



Aanvraag tot wijziging van de kernenergiewetvergunning **Brandstofdiversificatie**

Juli 2010

Aanvraag tot wijziging van de kernenergiewetvergunning **Brandstof**diversificatie



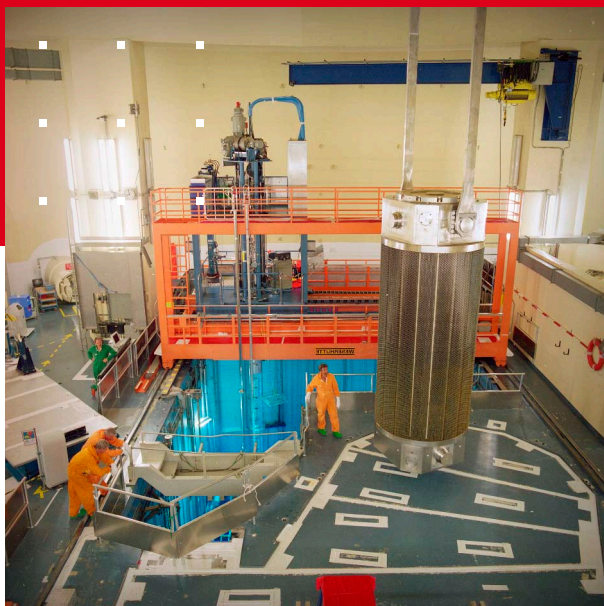
Juli 2010

Inhoudsopgave

1	Verklarende woordenlijst	4
2	Inleiding	9
2.1	Huidige samenstelling van de reactorkern	10
2.2	Mogelijkheden om in de splijtstofcyclus kosten te besparen	10
2.2.1	Back-end kosten	11
2.2.2	Kosten radioactief afval	11
2.2.3	Front-end kosten	12
2.3	Hergebruik van splijtstoffen	12
2.4	Vergelijking kostenopbouw van de alternatieve splijtstoffen	14
3	Huidige vergunningssituatie	16
4	Wijziging van de inrichting	17
5	Beschrijving van de wijziging	18
5.1	MOX-splijtstofelementen	18
5.1.1	Algemeen	18
5.1.2	Ontwerp van het MOX-splijtstofelement	20
5.1.3	Haalbaarheidsstudie	22
5.2	c-ERU-splijtstofelementen	24
5.2.1	Algemeen	24
5.2.2	Ontwerp van het c-ERU-splijtstofelement	25
5.2.3	Haalbaarheidsstudie	25
5.2.4	Gedrag onder ongevalscondities	25
5.2.5	Conclusies	26
5.3	Overgangssituaties en mengkernen	26
5.4	Gevolgen voor de bedrijfsvoering	26
6	Veiligheid	29
6.1	Veiligheid bij de inzet van MOX-splijtstofelementen	29
6.1.1	Neutronenfysisch en thermohydraulisch ontwerp van de reactorkern	29
6.1.2	Veiligheidsbeschouwing	29
6.1.2.1	Algemeen	29
6.1.2.2	Reactorkern; normaal bedrijf en storingen	30
6.1.2.2.1	Thermohydraulisch	30
6.1.2.2.2	Radiologisch	30
6.1.2.3	Reactorkern; ongevallen	30
6.1.2.3.1	LOCA	31
6.1.2.3.2	RIA	31
6.1.2.3.3	Conclusies	32
6.1.2.4	Thermohydraulische analyses	32
6.1.2.4.1	Radiologische analyses	37
6.1.2.4.2	Conclusie	37
6.1.2.5	Reactorkern; onderkriticaliteit	38
6.1.2.6	Reactorkern; nakoelen	38
6.1.2.7	SOB; onderkriticaliteit	38
6.1.2.8	SOB; koeling	38
6.1.2.9	SOB; afscherming	38

6.2	Veiligheid bij de inzet van c-ERU-elementen	39
6.2.1	Veiligheidsbeschouwing	40
6.2.1.1	Reactorkern; normaal bedrijf en storingen	40
6.2.1.1.1	Radiologisch	40
6.2.1.2	Reactorkern; ongevallen	40
6.2.1.2.1	Thermohydraulische analyses	40
6.2.1.2.2	Radiologische analyses	40
6.2.1.2.3	Conclusie	40
6.2.1.3	Reactorkern; onderkriticaliteit	40
6.2.1.4	Reactorkern; nakoelen	41
6.2.1.5	SOB; onderkriticaliteit	41
6.2.1.6	SOB; koeling	41
6.2.1.7	SOB; afscherming	41
7	Gevolgen van ongevalsemissies	42
7.1	Inleiding	42
7.2	Ontwerpongevallen	42
7.2.1	Wettelijke dosislimieten	42
7.2.2	Uitgangspunten en gebruikte gegevens	43
7.2.3	Resultaten radiologische analyses	43
7.2.4	Conclusie	43
8	Milieugevolgen van de voorgenomen wijziging	44
8.1	Inleiding	44
8.2	Lozingen bij normaal bedrijf	44
8.2.1	MOX	44
8.2.1.1	Lozingen naar lucht	44
8.2.1.2	Lozingen naar water	44
8.2.2	c-ERU	45
8.2.2.1	Lozingen naar lucht	45
8.2.2.2	Lozingen naar water	45
8.3	Radioactief afval en gebruikte splijtstofelementen	45
8.4	Aanvoer van verse splijtstofelementen	45
8.5	Afvoer van gebruikte splijtstofelementen	46
8.6	Proliferatie	46
9	Lijst van tabellen en figuren	47
10	Referenties	48
Bijlage a	Vergunningsaanvragen ingevolge Bkse	50
Bijlage b	Opgave van de verleende vergunningen	52

1 Verklarende woordenlijst



Hijsen van container voor afvoeren van gebruikte splijtstof-elementen

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).

Begingeburtenis

(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 kern-splijtingsproces 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 veiligheids-technisch oogpunt niet zonder meer voortgezet kan worden.

Ongevalsanalyse

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

Ontwerpcodes(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 ontwerpgeval. 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.

1

Afkortingen

Bkse Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen

c-ERU *Compensated Enriched Recycled Uranium*

DNB *Departure from Nucleate Boiling*

ENU *Enriched Natural Uranium*

EPZ N.V. Elektriciteits-Productie-maatschappij Zuid-Nederland

ERU *Enriched Recycled Uranium*

HTP Merknaam voor modern type splijtstofelement ontwerp

KCB Kernenergiecentrale Borssele

KEW Kernenergiewet

KFD Kernfysische Dienst

LOCA *Loss of Coolant Accident*

MER Milieu-effectrapport

MW Megawatt

MOX Mengoxide (*Mixed Oxide*) van plutonium en uranium

M5 Merknaam van een gangbaar type zircaloy

NRG *Nuclear Research & consultancy Group*

N.V. EPZ N.V. Elektriciteits-Productie-maatschappij Zuid-Nederland EPZ

PIE *Postulated Initiating Event; begingeburtenis*

RePu *Reprocessed Uranium*

RESA Reactorsnelafschakeling

RIA *Reactivity Initiated Accident*

SOB Splijtstofopslagbassin

TUSA Turbine Snel Afschakeling

VR Veiligheidsrapport

VROM Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

VLD Vollastdagen

ZM Zwaar metaal

Symbolen, eenheden

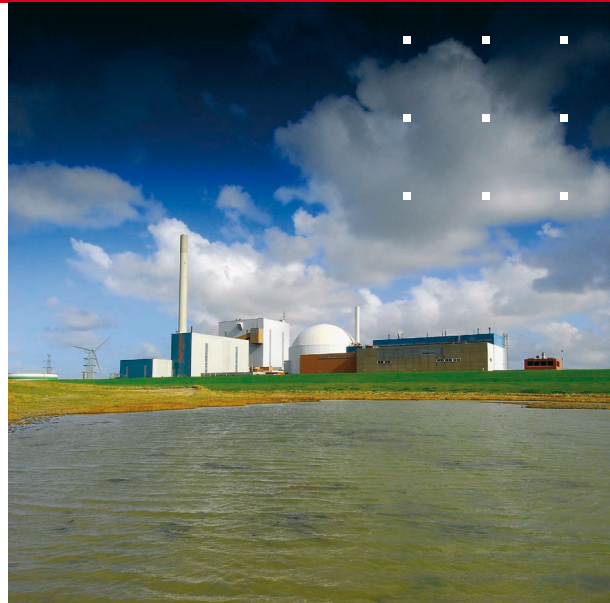
°C	Graad Celcius	N	Newton; de kracht die een massa van 1 kg een versnelling van 1 m/s ² geeft
F	Frequentie	pcm	per cent mille (10 ⁻⁵)
E	Effectieve dosis	ppm	parts per million (10 ⁻⁶)
Gew %	percentage in massa uitgedrukt, in splijtstof betrekking hebbend op de zware metalen	Sv	Sievert; eenheid van dosis-equivalent uitgedrukt in energie per massa-eenheid
h	(hour) uur	%	percentage, in splijtstof-samenstelling toegepast als percentage in massa uitgedrukt
H _{th}	schildklierdosis	w/o	percentage in massa uitgedrukt
K	graad Kelvin	μ	mikro
k _{eff}	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

2 Inleiding

N.V. Elektriciteits-produktiemaatschappij Zuid-Nederland EPZ is een joint venture van DELTA Energy N.V. (DELTA) en Energy Resources Holding B.V. (ERH). De uiteindelijke aandeelhouders van beide genoemde vennootschappen zijn provincies en gemeenten in Nederland. EPZ beschikt over twee productie-eenheden, een kolencentrale van 406 MW en een kerncentrale van 512 MW. Daarnaast exploiteert EPZ een windmolenpark van 12 MW. EPZ is gevestigd te Borssele, waar zich ook de productie-eenheden bevinden.



2

De reactor van de KCB is een zogenaamde drukwaterreactor. Dit is het 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 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



Uranium mijn 'Rabbit Lake' in Canada

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, is een grondstof waarvan de belangrijkste ertsproducerende landen Australië, Canada en Kazachstan zijn. Natuurlijk uranium 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 +/- 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.

2.1 Huidige samenstelling van de reactorkern

De brandstof voor de reactor bestaat uit verrijkt uranium in de vorm van tabletten uraniumoxide (UO_2). Deze tabletten worden opgesloten in gasdichte buizen, splijtstofstaven genoemd. Een pakket van 205 splijtstofstaven is een splijtstofelement dat dienst doet als bouwelement van de kernreactor. De reactor van KCB bestaat uit 121 splijtstofelementen die elk vier tot vijf jaar in de reactor energie blijven produceren. Jaarlijks worden circa 28 splijtstofelementen van de reactor uitgewisseld voor nieuwe. 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 stuks, als zuilen op elkaar gestapeld en geplaatst in dichtgelaste metalen hulzen om zo de splijtstofstaven te vormen. Voor de fabricage van 28 splijtstofelementen heeft EPZ jaarlijks circa 90 ton natuurlijk uranium nodig. Uranium is een grondstof waarvan de belangrijkste ertsproducerende landen zijn: Australië, Canada, en Kazakstan.

Het proces voor het vervaardigen van de huidige splijtstofelementen van de kerncentrale Borssele omvat globaal de volgende stappen:

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)

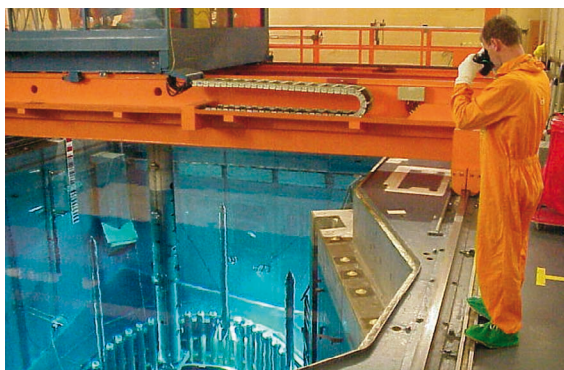
4,4 +/- 0,05 gew %. Bij dit proces komt ook een nevenstroom verarmd uranium vrij waarvan het gehalte aan splijtbaar uranium-235 is afgenomen tot bijvoorbeeld 0,25 gew %;

4. omzetten van het verrijkte uraniumhexafluoride in uraniumoxide (UO_2) dat tot tabletten wordt verwerkt;
5. verwerken van de uraniumoxide tabletten in splijtstofelementen en transport naar de kerncentrale Borssele.

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.

2.2 Mogelijkheden om in de splijtstofcyclus kosten te besparen

In 2006 hebben EPZ en haar aandeelhouders met de Staat een overeenkomst gesloten (het Borssele Convenant) waarin 31 december 2033 als sluitingsdatum voor KCB is overeengekomen. Als gevolg van de verlenging van de levensduur van 40 naar 60 jaar zal EPZ, na afloop van eerder gesloten brandstofcontracten, nog voor de rest van de levensduur kernbrandstof moeten inkopen. Er is momenteel een sterke ontwikkeling gaande op het gebied van de brandstoffen en daarmee de *front-end* kosten. Een ontwikkeling die wordt gedomineerd door sterk fluctuerende prijzen van de grondstof 'yellowcake'. Dat leidt voor kerncentrales tot meer kostenonzekerheid met betrekking tot de splijtstofkosten. Ter illustratie dient het volgende voorbeeld. De prijs van natuurlijk uranium is aan sterke fluctuaties onderhevig geweest: tussen € 20,- per kilo in 2001 en € 250,- per kilo



Geopende reactor tijdens de jaarlijkse splijtstofwisseling



Aandeelhouders en de Staat ondertekenen het 'Borssele Convenant'

in 2007, met momenteel een dagprijs van circa € 90,- per kilo. Deze fluctuaties zijn onder meer veroorzaakt door de sterk toegenomen vraag naar nieuw kernenergievermogen in de wereld. Het is moeilijk te voorspellen hoe deze ontwikkeling zich in komende jaren zal voortzetten.

EPZ voorziet in de levering van elektriciteit aan haar klanten. De wijze waarop EPZ dat doet is vastgelegd in de visie¹:

EPZ is een producent van electriciteit 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 watergemodeerde 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.

In het licht van deze missie heeft EPZ de mogelijkheden onderzocht om haar langere termijn brandstofcontracten zo efficiënt mogelijk in te vullen binnen genoemde randvoorwaarde.

Om duidelijk te maken waarom EPZ juist nu focust op optimalisatie van de brandstofcontracten volgt eerst een toelichting op de gehele splijfstofcyclus waar de brandstofcontracten onderdeel van vormen.

De splijfstofkosten bestaan uit drie componenten:

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

2.2.1 *Back-end* kosten

In voorgaande jaren heeft EPZ zich geconcentreerd op de verlaging van de *back-end* kosten. De kostprijs van het afvoeren van splijstof, 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 splijstfoelementen zo klein mogelijk te houden. De methode daarvoor is splijstfoelementen langer in de reactor te laten staan en zo de 'opbrand' te verhogen. Dat kan alleen maar door aan de nieuw in te zetten splijstof meer splijtbaar uranium-235 toe te voegen, dat wil zeggen de verrijkingsgraad te verhogen.

In dat kader werd de oorspronkelijke vergunde verrijking van 3,3 gew % in 1999 verhoogd naar 4,0 gew % en in 2005 naar 4,4 +/- 0,05 gew % uranium-235. Splijstfoelementen 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.

Een hogere verrijkingsgraad 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 splijstof 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 verrijkingsgraad is economisch ongunstig, omdat dan de *back-end* kosten zullen stijgen. EPZ beschouwt daarom de huidige verrijkingsgraad van 4,4 +/- 0,05 gew % voor ENU als de optimale keus.

2.2.2 Kosten radioactief afval

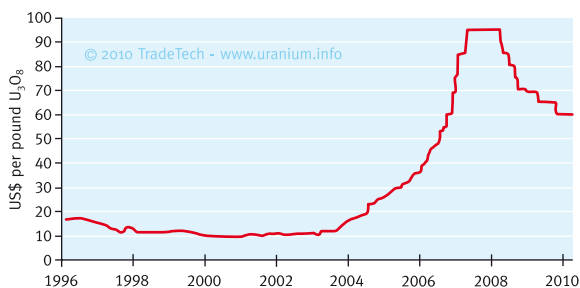
Aan de kant van het radioactief afval zijn er niet zo veel mogelijkheden om kosten te reduceren. Deze kosten bestaan voornamelijk uit de investering die EPZ gedaan heeft om bij COVRA het opslaggebouw HABOG te realiseren en om een financiële voorziening voor de eindberging te realiseren. Toekomstige hoeveelheden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

¹ Bron: Bedrijfsplan EPZ, 2010-2012

2.2.3 Front-end kosten

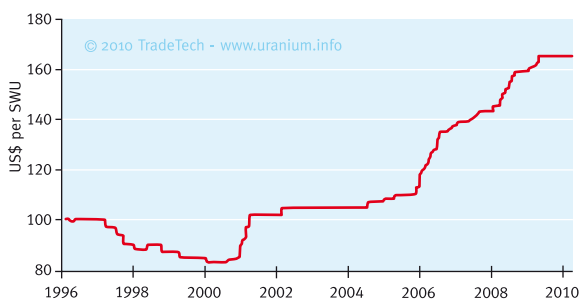
Van de drie kostensoorten blijven alleen de *front-end* kosten over om verder te kunnen beïnvloeden. Een belangrijke factor is de markt voor uranium, die in de afgelopen jaren aanzienlijke ontwikkelingen heeft doorgemaakt na een lange periode van lage en stabiele prijzen. Figuur 2.5.1 illustreert die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

Figuur 2.5.1 Historische termijn contractprijzen natuurlijk uranium. Bron: www.uranium.info



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.

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



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

- lange termijn uranium contracten sluiten met vaste prijzen
- alternatieven vinden voor natuurlijk uranium.

Beide mogelijkheden zijn intensief onderzocht. Het sluiten van lange termijn contracten met vaste prijzen biedt geen daadwerkelijk alternatief 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 als brandstof wordt gevormd door gerecyclede splijtstoffen, namelijk opgewerkt uranium (bekend als RepU) en plutonium. Deze alternatieve splijtstoffen zijn teruggewonnen uit gebruikte kernbrandstoffen. Door het breder samenstellen van de brandstofmix ontstaat de mogelijkheid om tot bedrijfseconomische optimalisatie te komen.

2.3 Hergebruik van splijtstoffen

Als gezegd zijn alternatieve splijtstoffen voor natuurlijk uranium stoffen afkomstig van opwerking die geschikt zijn voor hergebruik en die tevens kunnen worden toegepast in de KCB. Het betreft in casu:

- plutonium in de vorm van mengoxide (MOX)
- (gecompenseerd) verrijkt opgewerkt uranium ((c)-ERU, (*compensated*) *Enriched Reprocessed Uranium*).

