Algemene informatie over de Belgische splijtstofcyclus

Deel 1

Bijwerking op 31 december 2016

economie
FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie

.be

De opdracht van de FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie bestaat erin de voorwaarden te scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België. In dat kader heeft de Algemene Directie Energie dit informatiecompendium over het Belgisch historisch en wettelijk kader en over de nucleaire brandstofcyclus uitgegeven met het doel de basis over het beheer van de nucleaire bestraalde splijtstof te leggen.

Document opgemaakt door
FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie
Algemene Directie Energie - Afdeling nucleaire toepassingen

De redactie werd afgesloten eind augustus 2017.

Federale Overheidsdienst Economie, K.M.O., Middenstand en Energie
Vooruitgangstraat 50
1210 Brussel

Ondernemingsnr.: 0314.595.348

https://economie.fgov.be

tel.: 0800 120 33 (gratis nummer)

Verantwoordelijke uitgever: Jean-Marc Delporte
Voorzitter van het Directiecomité
Vooruitgangstraat 50
1210 Brussel

Internetversie

Woord vooraf

België gebruikt sinds 1975 kernenergie voor zijn industriële elektriciteitsproductie. Aanvankelijk werd om de gebruikte Belgische kernbrandstof te beheren, voor opwerking geopteerd. Een keuze die vervolgens in vraag werd gesteld.

Een parlementair debat uit 1993 draaide rond de vraag of de opwerking van bestraalde splijtstoffen wel de geschikte methode was en rond het gebruik van gerecycleerd plutonium (MOX-splijtstof) in de Belgische kerncentrales. Naar aanleiding van dat debat keurde de Kamer van Volksvertegenwoordigers een resolutie goed, waarin ze zich uitspreekt over beide kwesties en de volgende beslissingen neemt:

- een grondige evaluatie van de opties "opwerking" en "niet-opwerking" om een definitieve keuze te kunnen maken voor de toekomst;
- toelating om de reeds afgesloten contracten binnen de optie "opwerking" voort te zetten en toelating om de energiegrondstoffen teruggewonnen bij die opwerking te hergebruiken;

De Ministerraad sloot zich aan bij die resolutie. De raad werd in die periode geregeld ingelicht over de vorderingen van het werk dat de betrokken instellingen en ondernemingen leverden, in 1998 volgde er dan een synthese- en evaluatierapport. Naar aanleiding van dat rapport vraagt de Ministerraad in zijn beslissing van 4 december 1998 aan de "betrokken instanties om zo snel mogelijk een nieuw rapport op te stellen met daarin een allesomvattende visie voor de benedenfase van de splijtstofcyclus". Dat rapport werd tot op heden nog niet voorgelegd.

In diezelfde beslissing wordt overigens verwezen naar een vergelijking tussen twee opties voor de splijtstofcyclus, meer bepaald:

- de opwerking van bestraalde splijtstoffen, om het mogelijk te maken uranium en plutonium, die ongeveer 97 % van de massa aan bestraalde splijtstof uitmaken, opnieuw op te nemen in de splijtstofcyclus en om het resterende afval te conditioneren. Dat ultiem afval zou dan definitief worden opgeslagen in een geologische bergingsinstallatie. Dit is de optie opwerking of "gesloten cyclus";
- de conditionering van bestraalde splijtstoffen in de staat waarin ze de reactor verlaten en voorafgaand aan hun definitieve berging. Dit is de optie "directe berging" of "open cyclus".

In juli 2011 vraagt de Europese Commissie, in haar Richtlijn 2011/70/Euratom van 19 juli 2011, aan de lidstaten om tegen augustus 2015 een Nationaal Programma uit te werken voor het verantwoorde en veilige beheer van verbruikte kernbrandstof en van radioactief afval. Dat vergt uiteraard een grondige denkoefening op nationale schaal over de te volgen strategie.

Om dat Nationale Programma voor te bereiden, hebben een aantal lidstaten intussen verschillende mogelijke pistes geanalyseerd in functie van hun wetgeving en van de specifieke kenmerken van hun kernreactorpark. Ook België heeft die oefening moeten doen en op voorstel van minister van Economie Kris Peeters en minister van Energie Marie Christine

Marghem, heeft de Ministerraad van 30 juni 2016 een ontwerp van ministerieel besluit goedgekeurd tot vaststelling van het Nationale Programma voor het beheer van verbruikte splijtstoffen en radioactief afval.

