8.29e+14	8.64e+14
Sb128		9.45e+11	8.64e+11	9.45e+11	8.64e+11	9.44e+11	8.70e+11	9.44e+11	8.56e+11		
Sb129		5.24e+10	4.81e+10	5.24e+10	4.81e+10	5.25e+10	4.83e+10	5.25e+10	4.79e+10	4.72e+10	4.82e+10
Sm151		8.59e+12	3.30e+12	8.59e+12	3.30e+12	8.51e+12	3.32e+12	8.51e+12	3.28e+12	4.19e+12	3.23e+12
Sm153		2.65e+15	3.13e+15	2.65e+15	3.13e+15	2.76e+15	3.19e+15	2.76e+15	3.06e+15	2.82e+15	3.08e+15
Sm156		3.16e+12	2.28e+12	3.16e+12	2.28e+12	3.17e+12	2.32e+12	3.17e+12	2.25e+12	2.19e+12	2.29e+12
Sn117m		5.12e+11	4.23e+11	5.12e+11	4.23e+11	5.21e+11	4.27e+11	5.21e+11	4.20e+11	4.03e+11	4.26e+11
Sn119m		2.34e+11	2.84e+11	2.34e+11	2.84e+11	3.07e+11	3.12e+11	3.07e+11	2.55e+11	2.74e+11	2.86e+11
Sn121		3.48e+13	2.79e+13	3.48e+13	2.79e+13	3.49e+13	2.81e+13	3.49e+13	2.74e+13	2.67e+13	2.79e+13
Sn121m		1.30e+11	1.72e+11	1.30e+11	1.72e+11	1.82e+11	1.94e+11	1.82e+11	1.50e+11	1.67e+11	1.73e+11
Sn123		2.85e+13	3.06e+13	2.85e+13	3.06e+13	3.43e+13	3.24e+13	3.43e+13	2.85e+13	2.95e+13	3.07e+13
Sn125		4.51e+14	3.67e+14	4.51e+14	3.67e+14	4.51e+14	3.72e+14	4.51e+14	3.63e+14	3.50e+14	3.68e+14
Sn127		4.96e+04	4.18e+04	4.96e+04	4.18e+04	4.96e+04	4.23e+04	4.96e+04	4.14e+04	4.02e+04	4.19e+04
Sr89		5.31e+15	8.07e+15	5.31e+15	8.07e+15	5.62e+15	8.00e+15	5.62e+15	8.11e+15	8.55e+15	8.04e+15
Sr90		6.84e+14	1.52e+15	6.84e+14	1.52e+15	7.14e+14	1.54e+15	7.14e+14	1.51e+15	1.59e+15	1.52e+15
Sr91		4.62e+13	6.02e+13	4.62e+13	6.02e+13	4.61e+13	5.93e+13	4.61e+13	6.12e+13	6.35e+13	6.00e+13
Sr92		1.05e+08	1.28e+08	1.05e+08	1.28e+08	1.05e+08	1.26e+08	1.05e+08	1.29e+08	1.33e+08	1.27e+08
Tb160		7.04e+12	1.04e+13	7.04e+12	1.04e+13	1.16e+13	1.24e+13	1.16e+13	8.50e+12	9.08e+12	1.05e+13