MOX

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

In de opwerkingsfabriek in La Hague (Frankrijk) 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 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 kerncentrale Borssele 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 vrij-



De opwerkingsfabriek van AREVA in La Hague, Frankrijk

gemaakte 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. Door de inzet van MOX neemt EPZ zelf de verantwoordelijkheid voor het hergebruik van haar plutonium, zoals gedaan wordt door een meerderheid van de bedrijven die plutonium bezitten.

EPZ heeft de hoogte van en de variatie in de kosten van MOX-inzet afgewogen tegen die voor uraniumerts, verrijkingsarbeid en verwerkingskosten. De uitkomst van deze afweging heeft tot de conclusie geleid dat het voor EPZ aantrekkelijk is om MOX-splijtstof te kunnen inzetten. De ervaring van andere commerciële kerncentrales laat zien dat MOX zonder problemen kan worden gebruikt als gedeeltelijke vervanging van verrijkt uranium.

ERU en gecompenseerd ERU (c-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.

De uitgewerkte splijtstof die van de kerncentrale Borssele 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 (RepU) 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.

Voor 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 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. Hoewel de extra benodigde verrijkingsarbeid kostenverhogend is, weegt dit op tegen de besparing aan het gebruik van natuurlijk uraniumerts. Immers, uit de oorspronkelijke hoeveelheid natuurlijk uranium wordt door hergebruik meerdere keren energie gewonnen.

In de huidige situatie gebruikt EPZ al gerecycled uranium, maar de vigerende 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 omdat voor dezelfde energieproductie meer ERU-elementen dan c-ERU-elementen nodig zijn.

2.4 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 door EPZ van

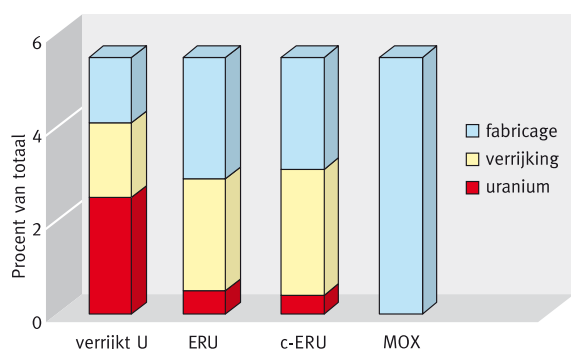
alternatieve brandstoffen, c-ERU of mengoxide MOX, heeft voor de processen en hoeveelheden in de *back-end*, noch voor de daarmee gepaard gaande kosten gevolgen. EPZ is van plan om, na gebruik, de c-ERU-elementen en de MOX elementen te laten opwerken net zoals nu gebeurt voor elementen van verrijkt uranium 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 model² (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).
- **Verrijkt uranium**, 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**, dat nu ook al ingezet wordt, zijn de verwervingskosten van het RepU veel 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 wegens de extra verrijking 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.

² Aan de absolute waardes 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.

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



Op basis van bovenstaande concludeert EPZ dat:

Hergebruik van *reprocessed uranium* en plutonium de volgende voordelen heeft:

- het maakt EPZ minder afhankelijk van de prijsontwikkeling van natuurlijk uranium;
- door hergebruik wordt meer energie gewonnen uit dezelfde hoeveelheid natuurlijk uranium;
- door het gebruik van MOX in de KCB hoeft EPZ haar plutonium niet meer over te dragen aan derden.

EPZ heeft al ruime ervaring met het gebruik van RepU uranium uit opwerking van haar eigen splijtstof. Op basis van de vigerende vergunning SAS/2005212596 d.d. 13 december 2005 is het EPZ vergund om uranium met een verrijkingsgraad van 4,4 +/- 0,05 gew % te gebruiken in de KCB.

Verder kan van plutonium splijtstof gemaakt worden voor kernreactoren die oorspronkelijk alleen voor uraniumsplijtstof waren ontworpen, zoals de KCB. In de reactor is het gebruik van MOX-elementen niet anders dan van uranium-elementen. Het plutonium uit ongeveer acht opgewerkte splijtstofelementen levert één nieuw MOX-element op. Tot op heden wordt van EPZ's plutonium MOX gefabriceerd voor andere (Europese) kerncentrales.

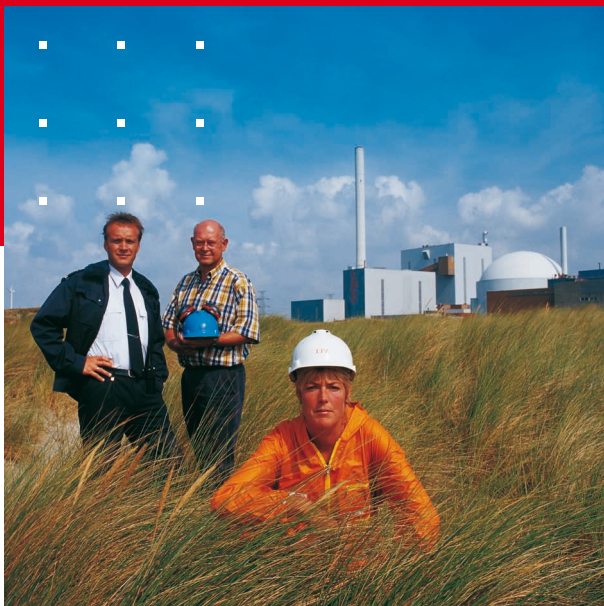
Verder heeft EPZ veiligheidsstudies laten uitvoeren naar de gevolgen van de inzet van C-ERU en MOX in de KCB. Het blijkt dat als gevolg van MOX er sprake is van een verminderde werkzaamheid van de chemische stof boor (boor-10) dat, opgelost in de vorm van boorzuur in het reactorkoelwater, het kernsplijtingsproces

regelt en beheerst. Dit nadeel kan door een aangepaste samenstelling van het boorzuur gecompenseerd worden. Natuurlijk Boor bevat circa 20% van het werkzame boor-10; verrijking tot 32% boor-10 zorgt ervoor dat alle regel- en veiligheidsfuncties gewaarborgd blijven. Dit is de enige wezenlijke aanpassing van de reactorbedrijfsvoering die voor gebruik van MOX in de KCB vereist blijkt te zijn.

Als gezegd dient de bredere samenstelling van de brandstofmix te passen binnen de randvoorwaarde van maximale veiligheid voor mens en milieu, waarbij de voorwaarde uit het Borssele Convenant om te blijven behoren tot de 25% veiligste watergekoelde centrales van West Europa, de VS en Canada, onverkort in acht wordt genomen. In hoofdstuk 6 Veiligheidsaspecten, hoofdstuk 7 Ongevalsemissies en hoofdstuk 8 Milieuaspecten wordt nader toegelicht dat de aanvraag past binnen deze randvoorwaarde.

3 Huidige vergunningssituatie

3



De vigerende kernenergiewetvergunning voor de KCB is voor het eerst afgegeven op 18 juni 1973 en laatstelijk gewijzigd op 13 december 2005 bij beschikking SAS/2005212596.

Vergunningshouder is N.V. Elektriciteitsproduktiemaatschappij Zuid- Nederland EPZ (verder te noemen EPZ).

Een overzicht van alle aan te leveren informatie voor het aanvragen van een wijzigingsvergunning ingevolge het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse) is opgenomen in bijlage A.

Een overzicht van alle tussenliggende wijzigingen is als bijlage B gevoegd bij deze aanvraag.

Het bevoegd gezag voor de laatste wijziging werd gevormd door de Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, mede namens de Minister van Economische zaken en de Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid.

De wijzigingsvergunning is verleend op 13 december 2005. De wijziging zag op de aanpassingen die uitgevoerd dienden te worden aan de centrale naar aanleiding van de tienjaarlijkse evaluatie welke had plaatsgevonden in 2003 en de wijziging van vergunningsvoorschrift II. Ba.2 met betrekking tot de opslag van radioactieve bronnen.

4 Wijziging van de inrichting

EPZ vraagt met inachtneming van het bepaalde in artikel 15 sub b van de Kernenergiewet verruiming van de toegestane soorten splijtstof voor de kerncentrale Borssele, door toelating van MOX (mengoxide) splijtstof-elementen met per element $\leq$ gemiddeld 5,41 gew % splijtbaar plutonium en elementen van c-ERU (gecompenseerd gerecycled uranium) met een verrijking $\leq 4,6 \pm 0,05$ gew % uranium-235.



4

Beide typen elementen zijn qua energie-potentieel equivalent aan ENU (verrijkt natuurlijk uranium) splijtstofelementen met $4,4 \pm 0,05$ gew. % uranium-235, om minder afhankelijk te worden van prijsfluctuaties op de markt van natuurlijk uranium en daarmee de splijtstofkosten beter te kunnen beheersen. In samenhang daarmee vraagt EPZ de navolgende wijzigingen in de vergunningsvoorschriften te verlenen.

1. **voorschrift II A.2** ter zake het toelaten van MOX als splijtstof bevattend per splijtstof-element $\leq$ gemiddeld 5,41 gew % $Pu_{\text{splijtbaar}}$ en ten hoogste 0,25 gew % uranium-235; in ieder element zal het percentage $Pu_{\text{splijtbaar}}$ in de afzonderlijke splijtstofstaven als volgt zijn: $\leq 2,6$ gew % in 12 staven, $\leq 3,6$ gew % in 56 staven en $\leq 6,4$ gew % in 137 staven.
2. **voorschrift II A** het maximale aantal MOX splijtstofelementen in de reactor bedraagt hoogste 48.
3. **voorschrift II A. 2** in die zin dat de maximalisatie van de verrijkingsgraad tot $4,4 \pm 0,05$ gew % alleen van toepassing is voor ENU.
4. **voorschrift II A. 2** ter zake het toelaten van c-ERU als splijtstof (equivalent aan $4,4 \pm 0,05$ gew % uranium-235 voor onbestraalde ENU-splijtstof) met een verrijkingsgraad van ten hoogste $4,6 \pm 0,05$ gew % opgewerkt uranium-235.

5 Beschrijving van de wijziging

5



In dit hoofdstuk wordt de technische onderbouwing gegeven voor de diversificatie van de splijtstof. Naast de nu vergunde splijtstoffen op basis van natuurlijk uranium (ENU: Enriched Natural Uranium) en gerecycled uranium (ERU: Enriched Reprocessed Uranium) vraagt EPZ vergunning aan voor de inzet van mengoxide-elementen (MOX) tot maximaal 40% van het totale aantal elementen in een kern en toepassing van compensated (gecompenseerd) Enriched Reprocessed Uranium (c-ERU).

De specificaties van ENU, ERU, c-ERU en MOX zijn samengevat:

Type splijtstof	Splijtstofsamenstelling
ENU en/of ERU (momenteel vergund)	$4,4 \pm 0,05$ gew % ^{235}U
c-ERU	$\leq 4,6 \pm 0,05$ gew % ^{235}U (equivalent aan $4,4 \pm 0,05$ % ^{235}U qua reactiviteit voor onbestraalde splijtstof) ¹⁾
MOX	$\leq$ gemiddeld 5,41 gew % splijtbaar plutonium ($\text{Pu}_{\text{splijtbaar}}$) ^{2, 3)}

- 1) De compensatie voor de aanwezigheid van ^{236}U zal maximaal 0,20 gew % ^{235}U bedragen.
- 2) De aanduiding van de splijtbare plutonium isotopen $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$.
- 3) In ieder element zal het percentage $\text{Pu}_{\text{splijtbaar}}$ in de afzonderlijke splijtstofstaven als volgt zijn: $\leq 2,6$ gew % in 12 staven, $\leq 3,6$ gew % in 56 staven en $\leq 6,4$ gew % in 137 staven.

De in bovengenoemde samenvatting opgesomde splijtstoffen kunnen, na verkrijging van de vergunning, in alle mogelijke mengverhoudingen worden ingezet waarbij de MOX-inzet de 40% niet mag overschrijden.

5.1 MOX-splijtstofelementen

5.1.1 Algemeen

Mengoxide (MOX) is een product dat is ontwikkeld om plutonium te kunnen gebruiken als brandstof in bestaande kerncentrales, die oorspronkelijk waren ontworpen voor het gebruik van verrijkt uranium. MOX is een mengsel van verarmd uraniumoxide met plutoniumoxide. Het splijtbaar plutonium in MOX-splijtstofelementen heeft dezelfde functie als het uranium-235 in ENU- en ERU-splijtstofelementen, namelijk energieproductie.

Bij de toepassing van MOX-splijtstofelementen wordt door EPZ gebruik gemaakt van de ervaring die hier internationaal mee is opgedaan. Om een beeld te geven van deze ervaring zijn in tabel 5.1-1 voor verschillende Europese drukwaterreactoren het gerealiseerde en vergunde aandeel MOX-splijtstof als percentage van het

totaal aantal splijstofelementen in de reactor-kern weergegeven. Het jaartal geeft aan wanneer voor het eerste MOX is ingezet.

In het buitenland, onder meer in België, Frankrijk, Duitsland en Zwitserland (zie tabel 5.1-1), heeft men ervaring met het gebruik van MOX-splijstofelementen. Het ontwerp van deze elementen, zoals het 'MOX parité' splijstof-element met gemiddeld 5,36 gew % $P_{\text{Usplijtbaar}}$ dat sinds 2007 in Franse 900 MW centrales wordt gebruikt, is vergelijkbaar met het ontwerp van de MOX-elementen die EPZ wil inzetten. De in bovengenoemde landen opgedane ervaringen met de inzet van MOX, zowel met het percentage $P_{\text{Usplijtbaar}}$ in de splijststof als met het percentage MOX-elementen in de kern, zijn verwerkt in de ontwerpcodes zoals die gebruikt zijn voor de haalbaarheidsstudie voor de MOX-inzet bij de KCB. De buitenlandse ervaringen hebben aangetoond dat de invoering van MOX-elementen technisch goed uitvoerbaar is. Het is altijd mogelijk gebleken om binnen de veiligheidsgrenswaarden een kern met MOX-elementen samen te stellen. Tevens leren deze ervaringen dat MOX-elementen veilig gehanteerd kunnen worden [7]. 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 zekergestellt dat het kogelmeetsysteem voor

de bewaking van de reactorfysische parameters betrouwbare informatie levert voor het bewaken van het splijtingsproces. De inhoud van dit extra inspectieregime zal ter goedkeuring aan de Kernfysische Dienst van het Ministerie van VROM worden voorgelegd.

Ten aanzien van de inzet van MOX-splijststof 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% van het aantal splijstofelementen.
3. Percentages tussen 30% en 40% MOX worden in Europese drukwaterreactoren toegepast.
4. Percentages $P_{\text{Usplijtbaar}}$ tot 5,36 gew % worden toegepast in Europese drukwaterreactoren.

EPZ vraagt vergunning aan voor de inzet van 48 MOX-splijstofelementen in de reactorkern, het percentage MOX-splijstofelementen in de reactor bedraagt dan 40%. Zoals uit tabel 5.1-1 blijkt, valt dit percentage MOX-splijststof binnen het bereik van percentages die in Europese drukwaterreactoren vergund zijn.

In paragraaf 5.1.2 wordt het ontwerp van de MOX-splijstofelementen beschreven, de haalbaarheid van de inzet van MOX-splijstofelementen wordt in paragraaf 5.1.3 behandeld.

Tabel 5.1-1 Gerealiseerde en vergunde inzet van MOX-elementen in Europese drukwaterreactoren.

Centrale	Gereali-seerd percentage MOX (%)	Vergund percentage MOX (%)	Vergund P_{Ufiss} (gew %)	Centrale	Gereali-seerd percentage MOX (%)	Vergund percentage MOX (%)	Vergund P_{Ufiss} (gew %)
Duitsland				Zwitserland			
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		België			
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	Frankrijk			
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				

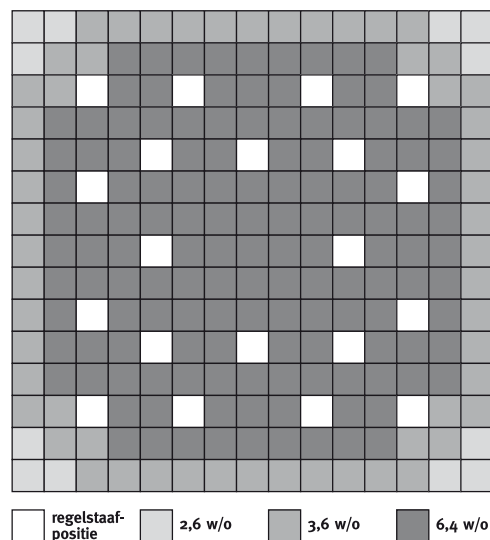
5.1.2 Ontwerp van het MOX-splijfstof-element

De MOX-splijststofelementen zijn, evenals de momenteel toegepast ENU- en ERU-splijststof-elementen, van het elementtype HTP-X5 van het bedrijf AREVA NP. Aan het ontwerp van het splijststofskelet en de splijststofomhulling wordt niets gewijzigd. Wat wijzigt, is de soort splijststof (MOX) in de splijststoftabletten.

Door AREVA NP is op basis van het equivalentie-principe³ het best mogelijke MOX-splijststof-element voor de kerncentrale Borssele ontworpen [1]. Uitgangspunt is dat in één kern zowel MOX- als uranium-elementen kunnen worden toegepast. Daarvoor is het noodzakelijk in een MOX-element splijststofstaven te gebruiken van drie verschillende $Pu_{\text{splijtbaar}}$ gehalten.

In dit element zijn de splijststofstaafjes met het kleinste gehalte 2,6 gew % $Pu_{\text{splijtbaar}}$ op de hoeken gelokaliseerd, de splijststofstaafjes met een 3,6 gew % $Pu_{\text{splijtbaar}}$ gehalte aan de randen en de splijststofstaafjes met het hoogste $Pu_{\text{splijtbaar}}$ gehalte (6,4 gew %) aan de binnenzijde van het splijststofelement (zie tabel 5.1-2 en figuur 5.1-1). Op deze wijze bedraagt het gemiddelde $Pu_{\text{splijtbaar}}$ gehalte in dit MOX-splijststofelement 5,41 gew %.

Figuur 5.1-1 Schema van de positie van verschillende MOX-splijststofstaven in een MOX-element.



De werkelijke samenstelling van het toe te passen plutonium kan afwijken van die in tabel 5.1-2, omdat de werkelijke samenstelling van MOX wordt bepaald door de samenstelling van het plutonium dat op een bepaald moment gebruikt gaat worden. Die samenstelling is niet op voorhand bekend omdat EPZ geen eigen voorraden (meer) heeft.

Tabel 5.1-2 Typische initiële nucliden samenstelling^{*)} van de zware metalen (ZM) in een MOX-element per type MOX-splijststofstaaf en de totale massa zware metalen per element.