Dat document kadert in die context. Het heeft als doel om op een begrijpelijke en overzichtelijke manier het kader te beschrijven voor het beheer van de splijtstofcyclus in België en om de geschiedenis ervan te schetsen. In dat opzicht stelt het eerste deel van dit document de actoren voor uit de Belgische splijtstofcyclus en beschrijft het de hierboven vermelde globale context en het wettelijke kader voor het beheer van die cyclus, zowel op nationaal als op internationaal vlak. Het tweede deel snijdt de wat meer technische aspecten aan die nodig zijn om een inzicht te krijgen in de problematiek van het beheer van radioactief afval en om de gevolgen van die problematiek te vatten. Zo lichten we eerst nog eens kort toe hoe een kernreactor juist werkt en zetten we vervolgens in detail de verschillende stappen van de splijtstofcyclus uiteen. Een tweede sectie is helemaal gewijd aan radioactief afval. Daarin beschrijven we eerst het eigenlijke concept radioactiviteit, om vervolgens dieper in te gaan op de problematiek van radioactief afval, op de manier waarop het wordt ingedeeld en op de bijzonderheden die bepalend zijn voor het beheer ervan. We besluiten dit document met een eerste raming van de hoeveelheid kernafval die de Belgische bestraalde splijtstof zal voortbrengen, afhankelijk van de cyclus (open of gesloten).

Dit document is een bijwerking de dato 31 december 2016 van een document waarvan de eerste editie dateerde van 2014. U kunt het raadplegen (en downloaden) op de website van de FOD Economie. Wegens de levensduurverlenging van verscheidene reactoren en de waargenomen ontwikkelingen in het scenario voor het beheer van splijtstoffen was het nodig dit document bij te werken. Het is het eerste deel van een reeks studies van de FOD Economie waarin de mogelijke strategieën om het radioactieve afval uit de Belgische splijtstofcyclus te beheren, worden geschetst en geanalyseerd. De eerste studie was afgesloten eind 2014 en werd door een team van internationale experten onderworpen aan een peerreview. De tweede studie is een bijwerking de dato 31 december 2016 en bekijkt de weerslag van de gebeurtenissen die intussen hebben plaatsgevonden op de voor België denkbare strategieën.

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

Inhoud

Woord vooraf 3
Lijst van tabellen 6
Lijst van figuren 6

1. ALGEMENE INFORMATIE OVER DE BELGISCHE SPLIJTSTOFCYCLUS 7

1.1. Het beheer van de splijtstofcyclus in België 7
1.1.1 De actoren van de Belgische splijtstofcyclus 7
1.1.2. Organisatie van de splijtstofcyclus 12
1.1.3. Het beheer van de splijtstofcyclus tot 1998 12
1.1.4. De ontwikkelingen sinds 1998 18

1.2. Samenvatting van het wettelijke kader 30
1.2.1 Op Belgisch niveau 30
1.2.2 Op Europees niveau 35
1.2.3. Op internationaal niveau 38

2. TECHNISCHE INFORMATIE OVER DE CYCLUS VAN SPLIJTSTOFFEN EN RADIOACTIEF AFVAL 42

2.1. De splijtstofcyclus 42
2.1.1. De kernreactoren 43
2.1.2 De bovenfase van de splijtstofcyclus 49
2.1.3. De reactorfase 52
2.1.4. De benedenfase van de cyclus 52
2.1.5. Het transport 78
2.1.6. De impact op het leefmilieu 81

2.2. Radioactief afval 82
2.2.1. Radioactiviteit 82
2.2.2 De radiotoxiciteit 85
2.2.3. De problematiek van radioactief afval 88
2.2.4. De safeguards en de non-proliferatie 90
2.2.5. De previsionele inventaris voor het radioactieve afval uit de splijtstofcyclus 91

Bijlagen 96

Bijlage A. Glossarium 96

Bijlage B. Vervalreeksen 102

Bijlage C. Massasamenstelling van verse en verbruikte UOX-, MOX- en REU-splijtstof 103

Bijlage D. Strategieën in de andere landen 105
D.1 Europa 105
D.2 De rest van de wereld 110