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		c-ERU	ENU
	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm		
Tb161	7.46e+13	4.63e+13	7.46e+13	4.63e+13	7.58e+13	4.77e+13	7.58e+13	4.47e+13	4.39e+13	4.64e+13
Tc99	2.59e+11	2.76e+11	2.59e+11	2.76e+11	2.69e+11	2.81e+11	2.69e+11	2.72e+11	2.89e+11	2.78e+11
Tc99m	1.00e+16	1.02e+16	1.00e+16	1.02e+16	1.00e+16	1.02e+16	1.00e+16	1.02e+16	1.02e+16	1.02e+16
Te123m	2.58e+09	9.83e+09	2.58e+09	9.83e+09	6.22e+09	1.33e+10	6.22e+09	6.95e+09	8.29e+09	1.00e+10
Te125m	1.16e+13	1.72e+13	1.16e+13	1.72e+13	1.89e+13	2.02e+13	1.89e+13	1.43e+13	1.67e+13	1.73e+13
Te127	1.09e+15	8.72e+14	1.09e+15	8.72e+14	1.10e+15	8.80e+14	1.10e+15	8.63e+14	8.48e+14	8.72e+14
Te127m	1.49e+14	8.43e+13	1.49e+14	8.43e+13	1.63e+14	8.47e+13	1.63e+14	8.39e+13	9.01e+13	8.30e+13
Te129	4.72e+14	4.41e+14	4.72e+14	4.41e+14	4.81e+14	4.43e+14	4.81e+14	4.37e+14	4.34e+14	4.41e+14
Te129m	7.25e+14	6.77e+14	7.25e+14	6.77e+14	7.40e+14	6.81e+14	7.40e+14	6.72e+14	6.66e+14	6.78e+14
Te131	8.54e+13	8.42e+13	8.54e+13	8.42e+13	8.51e+13	8.45e+13	8.51e+13	8.38e+13	8.23e+13	8.44e+13
Te131m	3.80e+14	3.74e+14	3.80e+14	3.74e+14	3.79e+14	3.75e+14	3.79e+14	3.72e+14	3.65e+14	3.75e+14
Te132	9.17e+15	9.21e+15	9.17e+15	9.21e+15	9.16e+15	9.21e+15	9.16e+15	9.21e+15	9.16e+15	9.21e+15
U237	1.16e+15	9.20e+15	1.16e+15	9.20e+15	1.19e+15	9.35e+15	1.19e+15	9.44e+15	1.92e+16	9.40e+15
Xe129m	1.35e+09	6.98e+09	1.35e+09	6.98e+09	2.90e+09	9.16e+09	2.90e+09	5.10e+09	5.54e+09	7.19e+09
Xe131m	1.38e+14	1.36e+14	1.38e+14	1.36e+14	1.39e+14	1.36e+14	1.39e+14	1.36e+14	1.35e+14	1.36e+14
Xe133	1.97e+16	1.97e+16	1.97e+16	1.97e+16	1.98e+16	1.97e+16	1.98e+16	1.97e+16	1.98e+16	1.98e+16
Xe133m	4.33e+14	4.35e+14	4.33e+14	4.35e+14	4.33e+14	4.35e+14	4.33e+14	4.35e+14	4.35e+14	4.35e+14
Xe135	2.70e+14	2.43e+14	2.70e+14	2.43e+14	2.69e+14	2.41e+14	2.69e+14	2.43e+14	2.45e+14	2.41e+14
Xe135m	2.03e+12	2.00e+12	2.03e+12	2.00e+12	2.02e+12	2.00e+12	2.02e+12	2.00e+12	2.00e+12	2.00e+12
Y90	6.84e+14	1.52e+15	6.84e+14	1.52e+15	7.15e+14	1.55e+15	7.15e+14	1.51e+15	1.61e+15	1.53e+15
Y91	7.57e+15	1.12e+16	7.57e+15	1.12e+16	8.17e+15	1.12e+16	8.17e+15	1.12e+16	1.17e+16	1.12e+16
Y91m	2.53e+13	3.30e+13	2.53e+13	3.30e+13	2.53e+13	3.25e+13	2.53e+13	3.35e+13	3.47e+13	3.29e+13
Y92	3.32e+10	4.05e+10	3.32e+10	4.05e+10	3.32e+10	4.00e+10	3.32e+10	4.10e+10	4.22e+10	4.04e+10
Y93	9.58e+13	1.10e+14	9.58e+13	1.10e+14	9.56e+13	1.09e+14	9.56e+13	1.11e+14	1.14e+14	1.10e+14
Zn72	1.94e+11	1.51e+11	1.94e+11	1.51e+11	1.94e+11	1.53e+11	1.94e+11	1.49e+11	1.45e+11	1.51e+11
Zr95	1.61e+16	1.81e+16	1.61e+16	1.81e+16	1.63e+16	1.81e+16	1.63e+16	1.81e+16	1.84e+16	1.81e+16
Zr97	9.59e+14	1.00e+15	9.59e+14	1.00e+15	9.59e+14	9.96e+14	9.59e+14	1.00e+15	1.01e+15	9.99e+14
<b>Totaal</b>	<b>4.22e+17</b>	<b>4.70e+17</b>	<b>4.22e+17</b>	<b>4.70e+17</b>	<b>4.30e+17</b>	<b>4.75e+17</b>	<b>4.30e+17</b>	<b>4.68e+17</b>	<b>4.73e+17</b>	<b>4.72e+17</b>