	$Pu_{\text{splijtbaar}} = 2,6\%$	$Pu_{\text{splijtbaar}} = 3,6\%$	$Pu_{\text{splijtbaar}} = 6,4\%$	$Pu_{\text{splijtbaar}} = 5,41\%$
Aantal staven	12	56	137	205
Nuclide	Massa [kg]	Massa [kg]	Massa [kg]	Massa [kg]
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
Totaal	1,57	1,57	1,57	321

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

³ Met een gestandaardiseerd herladingsmodel is berekend dat de MOX-splijststofelementen dezelfde opbrand kunnen bereiken als ('equivalent zijn aan') de nu al vergunde splijststofelementen op basis van uranium dat tot $4,4 \pm 0,05$ gew % is verrijkt.

Het elementgemiddelde $Pu_{\text{splijtbaar}}$ gehalte zal maximaal 5,41 gew % bedragen, wat wordt verzekgesteld door strenge kwaliteitscontroles tijdens het productieproces. Bovendien zal in ieder element het percentage $Pu_{\text{splijtbaar}}$ in de afzonderlijke splijfstofstaven als volgt zijn:

- $\leq 2,6$ gew % in 12 staven,
- $\leq 3,6$ gew % in 56 staven en
- $\leq 6,4$ gew % in 137 staven.

Zoals gebruikelijk bij wijzigingen van de splijfstof is het gedrag van de nieuwe splijfstof geanalyseerd voor de bedrijfssituaties 'normaal bedrijf' en 'storingen en ongevallen' (zogenaamde ontwerpanalyses). Afhankelijk van de positie van de splijfstof in de reactorkern of in het splijfstof-opslagbassin is gekeken naar het neutronenfysisch en thermohydraulisch gedrag van de splijfstof en naar de stabiliteit van de splijfstofstaaf.

De splijfstofstaven moeten de mechanische en thermische belastingen gedurende bedrijfs- en ongevalsituaties kunnen weerstaan. Het gedrag van de nieuwe splijfstofstaven is daartoe getoetst aan het hierna volgende, in het veiligheidsrapport [2] (dat onderdeel uitmaakt van deze aanvraag) opgenomen, ontwerpcriteria:

- De temperatuur in het centrum van de splijfstof moet lager zijn dan de smelttemperatuur.

- De inwendige druk in de splijfstofstaaf mag er niet toe leiden dat de ruimte tussen de splijfstof en de huls groter wordt.
- De vervormingen op grond van de variabele wisselwerkingen mogen de voorgeschreven waarden niet overschrijden.
- Een ontoelaatbare corrosie dient te worden voorkomen.
- De opname van waterstof in de huls dient te worden beperkt.
- De spanningen in de huls dienen onder de ontwerp grenzen te blijven.
- Een te grote elastische respectievelijk plastische vervorming in de huls door uitwendige overdruk dient te worden voorkomen.
- De enthalpieverhoging gemiddeld over een splijstoftablet mag de voorgeschreven waarde niet overschrijden.
- De uniforme rek als gevolg van de wisselwerking tussen de splijstoftabletten en de huls moet onder de ontwerp grens blijven.

Door analyses is aangetoond dat het ontwerp van de gewijzigde splijfstofstaven (2,6 gew % $Pu_{\text{splijtbaar}}$, 3,6 gew % $Pu_{\text{splijtbaar}}$ en 6,4 gew % $Pu_{\text{splijtbaar}}$) aan de bovengenoemde ontwerpcriteria voldoet [3]. Hiermee is aangetoond dat de belastingen die kunnen optreden tijdens normaal bedrijf en storingsituaties acceptabel zijn. De resultaten van deze analyses zijn weergegeven in tabel 5.1-3.

Tabel 5.1-3 Resultaten van de analyse naar het mechanisch en thermisch gedrag van de MOX-splijfstofstaven.

Ontwerpcriterium	Ontwerpparameter	Ontwerpwaarde	Berekende waarde ³⁾
Splijstoftemperatuur	Smelttemperatuur – splijstoftemperatuur (K)	≥ 0	336
Inwendige druk	Max. druk in de huls ¹⁾ (bar)		173
	In het geval van interne overdruk:		
	Kruipsnelheid huls ($10^{-4}\%/h$)	$\leq 1,0$	0,08
	Integrale kruip rek huls (%)	$\leq 0,3$	0,01
	Tangentiele spanning huls N/mm^2	≤ 100	4
Vervormingen	Tangentiele rek (%)	$\leq 1,0$	0,75
	Plastische rek (%)	$\leq 3,5$	2,3
Corrosie & waterstofopname	Dikte oxidelaag (μm)	≤ 100	48
Spanningen	Veiligheidsfactor voor spanningen in huls en lasnaad	$\geq 1,0$	1,03
Vervorming door uitwendige overdruk	Veiligheidsfactor voor elastische knik	$\geq 1,0$	3,4
	Veiligheidsfactor voor plastische vervorming	$\geq 1,0$	1,07
Enthalpieverhoging	Enthalpieverhoging bij uitworp van een regelement	$< 60-170 \text{ cal/g}^2$	30
Rek door wisselwerking	Veiligheidsfactor wisselspanning door dynamische belasting	$\geq 1,0$	7,1

1) De berekende druk is groter dan de hoofdkoelmiddeldruk. Daarom zijn de spanning, kruip en rek van de splijstofhuls nader geanalyseerd.

2) De limietwaarde is afhankelijk van de opbrand.

3) De ontwerpwaarden zijn conservatief vastgesteld, dat wil zeggen dat er bij de ontwerpwaarde een ruime marge is tot het daadwerkelijk falen van de splijfstof.

5.1.3 Haalbaarheidsstudie

Door middel van een haalbaarheidsstudie [4] is onderzocht of een inzet van 40% MOX splijtstof met een gemiddeld gehalte $Pu_{\text{splijtbaar}}$ van 5,41 gew % realiseerbaar is binnen de aan de reactorkern te stellen veiligheidstechnische eisen. Daarvoor is een aantal fictieve beladingsplannen opgesteld die representatief zijn voor de beladingsplannen die nodig zijn voor de overgangssituatie van uitsluitend ENU- en ERU-elementen naar de inzet van 40% MOX-elementen. Van deze beladingsplannen zijn door AREVA met voor bovengenoemde MOX-inzet gevalideerde ontwerpcodes de neutronenfysische en thermohydraulische veiligheidsparameters geanalyseerd. Voor de gebruikte ontwerpcodes is bewezen (en wordt feitelijk continu bewezen) dat de met deze codes berekende veiligheidstechnische ontwerpparameters goed overeen komen met de achteraf c.q. continu gemeten praktijkwaarden. Het neutronenfysisch kernontwerp is gebaseerd op de berekening van diverse wisselwerkingsprocessen tussen de kernmaterialen en de neutronen. In het bijzonder zijn daarbij de kernsplijting en verstrooiingsprocessen van neutronen in materialen van belang.

Belangrijkste doelen van het neutronenfysisch ontwerp van de kern zijn:

- Het voorkomen van overschrijding van de voorgeschreven maximale waarden van de vermogensdichtheid.
- Het onderkritisch kunnen maken en langdurig houden van de reactorkern in elke situatie.
- Het inherent veilige karakter van de kern ten aanzien van de reactiviteit.

Het thermohydraulisch ontwerp heeft als doel te verzekeren dat het onder alle bedrijfsomstandigheden is uitgesloten dat er filmkoken ontstaat, omdat daardoor de warmteoverdracht naar het koelmiddel zodanig zou verslechteren dat er schade kan ontstaan aan de splijtstof.

De belangrijkste parameters die daarvoor van belang zijn, worden als volgt gegeven:

- maximale splijtstoftemperatuur;
- maximale splijtstofomhullingstemperatuur;
- kritieke warmteflux;
- DNB-verhouding;
- heetkanaalfactoren F_q en F_{dH} .

Binnen de voorgenomen bedrijfsgrenzen van de reactor, het beschikbare koelmiddeldebiet, de koelmiddeltemperatuur en de massastroomtransiënten wordt aangetoond dat er geen overschrijding van de limieten van bovenstaande parameters plaatsvindt.

Uit de haalbaarheidsstudie [4] is gebleken dat zonder grote aanpassingen van de centrale voor de evenwichtscyclus en alle overgangscycli aan alle in het veiligheidsrapport genoemde veiligheidscriteria ten aanzien van de neutronenfysische en thermohydraulische veiligheidscriteria kan worden voldaan. De enige uitzondering vormt het waarborgen van langdurige onderkriticaliteit. Om ten aanzien van langdurige onderkriticaliteit aan de criteria te voldoen, zal een wijziging worden doorgevoerd in de boreersystemen van de kerncentrale. Bij de inzet van MOX splijtstof zal het boorzuur worden verrijkt (boor-10 concentratie wordt verhoogd van 20% (natuurlijk boor) naar 32%) [5].

Tevens is in de haalbaarheidsstudie [4] aangetoond dat de reactor tijdens normaal en storingsbedrijf gedurende overgangscycli en de evenwichtscyclus veilig kan worden bedreven. Voor de evenwichtscyclus worden de belangrijkste resultaten van de haalbaarheidsstudie in tabel 5.1-4 weergegeven.

Voor iedere nieuwe cyclus wordt door middel van een analyse van het vooraf opgestelde beladingsplan vastgesteld dat aan de neutronenfysische en thermohydraulische ontwerpdoelen wordt voldaan. Randvoorwaarden die beperkend kunnen zijn voor een dergelijke analyse, worden opgelegd met betrekking tot:

- opbrand;
- vermogensdichtheid;
- maximale vermogenssprong;
- reactiviteitscoëfficiënten;
- afschakelreactiviteit;
- maximale gecontroleerde reactiviteitstoename;
- stabiliteit;
- opwarmmarge;
- bedrijfstransiënten, waarbij uitval van het regelelementensysteem wordt verondersteld.

Bovengenoemde randvoorwaarden zijn opgenomen in de ‘*Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen*’ [6], waarin alle geldende beperkingen voor de analyse van de kernbelading zijn vastgelegd. Veranderingen van deze beperkingen naar aanleiding van de voorgenomen inzet van MOX-splijtstof zijn in deze

‘*Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen*’ opgenomen. Voorafgaand aan de belading van de eerste MOX-elementen in de kern wordt een rapportage van de toetsing aan de dan geldende ‘*Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen*’ aan de Kernfysische Dienst ter beoordeling aangeboden.

Tabel 5.1-4 Weergave van de belangrijkste resultaten van de MOX haalbaarheidsstudie.

Ontwerpcriterium		Ontwerp- of vergunningswaarden	Berekende waarde
Cyclus:			
Natuurlijke duur	(vollastdagen)	--	324
Totale duur	(vollastdagen)	--	350
Opbrand	(MWd/kgZM)	--	12,3
Maximale heetkanaalfactoren:			
F_{xy}	(-)	--	1,68
F_q	(-)	$\leq 2,80$	2,51
F_H	(-)	$\leq 1,80$	1,69
F_z	(-)	$\leq 1,44$	1,28
$q'_{\max,xyz}$	(W/cm)	≤ 568	509
Maximale opbrand:			
ENU-Splijtstofelement gemiddeld A_{BE}	(MWd/kgZM)	-	58,7
MOX-Splijtstofelement gemiddeld A_{BE}	(MWd/kgZM)	1)	54,3
ENU-Splijtstofstaaf gemiddeld A_{xy}	(MWd/kgZM)	≤ 68	64,4
MOX-Splijtstofstaaf gemiddeld A_{xy}	(MWd/kgZM)	1)	63,3
Lokaal $A_{\max,xyz}$	(MWd/kgZM)		73,7
Werkzaamheid regelementen (nullast, 294 °C, 324 VLD, Xenonevenwicht)	(%)	≤ -5	-5,59
Afschakelreactiviteit (o VLD, nullast heat, Xenonvrij)		< 0	max. -20,8
Onderkritikaliteit k_{eff} :			
Bij splijtstofwisseling:	(-)	$\leq 0,95$	$< 0,95$
Bij ongevalssituaties	(-)	$\leq 0,99$	$< 0,99$
DNB-verhouding (324 VLD, breuk hoofdstoomleiding)	(-)	$\geq 1,45$	2,03
Maximale splijtstoftemperatuur na breuk stoomleiding	(°C)	≤ 2650	2340

1) Vergunningswaarde(n) voor de splijtstofelement gemiddelde opbrand en/of de splijtstofstaaf gemiddelde opbrand zijn voor MOX nog niet vastgesteld. EPZ is voornemens voor de MOX-elementen te blijven voldoen aan de huidige vergunningseis met betrekking tot de gemiddelde opbrand per splijtstofstaaf. Voor staafgemiddelde opbranden boven 60 MWd/kgU dient volgens de vigerende Kew-vergunning aanvullende kwalificatie te worden geleverd. Deze eis met betrekking tot het leveren van aanvullende kwalificatie boven 60 MWd/kgHM zal ook voor ERU-, c-ERU- en MOX-splijtstofelementen gelden.

5.2 c-ERU-splijstofelementen

5.2.1 Algemeen

Bij de toepassing van c-ERU-elementen wordt gebruik gemaakt van de ervaring⁴ die hier internationaal mee is opgedaan. Om een beeld te geven van deze ervaring zijn in tabel 5.1-5 voor verschillende Europese lichtwaterreactoren de gerealiseerde percentages uranium-235 in een c-ERU-element weergegeven. Tevens is de bijbehorende ENU-equivalentie aangegeven.

Ervaringen van andere exploitanten van kerncentrales tonen aan dat er geen significant verschil bestaat in de bedrijfsvoering van de reactor bij de inzet van gecompenseerd verrijkt gerecycled uranium (ERU) en verrijkt natuurlijk uranium (ENU) [7]. In de periode dat bij de kerncentrale Borssele ERU-elementen zijn ingezet zijn, bijvoorbeeld tijdens visuele inspecties van de splijstofelementen, eveneens geen operationele verschillen tussen ERU- en ENU-elementen geconstateerd. Splijstofelementen van c-ERU zijn en worden gebruikt in Frankrijk, Duitsland, Zwitserland en België (zie tabel 5.1-5).

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

1. Er is meer dan 15 jaar ervaring met inzet van c-ERU in Europese drukwaterreactoren.
2. Europese lichtwaterreactoren hebben c-ERU-elementen tot een percentage van 4,91 gew % ²³⁵U ingezet.
3. Compensatie tot 0,45 gew % ²³⁵U wordt in Europese drukwaterreactoren toegepast.

Splijstof op basis van ERU bevat, in tegenstelling tot ENU-splijstof, het isotoop uranium-236. Het isotoop uranium-236 heeft het nadeel dat het neutronen absorbeert zonder te splijten, waardoor het de 'reactiviteit' van de splijstof ongunstig beïnvloedt. Het gevolg is dat splijstofelementen die van gerecycled uranium zijn gemaakt, een lagere 'effectieve' verrijking hebben dan elementen van natuurlijk uranium, ook al is bij beide het gehalte aan uranium-235 gelijk. Daardoor bereiken ERU-elementen een lagere opbrand. In de praktijk wordt dit nadeel meestal gecompenseerd door de uranium-235 verrijking hoger te kiezen (c-ERU). 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 (compensatieprincipe).

EPZ vraagt nu vergunning aan voor de inzet van splijstofelementen met gecompenseerd uraniumoxide (c-ERU) op basis van gerecycled uranium. Deze c-ERU-elementen zijn qua reactiviteit equivalent aan de huidige natuurlijk uranium-elementen (ENU). De toe te passen compensatie is $\leq 0,20$ gew % uranium-235. Het toe te passen uranium-235 percentage is derhalve $4,4 \pm 0,05$ gew % $+ \leq 0,20$ gew % = $4,6 \pm 0,05$ gew % uranium-235. Het ontwerp van deze c-ERU-splijstofelementen wordt beschreven in paragraaf 5.2.2, de haalbaarheid van de inzet van c-ERU-splijstofelementen wordt in paragraaf 5.2.3 behandeld en in paragraaf 5.2.4 worden de buitenlandse bedrijfservaringen van c-ERU-splijstofelementen beschreven.

Tabel 5.1-5 Gerealiseerde inzet van c-ERU en bijbehorende ENU-equivalentie.

Reactor	c-ERU, percentage ²³⁵ U	Equivalent ENU	Bijzonderheden
Duitsland			
Neckarwestheim 2	4,6%	4,4%	
Zwitserland			
Goesgen	4,91%	4,8%	Sinds 2000, vergund is 5,0%
Belgie			
Doel-1	4,25%	3,8%	1994-2003, niet voortgezet wegens beëindigen opwerken
Frankrijk			
Cruas 3	4,1%	3,7%	Reactor met 100% c-ERU belading
Cruas 4	4,1%	3,7%	Reactor met 100% c-ERU belading

⁴ EPZ heeft reeds ervaring met de inzet van niet gecompenseerde ERU-elementen met een verrijkingspercentage van 4,4 w/o ²³⁵U. 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.

5.2.2 Ontwerp van het c-ERU-splijstf-element

Uitgangspunt bij het ontwerp van c-ERU-elementen is dat deze elementen qua reactiviteit equivalent zijn aan de huidige natuurlijk uraniumelementen (ENU). De initiële samenstelling van een typisch c-ERU-element met een verrijkingsgraad van 4,6 +/- 0,05 gew % uranium-235 is in tabel 5.1-6 weergegeven.

Tabel 5.1-6 Typische¹⁾ initiële isotopische samenstelling van het uranium in een c-ERU-element.

U-isotoop	Massa [kg]	Massa percentage [w/o]
U-232	0,0000048	0,0000015
U-234	0,64	0,2
U-235	14,8	4,6
U-236	1,93	0,6 ²⁾
U-238	304	94,6
Totaal Zware Metalen	321	100

- 1) De feitelijke isotopensamenstelling hangt af van de voorgeschiedenis van de opgewerkte splijststof en van de toegepaste verrijkmethode.
- 2) Is het percentage uranium-236 in het opgewerkte uranium dat toegepast wordt bij de fabricage van c-ERU lager dan 0,6 gew %, dan zal het percentage uranium-235, in overeenstemming met het compensatie principe, verlaagd worden. Afhankelijk van de uiteindelijke samenstelling, zal de compensatie (max. 0,2 gew %) zo gekozen worden dat de reactiviteit van het C-ERU niet groter wordt dan van natuurlijk uranium verrijkt tot 4,4 +/- 0,05 gew %.

De c-ERU-splijstf-elementen zijn evenals de momenteel toegepaste ENU- en ERU-splijstf-elementen van het elementtype HTP-X5 van het bedrijf AREVA NP. Aan het ontwerp van het splijstofskelet en de splijststofomhulling wordt niets gewijzigd. Wat wijzigt is het percentage

uranium-235 in de splijstoftabletten. Dit percentage wordt licht verhoogd ten opzichte van ERU om de neutronenabsorptie door het in het ERU aanwezige uranium-236 te compenseren.