Bibliografie 115

Lijst van tabellen

Tabel 1. Aantal verse MOX-brandstofelementen geladen in de Belgische reactoren in de periode 1995-2006 17
Tabel 2. Splijtstofelementen en hun eigenschappen. 51
Tabel 3. Lozingen van Areva in het milieu in 2016, in TBq (10^{12} becquerel), en de toegelaten limieten in absolute waarde, geklasseerd per isotoop [63]. 67
Tabel 4. Grootte van de installatie voor geologische berging in de twee referentiescenario's. 71
Tabel 5. Previsionele inventaris voor het radioactieve afval (2013) 91
Tabel 6. Raming (eind 2012) van het aantal verbruikte brandstofelementen na 40 jaar exploitatie, per reactor- en elementtype. 94
Tabel 7. Previsionele inventaris op 31 december 2016 van de hoeveelheid verbruikte brandstofelementen in het referentiescenario van Synatom 95
Tabel 8. Niet-limitatieve massasamenstelling van verse en verbruikte splijtstof 103
Tabel 9. Overzicht van de situatie op 15 september 2012 inzake beheer van bestraalde splijtstoffen en de bijhorende wettelijke basis in de verschillende OESO-landen met een of meerdere kerncentrales 106

Lijst van figuren

Figuur 1. Actoren in de Belgische nucleaire sector 12
Figuur 2. Schematische weergave van de splijtstofcyclus 42
Figuur 3. Schematische weergave van een PWR-reactor 43
Figuur 4. Brandstofstaaf met Uranium-tabletten 51
Figuur 5. Foto van een splijtstofelement met vierkante doorsnede, bestemd voor een PWR-reactor. 51
Figuur 6. Isotopische samenstelling van UOX-, REU- en MOX-elementen, vers of bestraald (burn-up van GWd/t en afkoelperiode van 3 jaar) 54
Figuur 7. Illustratie van het PUREX-scheidingsprocedé. 55
Figuur 8. Illustratie van het UREX-scheidingsprocedé. 56
Figuur 9. Illustratie van het COEX-scheidingsprocedé. 56
Figuur 10. Illustratie van de opeenvolgende toepassing van de PUREX- en de TRUEX-methode op bestraalde splijtstof. 57
Figuur 11. Illustratie van pyroprocessing. 57
Figuur 12. Illustratie van het scheidingsprincipe gevolgd door transmutatie. 67
Figuur 13. Veiligheidsfunctie van een geologische berging 68
Figuur 14. De Boomse kleilaag in België. 69
Figuur 15. Concept voor geologische berging zoals beschreven in het NIRAS-afvalplan. 69
Figuur 16. Kunstmatige barrières in de geologische berging. 70
Figuur 17. Kosten van de splijtstofcyclus en van de benedenfase van de cyclus voor de verschillende reactorvloten en strategieën, met een actualiseringspercentage van 3% 77
Figuur 18. Verdeling naar bron van de dosis uit ioniserende straling in België 85
Figuur 21. Radiotoxiciteit van bestraalde UOX-splijtstof met de bijdrage van de verschillende elementen die ze bevat. 86
Figuur 20. Ingenomen radiotoxiciteit uitgedrukt in Sv/t bestraalde splijtstof 87
Figuur 21. Vervalreeksen '4n+1' (linksboven), '4n+3' (rechtsboven), '4n' (linksonder) en '4n+2' (rechtsonder). 102

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

1. ALGEMENE INFORMATIE OVER DE BELGISCHE SPLIJTSTOFCYCLUS

1.1. Het beheer van de splijtstofcyclus in België

In dit rapport wordt de volgende terminologie gebruikt :

- "splijtstof" verwijst uitsluitend naar de splijtstof die ontwikkeld is voor een in België uitgebate kernreactor voor elektriciteitsproductie;
- "bestraalde splijtstof" verwijst naar de splijtstof die een reactorfase heeft ondergaan en die definitief ontladen is, maar eigendom van Synatom blijft en waarvoor de keuze inzake beheer op lange termijn nog niet genomen is;
- "verbruikte splijtstof" is elke bestraalde splijtstof die als afval is verklaard en waarvan het beheer aan NIRAS werd toevertrouwd.

1.1.1 De actoren van de Belgische splijtstofcyclus

De Belgische nucleaire industrie in de brede zin bestrijkt verschillende domeinen: elektriciteitsproductie, fundamenteel onderzoek, de productie van radio-isotopen, dosimetrie, nucleaire geneeskunde enz. Maar omdat dit document als doel heeft om een stand van zaken op te maken van de cyclus van de splijtstof die in de Belgische kerncentrales voor elektriciteitsproductie bestraald is[1], beperken we ons hier tot een beknopte voorstelling van de actoren die daarbij betrokken zijn.