e

Tabel e.2 Hoeveelheid activiteit van de radionuclideninventaris van één element na volledige opbrand en na 500 dagen verval (Bq). Ter vergelijking zijn in kolom 'ENU' de berekende hoeveelheden activiteit van de huidige situatie opgenomen.

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		ERU	ENU
	T=500d MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
Ag109m	3.64e+08	5.59e+08	3.64e+08	5.59e+08	7.00e+08	7.01e+08	7.00e+08	4.36e+08	3.75e+08	5.61e+08
Ag110	3.26e+11	2.61e+11	3.26e+11	2.61e+11	4.23e+11	2.85e+11	4.23e+11	2.36e+11	2.20e+11	2.65e+11
Ag110m	2.45e+13	1.96e+13	2.45e+13	1.96e+13	3.18e+13	2.14e+13	3.18e+13	1.77e+13	1.66e+13	1.99e+13
Ag111	8.17e-06	6.49e-06	8.17e-06	6.49e-06	8.28e-06	6.60e-06	8.28e-06	6.35e-06	6.11e-06	6.50e-06
Ag112										
Am241	6.32e+13	5.75e+12	6.32e+13	5.75e+12	6.18e+13	5.76e+12	6.18e+13	5.72e+12	5.75e+12	5.59e+12
Am242	2.12e+12	6.92e+10	2.12e+12	6.92e+10	2.04e+12	6.88e+10	2.04e+12	6.96e+10	7.50e+10	6.62e+10
Am242m	2.13e+12	6.96e+10	2.13e+12	6.96e+10	2.05e+12	6.91e+10	2.05e+12	7.00e+10	7.54e+10	6.65e+10
Am243	4.44e+12	6.43e+11	4.44e+12	6.43e+11	4.59e+12	6.84e+11	4.59e+12	6.05e+11	5.75e+11	6.52e+11
Am244										
As76										
As77										
Ba135m										
Ba137m	1.95e+15	2.11e+15	1.95e+15	2.11e+15	2.04e+15	2.16e+15	2.04e+15	2.07e+15	2.16e+15	2.11e+15
Ba139										
Ba140	3.08e+04	3.15e+04	3.08e+04	3.15e+04	3.07e+04	3.14e+04	3.07e+04	3.16e+04	3.17e+04	3.14e+04
Br82										
Br83										
Cd113m	2.17e+10	5.49e+09	2.17e+10	5.49e+09	2.19e+10	5.67e+09	2.19e+10	5.39e+09	4.61e+09	5.35e+09
Cd115										
Cd115m	3.65e+09	3.04e+09	3.65e+09	3.04e+09	3.87e+09	3.12e+09	3.87e+09	2.96e+09	2.93e+09	3.05e+09
Cd117										
Cd117m										
Ce139	1.10e+09	2.96e+09	1.10e+09	2.96e+09	2.09e+09	3.58e+09	2.09e+09	2.42e+09	2.55e+09	2.88e+09
Ce141	4.32e+11	4.56e+11	4.32e+11	4.56e+11	4.39e+11	4.55e+11	4.39e+11	4.56e+11	4.59e+11	4.55e+11
Ce143										
Ce144	3.77e+15	4.36e+15	3.77e+15	4.36e+15	3.85e+15	4.37e+15	3.85e+15	4.35e+15	4.49e+15	4.35e+15
Cm242	1.10e+15	1.30e+14	1.10e+15	1.30e+14	1.12e+15	1.33e+14	1.12e+15	1.27e+14	1.30e+14	1.30e+14
Cm243	5.71e+12	4.81e+11	5.71e+12	4.81e+11	5.90e+12	5.08e+11	5.90e+12	4.53e+11	4.54e+11	4.85e+11
Cm244	1.01e+15	1.27e+14	1.01e+15	1.27e+14	1.09e+15	1.39e+14	1.09e+15	1.15e+14	1.04e+14	1.27e+14
Cm245	1.79e+11	1.31e+10	1.79e+11	1.31e+10	1.96e+11	1.46e+10	1.96e+11	1.17e+10	1.19e+10	1.27e+10