5.2.3 Haalbaarheidsstudie

Door middel van een ERU haalbaarheidsstudie [9] is aangetoond dat de inzet van niet gecompenseerde ERU-elementen, verkregen door vermenging van gerecycled uranium met middel/hog verrijkt uranium, geen significante neutronenfysische verschillen vertoont ten opzichte van de inzet van ENU-elementen. De neutronenfysische eigenschappen van de ERU-splijststof verschillen nog minder van die ENU-splijststof wanneer de aanwezigheid van uranium-236 in verse ERU-splijststof wordt gecompenseerd door een verhoging van het uranium-235 gehalte, dus voor c-ERU splijststof [10]. Er kan daarom worden geconcludeerd dat de ENU en MOX analyses ook geldig zijn voor een gecompenseerde ERU-kern.

Naast bovengenoemde haalbaarheidsstudie zijn door NRG ondersteunende analyses uitgevoerd voor een 100% c-ERU kern [11]. De belangrijkste resultaten met betrekking tot het thermohydraulisch gedrag van de kern voor de evenwichtscyclus worden weergegeven in tabel 5.2-1.

5.2.4 Gedrag onder ongevalscondities

Het gedrag van c-ERU splijststof onder ongevalscondities verschilt niet significant van dat van de huidige ENU- en ERU-splijststoffen [10].

Tabel 5.2-1 Weergave van de belangrijkste resultaten van de ondersteunende c-ERU analyses.

Parameter		Ontwerpcriteria of vergunningswaarden	Berekende waarde
Cyclus:			
Natuurlijke duur	(vollastdagen)	--	354
Totale duur	(vollastdagen)	--	350
Opbrand	(MWd/kgZM)	--	12,3
Maximale heetkanaalfactoren:			
F_q	(-)	$\leq 2,80$	2,36
F_H	(-)	$\leq 1,80$	1,71
Maximale opbrand:			
c-ERU-Splijstf-element gemiddeld A_{BE}	(MWd/kgZM)	--	60,0
c-ERU-Splijststofstaaf gemiddeld A_{xy}	(MWd/kgZM)	≤ 68	64,7
Lokaal $A_{max,xyz}$	(MWd/kgZM)	--	72,2

5.2.5 Conclusies

Op grond van de uitgevoerde ERU haalbaarheidsstudie [9] en de tot op heden in het buitenland opgedane ervaringen met c-ERU-elementen kan worden geconcludeerd dat deze elementen inzetbaar zijn in de kerncentrale Borssele.

In hoofdstuk 6 wordt ingegaan op de veiligheidsaspecten van de c-ERU-elementen in de reactor en het splijtstofopslagbassin (SOB).

5.3 Overgangssituaties en mengkernen

De ontwerpanalyses zijn veelal voor één specifieke kernsamenstelling uitgevoerd, te weten de inzet van 40% MOX- en 60% ENU-elementen ofwel de inzet van 100% ENU-elementen. De MOX haalbaarheidsstudie [4] toont aan dat ook voor alle overgangscycli aan de in het veiligheidsrapport genoemde ontwerpcriteria ten aanzien van het mechanisch ontwerp en de neutronenfysische en thermohydraulische ontwerpcriteria kan worden voldaan. Indien de initiële reactiviteit van de c-ERU-elementen kleiner dan of gelijk is aan de initiële reactiviteit van de 4,4 +/- 0,05 gew % ENU-elementen, zijn de bestaande ontwerpanalyses uitgevoerd voor ENU-elementen geldig voor de c-ERU-elementen [10].

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

5.4 Gevolgen voor de bedrijfsvoering

Door het beperken van de inzet van MOX tot maximaal 40% van het aantal splijtstofelementen in de kern zijn de gevolgen voor de bedrijfsvoering met KCB ten gevolge van de inzet van MOX beperkt. In deze paragraaf worden de wijzigingen die optreden kort besproken. EPZ heeft het voornemen om, na verkrijging van de vergunning voor het toepassen van MOX, met de inzet van 8 MOX-elementen te starten. Gezien de beperkte bedrijfservaringen met MOX met een verrijkingsgraad van 5,41 gew % $Pu_{\text{splijtbaar}}$ 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 zekergesteld dat het kogelmeetsysteem voor de bewaking van de reactorfysische parameters betrouwbare informatie levert voor het bewaken van het splijttingsproces. 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 splijtstofwisselperioden, 12 MOX-elementen bijgeplaatst worden tot er in de kern een maximum van 48 stuks is bereikt. Dit maximum van 48 stuks blijft daarna gedurende een aantal jaar 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 uranumelementen moeten MOX-elementen met een vergelijkbare opbrand historie na definitieve ontlading uit de reactor in het algemeen één à twee jaar langer in het splijtstofopslagbassin afkoelen voordat ze kunnen worden afgetransporteerd. De inzet van MOX-elementen vindt op zodanige wijze plaats dan dit geen invloed heeft op de verplichting tot directe ontmanteling na einde 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. Na uitval van een hoofdkoelmiddelpomp worden in de huidige situatie afhankelijk van het aantal vollastdagen 4 of 6 regelstaafparen ingeworpen. Door inzet van MOX verandert de reactiviteit van de regelstaven en daardoor het aantal vollastdagen waarbij 6 regelstaafparen worden ingeworpen. De regeling voor staafinworp zal worden aangepast op het gebruik van MOX.

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 +/- 0,05 gew % uranium-235.

Bij de inzet van MOX-splijtstof in de kern kan de grootte van de snelle flux gradiënt toenemen. Hiermee neemt het risico op kromtrekken van splijtstofelementen ten gevolge van ongelijke lengtetoeename van de regelstaafgeleidebuizen toe. Hoewel er geen problemen zijn waargenomen bij korte splijtstofelementen zoals die van KCB en er geen verband is aangetoond tussen het type gebruikte brandstof (UO₂ of MOX) en de buiging van de splijtstof-elementen zal EPZ in overleg met de KFD een inspectieregime opstellen om eventuele buiging van elementen te bewaken.

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.

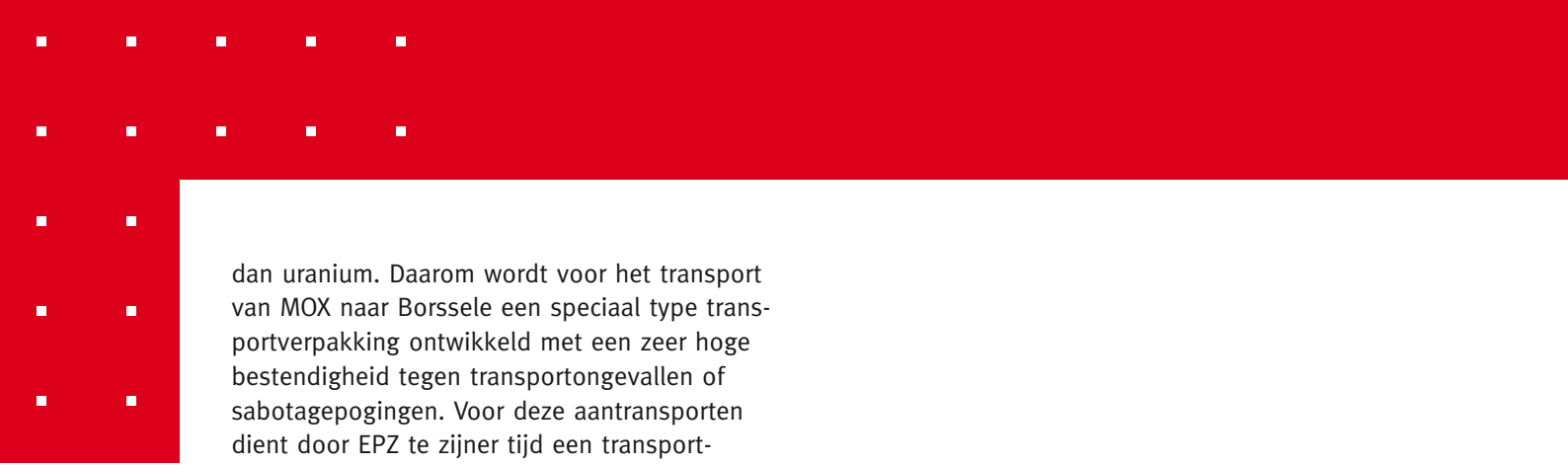
Door middel van een haalbaarheidsstudie [4] is onderzocht of bij een inzet van 40% MOX splijtstof met een gemiddeld gehalte Pu_{splijtbaar} van 5,41 gew % de huidige boreringsystemen aan de eisen voldoen en welke aanpassingen er

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% naar 32% volstaat.

Voordat het eerste MOX-element in het SOB zal worden geplaatst, zal in alle systemen de boor-10 verrijking worden verhoogd naar 32% door het toevoegen van de juiste hoeveelheid 99,9% boor-10. Het is daartoe van belang om het volume van ieder systeem nauwkeurig vast te stellen. Na deze overgang van natuurlijk boor naar 32% verrijkt boor zal KCB overgaan op het gebruik van 32% verrijkt boorzuur voor het aanmaken van nieuwe voorraden boorzurhoudend water. In de technische specificaties zal worden vastgelegd dat na de invoering van 32% verrijkt boor regelmatig de verrijkingsgraad van het boor in de boorhoudende systemen zal worden bepaald. Na invoering van het verrijkte boor zal de centrale verrijkt boor blijven toepassen, ook wanneer geen MOX meer zou worden ingezet. Dit heeft geen nadelige effecten. Behoudens bij de overgang van 20% op 32%, waarbij zeker gesteld moet worden dat er zich overal in de installatie waar dat nodig is 32% boor-10 bevindt, leidt deze aanpassing niet tot een verandering van de bedrijfsvoering.

MOX-elementen vereisen na bestraling een één à twee jaar langere afkoelperiode in het splijtstofopslagbassin alvorens deze kunnen worden afgevoerd. De opslagcapaciteit van het SOB is echter voldoende om het langere verblijf in het SOB te kunnen garanderen.

Een verandering als gevolg van de toepassing van MOX vindt plaats bij het logistieke proces van aanvoer van nieuwe splijtstofelementen. Omdat MOX plutonium bevat, zijn de nieuw gefabriceerde splijtstofelementen radioactiever dan nieuw gefabriceerde uraniumsplijtstofelementen. Daardoor zijn de nieuw gefabriceerde MOX-splijtstofelementen bij aankomst op de centrale ook warmer dan nieuw gefabriceerde uranumelementen. De hogere temperatuur en de grotere radioactiviteit maken dat verse MOX-elementen volgens speciale ontladingsprocedures vanuit de aantransportcontainer in het SOB moeten worden geplaatst. 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. Voor deze aantransporten dient door EPZ te zijner tijd een transportvergunning te worden aangevraagd. Er is geen reden om te veronderstellen dat deze transportvergunning niet verleend zou worden.

5

De wijzigingen met betrekking tot de introductie en het gebruik van boorzuur met een hoger boor-10 gehalte, het toepassen van een MOX aantransport en het aanpassen van het regelsysteem worden door middel van aparte wijzigingsplannen aan de Kernfysische Dienst van het Ministerie van VROM ter beoordeling voorgelegd.

In dit hoofdstuk wordt de invloed van de aangevraagde wijziging (inzet MOX- en c-ERU-elementen) op de veiligheidsaspecten van de splijtstof in de reactorkern en het splijtstofopslagbassin beschreven.

De beschreven analyses maken onderdeel uit van het veiligheidsrapport van de kerncentrale Borssele [2].



6.1 Veiligheid bij de inzet van MOX-splijtstofelementen

6.1.1 Neutronenfysisch en thermohydraulisch ontwerp van de reactorkern

De belangrijkste aandachtspunten van het neutronenfysisch ontwerp van de reactorkern zijn het voorkomen van overschrijding van de voorgeschreven maximale waarden voor vermogensdichtheid en heetkanaalfactoren. Ook moet het langdurig onderkritisch kunnen maken van de reactor vanuit elke situatie en de langdurige afvoer van de vervalwarmte zeker gesteld zijn.

Het doel van het thermohydraulische ontwerp is, onder alle bedrijfsomstandigheden te verzekeren dat in de kern geen filmkoken kan ontstaan, omdat daardoor de warmteoverdracht verslechtert, met als mogelijk gevolg een te hoge splijtstoftemperatuur.

Aangetoond dient te worden dat het ontwerp van de reactorkern aan de doelen van het neutronenfysisch en thermohydraulisch ontwerp voldoet. Daartoe wordt ieder kernontwerp getoetst aan de randvoorwaarden die vastliggen in de ‘Sicherheitsstechnische Rahmenbedingungen’ [6] (zie paragraaf 5.1.3). De ‘Sicherheitsstechnische Rahmenbedingungen’ vormen een samenvatting van het geldigheidsgebied van de geldende veiligheidsanalyses en ontwerpanalyses van de splijtstof.

Bij de voorgenomen toepassing van MOX wordt een nieuw type splijtstof toegepast waarvoor de oude veiligheidsanalyses en ontwerpanalyses niet geldig zijn. Ook voor de nieuwe splijtstof is daarom door middel van expliciete berekeningen het bewijs geleverd dat aan de doelen van het ontwerp wordt voldaan. De resultaten van de nieuwe analyses voor de inzet van MOX-splijtstofelementen zijn vastgelegd in een revisie van de ‘Sicherheitsstechnische Rahmenbedingungen’.

De inzet van MOX-splijtstofelementen heeft invloed op de volgende parameters van de reactorkern:

- snelheidsparameters van de neutronen
- reactiviteitseffecten
- vervalwarmte.

In de nu volgende veiligheidsbeschouwing wordt aangetoond dat de wijzigingen in bovenstaande parameters toelaatbaar zijn en afgedekt worden door de bestaande of nieuw uitgevoerde analyses.

6.1.2 Veiligheidsbeschouwing

6.1.2.1 Algemeen

Bij het splijten van plutonium-239 en plutonium-241 atomen komen, ten opzichte van de splijting van een uranium-235 atoom, relatief hoog energetische neutronen vrij. Bovendien absorberen plutonium-239 en plutonium-241 thermische neutronen sterker dan uranium-235. Bij de inzet van MOX-splijtstofelementen zal het

neutronenspectrum daardoor harder zijn (spectrum bevat relatief meer hoog energetische neutronen en minder thermische neutronen). Het hardere neutronenspectrum zorgt ervoor dat zowel de werkzaamheid van de regelementen als die van boor-10 bij de inzet van MOX afneemt.

Hier staat tegenover dat de reactiviteit van verse MOX-splijststofelementen lager is ten opzichte van verse uranumelementen. De balans van deze twee tegenovergestelde effecten is zodanig dat bij de inzet van MOX-splijststofelementen tijdens normaal bedrijf de maximale en gemiddelde boor-10 concentraties in het hoofdkoelmiddel lager zijn dan bij het gebruik van uranium-elementen. Onder ongevalscondities dient de boor-10 concentratie in het hoofdkoelmiddel juist hoger te zijn waardoor het gebruik van verrijkt boorzuur noodzakelijk is.

Bij het gebruik van MOX-splijststofelementen is de vervalwarmte, gedurende de eerste 46 uur na afschakeling van de reactor, lager dan bij het gebruik van ENU-splijststofelementen [12]. Na deze periode is de vervalwarmte hoger, waardoor MOX-elementen bij gebruik van de huidige aftransportcontainer een één à twee jaar langere afkoelperiode in het splijststofopslagbassin vereisen alvorens deze kunnen worden afgevoerd.

6.1.2.2 Reactorkern; normaal bedrijf en storingen

Hieronder worden de resultaten van de thermohydraulische en radiologische analyses voor het normaal bedrijf en storingen beschreven.

6.1.2.2.1 Thermohydraulisch

Het gedrag van de reactorkern tijdens normaal bedrijf is berekend voor de situatie waarbij de kern voor 40% is opgebouwd uit MOX-elementen en voor 60% uit ENU-elementen (evenwichtskern), als ook voor kernen welke een lager percentage MOX-elementen bevatten (overgangskernen). De resultaten van deze berekeningen tonen aan dat bij een verrijking van het boorzuur (boor-10 concentratie wordt verhoogd van 20% (natuurlijk boor) naar 32%) wordt voldaan aan de acceptatiecriteria zoals vastgesteld in de 'Sicherheitsstechnische Rahmenbedingungen' [6] (zie paragraaf 5.1.3).

6.1.2.2.2 Radiologisch

Tijdens normaal bedrijf worden kleine hoeveelheden activiteit via de ventilatielucht en het koelwater geloosd. Bij de inzet van MOX-splijststofelementen kan de samenstelling van de geloosde activiteit en daarmee de jaardosis wijzigen. Momenteel wordt de jaardosis ten gevolge van lozingen naar de omgevingslucht voor meer dan 80% bepaald door de emissie van koolstof-14. Daarnaast dragen edelgasen (14%), tritium (5%) en jodium-131 (1%) bij aan de jaardosis. De totale bijdrage van overige nucliden is minder dan 1%. Bij het gebruik van MOX-splijststofelementen zal de stralingsbelasting ten gevolge van lozingen naar de omgevingslucht met ongeveer 10% afnemen [13] ten opzichte van die bij gebruik van uranumelementen.

De jaardosis ten gevolge van koelwaterlozingen op de Westerschelde wordt momenteel voornamelijk bepaald door bèta/gamma stralers en door tritium in het hoofdkoelmiddel. Uit analyses is gebleken dat de dosis ten gevolge van de bèta/gamma stralers niet afhankelijk is van het gebruik van MOX-elementen. De dosisbijdrage ten gevolge van tritium neemt bij de inzet van MOX-elementen af, waardoor de totale stralingsbelasting ten gevolge van lozingen naar de Westerschelde bij de inzet van MOX-elementen ook zal afnemen [13].

De dosisgevolgen van de radiologische lozingen van KCB zijn gebaseerd op de berekende verspreiding van de radioactieve stoffen in de omgeving. Een uitgebreid meetprogramma in de omgeving van de kerncentrale toont aan dat er geen meetbare verhoging is van de hoeveelheid radioactiviteit in de omgeving van de kerncentrale.

6.1.2.3 Reactorkern; ongevallen

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 splijststof met hoge opbrand. Dit onderzoek omvatte twee typen relevante ongevallen, te weten RIA-ongevallen (*Reactivity Initiated Accidents*) en LOCA-ongevallen (*Loss Of Coolant Accidents*). Het gedrag van een MOX-splijststofstaaf met hoge opbrand specifiek tijdens RIA en LOCA-ongevallen wordt hierna in meer detail besproken.

Op basis van de bij bovengenoemde onderzoeken verkregen inzichten zijn in opdracht van EPZ voor het voorgenomen gebruik van MOX splijfstof nieuwe ongevalsanalyses uitgevoerd. In deze analyses is rekening gehouden met verschillen in het gedrag tussen MOX en uraniumoxide. Deze analyses worden besproken in paragraaf 6.1.2.4.