Dit rapport houdt geen rekening met de splijtstof die bestraald is in de onderzoeksreactoren of de experimentele reactoren die in België operationeel zijn.

Synatom: staat in voor het beheer van de splijtstofcyclus

Synatom nv is een private onderneming waarvan het kapitaal volledig in handen is van Electrabel [1], [2][2], met uitzondering van een "bijzonder aandeel"[3] dat in handen is van de Belgische Staat; dat aandeel verleent aan de Belgische Staat bijzondere rechten binnen de Raad van Bestuur en de Algemene Vergadering van Synatom. Die golden share geeft de Belgische Staat bovendien de mogelijkheid om twee vertegenwoordigers af te vaardigen in de Raad van Bestuur van Synatom.

Synatom staat in voor het beheer van de volledige splijtstofcyclus voor de kerncentrales in België:

- **Bovenfase van de cyclus**: Synatom verzekert de uraniumbevoorrading van de Belgische kerncentrales; van de aankoop en de verrijking behalve de productie van splijtstofelementen.

---

[1] Zie glossarium in bijlage A.
[2] Verwijzingen in de vorm [1], [2], ... vindt u terug in de bibliografie.
[3] De "golden share" werd ingevoerd op grond van lid 1 uit artikel 179 van de wet van 8 augustus 1980.

- **Reactorfase**: Synatom blijft eigenaar van de materie die voor gebruik ter beschikking wordt gesteld van de exploitanten van de kernreactoren.
- **Benedenfase van de cyclus**: Synatom behandelt de splijtstofelementen na hun gebruik in een reactor (in de rest van deze studie aangeduid met "bestraalde brandstof") en na een afkoelingsperiode in de centrale. Synatom is verantwoordelijk voor de bestraalde of verbruikte[4] brandstof en voor het bijhorende geconditioneerde afval tot het wordt overgenomen door NIRAS. Hiervoor heeft Synatom een reeks overeenkomsten gesloten met NIRAS voor de overname van haar radioactief afval.
- **Beheer van de nucleaire voorzieningen**: op grond van de wet van 11 april 2003 is Synatom de beheerder van de voorzieningen aangelegd voor de ontmanteling van de Belgische kerncentrales en voor het beheer van de splijtstoffen bestraald in die centrales.

Synatom staat tevens in voor het beheer van de splijtstoffen herwonnen bij de vroegere opwerking van bestraalde brandstof (in de vorm van MOX[5]- en REU[6]-splijtstofelementen).

Electrabel: exploitant, producent en leverancier van energie

Electrabel nv, filiaal van de groep ENGIE [3], baat de kerncentrales uit van Doel (4 reactoren: Doel 1, Doel 2, Doel 3 en Doel 4) en Tihange (3 reactoren: Tihange 1, Tihange 2 en Tihange 3). Electrabel beheert de brandstoffen zodra ze toekomen in de centrale en tot de bestraalde kernbrandstof verwijderd wordt uit de reactor en in het reactorbekken wordt geplaatst om af te koelen.

EDF Luminus: producent en leverancier van energie

EDF Luminus is een Belgische energieproducent en -leverancier die voor 68,6 % in handen is van EDF International, via EDF Belgium [4]. De overige aandeelhouders zijn Belgisch waarvan Publilec (26,4 %) en Socofe (4,7 %) de belangrijkste zijn.

EDF Luminus baat geen kerncentrales uit, maar heeft wel een participatie in de elektriciteitsproductie in de kerncentrales van Doel en Tihange.

FBFC: fabrikant van nucleaire brandstofelementen

De Franco-Belge de Fabrication du Combustible (FBFC) is een filiaal van Areva [5]. Zij produceert UOX[7]-brandstofelementen voor DWR- (drukwaterreactoren, zoals de 7 Belgische reactoren) en KWR-reactoren[8] (kokendwaterreactoren) en heeft ook MOX-brandstofelementen gemaakt.

Haar fabriek in Dessel is in volle ontmanteling.

---

[4] Zie glossarium in bijlage A.
[5] MOX = "Mixed Oxide" in het Engels, gemengde oxides.
[6] REU = gerecycleerd uranium.
[7] UOX = Uranium Oxide (U_3O_8).
[8] Ook gekend als PWR (pressurised water reactor) en BWR (boiling water reactor).