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		ERU	ENU
	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
T=500d										
Cm246	5.38e+10	6.72e+09	5.38e+10	6.72e+09	6.35e+10	7.81e+09	6.35e+10	5.76e+09	4.75e+09	6.77e+09
Cs132	4.62e-12	5.79e-12	4.62e-12	5.79e-12	5.21e-12	6.10e-12	5.21e-12	5.76e-12	5.61e-12	5.49e-12
Cs134	2.00e+15	2.71e+15	2.00e+15	2.71e+15	2.16e+15	2.81e+15	2.16e+15	2.60e+15	2.64e+15	2.75e+15
Cs134m										
Cs136	4.50e+03	3.96e+03	4.50e+03	3.96e+03	4.72e+03	4.10e+03	4.72e+03	3.91e+03	3.88e+03	4.00e+03
Cs137	2.06e+15	2.23e+15	2.06e+15	2.23e+15	2.15e+15	2.28e+15	2.15e+15	2.19e+15	2.28e+15	2.24e+15
Dy165										
Dy166										
Eu152	8.16e+10	8.41e+09	8.16e+10	8.41e+09	8.87e+10	8.32e+09	8.87e+10	8.55e+09	1.51e+10	7.96e+09
Eu152m										
Eu154	2.65e+14	2.02e+14	2.65e+14	2.02e+14	2.84e+14	2.07e+14	2.84e+14	1.96e+14	2.17e+14	2.02e+14
Eu155	1.39e+14	8.14e+13	1.39e+14	8.14e+13	1.46e+14	8.38e+13	1.46e+14	7.94e+13	6.16e+13	8.11e+13
Eu156	5.83e+05	8.00e+05	5.83e+05	8.00e+05	6.22e+05	8.29e+05	6.22e+05	7.65e+05	6.77e+05	8.18e+05
Eu157										
Ga72										
Gd153	7.31e+10	1.15e+10	7.31e+10	1.15e+10	7.89e+10	1.13e+10	7.89e+10	1.18e+10	1.74e+10	1.09e+10
Gd159										
Ge77										
H3	1.32e+12	2.12e+12	1.32e+12	2.12e+12	1.86e+12	2.39e+12	1.86e+12	1.83e+12	2.07e+12	2.12e+12
H0166										
I130										
I131	2.55e-03	2.52e-03	2.55e-03	2.52e-03	2.55e-03	2.52e-03	2.55e-03	2.51e-03	2.49e-03	2.52e-03
I132										
I133										
I135										
In115m	3.67e+05	3.06e+05	3.67e+05	3.06e+05	3.88e+05	3.13e+05	3.88e+05	2.97e+05	2.94e+05	3.07e+05
In117										
In117m										
Kr83m										
Kr85	1.31e+13	2.84e+13	1.31e+13	2.84e+13	1.82e+13	3.15e+13	1.82e+13	2.50e+13	2.93e+13	2.82e+13
Kr85m										