6.1.2.3.1 LOCA

Met betrekking tot de gevolgen van een ongeval met koelmiddelverlies (LOCA; *Loss of Coolant Accident*) als gevolg van de invoering van MOX, kan opgemerkt worden dat onderstaande LOCA-relevante splijfstofkarakteristieken niet wijzigen:

- Het type splijstofelement (HTP-X5)
- De splijstofstaafomhulling (M5)
- De opbrand van de definitief te ontladen MOX-elementen; deze zal gelijk zijn aan die van de huidige ENU-elementen.

Wat wijzigt is de soort splijstof (MOX) in de splijstoftabletten. Het belangrijkste effect van de inzet van MOX is dat de in de splijstoftabletten opgeslagen energie hoger is dan in die van uraniumelementen. Het vrijkomen van deze hogere opgeslagen energie tijdens een LOCA zou kunnen leiden tot onacceptabele splijstofomhullingstemperaturen en als gevolg daarvan tot schade aan de splijstofstaaf. Afdekkend qua gevolgen voor LOCA-ongevallen is voor de KCB de begingebourtenis 'Breuk van een hoofdkoelmiddelleiding' (begingebourtenis 7.2.3) en de begingebourtenis 'Lekkage van het primair systeem binnen de veiligheidsomhulling'

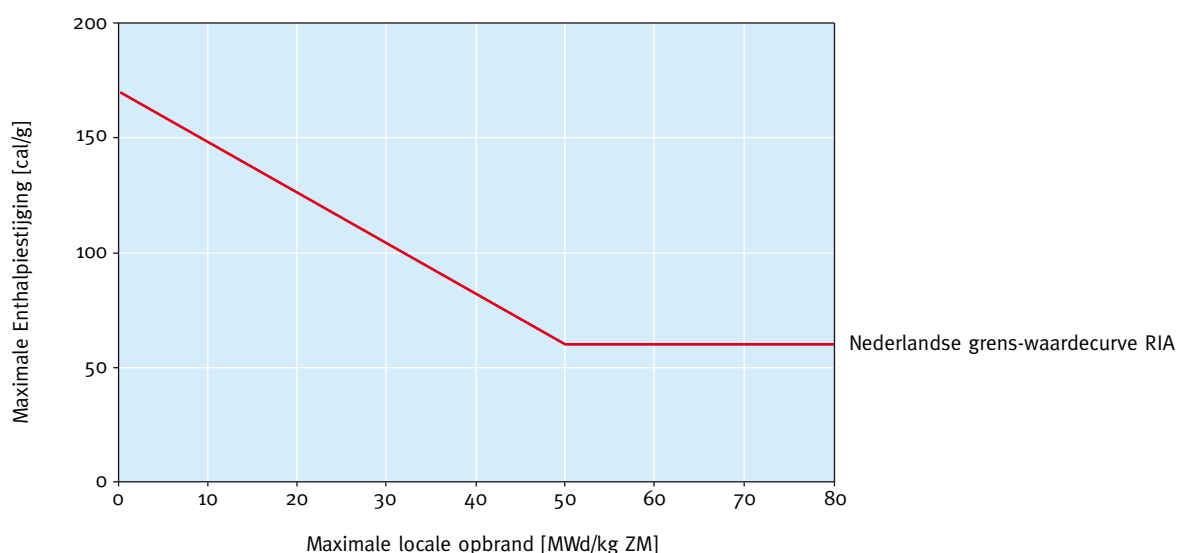
(begingebourtenis 7.2.2). De analyse voor begingebourtenis 7.2.3 is door AREVA uitgevoerd voor een reactorkern met 48 MOX-elementen (40% MOX), ook voor hogere opbranden [6].

De conservatieve resultaten laten zien dat voor alle opbranden de maximale splijstofomhullingstemperatuur lager blijft dan de ontwerp eis. Voor begingebourtenis 7.2.2. is door middel van een plausibiliteitsverklaring aangetoond dat de relevante beschermingsdoelstellingen behorende bij deze begingebourtenis te allen tijde voor MOX worden gerealiseerd.

6.1.2.3.2 RIA

Als gevolg van een snelle enthalpiestijging in een splijstofstaaf kan er schade aan de staaf ontstaan. Een dergelijke enthalpiestijging kan optreden bij veronderstelde begingebourtenissen waarbij een onbedoelde verandering van de reactiviteit optreedt (RIA; *Reactivity Initiated Accident*). Afdekkend qua gevolgen voor deze categorie begingebourtenissen is voor de KCB de begingebourtenis 'Uitworp van het meest effectieve regelement' (gebeurtenis nr. 5.2). Het al of niet optreden van schade aan de staaf bij een bepaalde enthalpiestijging is afhankelijk van de opbrand van de betreffende staaf. In figuur 5.1-2 is aangegeven welke maximale enthalpiestijging is toegestaan als functie van de opbrand van de splijstofstaaf. De aangegeven ontwerpgrenswaarden zijn proefondervindelijk vastgesteld en zijn conservatief. Voor de KCB is op een conservatieve wijze berekend welke maximale enthalpiestijging kan optreden

Figuur 5.1-2 Ontwerpgrenswaarden voor maximale enthalpieverhogingen als gevolg van een RIA-ongeval als functie van de maximale locale opbrand.



bij uitworp van het meest effectieve regelement in een reactorkern met 48 MOX-elementen. Uit de vergelijking van de berekende resultaten met de opbrand afhankelijke ontwerp grenswaarden uit figuur 5.1-2 kan geconcludeerd worden dat voor de maximaal optredende lokale opbranden tot 73,7 MWd/kgZM (evenwichtskern) er ruim voldoende marge blijft bestaan tussen de berekende maximale enthalpiestijging en de ontwerpwaarden waarboven schade aan de splijfstofstaaf kan optreden [8].

6.1.2.3.3 Conclusies

In de uitgevoerde analyses ten behoeve van het voorgenomen gebruik van MOX-splijfstof zijn stand-der-techniek splijfstofcodes gebruikt waarin de laatste internationale inzichten omtrent falen van splijststoffen bij hoge opbrand zijn verwerkt.

Op grond van de uitgevoerde haalbaarheidsstudie [4], alsmede de tot op heden opgedane ervaringen met MOX-splijstofelementen kan worden geconcludeerd dat deze elementen veilig inzetbaar zijn in de KCB. Voor de beoordeling van de verkregen berekende resultaten zijn conservatieve criteria toegepast.

6.1.2.4 Thermohydraulische analyses

De in paragraaf 6.1.1 genoemde parameters die wijzigen bij inzet van MOX-splijstofelementen kunnen van invloed zijn op het verloop en de beheersing van ongevallen. Om deze invloeden vast te stellen zijn de voor KCB representatieve begingebourtenissen opnieuw beschouwd.

De inzet van MOX-splijstofelementen heeft invloed op zowel de ontwerpongevallen waarbij koelmiddelverlies optreedt als op de ontwerp-ongevallen waarbij geen koelmiddelverlies optreedt. Voor de bestudering van het verloop van de ontwerpongevallen waarbij geen koelmiddelverlies optreedt, spelen de snelheidsparameters van de neutronen en de reactiviteitscoëfficiënten een belangrijke rol. Voor de bestudering van ontwerpongevallen met koelmiddelverlies speelt daarnaast de in de kern opgeslagen hoeveelheid energie een rol. Bij de laatstgenoemde analyses is daarom ook het percentage MOX-elementen in de kern relevant. Het gedrag van de reactorkern tijdens koelmiddelverlies-ongevallen is berekend voor de situatie waarbij de kern voor 40% is opgebouwd uit MOX-elementen en voor 60% uit ENU-

elementen (evenwichtskern), als ook voor kernen die een lager percentage MOX-elementen bevatten (overgangskernen).

Om aan te tonen dat de ontwerpongevallen worden beheerst bij de inzet van MOX-elementen, is in eerste instantie nagegaan of de verandering van de splijfstofparameters valt binnen het geldigheidsbereik van de bestaande analyses. 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 geanalyseerd.

Hieronder zijn de resultaten van de thermohydraulische analyses van de begingebourtenissen (PIEs; *Postulated Initiating Events*), zoals omschreven in het veiligheidsrapport, kort weergegeven.

PIE 1.4 “Onbedoeld openen van appendages (bijvoorbeeld omloopafsluiters, afblaasregelkleppen, veiligheidskleppen)” [14]

Deze PIE kent twee beschermingsdoelstellingen:

- Filmkoken aan de splijfstofstaven mag slechts in beperkte mate optreden.
- De temperatuur van de splijststofomhulling blijft beneden de grenswaarde.

De analyse behorende bij deze PIE is voor de inzet van MOX-elementen opnieuw uitgevoerd. In tegenstelling tot de voorgaande analyse is hierbij de conservatieve aanname gedaan dat het eerste signaal van de reactorvermogensbegrenzing wordt genegeerd. Het verloop van het ongeval wijzigt hierdoor. De reactor wordt (na het aanspreken van de tweede grenswaarde) afgeschakeld (RESA), maar wordt door onderkoeling van het koelmiddel opnieuw kritisch. De onderkoeling wordt door het secundair isoleren van de stoomgeneratoren beëindigd, waarmee de reactor op de lange termijn onderkritisch is.

De analyse toont aan dat te allen tijde wordt voldaan aan de bij deze analyse behorende beschermingsdoelstellingen.

PIE 1.5.4 “Breuk in de hoofdstoomleiding tussen de veiligheidsomhulling en de hoofdstoomafsluiters” [15]

Deze PIE kent twee beschermingsdoelstellingen:

- De onderkriticaliteit en de warmteafvoer zijn voor de langere termijn zeker gesteld.
- De temperatuur van de splijtstofomhulling blijft beneden de grenswaarde.

De relevante verschillen als gevolg van de inzet van MOX-elementen ten opzichte van de eerder uitgevoerde analyse betreffen de veranderingen in de minimale en maximale waarden van de reactiviteitscoëfficiënten en de afname van de regelstaafwerkzaamheid. De veranderingen van de reactiviteitscoëfficiënten voor deze begin-gebeurtenis betreffen de verzwakking van de splijtstoftemperatuurcoëfficiënt, de versterking van de moderatortemperatuurcoëfficiënt en de verzwakking van de boorzuurconcentratiecoëfficiënt.

Als gevolg van de breuk in de hoofdstoomleiding treedt een sterke afkoeling van het primaire systeem op. Door de sterkere moderatortemperatuurcoëfficiënt en de kleinere regelstaafwerkzaamheid wordt de reactor eerder kritisch dan voorheen, namelijk bij een minder sterke afkoeling van het primaire systeem. Vanwege de zwakkere boorzuurconcentratiecoëfficiënt moet vervolgens meer boorzuur worden toegevoegd aan het primaire systeem om weer onderkriticaliteit te bereiken.

Middels een plausibiliteitsbeschouwing is aangetoond dat de boreersystemen bij toepassing van 32% verrijkt boor voldoende capaciteit hebben om onderkriticaliteit van de reactor op lange termijn zeker te stellen. De inzet van MOX-elementen resulteert hierbij in een langere periode van boren voor het bereiken van onderkriticaliteit.

Het voldoen aan het acceptatiecriterium voor de splijtstoftemperatuur wordt cyclusspecifiek vastgesteld bij iedere splijtstofwisseling. Voor het opstarten van de reactor dient aangetoond te worden dat de beoogde kernbelading hieraan voldoet. De resultaten van deze analyse worden na goedkeuring door de EPZ Veiligheidscommissie conform de Kew-vergunning ter goedkeuring voorgelegd aan de Kernfysische Dienst van VROM. Hiermee is aangetoond dat te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

PIE 2.3.2 “TUSA zonder opening van de turbine-omloopleiding” [16]

Deze PIE kent twee beschermingsdoelstellingen:

- De temperatuur van de splijtstofomhulling blijft beneden de grenswaarde.
- De primaire koelmiddeldruk en de secundaire stoomdruk moeten onder de toelaatbare waarden blijven.

De thermohydraulische analyse behorende bij deze PIE is voor de inzet van MOX-elementen opnieuw uitgevoerd. Deze analyse toont aan dat het ongevalsverloop bij de inzet van MOX-elementen afwijkt van het ongevalsverloop bij de inzet van ENU-elementen. Bij de inzet van MOX-elementen volgt bijvoorbeeld 11 seconden na aanvang van het ongeval reeds RESA terwijl bij de inzet van ENU RESA pas na circa 400 seconden volgt. Na de reactorsnelafschakeling wordt de vervalwarmte afgevoerd door secundair stoom af te blazen.

De analyse toont aan dat te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

PIE 2.5.2 “Langdurige noodstroomsituatie (>30 minuten)” [14]

Deze PIE kent twee beschermingsdoelstellingen:

- Filmkoken aan de splijtstofstaven mag niet optreden.
- De primaire koelmiddeldruk en de secundaire stoomdruk moeten onder de toelaatbare waarden blijven.

De relevante verschillen als gevolg van de inzet van MOX-elementen ten opzichte van de eerder uitgevoerde analyse betreffen de veranderingen in de minimale en maximale waarden van de reactiviteitscoëfficiënten en de afname van de regelstaafwerkzaamheid. De veranderingen van de reactiviteitscoëfficiënten voor deze begin-gebeurtenis betreffen de versterking van de splijtstoftemperatuurcoëfficiënt en de verzwakking van de moderatortemperatuurcoëfficiënt.

Als gevolg van de uitval van de normale stroomvoorziening vallen de hoofdkoelmiddelpompen uit. Hierdoor vermindert de koeling van de reactorkern. Na enige tijd worden regelstaven in de reactorkern gestuurd waardoor het vermogen sterk afneemt en de koeling verbetert. Met een eerdere analyse waarbij gelijke reactiviteitscoëfficiënten zijn toegepast is aangetoond dat

de koeling ruim voldoende blijft om filmkoken te voorkomen. De kleinere regelstaafwerkzaamheid heeft hierop geen invloed omdat de minimale waarde voor de koeling bij deze gebeurtenis optreedt voordat de regelstaven worden ingestuurd. Wel is de directe vermogensreductie geringer als gevolg van de beperktere regelstaafwerkzaamheid.

De optredende primaire koelmiddeldruk en secundaire stoomdruk worden door de ongunstigere begingeburtenis 2.3.2 ‘TUSA zonder opening van de turbine-omloopleiding’ afgedekt. Hierbij worden de primaire veiligheidskleppen niet aangesproken. Hiermee is aangetoond dat te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

PIE 2.6.1 “Uitval van de hoofdvoedingswaterpompen” [15]

Deze PIE kent twee beschermingsdoelstellingen:

- Filmkoken aan de splijststofstaven mag niet optreden.
- De primaire koelmiddeldruk en de secundaire stoomdruk moeten onder de toelaatbare waarden blijven.

De relevante verschillen als gevolg van de inzet van MOX-elementen ten opzichte van de eerder uitgevoerde analyse betreffen de veranderingen in de minimale en maximale waarden van de reactiviteitscoëfficiënten en de afname van de regelstaafwerkzaamheid. De veranderingen van de reactiviteitscoëfficiënten voor deze begingeburtenis betreffen de versterking van de splijstoftemperatuurcoëfficiënt en de verzwakking van de moderatortemperatuurcoëfficiënt.

Als gevolg van de uitval van de hoofd- en noodvoedingswaterpompen stijgen de primaire temperatuur en druk. De optredende primaire koelmiddeldruk en secundaire stoomdruk worden door de ongunstigere begingeburtenis 2.3.2 ‘TUSA zonder opening van de turbine-omloopleiding’ afgedekt. Hierbij worden de primaire veiligheidskleppen niet aangesproken.

De hogere koelmiddeltemperatuur verlaagt de marge tot het optreden van filmkoken. Dit wordt echter gecompenseerd door de hogere koelmiddeldruk. Om het resultaat hiervan vast te stellen is een specifieke analyse uitgevoerd.

Hiermee is aangetoond dat de marge tot het optreden van filmkoken niet daalt. Bijgevolg worden te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen gerealiseerd.

PIE 3.2 “Blokken van een hoofdkoelmiddel-pomp of breuk van een hoofdkoelmiddelpompas” [17]

Deze PIE kent vier beschermingsdoelstellingen:

- Onderkriticaliteit is voor de langere termijn zeker gesteld.
- De langdurige afvoer van vervalwarmte moet gegarandeerd zijn.
- De temperatuur van de splijststofomhulling blijft beneden de grenswaarde.
- De primaire koelmiddeldruk en de secundaire stoomdruk moeten onder de toelaatbare waarden blijven.

De analyse van deze PIE is voor de inzet van MOX-elementen opnieuw uitgevoerd. Hierin wordt aangetoond dat het ongevalsverloop bij de inzet van MOX-elementen enigszins afwijkt van het ongevalsverloop bij de inzet van ENU-elementen, maar dat bij de inzet van MOX-elementen te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

PIE 5.2 “Uitworp van het meest effectieve regelement” [8]

Deze PIE kent drie beschermingsdoelstellingen:

- De temperatuur van de splijststofomhulling blijft beneden de grenswaarde.
- De enthalpieverhoging moet beneden de toelaatbare waarde blijven.
- De primaire koelmiddeldruk en de secundaire stoomdruk moeten onder de toelaatbare waarden blijven.

De analyse van deze PIE is voor de inzet van MOX-elementen ten dele opnieuw uitgevoerd. In deze analyse is aangetoond dat de temperatuur van de splijststofomhulling en de enthalpieverhoging beneden de daartoe geldende grenswaarden blijven. Middels plausibiliteit is aangetoond dat de primaire koelmiddeldruk en de secundaire stoomdruk niet boven de maximaal toelaatbare waarden komen.

PIE 7.1.1 “Onbedoeld openen en weer sluiten van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder” [18]

Deze PIE kent drie beschermingsdoelstellingen:

- Filmkoken aan de splijtstofstaven mag niet optreden.
- De temperatuur van de splijtstofomhulling blijft beneden de grenswaarde.
- Een blijvend lek van het primaire systeem dient te worden vermeden.

De relevante verschillen als gevolg van de inzet van MOX-elementen ten opzichte van de eerder uitgevoerde analyse betreffen de veranderingen in de minimale en maximale waarden van de reactiviteitscoëfficiënten en de afname van de regelstaafwerkzaamheid.

De veranderingen van de reactiviteitscoëfficiënten voor deze begingebourtenis betreffen de verzwakking van de splijtstoftemperatuurcoëfficiënt en de versterking van de moderatortemperatuurcoëfficiënt.

Als gevolg van het openen van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder treedt afkoeling en drukdaling van het primaire systeem op. Uit de eerdere analyse blijkt dat de temperatuur en dichtheid van het primaire koelmiddel voor het afschakelen van de reactor niet significant veranderen. Hierdoor hebben de door de toepassing van MOX-elementen veranderde reactiviteitscoëfficiënten geen significante invloed op het reactorvermogen. Vanwege de grote marge tot het optreden van filmkoken worden de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen gerealiseerd.

PIE 7.1.2 “Onbedoeld openen en open blijven van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder” [15]

De begingebourtenis 7.1.2 ‘Onbedoeld openen en open blijven van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder’ betreft in principe een lekkage van het primair systeem. Voor de behandeling wordt daarom verwezen naar begingebourtenis 7.2.2 ‘Lekkage van het primair systeem binnen de veiligheidsomhulling’.

PIE 7.2.2 “Lekkage van het primair systeem binnen de veiligheidsomhulling” [15]

Deze PIE kent vijf beschermingsdoelstellingen:

- De temperatuur van de splijtstofomhulling blijft beneden de grenswaarde.

- De plaatselijke oxidatie van de splijtstofomhulling blijft beneden de grenswaarde.
- De waterstofproductie van de splijtstofomhulling blijft beneden de grenswaarde.
- De door temperatuurverhoging veroorzaakte geometrische veranderingen in de kern mogen de koeling daarvan niet nadelig beïnvloeden.
- De langdurige afvoer van vervalwarmte moet gegarandeerd zijn.

De relevante verschillen als gevolg van de inzet van MOX-elementen ten opzichte van eerder uitgevoerde analyse betreffen de veranderingen in de afname van de regelstaafwerkzaamheid en de in de kern opgeslagen hoeveelheid energie.

Na het optreden van een lekkage wordt de reactor afgeschakeld door het invallen van de regelstaven. Het afschakelen wordt korte tijd ondersteund door de reactiviteitverlaging als gevolg van dampbelvorming. De afschakeling wordt langdurig verzekerd door de toevoer van geboreerd water. Overige reactiviteitssterugkoppelingen hebben een ondergeschikte invloed. De gebeurtenis wordt voor wat betreft de kortstondige onderkritikaliteit afgedekt door de PIE 2.5.2 ‘Langdurige noodstroomsituatie (>30 minuten)’. De langdurige onderkritikaliteit wordt cyclusspecifiek aangetoond bij iedere splijtstofwisseling.

De hogere energie-inhoud van een MOX-kern heeft bij de hier behandelde kleinere lekkages geen invloed. In het geval dat filmkoken optreedt, gebeurt dit pas wanneer de in de kern opgeslagen energie al is afgevoerd.

De werkzaamheid van de kernkoeling is aangetoond op basis van eerder uitgevoerde analyses en de beperkte maximale temperatuur van de splijtstofomhulling en de marge tot de grenswaarde die bij deze analyses is vastgesteld.

Hierdoor hebben de door de toepassing van MOX-elementen veranderde reactiviteitscoëfficiënten geen significante invloed op het reactorvermogen. Hiermee is aangetoond dat te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

PIE 7.2.3 “Breuk van de hoofdkoelmiddel-leiding” [19]

Deze PIE kent vijf beschermingsdoelstellingen:

- De temperatuur van de splijtstofomhulling blijft beneden de grenswaarde.
- De plaatselijke oxidatie van de splijtstofomhulling moet minder zijn dan 17%.
- De waterstofproductie mag 1% van de grootste mogelijke waarde niet overschrijden.
- De door temperatuurverhoging veroorzaakte geometrische veranderingen in de kern mogen de koeling daarvan niet nadelig beïnvloeden.
- De langdurige afvoer van vervalwarmte moet gegarandeerd zijn.

De analyse van deze PIE is voor de inzet van MOX-elementen opnieuw uitgevoerd. Hierin wordt aangetoond dat bij de inzet van MOX-elementen te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

PIE 7.3.2 “Bezwijken van stoomgeneratorpijpen” [15]

Deze PIE kent drie beschermingsdoelstellingen:

- De splijtstofomhulling moet dicht blijven.
- De langdurige afvoer van vervalwarmte moet gegarandeerd zijn.
- De defecte stoomgenerator mag niet overvuld raken.

De relevante verschillen als gevolg van de inzet van MOX-elementen ten opzichte van de eerder uitgevoerde analyse betreffen de veranderingen in de minimale en maximale waarden van de reactiviteitscoëfficiënten en de afname van de regelstaafwerkzaamheid. De veranderingen van de reactiviteitscoëfficiënten voor deze begingeburtenis betreffen de verzwakking van de splijtstof-temperatuurcoëfficiënt, de versterking van de moderator-temperatuurcoëfficiënt en de verzwakking van de boorzuurconcentratiecoëfficiënt.

Nadat het bezwijken van stoomgeneratorpijpen is vastgesteld, wordt de koelmiddeldruk verlaagd en wordt na enkele seconden de turbine afgeschakeld. Vlak daarna wordt de reactor afgeschaakeld. In dit korte tijdsbestek daalt de koelmiddeldichtheid nauwelijks. De verandering van de reactiviteitscoëfficiënten ten gevolge van de toepassing van MOX-elementen heeft derhalve geen significante invloed op het reactorvermogen. De marge tot het optreden van filmkoken wordt daardoor nauwelijks kleiner.

Aangenomen wordt dat door het afschakelen van de turbine de normale stroomvoorzorging uitvalt waardoor de hoofdkoelmiddelpompen uitvallen. Hierdoor vermindert de koeling van de reactor-kern. In de tijd tot afschakeling van de reactor versnelt daardoor het afnemen van de marge tot het optreden van filmkoken. Deze versnelde afname vindt plaats gedurende een beperkte tijd (circa 1 seconde).

Met een eerdere analyse is aangetoond dat er een ruime marge tot het optreden van filmkoken bestaat. Zoals hierboven aangegeven zal deze marge tot het afschakelen van de reactor slechts zeer beperkt dalen zodat voldoende marge overblijft. Na afschakeling van de reactor spelen de veranderingen van de reactiviteitscoëfficiënten en de regelstaafwerkzaamheid geen rol meer en is de eerder uitgevoerde analyse van toepassing. Hiermee is aangetoond dat te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

PIE 9.1.1 “Lekkage van hoofdstoomleidingen in geval van een aardbeving” [20]

Deze PIE kent twee beschermingsdoelstellingen:

- Onderkriticaliteit is voor de langere termijn zeker gesteld.
- De langdurige afvoer van vervalwarmte moet gegarandeerd zijn.

De analyse van deze PIE is voor de inzet van MOX-elementen opnieuw uitgevoerd. Hierin wordt aangetoond dat het ongevalsverloop bij de inzet van MOX-elementen nagenoeg niet verschilt van het ongevalsverloop bij de inzet van ENU-elementen. Ook bij de inzet van MOX-elementen worden te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen gerealiseerd.

PIE 10.2 “Overtoerental van een hoofdkoelmiddelpomp tijdens een lekkage van het primair systeem binnen de veiligheidsomhulling” [21]

Deze PIE kent één beschermingsdoelstelling:

- De hoofdkoelmiddelpompen mogen geen ontoelaatbaar hoge toerentallen bereiken.

De beschermingsdoelstellingen met betrekking tot de lekkage van het primair systeem worden behandeld bij PIE 7.2.2 ‘Lekkage van het primair systeem binnen de veiligheidsomhulling’.

De inzet van MOX-elementen heeft geen invloed op het gedrag van de hoofdkoelmiddelpompen met betrekking tot een te hoog toerental. De eerder uitgevoerde analyse van deze begin-gebeurtenis is daarom nog steeds geldig. Hiermee is aangetoond dat te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstelling wordt gerealiseerd.

PIE 10.5 “Bedrijfstransiënten waarbij een hypothetisch uitvallen van het systeem voor snelle afschakeling wordt verondersteld” [22]

Deze PIE kent drie beschermingsdoelstelling:

- Onderkriticaliteit is voor de langere termijn zeker gesteld.
- De langdurige afvoer van vervalwarmte moet gegarandeerd zijn.
- De primaire koelmiddeldruk en de secundaire stoomdruk moeten onder de toelaatbare waarden blijven.

Voor PIE 10.5 is in 2000 een analyse uitgevoerd. In deze analyse is reeds rekening gehouden met de mogelijkheid MOX-elementen in de toekomst in de KCB in te zetten. Deze analyse is daarom nog altijd geldig. Hiermee is aangetoond dat te allen tijde de voor deze gebeurtenis relevante beschermingsdoelstellingen worden gerealiseerd.

6.1.2.4.1 Radiologische analyses

Uit de hierboven beschreven thermohydraulische analyses is gebleken van welke ontwerponge-

vallen het verloop beïnvloed wordt door het toepassen van MOX-elementen. Uit de analyses blijkt dat ontwerpongevallen die een lozing van radioactieve stoffen tot gevolg hebben, in hun verloop niet worden beïnvloed door de toepassing van MOX-elementen en daarom nog steeds representatief zijn.

De inzet van MOX-elementen leidt wel tot veranderingen in de kerninventaris en de radioactiviteit daarvan. Deze veranderingen leiden ertoe dat de brontermen van de ongevallen wijzigen. Voor de inzet van MOX-elementen zijn daarom nieuwe radiologische analyses uitgevoerd. Deze analyses zijn volgens de laatste inzichten uitgevoerd. In tabel 6.1-1 worden de ongevallen waarvoor een nieuwe radiologische analyse is uitgevoerd opgesomd. In hoofdstuk 7 worden de resultaten van deze analyses beschreven.

6.1.2.4.2 Conclusie

De parameters die wijzigen als gevolg van de inzet van MOX-elementen betreffen de werkzaamheid van de regelstaven en van het boor-10, de reactiviteit van de splijtstof, de vervalwarmte en de brontermen. De bestaande en de nieuw uitgevoerde veiligheidsanalyses dekken deze wijzigingen in voldoende mate af. Gebleken is dat de installatie voor alle te beschouwen ontwerpongevallen in een veilige toestand zal worden gebracht en gehouden.

Tabel 6.1-1 Representatieve begingebourtenissen voor de radiologische analyses. Deze begingebourtenissen zijn voor de inzet van MOX-elementen opnieuw beschouwd.

PIE 1.5.1	Langdurige uitval van de secundaire hoofdkoeling bij bedrijfslekkage van stoomgeneratorpijpen
PIE 7.2.2	Lekkage van het primaire systeem binnen de veiligheidsomhulling
PIE 7.2.3	Breuk van de hoofdkoelmiddelleiding
PIE 7.3.2.2	Bezwijken van stoomgeneratorpijpen met een noodstroomsituatie (kortstondig)
PIE 7.4.2	Lekkage van een meetleiding die hoofdkoelmiddel bevat buiten de veiligheidsomhulling
PIE 8.2	Lekkage in een leiding van het afgassysteem
PIE 8.4.1	Beschadigingen van splijtstofelementen tijdens het hanteren
PIE 9.1.2	Gevolgen van een aardbeving op het reactorhulpgebouw

6.1.2.5 Reactorkern; onderkriticaliteit

De inzet van MOX-elementen heeft invloed op de onderkriticaliteit van de reactor na afschakeling. Er zijn daarom aanpassingen aan het boreersysteem vereist. Middels een analyse [5] is aangetoond dat langdurige onderkriticaliteit is zekergestellt wanneer 2300 ppm boor met een boor-10 verrijking van 32% (in plaats van de momenteel gehanteerde 20%) wordt toegepast.

Daarnaast wordt voor iedere kernbelading van de KCB voor iedere bedrijfscyclus een formele veiligheidsanalyse van het reactorbedrijf uitgevoerd. De resultaten van deze analyse worden na goedkeuring door de EPZ Veiligheidscommissie conform de vergunning ter goedkeuring voorgelegd aan de Kernfysische Dienst van VROM.

6.1.2.6 Reactorkern; nakoelen

Bij het gebruik van MOX-splijtstofelementen is de vervalwarmte gedurende de eerste 46 uur na afschakeling van de reactor lager dan bij het gebruik van ENU-splijtstofelementen [12]. Na deze periode is de vervalwarmte hoger. Evaluatie van de capaciteit van de nakoelketen en de reserve-nakoelketen toont aan dat voor alle bedrijfstoestanden de afvoer van de vervalwarmte gewaarborgd is [23]. Er zijn geen wijzigingen aan het nakoelsysteem nodig.

6.1.2.7 SOB; onderkriticaliteit

In de splijtstofelementen in het splijtstofopslagbassin (SOB) mag onder geen beding een kernsplijtingsproces op gang komen. Daarom dient aangetoond te worden dat de onderkriticaliteit van de splijtstofelementen in het bassin is gewaarborgd. De vermenigvuldigingsfactor van de neutronen (keff) dient daartoe kleiner dan of gelijk aan 0,95 te zijn.

Kriticaliteitsberekeningen [24] voor de inzet van verse MOX-elementen in het splijtstofopslagbassin tonen aan dat de configuratie met deze MOX-elementen minder reactief is dan een configuratie met verse 4,4 +/- 0,05 gew % ENU-elementen. Het plaatsen van MOX-elementen in het SOB resulteert dus in een kleinere keff en leidt daarmee tot meer marge in de onderkriticaliteit.

In figuur 6.1-1 is de huidige geometrie van het SOB weergegeven. Voor de opslag van MOX-elementen zijn geen wijzigingen in deze geometrie nodig.

6.1.2.8 SOB; koeling

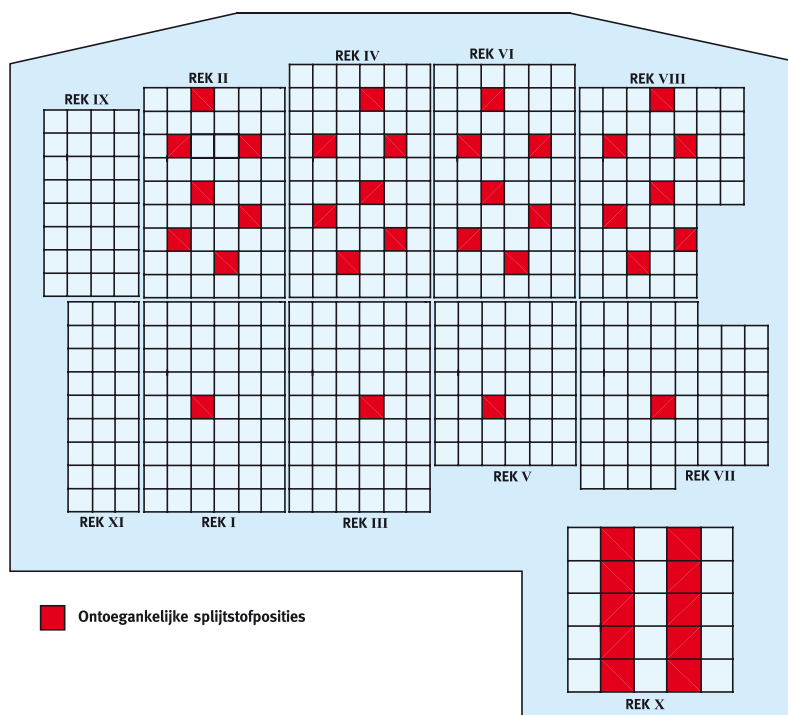
MOX-elementen vereisen na bestraling een één à twee jaar langere afkoelperiode in het splijtstofopslagbassin alvorens deze kunnen worden afgevoerd. De opslagcapaciteit van het SOB is voldoende om het langere verblijf in het SOB te kunnen garanderen.

De evaluatie van de capaciteit van de bassin-koelketen en de reserve-koelketen [12] toont aan dat voor alle bedrijfstoestanden de afvoer van de vervalwarmte gewaarborgd is. Bovendien wordt bij het opstellen van het kernontwerprapport voor elke nieuw te laden kern het vroegst mogelijke tijdstip bepaald waarop de gehele reactorkern in het SOB mag zijn geplaatst met de verbindingssluis tussen het SOB en het reactorbassin gesloten.

6.1.2.9 SOB; afscherming

De inzet van MOX-elementen leidt tot veranderingen van de kerninventaris. Deze verandering zou, als gevolg van het hanteren en opslaan van de bestraalde elementen, van invloed kunnen zijn op de dosis van het personeel. De dosisbijdrage van het splijtstofopslagbassin is daarom apart geanalyseerd. Berekeningen van de stralingsdosis in de ruimten rondom het SOB tonen aan dat het dosistempo in de beschouwde ruimtes niet verandert [13].

Figuur 6.11 Schematisch bovenaanzicht van het splijfstof-opslagbassin. De afgesloten posities zijn in het rood weergegeven.



6.2 Veiligheid bij de inzet van c-ERU-elementen

Gerecycled uranium heeft een andere samenstelling (zie tabel 5.1-6) dan natuurlijk uranium. De belangrijkste isotopen die wel in gerecycled uranium en niet in natuurlijk uranium voorkomen zijn: uranium-232 en uranium-236. De aanwezigheid van deze isotopen heeft consequenties voor de eigenschappen van (c-)ERU-splijstof-elementen.

Het isotoop uranium-232 is in een lage concentratie aanwezig in (c-)ERU (tabel 5.1-6). Dit isotoop vervalt met een halfwaardetijd van 69 jaar. In de reeks van 'dochters' die hieruit ontstaan, zit onder meer het radioactieve Thallium-208 (208Tl). Het opgeslagen (c-)ERU wordt door de toename van deze radioactieve dochters in de loop van de jaren radioactiever. Dit heeft vooral gevolgen voor het personeel dat in installaties (c-)ERU moet bewerken, zoals de conversie-, verrijkings- en fabricageinstallaties. Door waar nodig extra afschermingsvoorzieningen te treffen kan het gerecycled uranium toch zonder significante verhoging van de doses voor de medewerkers verwerkt worden.

Het isotoop uranium-236 heeft het nadeel dat het neutronen absorbeert zonder te splijten, waardoor het de 'reactiviteit' van de splijstof-elementen die van gerecycled uranium zijn gemaakt een lagere 'effectieve' verrijking hebben dan elementen van natuurlijk uranium. Ook al is bij beide het gehalte aan uranium-235 gelijk. Bijgevolg bereiken ERU-elementen een lagere opbrand. In de praktijk wordt dit nadeel meestal gecompenseerd door de uranium-235 verrijking hoger te kiezen (c-ERU). 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.

Uitgangspunten bij het ontwerp van c-ERU elementen zijn dat deze elementen qua reactiviteit equivalent zijn aan de huidige natuurlijk uranumelementen (ENU) en dat de toe te passen compensatie voor uranium-236 $\leq 0,20$ gew % uranium-235 is. Voor c-ERU-elementen betekent dit dat ongeveer 0,6 gew % uranium-236 gecompenseerd kan worden. Een dergelijke compensatie correspondeert met een verrijkingsgraad van 4,6 +/- 0,05 gew % uranium-235.

6.2.1 Veiligheidsbeschouwing

6.2.1.1 Reactorkern; normaal bedrijf en storings

Door middel van een ERU haalbaarheidsstudie [9] is aangetoond dat de inzet van niet gecompenseerde ERU-elementen geen significante 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-splijtstof wordt gecompenseerd door een verhoging van het uranium-235 gehalte [10]. Er kan daarom worden geconcludeerd dat de ENU- en MOX-analyses ook geldig zijn voor een gecompenseerde ERU-kern.