e

e

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		ERU	ENU
	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
Kr88										
La140	3.55e+04	3.62e+04	3.55e+04	3.62e+04	3.54e+04	3.61e+04	3.54e+04	3.63e+04	3.66e+04	3.61e+04
La141										
La142										
Mo99										
Nb95	1.66e+14	1.87e+14	1.66e+14	1.87e+14	1.69e+14	1.87e+14	1.69e+14	1.88e+14	1.91e+14	1.87e+14
Nb95m	8.70e+11	9.79e+11	8.70e+11	9.79e+11	8.82e+11	9.76e+11	8.82e+11	9.79e+11	9.96e+11	9.77e+11
Nb96										
Nb97										
Nb97m										
Nd147	1.56e+02	1.56e+02	1.56e+02	1.56e+02	1.55e+02	1.56e+02	1.55e+02	1.56e+02	1.56e+02	1.55e+02
Nd149										
Np238	9.56e+09	3.13e+08	9.56e+09	3.13e+08	9.23e+09	3.10e+08	9.23e+09	3.15e+08	3.39e+08	2.99e+08
Np239	4.44e+12	6.43e+11	4.44e+12	6.43e+11	4.59e+12	6.84e+11	4.59e+12	6.05e+11	5.75e+11	6.52e+11
Pd109										
Pm147	1.91e+15	1.69e+15	1.91e+15	1.69e+15	1.93e+15	1.69e+15	1.93e+15	1.70e+15	1.97e+15	1.69e+15
Pm148	7.82e+09	4.64e+09	7.82e+09	4.64e+09	8.05e+09	4.70e+09	8.05e+09	4.80e+09	3.73e+09	4.58e+09
Pm148m	1.48e+11	8.77e+10	1.48e+11	8.77e+10	1.52e+11	8.88e+10	1.52e+11	9.06e+10	7.07e+10	8.65e+10
Pm149										
Pm150										
Pm151										
Pr142										
Pr143	1.50e+05	1.59e+05	1.50e+05	1.59e+05	1.50e+05	1.58e+05	1.50e+05	1.60e+05	1.62e+05	1.59e+05
Pr144	3.77e+15	4.36e+15	3.77e+15	4.36e+15	3.85e+15	4.37e+15	3.85e+15	4.35e+15	4.49e+15	4.35e+15
Pr144m	5.66e+13	6.54e+13	5.66e+13	6.54e+13	5.78e+13	6.56e+13	5.78e+13	6.52e+13	6.74e+13	6.54e+13
Pr145										
Pu237	5.53e+07	8.43e+06	5.53e+07	8.43e+06	5.81e+07	8.98e+06	5.81e+07	7.98e+06	2.09e+07	7.64e+06
Pu238	4.57e+14	7.44e+13	4.57e+14	7.44e+13	4.55e+14	7.72e+13	4.55e+14	7.16e+13	1.86e+14	7.26e+13
Pu239	1.31e+13	3.98e+12	1.31e+13	3.98e+12	1.26e+13	3.97e+12	1.26e+13	4.00e+12	3.59e+12	3.91e+12
Pu240	4.67e+13	7.49e+12	4.67e+13	7.49e+12	4.58e+13	7.54e+12	4.58e+13	7.40e+12	7.97e+12	7.36e+12
Pu241	9.32e+15	1.67e+15	9.32e+15	1.67e+15	9.18e+15	1.69e+15	9.18e+15	1.65e+15	1.64e+15	1.62e+15
Pu242	3.90e+11	5.14e+10	3.90e+11	5.14e+10	3.95e+11	5.38e+10	3.95e+11	4.90e+10	4.85e+10	5.24e+10
Pu243	1.48e+05	2.52e+04	1.48e+05	2.52e+04	2.24e+05	3.07e+04	2.24e+05	2.01e+04	1.64e+04	2.48e+04