6.2.1.1.1 Radiologisch

Tijdens normaal bedrijf worden kleine hoeveelheden activiteit via de ventilatielucht en het koelwater geloosd. Bij toepassing van c-ERU-elementen kan de samenstelling van de geloosde activiteit en daarmee de jaardosis wijzigen. Momenteel 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%. Bij het gebruik van c-ERU-elementen zal de stralingsbelasting ten gevolge van lozingen naar de omgevingslucht niet of nauwelijks afwijken van de momenteel gangbare stralingsbelasting [11].

De jaardosis ten gevolge van koelwaterlozingen op de Westerschelde wordt momenteel voornamelijk bepaald door bèta/gamma stralers en door tritium in het hoofdkoelmiddel. Uit analyses is gebleken dat de dosis ten gevolge van de bèta/gamma stralers niet afhankelijk is van het gebruik van c-ERU-elementen. De dosisbijdrage van tritium neemt bij de inzet van c-ERU-elementen met maximaal 10% toe [11], waardoor de totale stralingsbelasting ten gevolge van lozingen naar de Westerschelde bij de inzet van c-ERU-elementen met minder dan 2% zal toenemen en er ruimschoots aan de vergunningslimieten wordt voldaan.

6.2.1.2 Reactorkern; ongevallen

Hierna worden de resultaten van de thermohydraulische en radiologische ongevalsanalyses die afdekkend zijn voor c-ERU-elementen beschreven.

6.2.1.2.1 Thermohydraulische analyses

Door middel van een ERU-haalbaarheidsstudie [9] is aangetoond dat de inzet van niet gecompenseerde ERU-elementen geen significante neutronenfysische verschillen vertoont ten opzichte van de inzet van ENU-elementen. Dit geldt ook 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 [10]. Er kan daarom worden geconcludeerd dat de ENU- en MOX-analyses ook geldig zijn voor een gecompenseerde ERU-kern.

6.2.1.2.2 Radiologische analyses

De ontwerpgegevens die een lozing van radioactieve stoffen tot gevolg hebben, worden in hun verloop niet beïnvloed door toepassingen van c-ERU-elementen en zijn daarom nog steeds representatief.

De inzet van c-ERU-elementen leidt wel tot veranderingen in de kerninventaris. Deze veranderingen leiden ertoe dat de brontermen van de ongevallen wijzigen. Voor de inzet van c-ERU-elementen zijn daarom nieuwe radiologische analyses uitgevoerd. Deze analyses zijn in zijn geheel volgens de laatste inzichten uitgevoerd. In tabel 6.1-1 zijn de ongevallen waarvoor een nieuwe radiologische analyse is uitgevoerd opgesomd. In hoofdstuk 7 worden de resultaten van deze analyses beschreven.

6.2.1.2.3 Conclusie

Als gevolg van de inzet van c-ERU-elementen wijzigen alleen de brontermen. De radiologische analyses zijn daarom opnieuw uitgevoerd [11]. De bestaande thermohydraulische analyses dekken de inzet van c-ERU-elementen reeds in voldoende mate af en zijn dus niet opnieuw uitgevoerd.

6.2.1.3 Reactorkern; onderkriticaliteit

De inzet van c-ERU-elementen heeft geen invloed op de onderkriticaliteit van de reactor na afschakeling.

Daarnaast wordt voor iedere kernbelading van de KCB voor iedere bedrijfsacyclus een formele veiligheidsanalyse van het reactorbedrijf uitgevoerd. De resultaten van deze analyse worden na goedkeuring door de EPZ Veiligheidscommissie conform de Kew-vergunning ter goedkeuring voorgelegd aan de Kernfysische Dienst van VROM.

6.2.1.4 Reactorkern; nakoelen

Evaluatie van de capaciteit van de nakoelketen en de reserve-nakoelketen toont aan dat voor alle bedrijfstoestanden de afvoer van de vervalwarmte gewaarborgd is.

6.2.1.5 SOB; onderkriticaliteit

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

Het ontwerp van c-ERU-elementen is gericht op het bereiken van een initiële reactiviteit gelijk aan die van ENU-elementen. De marge in de onderkriticaliteit is voor c-ERU-elementen daarvoor 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.

6.2.1.6 SOB; koeling

De evaluatie van de capaciteit van de bassin-koelketen en de reserve-koelketen toont aan dat voor alle bedrijfstoestanden de afvoer van de vervalwarmte gewaarborgd is. Bovendien wordt bij het opstellen van het kernontwerprapport voor elke nieuw te laden kern het vroegst mogelijke tijdstip bepaald waarop de gehele reactorkern in het SOB mag zijn geplaatst met de verbindingssluis tussen het SOB en het reactorbassin gesloten.

6.2.1.7 SOB; afscherming

De inzet van c-ERU-elementen leidt tot veranderingen van de kerninventaris. Deze verandering zou, als gevolg van het hanteren en opslaan van de bestraalde elementen, van invloed kunnen zijn op de dosis van het personeel. De dosisbijdrage van het SOB is daarom apart geanalyseerd. De berekeningen van de stralingsdosis in de ruimten rondom het SOB tonen aan dat het dosistempo in de beschouwde ruimtes niet verandert [11].

7 Gevolgen van ongevalsemissies



Als onderdeel van de invoering van MOX- en c-ERU-elementen is het effect hiervan op de radiologische lozingen naar de omgevingslucht en de gevolgen daarvan voor normaal bedrijf en voor ongevalscondities (zowel ontwerp-gevallen als buitenontwerpegevallen) onderzocht. De lozingen tijdens normaal bedrijf en storingen zijn behandeld in de paragrafen 6.1.2 en 6.2.1.

7.1 Inleiding

Dit hoofdstuk behandelt de uitgangspunten, methodiek en resultaten van deze studie behorende bij de representatieve ontwerp-ongevallen. Voor de lozingen en bijbehorende gevolgen voor de buitenontwerpegevallen wordt verwezen naar de Milieueffectrapportage KCB Brandstofdiversificatie [7]. In hoofdstuk 8 van deze aanvraag worden de resultaten uit de Milieueffectrapportage samengevat.

7.2 Ontwerpegevallen

In het algemeen leiden ontwerp-ongevallen niet tot lozingen van activiteit naar de omgeving. Het ontwerp is immers gebaseerd op het beheersen van ontwerp-ongevallen en dus op het insluiten van de activiteit. Toch kunnen bepaalde ontwerp-ongevallen een lozing, die uitgaat boven de emissies als gevolg van de normale bedrijfsvoering, tot gevolg hebben. Met behulp van radiologische analyses is aangetoond dat

de gevolgen van een dergelijke lozing binnen aanvaardbare grenzen blijven [11, 12].

7.2.1 Wettelijke dosislimieten

Wettelijk zijn er limieten aan de maximale dosis die leden van de bevolking, als gevolg van blootstelling aan straling door ontwerp-ongevallen mogen ontvangen, vastgesteld. Deze limieten zijn vastgesteld om de kans op sterfte ten gevolge van stochastische effecten te beperken. Met stochastische effecten worden ziektes bedoeld, zoals kanker, die zich vele jaren na de bestraling kunnen openbaren. De dosislimieten waaraan moet worden voldaan, zijn gegeven in tabel 7.2-1. De limieten hangen af van de frequentie van optreden van het ongeval (F) en de blootgestelde groep (respectievelijk personen jonger dan 16 en personen van 16 jaar en ouder). Bij een ontwerp-ongeval mogen geen deterministische effecten⁵ door blootstelling aan straling optreden. Ter vermindering van deterministische effecten is er voor de schildklier een aanvullende dosislimiet vastgesteld van 500 mSv.

Tabel 7.2-1 Dosislimieten voor personen tot 16 jaar en personen vanaf 16 jaar als functie van het kansgebied.

Gebeurtenis frequentie (F) (per jaar)			Effectieve dosis E (mSv)	
			Personen vanaf 16 jaar	Personen tot 16 jaar ¹⁾
10 ⁻¹ >	F	≥ 10 ⁻¹	0,1	0,04
	F	≥ 10 ⁻²	1	0,4
10 ⁻² >	F	≥ 10 ⁻⁴	10	4
10 ⁻⁴ >	F	≥ 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 ontwerp-ongevallen de maximale dosis voor eenjarige kinderen berekend.

⁵ De brontermen zijn berekend op basis van de in het 'Reaktorsicherheit & Strahlenschutz Handbuch' [25] beschikbare uitgangspunten.

7.2.2 Uitgangspunten en gebruikte gegevens

In een radiologische analyse worden de consequenties van een lozing voor de omgeving van de KCB berekend en van de dosis die het gevolg is van externe bestraling door activiteit die zich in het reactorgebouw bevindt.

Om geloosde activiteit (bronterm) te bepalen wordt gebruik gemaakt van:

- Activiteit in het hoofdkoelmiddel; deze wordt berekend door de ontwerpwaarden voor de Duitse Konvoi-reactor te schalen naar het vermogen van de KCB
- Ongevalsverloop
- Filterrendementen

De brontermen zijn berekend op basis van de in het *'Reaktorsicherheit & Strahlenschutz Handbuch'* [25] beschikbare uitgangspunten. Met behulp van het computerprogramma COSYMA, versie 95/1, is berekend hoe deze activiteit zich in de omgeving verspreidt en wordt de maximale dosis op 350 meter van het emissiepunt bepaald. In deze berekeningen

wordt een blootstellingsduur van respectievelijk 50 jaar voor de groep volwassenen en 70 jaar voor de groep eenjarige kinderen gehanteerd. Deze maximale dosis wordt getoetst aan de dosislimieten vermeld in tabel 7.2-1.

7.2.3 Resultaten radiologische analyses

In tabel 7.2-2 zijn de resultaten gegeven van de berekeningen van de dosis voor de 40% MOX-[12] en 100% c-ERU-kern [11] en vergeleken met de dosislimieten.

7.2.4 Conclusie

Uit tabel 7.2-2 blijkt dat bij de representatieve begingebourtenissen in ruime mate wordt voldaan aan de eisen betreffende de dosislimieten. De voorgenomen activiteit (inzet 40% MOX en c-ERU) verschilt wat betreft veiligheid niet significant van de bestaande activiteit. De voorgenomen activiteit heeft dus ook geen invloed op de aangegane verplichting om tot de 25% meest veilige kerncentrales van de westerse landen te behoren.

Tabel 7.2-2 Toetsing van de berekende ongevalsdoses aan de dosislimieten.

Veronderstelde representatieve begingebourtenenis		ENU		40% MOX		100% c-ERU		Dosislimieten	
		E(mSv)	H _{inh} (mSv)	E(mSv)	H _{inh} (mSv)	E(mSv)	H _{inh} (mSv)	E(mSv)	H _{inh} (mSv) *)
1.5.1	Langdurige uitval van de secundaire hoofdkoeling bij bedrijfslekage van stoomgeneratorpijpen	0,024	0,466	0,025	0,475	0,024	0,466	0,4	500
7.2.2	Onbedoeld openen en open blijven van een drukbeveiligingstoestel van de drukhouder	0,00080	0,0143	0,00082	0,147	0,00081	0,014	4	500
7.2.3	Breuk van de hoofdkoelmiddelleiding	0,684	4,50	0,695	4,58	0,696	4,51	40	500
7.3.2.2	Bezwijken van stoomgeneratorpijpen met een noodstroomsituatie (kortstondig)	0,19	3,40	0,19	3,48	0,19	3,41	4	500
7.4.2	Lekkage van een meetleiding die hoofdkoelmiddel bevat buiten de veiligheidsomhulling	0,12	2,42	0,13	2,47	0,12	2,42	4	500
8.2	Lekkage in een leiding van het afgassysteem	0,0099	0,0111	0,0100	0,011	0,0100	0,012	0,04	500
8.4.1	Beschadigen van splijststofelementen tijdens het hanteren	0,0097	0,191	0,0099	0,196	0,0090	0,191	0,4	500
9.1.2	Gevolgen van een aardbeving op het reactorhulpgebouw	0,20	0,717	0,20	0,733	0,20	0,717	4	500

*) In het kader van het Nationaal Plan Kernongevallenbestrijding is voorgesteld om de interventiewaarde voor de schildklierdosis voor kinderen te verlagen naar 100 mSv. Ook aan deze interventiewaarde wordt ruimschoots voldaan.

8 Milieugevolgen van de voorgenomen

8



De voorgenomen wijziging van de inrichting is MER-plichtig in het kader van de Wet Milieubeheer artikel 7.8 a t/m e jo 7.2, wijziging van de soort splijtstof, lijst D, artikel 22.3 sub 1. Een startnotitie is ingediend in mei 2008. Op deze startnotitie zijn zienswijzen ingebracht.

8.1 Inleiding

Een milieueffectrapportage is dienovereenkomstig opgesteld en wordt gelijktijdig met de vergunningsaanvraag ingediend [7].

De gevolgen voor mens en milieu van de voorgenomen wijziging van de inrichting worden in dit hoofdstuk samengevat.

8.2 Lozingen bij normaal bedrijf

Tijdens normaal bedrijf wordt door de kerncentrale een geringe hoeveelheid radioactieve stoffen uitgestoten naar de lucht en naar het water van de Westerschelde. Een uitgebreid meetprogramma in de omgeving van de kerncentrale laat zien dat deze lozingen zo gering zijn dat ze niet leiden tot meetbare hoeveelheden radioactieve stoffen in de omgeving van de kerncentrale. De gevolgen van de lozingen moeten daarom worden bepaald op basis van berekeningen. De totale jaardosis voor mensen in de omgeving van de kerncentrale ten gevolge van radioactieve lozingen naar de lucht en naar het water bedraagt circa 0,000022 mSv, wat ongeveer een factor 100.000 lager is dan de dosis voor mensen in de omgeving ten gevolge van kosmische straling en natuurlijke radioactiviteit.

In de huidige situatie wordt de berekende jaardosis voor mensen in de omgeving 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 dosis voor de omgeving.

De jaardosis ten gevolge van lozingen via het koelwater op de Westerschelde wordt voornamelijk bepaald door bèta/gamma stralers en door tritium in het hoofdkoelmiddel. Uit analyses is gebleken dat de dosis ten gevolge van de bèta/gammastralers niet afhankelijk is van de splijtstofsamenstelling.

8.2.1 MOX

8.2.1.1 Lozingen naar lucht

Bij inzet van MOX-splijtstofelementen daalt de neutronenflux in de kern. Bij inzet van 40% MOX zullen de lozing en dosisgevolgen van koolstof-14 tijdens normaal bedrijf met naar schatting 10% afnemen.

De dosis ten gevolge van de lozing van edelgassen zal met ongeveer 7% dalen ten gevolge van de veranderde samenstelling van de splijtstof. De lagere gemiddelde boorzuurconcentratie leidt bij inzet van 40% MOX tot een daling van de tritiumlozing.

Per saldo zullen de dosisgevolgen voor de omgeving ten gevolge van lozingen naar de omgevingslucht met ongeveer 10% afnemen.

8.2.1.2 Lozingen naar water

De dosisbijdrage van tritium neemt bij inzet van MOX elementen af ten gevolge van de verlaagde gemiddelde boorzuurconcentratie. De totale stralingsbelasting ten gevolge van lozingen naar de Westerschelde zal bij de inzet van MOX dus afnemen.

8.2.2 c-ERU

8.2.2.1 Lozingen naar lucht

Bij de inzet van c-ERU splijstofelementen zal de dosis voor de omgeving ten gevolge van de lozingen naar lucht niet of nauwelijks afwijken van de huidige situatie.

8.2.2.2 Lozingen naar water

De dosisbijdrage van tritium neemt bij inzet van c-ERU-elementen met maximaal 10% toe.

De totale stralingsbelasting ten gevolge van lozingen naar de Westerschelde zal bij de inzet van c-ERU met maximaal 2% toenemen.

8.3 Radioactief afval en gebruikte splijstofelementen

Het radioactief afval dat als gevolg van het bedrijfsproces ontstaat kan worden onderverdeeld in bedrijfsafval, gecompacteerd metaalafval en kernsplijtingsafval.

De voorgenomen activiteit heeft geen gevolgen voor de productie van bedrijfsafval bij de KCB. Voor wat betreft gecompacteerd metaalafval afkomstig uit opgewerkte splijstof is het aantal te ontladen splijstofelementen bepalend. Omdat het jaarlijks te ontladen aantal elementen door de voorgenomen wijziging niet verandert, wijzigt ook de hoeveelheid gecompacteerd metaalafval niet.

De samenstelling van het kernsplijtingsafval wijzigt bij de voorgenomen activiteit (en de alternatieven) wel enigszins. Het afval afkomstig van MOX-elementen bevat meer langlevende nucliden, waardoor de radioactiviteit van het kernsplijtingsafval bij de inzet van MOX minder snel afneemt. Dit heeft geen significante gevolgen voor de hoeveelheid en activiteit van het geconditioneerde afval dat bij de COVRA wordt opgeslagen. De toewijzing van afvalverpakkingen afkomstig van de opwerkingsfabriek aan EPZ gebeurt namelijk op basis van een geformaliseerd pro-rato principe⁶. De inhoud van de afvalverpakkingen is daarom niet exclusief afkomstig van EPZ-splijststoffen maar is representatief voor de gemiddelde eigenschappen van de splijstof die in La Hague in een bepaalde periode is ver-

werkt. Het verpakte afval dient te allen tijde blijven voldoen aan de door de Nederlandse overheid goedgekeurde specificaties.

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

8.4 Aanvoer van verse splijstofelementen

Verse MOX-elementen zijn wegens het verval van plutoniumisotopen radioactiever dan ENU-elementen. Daardoor hebben de MOX-elementen ook een grotere warmteproductie dan verse uraniumsplijstof. Voor MOX-elementen zijn daarom speciale transportverpakkingen beschikbaar. Na aankomst in de centrale dienen deze speciale transportverpakkingen volgens specifieke ontladingsprocedures te worden ontladen, rekening houdend met de radioactiviteit en temperatuur van de verse MOX splijstofelementen. De ontladingsprocedures zijn specifiek voor de centrale en afhankelijk van het type aantransportcontainers.

Op basis van het maximaal aantal benodigde transporten en het dosistempo is de maximale jaarlijkse dosis voor omwonenden en weggebruikers voor de beoogde situatie (inzet van 40% MOX en c-ERU) berekend, te weten respectievelijk $4,5 \cdot 10^{-5}$ en $0,0014$ mS/jaar. Hoewel het radiologisch risico van omwonenden en weggebruikers in termen van ontvangen stralingsdosis bij transport door de inzet van MOX en c-ERU fractioneel toeneemt, blijft de berekende maximaal te ontvangen dosis ($0,0014$ mSv) ruim binnen de limiet die is gesteld in het Besluit stralingsbescherming, te weten $0,1$ mSv voor leden van de bevolking.

Het aantransport van MOX-elementen zal voor medewerkers van de KCB in een hogere dosis resulteren dan het aantransport van $4,4 \pm 0,05$ gew % 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 betrokken

⁶ Het pro-rato principe houdt in dat na opwerking een hoeveelheid afval wordt teruggezonden die in evenredige verhouding staat tot de hoeveelheid aangeleverde splijstof.

werknemers van minder dan 10 mens mSv te verwachten is.

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 4,4 +/- 0,05 gew % 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 mens mSv bedroeg (ter vergelijking: de collectieve dosis van EPZ medewerkers bij transport van 4,4 +/- 0,05 gew % ENU-elementen bedraagt typisch 0,25 mens mSv).

De jaarlijkse individuele doses blijven zowel voor de aanvoer van MOX- als c-ERU-splijtstof-elementen ruim onder de wettelijke limiet voor individuele dosis van 20 mSv/jaar en de interne streefwaarde van 3 mSv/jaar die EPZ voor werknemers hanteert.

8.5 Afvoer van gebruikte splijtstofelementen

De hoeveelheid radioactiviteit in de gebruikte splijtstofelementen is 500 dagen na afschakeling bij de inzet van MOX circa 30% hoger dan bij de huidige elementen. Voor het afvoeren van gebruikte splijtstofelementen, zowel voor 4,4 +/- 0,05 gew % ENU-elementen, als c-ERU en MOX, wordt gebruik gemaakt van een gekwalificeerde transportverpakking. Het aantal transporten dat voor het afvoeren van de elementen noodzakelijk is, verandert door de inzet van MOX en c-ERU niet. Door langere afkoeling en toepassing van een ander ontwerp van de transportverpakking zal de stralingsbelasting van het personeel van EPZ niet negatief worden beïnvloed. Evenmin veranderen de radiologische gevolgen voor omwonenden en treinreizigers.

8.6 Proliferatie

Alle splijtstoffen die bij de kerncentrale Borssele worden ingezet staan onder toezicht van IAEA en Euratom om proliferatie uit te sluiten. Het is bekend dat plutonium in theorie kan worden gebruikt voor de productie van kernwapens. Dit vereist echter een bijzondere kwaliteit plutonium die niet vrijkomt bij het opwerken van bestraalde splijtstaven uit commerciële kernreactoren. Het plutonium dat vrijkomt na opwerken wordt als grondstof voor MOX gebruikt, hetgeen een vreedzame toepassing is van plutonium. Het gebruik van MOX vermindert de hoeveelheid plutonium en daarmee de kans op niet-vreedzame toepassing.

De effecten van de voorgenomen inzet van c-ERU zijn uit het oogpunt van non-proliferatie niet significant.



Lijst van tabellen

pagina

Gerealiseerde en vergunde inzet van MOX-elementen in Europese drukwaterreactoren.	19
Typische initiële nucliden samenstelling van de zware metalen (ZM) in een MOX-element per type MOX-splijtstofstaaf en de totale massa zware metalen per element.	20
Resultaten van de analyse naar het mechanisch en thermisch gedrag van de MOX-splijtstofstaven.	21
Weergave van de belangrijkste resultaten van de MOX-haalbaarheidsstudie.	23
Gerealiseerde inzet van c-ERU en bijbehorende ENU-equivalentie.	24
Typische initiële isotopische samenstelling van het uranium in een c-ERU-element.	25
Weergave van de belangrijkste resultaten van de ondersteunende c-ERU-analyses.	25
Representatieve begingebourtenissen voor de radiologische analyses. Deze begingebourtenissen zijn voor de inzet van MOX-elementen opnieuw beschouwd.	37
Dosislimieten voor personen tot 16 jaar en personen vanaf 16 jaar als functie van het kansengebied.	42
Toetsing van de berekende ongevalsdoses aan de dosislimieten.	43
Overzicht van de ingevolge het Bkse vereiste informatie voor het aanvragen van een wijzigingsvergunning.	50
Overzicht van de reeds verleende vergunningen.	52

Lijst van figuren

Historische termijn contractprijzen natuurlijk uranium.	12
Ontwikkeling van de kosten van uraniumverrijking.	12
Model voor de kostencomponenten van alternatieve soorten kernbrandstof voor de KCB.	15
Schema van de positie van verschillende MOX-splijtstofstaven in een MOX-element.	20
Ontwerpgrenswaarden voor maximale enthalpieverhogingen als gevolg van een RIA ongeval als functie van de maximale locale opbrand.	31
Schematisch bovenaanzicht van het splijtstofopslagbassin. De afgesloten posities zijn in het zwart weergegeven.	39

10 Referenties



- [1] KCB: Neutronenphysikalische Auslegung von MOX-Brennelementen, A1C-1334588-o, AREVA, 30 april 2008
- [2] Veiligheidsrapport kernenergie-eenheid centrale Borssele, VR-KCB 93, rev. 6
- [3] Borssele: Fuel Rod Design Report for MOX fuel in M5 fuel rods, A1C-1334810-1, AREVA, 19 mei 2009
- [4] KCB-Reaktorphysikalische Machbarkeitsstudie zum Einsatz von MOX-Brennelementen, A1C-1334644-o, AREVA, 25 april 2008
- [5] Anforderungen an die Boriersysteme beim Einsatz von MOX-BE, NESS-G/2009/de/0030A, AREVA, 27 mei 2009
- [6] KCB, Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen für Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns, A1C-1302106-3, Siemens, 16 december 1996
- [7] Milieueffectrapportage Kerncentrale Borssele Brandstofdiversificatie, juli 2010
- [8] KCB, MOX-Studie; Verhalten des Reaktorkerns beim Störfall Steuerelementauswurf für Kernbeladungen mit MOX-BE mit bis zu 5,4% Pu fiss, AREVA, A1C-1337572-o
- [9] KCB – Reaktorphysikalische Verträglichkeitsstudie zum Einsatz von ERU-brennelementen, A1C-1311067-o, AREVA, 12 juni 2002
- [10] Übertragbarkeit der Ergebnisse der U/MOX-Analysen auf den Einsatz von ERU-Brennelementen (BE), AREVA, 11 december 2008
- [11] Onderbouwende Analyses van ERU Splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB, NRG-22276/09.97387, NRG, 7 december 2009
- [12] Berechnung der Nachzerfallsleistung im BE-Lagerbecken mit einer Mischbelegung mit Uran-BE (4,45% U235) und MOX-BE (5,41% Pu-fiss in U-tails), NESS-G/2008/de/0089A, AREVA, 4 december 2008

- [13] Onderbouwende Analyses van MOX-splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB, NRG-22276/o8.90048, NRG, 18 maart 2010
- [14] KCB, PIE 1.4 Fehlöffnen von Armaturen im Sekundärkreis, NEPR-G/2008/de/0178A, AREVA, 17 november 2008
- [15] KCB, Einsatz von MOX-Brennelementen – Plausibilitätsbetrachtungen für NON-LOCA und SB-LOCA, NEPR-G/2008/de/0291A, AREVA, 20 maart 2009
- [16] KCB: Einsatz von MOX-Brennelemente – PIE 2.3.2 TUSA ohne FDU, NEPR-G/2008/de/0160A, AREVA, 17 november 2008
- [17] KCB: PIE 3.2 Bruch einer Hauptkuhlmittelpumpenwelle, NEPR-G/2008/de/0262A, AREVA, 2 september 2009
- [18] PIE 7.1.1 inadvertent opening and closing of one pressurizer safety valve, AREVA brief met datum 24 juli 2009
- [19] KCB: Nachweis der ausreichenden Kernkuhlung bei Kuhlmittelverluststorfallen beim Einsatz von MOX-Brennelementen, AREVA, NEPR-G/2008/de/0244, 28 oktober 2009
- [20] KCB: MOX PIE 9.1.1 Frischdampfleitungsbruch infolge von Erdbeben, NEPR-G/2009/de/0189A, AREVA, 21 januari 2010
- [21] KCB, SBLOCA-Analysen: Zusammenfassende Dokumentation der Ergebnisse zu den Auslegungs-Storfallen, KWU E412/93/2073a, 4 augustus 1993
- [22] KCB MOX-BE: NON-LOCA Analyse PIE 10.5: Vollständiger Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung mit Versagen des Schnellabschaltsystems, KWU NDS1/00/2003, 10 januari 2000
- [23] Anfallende nachzerfallsleistung im Reaktor und BE-Lagerbecken bei einer Mischbelegung mit Uran-Brennelementen (4,45w/o U235) und MOX-Brennelementen (5,41 w/o Pu-fiss in U-tails), NESS-G/2008/de/0090A, AREVA, 4 december 2008
- [24] Kritikaliteitsanalyses Splijtstof Opslag Bassin KCB, NRG-22295/o8.91160, NRG, 22 december 2008
- [25] RS-Handbuch 3-33.2 Störfallberechnungsgrundlagen für die Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR gemäss § 28 Abs. 3 der StrlschV und Neufassung der Berechnung der Strahlenexposition, vom 29. Juni 1994/Stand 12/2001 (onveranderd)

Bijlage a

a



Vergunningsaanvragen ingevolge Bkse

In de hierna volgende tabel A-1 wordt een overzicht gegeven van de ingevolge het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse) vereiste informatie voor het aanvragen van een wijzigingsvergunning. Per artikel van het Bkse wordt in de tweede kolom de inhoud van dit artikel en in de laatste kolom de invulling van dit vereiste gegeven. Hierbij wordt, waar nodig, verwezen naar andere aanvraagdocumenten.

N.B. De verwijzingen MER en VR betreffen het Milieueffectrapport Kerncentrale Borssele 'Milieueffectrapportage Kerncentrale Borssele Brandstofdiversificatie' [7] respectievelijk het Veiligheidsrapport Kernenergie-eenheid centrale Borssele [2], die als bijlagen bij de vergunningsaanvraag zijn gevoegd.

Tabel A-2 Overzicht van de ingevolge het Bkse vereiste informatie voor het aanvragen van een wijzigingsvergunning.

Artikel	Inhoud	Respons
3.4 a	Naam en adres aanvrager	Niet gewijzigd
3.4 b	Een feitelijke omschrijving van hetgeen de aanvrager met de betrokken splijtstoffen of ertsen wenst te doen onderscheidenlijk een aanduiding van de betrokken inrichting of uitrusting onder vermelding van het gebruik, dat de aanvrager van die inrichting of uitrusting wenst te maken.	Niet gewijzigd
3.4 c	Voor zover een of meer der in de artikelen 4 tot en met 11 vervatte bepalingen op de betrokken aanvraag van toepassing zijn, de gegevens, welke de aanvraag uit dien hoofde in het bijzonder dient te bevatten dan wel, ingeval zodanige gegevens in een bij de aanvraag behorende bijlage zijn vermeld, een korte aanduiding van de aard en de inhoud dezer gegevens met verwijzing naar de betrokken bijlage.	Zie hieronder
3.4 d	Een opgave van de tijdsduur, waarvoor de vergunning wordt verlangd.	Niet gewijzigd
3.4 e	Indien een vergunning wordt aangevraagd voor een handeling die in de krachtens artikel 19 in samenhang met artikel 4, tweede lid, van het Besluit stralingsbescherming geldende regeling, als gerechtvaardigd is bekendgemaakt, een verwijzing naar die bekendmaking.	Zie Regeling bekendmaking rechtvaardiging gebruik van ioniserende straling (Stcrt. 2002-248) onder categorie I.B.2 'Energieopwekking'

Artikel	Inhoud	Respons
4.1 a	Een opgave van de hoeveelheden, de chemische en fysische toestand, de vorm, het gehalte en de verrijkingsgraad, zomede, voor wat bestraalde splijtstoffen betreft, een zo nauwkeurig mogelijke opgave van de activiteit der splijtstoffen.	Voor beschrijving van de reactorkern, de splijtstofstaven, de regelementen, de opslag van splijtstof en een opgave van de nuclide-inventaris wordt verwezen naar het VR o.a. de hoofdstukken 4 en 11.
4.1 b	Een opgave van het doel, waarvoor de aanvrager splijtstoffen voorhanden wenst te hebben.	Niet gewijzigd
4.1 c	Een opgave en beschrijving van de plaats, waar de splijtstoffen voorhanden worden gehouden, dan wel, indien ten aanzien van de inrichting of uitrusting, waarin de splijtstoffen voorhanden worden gehouden, een vergunning als bedoeld in artikel 15, onder b of c, van de wet is vereist, een opgave van die inrichting of uitrusting, onder verwijzing naar de ten aanzien daarvan verleende vergunning, dan wel naar de aanvraag om een zodanige vergunning.	Niet gewijzigd.
4.1 d	Een beschrijving van de maatregelen die door of vanwege de aanvrager zullen worden getroffen ter voorkoming van schade.	In paragraaf 5.4 van dit aanvraagdocument wordt beschreven welke wijzigingen worden doorgevoerd in de bedrijfsvoering met KCB.
4.1 e	Een risicoanalyse van de schade van het voorhanden hebben van de onder a bedoelde splijtstoffen buiten de onder c bedoelde plaats, inrichting of uitrusting.	Er wordt verwezen naar het VR (hoofdstuk 15) waarin een risicoanalyse van de schade buiten de inrichting als gevolg van de ontwerpongevallen wordt gegeven.
4.1 f	Een opgave van alle handelingen en werkzaamheden met splijtstoffen, ertsen, radioactieve stoffen en toestellen binnen de locatie die meldingsplichtig of vergunningplichtig zijn krachtens dit besluit, het Besluit stralingsbescherming of het Besluit vervoer splijtstoffen, ertsen en radioactieve stoffen.	Niet gewijzigd
11.1 a	Een opgave van de vergunning, krachtens welke de betrokken inrichting is opgericht dan wel in werking gebracht of gehouden.	Zie bijlage B bij dit aanvraagdocument
11.1 b	Een beschrijving van de voorgenomen wijziging.	Zie onderhavige rapport
11.1 c	Indien de aanvraag betrekking heeft op een inrichting als bedoeld in artikel 6, 7 of 8 en de voorgenomen wijziging van invloed is op een of meer gegevens als vermeld in het ter verkrijging van de onder a bedoelde vergunning overgelegde veiligheidsrapport of de risicoanalyse, bedoeld in artikel 6, onder h, een desbetreffende aanvulling hiervan (ontwerp-ongevallen)	Zie VR en de risicoanalyse uit het MER (met name paragraaf 6.4)
11.1 d	Indien de aanvraag betrekking heeft op een inrichting als bedoeld in artikel 6, 7 of 8 en de voorgenomen wijziging van invloed is op een of meer gegevens als vermeld in de ter verkrijging van de onder a bedoelde vergunning overgelegde risicoanalyse, bedoeld in artikel 6, eerste lid, onder i, een desbetreffende aanvulling van die risicoanalyse (buiten-ontwerp-ongevallen)	Zie VR en de risicoanalyse uit het MER (met name paragraaf 6.4)

a

Bijlage b



Opgave van de verleende vergunningen

De hierna volgende tabel B1 geeft een overzicht van de reeds verleende vergunningen ingevolge artikel 15 van de Kernenergiewet.

Tabel B-3 Overzicht van de reeds verleende vergunningen.

Kenmerk	Datum afgifte beschikking	Omschrijving
372/352/EEK	23-03-1972	Vergunning voor het oprichten van een kernenergiecentrale te Borssele en het voorhanden hebben van splijtstoffen.
372/1132/EEK	18-06-1973	Vergunning voor het in werking brengen en in werking houden van de kernenergiecentrale te Borssele.
675/540	08-09-1975	Koninklijke besluit nr. 16, m.b.t. oprichtingsvergunning.
378/II/66EEK	27-01-1978	Wijziging bedrijfsvergunning n.a.v. het bouwen van een afvalgebouw.
679/842	13-09-1979	Koninklijke besluit nr. 46, m.b.t. bedrijfsvergunning.
380/II/330/EEK	18-04-1980	Vergunning voor het wijzigen van de kernenergiecentrale te Borssele en het voorhanden hebben van ten hoogste 200 ton uranium (compactrekken).
nr. 189326 DGMH/S/VK/AS	24-09-1982	Wijziging bedrijfsvergunning in verband met intrekking van het veiligheidsbesluit Ioniserende Stralen (VBIS).
149/463	07-03-1984	Aanvullende voorschriften, verbonden aan de vergunning tot het in werking houden van de kernenergiecentrale te Borssele (deskundigheid personeel).
687/45	12-11-1986	Koninklijke besluit nr. 26, m.b.t. bedrijfsvergunning (compactrekken).
nr. 2537041	27-03-1987	Wijziging bedrijfsvergunning i.v.m. vervallen Radioactieve stoffenbesluit Kernenergiewet (Stb.1981, 564).
DGA/KFD/88/12587	27-01-1989	Aanvullende voorschriften i.v.m. invoering kwaliteitsborgingsprogramma.
E/EEK/90039894	25-04-1990	Overdracht van destijds vigerende kernenergiewetvergunningen van N.V. PZEM aan N.V. EPZ.
E/EE/KK/91001017	13-02-1992	Aanvulling van voorschrift II.1 t/m II.1d (betreft implementatie NVR en 2- en 10-jaarlijkse evaluaties). * Vervanging voorschrift II.37 (betreft geluidshinder).
E/EE/KK/93041207	28-06-1993	Wijziging bedrijfsvergunning n.a.v. tijdelijke opslag van licht besmet materiaal. (cementeerinstallatie).
E/EE/KK/94053428	02-08-1994	Aanpassing van bedrijfsvergunning n.a.v. MOD-project.
E/EE/KK/96076055	20-12-1996	Wijziging vergunning kernenergiecentrale Borssele, inzake hogere verrijking.
E/EE/KK/99004681	01-06-1999	Beschikking inzake MOD, aanpassingen n.a.v. nieuwe revisie Veiligheidsrapport (KCB93.REV.2) zijn hierin ook verwerkt.
E/EE/KK/99004680	01-06-1999	Beschikking inzake Optimalisatie Splijtstof.
SAS/2004084087	22-09-2004	Beschikking hogere verrijking.
Brief Raad van State 200408865/1	03-08-2005	Uitspraak Raad van State, artikelen II.B.30 t/m II.B.34 uit SAS/2004084087 m.b.t. financiële regelingen vervallen verklaard.
SAS/2005212596	13-12-2005	Beschikking wijzigen van de kernenergiecentrale Borssele (10-jaarlijkse veiligheids-evaluatie), aanpassing vergunningsvoorschrift II. Ba.2 m.b.t. de opslag van radioactieve bronnen.

Colofon

Teksten en productie EPZ Projectgroep Brandstofdiversificatie / NRG

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
Website: www.mengoxide.nl / www.epz.nl