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		ERU	ENU
	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
Rb86	2.70e+04	5.71e+04	2.70e+04	5.71e+04	3.40e+04	6.38e+04	3.40e+04	5.09e+04	5.52e+04	5.74e+04
Rb88										
Rh102	1.60e+10	1.49e+10	1.60e+10	1.49e+10	2.22e+10	1.66e+10	2.22e+10	1.32e+10	1.32e+10	1.44e+10
Rh102m	1.65e+10	1.38e+10	1.65e+10	1.38e+10	2.11e+10	1.50e+10	2.11e+10	1.27e+10	1.22e+10	1.33e+10
Rh103m	3.66e+12	3.26e+12	3.66e+12	3.26e+12	3.68e+12	3.29e+12	3.68e+12	3.23e+12	3.19e+12	3.27e+12
Rh105										
Rh106	1.87e+15	2.07e+15	1.87e+15	2.07e+15	2.47e+15	2.29e+15	2.47e+15	1.86e+15	1.99e+15	2.08e+15
Rh106m										
Ru103	3.67e+12	3.26e+12	3.67e+12	3.26e+12	3.69e+12	3.29e+12	3.69e+12	3.23e+12	3.19e+12	3.27e+12
Ru105										
Ru106	1.87e+15	2.07e+15	1.87e+15	2.07e+15	2.47e+15	2.29e+15	2.47e+15	1.86e+15	1.99e+15	2.08e+15
Sb122										
Sb124	1.23e+10	1.98e+10	1.23e+10	1.98e+10	1.83e+10	2.28e+10	1.83e+10	1.66e+10	1.80e+10	2.01e+10
Sb125	6.43e+13	7.70e+13	6.43e+13	7.70e+13	8.79e+13	8.61e+13	8.79e+13	6.76e+13	7.43e+13	7.73e+13
Sb126	4.41e+09	2.61e+09	4.41e+09	2.61e+09	4.62e+09	2.70e+09	4.62e+09	2.52e+09	2.54e+09	2.62e+09
Sb127										
Sb128										
Sb129										
Sm151	8.52e+12	3.27e+12	8.52e+12	3.27e+12	8.44e+12	3.30e+12	8.44e+12	3.26e+12	4.17e+12	3.21e+12
Sm153										
Sm156										
Sn117m	1.05e+01	8.71e+00	1.05e+01	8.71e+00	1.07e+01	8.78e+00	1.07e+01	8.64e+00	8.30e+00	8.77e+00
Sn119m	7.21e+10	8.76e+10	7.21e+10	8.76e+10	9.46e+10	9.63e+10	9.46e+10	7.87e+10	8.46e+10	8.82e+10
Sn121	9.93e+10	1.31e+11	9.93e+10	1.31e+11	1.39e+11	1.47e+11	1.39e+11	1.14e+11	1.27e+11	1.31e+11
Sn121m	1.28e+11	1.69e+11	1.28e+11	1.69e+11	1.79e+11	1.90e+11	1.79e+11	1.47e+11	1.64e+11	1.68e+11
Sn123	1.98e+12	2.13e+12	1.98e+12	2.13e+12	2.38e+12	2.26e+12	2.38e+12	1.99e+12	2.05e+12	2.14e+12
Sn125	1.36e-01	1.11e-01	1.36e-01	1.11e-01	1.36e-01	1.12e-01	1.36e-01	1.10e-01	1.06e-01	1.11e-01
Sn127										
Sr89	5.77e+12	8.81e+12	5.77e+12	8.81e+12	6.12e+12	8.71e+12	6.12e+12	8.84e+12	9.32e+12	8.75e+12
Sr90	6.62e+14	1.48e+15	6.62e+14	1.48e+15	6.92e+14	1.49e+15	6.92e+14	1.45e+15	1.55e+15	1.48e+15
Sr91										
Sr92										
Tb160	6.01e+10	8.90e+10	6.01e+10	8.90e+10	9.92e+10	1.06e+11	9.92e+10	7.25e+10	7.74e+10	8.97e+10

e

e

Nuclide	26% MOX kern		40% MOX kern		53% MOX kern		73% MOX kern		ERU	ENU
	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	MOX-elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm	UO <sub>2</sub> -elm
T=500d										
Tb161	1.67e-08	1.03e-08	1.67e-08	1.03e-08	1.70e-08	1.06e-08	1.70e-08	9.98e-09	9.77e-09	1.04e-08
Tc99	2.59e+11	2.77e+11	2.59e+11	2.77e+11	2.69e+11	2.81e+11	2.69e+11	2.72e+11	2.90e+11	2.78e+11
Tc99m										
Te123m	1.45e+08	5.54e+08	1.45e+08	5.54e+08	3.50e+08	7.49e+08	3.50e+08	3.91e+08	4.66e+08	5.64e+08
Te125m	1.57e+13	1.88e+13	1.57e+13	1.88e+13	2.14e+13	2.10e+13	2.14e+13	1.65e+13	1.81e+13	1.88e+13
Te127	6.46e+12	3.73e+12	6.46e+12	3.73e+12	7.05e+12	3.74e+12	7.05e+12	3.71e+12	3.97e+12	3.68e+12
Te127m	6.59e+12	3.81e+12	6.59e+12	3.81e+12	7.19e+12	3.82e+12	7.19e+12	3.79e+12	4.05e+12	3.75e+12
Te129	1.66e+10	1.56e+10	1.66e+10	1.56e+10	1.70e+10	1.56e+10	1.70e+10	1.54e+10	1.53e+10	1.55e+10
Te129m	2.56e+10	2.39e+10	2.56e+10	2.39e+10	2.61e+10	2.40e+10	2.61e+10	2.36e+10	2.35e+10	2.39e+10
Te131										
Te131m										
Te132										
U237	7.95e-08	6.30e-07	7.95e-08	6.30e-07	8.13e-08	6.39e-07	8.13e-08	6.46e-07	1.31e-06	6.43e-07
Xe129m	2.00e-08	1.03e-07	2.00e-08	1.03e-07	4.30e-08	1.36e-07	4.30e-08	7.56e-08	8.21e-08	1.06e-07
Xe131m	1.00e+02	9.85e+01	1.00e+02	9.85e+01	1.00e+02	9.87e+01	1.00e+02	9.85e+01	9.76e+01	9.86e+01
Xe133										
Xe133m										
Xe135										
Xe135m										
Y90	6.62e+14	1.48e+15	6.62e+14	1.48e+15	6.92e+14	1.49e+15	6.92e+14	1.45e+15	1.55e+15	1.48e+15
Y91	2.10e+13	3.12e+13	2.10e+13	3.12e+13	2.27e+13	3.11e+13	2.27e+13	3.10e+13	3.25e+13	3.10e+13
Y91m										
Y92										
Y93										
Zn72										
Zr95	7.39e+13	8.32e+13	7.39e+13	8.32e+13	7.50e+13	8.30e+13	7.50e+13	8.33e+13	8.48e+13	8.31e+13
Zr97										
<b>Totaal</b>	<b>3.34e+16</b>	<b>2.74e+16</b>	<b>3.34e+16</b>	<b>2.74e+16</b>	<b>3.52e+16</b>	<b>2.81e+16</b>	<b>3.52e+16</b>	<b>2.67e+16</b>	<b>2.80e+16</b>	<b>2.74e+16</b>



## **Colofon**

Teksten en productie NRG / EPZ Projectgroep Brandstofdiversificatie

Fotografie Ruden Riemens, Middelburg / Archief EPZ

Vormgeving & digitaal drukwerk Chris Cras Reclame, Lekkerkerk



Zeedijk 32, 4454 PM Borssele  
Postbus 130, 4380 AC Vlissingen  
Telefoon 0113 - 356 000  
E-mail: [info@epz.nl](mailto:info@epz.nl)  
Website: [www.mengoxide.nl](http://www.mengoxide.nl) / [www.epz.nl](http://www.epz.nl)