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

SCK•CEN: nationaal onderzoekscentrum

Het Studiecentrum voor Kernenergie (in het Frans "Centre d'Etudes de l'Energie Nucléaire", of afgekort SCK•CEN) is een stichting van openbaar nut met een privaatrechtelijk statuut, onder de voogdij van de Belgische federale ministers van economie en energie. Het SCK•CEN is het Belgische expertisecentrum inzake nucleaire wetenschappen en technologieën en ioniserende straling [6].

Het SCK•CEN doet vooral onderzoek naar de veiligheid van nucleaire installaties, naar de veilige verwerking en het veilige beheer van radioactief afval, naar de bescherming van mens en milieu tegen straling en naar het beheer van splijtstoffen en andere strategische grondstoffen. Het SCK•CEN is ook uitbater van een reeks nucleaire installaties, zoals onderzoeksreactoren, en produceert bijgevolg ook radioactief afval.

Belgonucleaire

Belgonucleaire nv, een vennootschap die via het SCK•CEN voor 50 % gecontroleerd wordt door de Belgische staat, baatte tussen 1986 en 2006 op de site in Dessel de fabriek uit voor de productie van splijtstof van het MOX-type [7]. De ontmanteling van de fabriek is voltooid.

NIRAS: nationaal beheerder van het radioactieve afval

NIRAS, de Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen, werd in 1980 opgericht door de Belgische Staat. Deze overheidsinstelling staat in voor het beheer van al het radioactieve afval dat in België geproduceerd wordt, ongeacht de oorsprong en herkomst, op een zodanige manier dat mens en milieu doeltreffend en permanent beschermd worden tegen de mogelijke risico's [8].

NIRAS vervult in de eerste plaats de volgende taken

- controle op de productie van radioactief afval en op de conditionering van dat afval door de producenten;
- opslag van het radioactieve afval buiten de vestigingen van de producenten;
- transport van het radioactieve afval;
- het instellen van een systeem voor het veilige langetermijnbeheer van dat radioactief afval: zo werkt NIRAS momenteel aan een systeem voor de bovengrondse berging van afval van categorie A[9] op het grondgebied van de gemeente Dessel en onderzoekt het een geologisch bergingsconcept voor afval van categorieën B en C;
- het opmaken van een inventaris van alle nucleaire installaties en van alle terreinen die radioactieve stoffen bevatten;
- het technische en financiële toezicht op de ontmanteling van nucleaire installaties en de uitvoering ervan voor producenten die dat vragen of die failliet gaan.

[9] De definities van de verschillende categorieën radioactief afval zijn te vinden in deel 2.2.

Belgoprocess

Belgoprocess is een naamloze vennootschap en dochtermaatschappij van NIRAS, gevestigd te Dessel [9]. De onderneming staat in voor de ontmanteling van de stilgelegde nucleaire installaties van Eurochemic en voor de ontmanteling van de oude 'afvalinstallaties' van het SCK•CEN. Zorgt voor ook de verwerking en de opslag van radioactief afval voor de producenten die daarom vragen. Verder baat Belgoprocess een hele reeks opslaggebouwen voor radioactief afval uit.

EURIDICE

EURIDICE (European Underground Research Infrastructure for Disposal of nuclear waste In Clay Environment) is een economisch samenwerkingsverband (ESV) waar ook het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN) en de Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen (NIRAS) deel van uitmaken.

Het ESV EURIDICE doet studies omtrent de haalbaarheid van geologische berging van hoogactief en/of langlevend afval in kleilagen. Zo draagt EURIDICE onder andere bij tot het nationale onderzoek naar geologische berging [10].

FANC: veiligheidsoverheid en regulator

Het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) is de bevoegde overheid op het vlak van veiligheid en beveiliging van nucleaire toepassingen. Het FANC is actief binnen een brede waaier aan domeinen, gaande van de controle van kerncentrales en nucleaire installaties en het gebruik van isotopen binnen de medische of de industriële sector tot het toezicht op de radioactiviteit binnen ons grondgebied.

Ook het veilige transport van nucleaire bronnen is een van de permanente bekommernissen van het agentschap.

Als bevoegde overheid op het vlak van nucleaire veiligheid in België bevordert het FANC daarnaast de doeltreffende bescherming van de bevolking, de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van ioniserende straling [11]. In dat opzicht is het bevoegd voor het Algemeen Reglement op de Bescherming tegen het gevaar van Ioniserende Straling (ARBIS), dat hoofdzakelijk betrekking heeft op de volgende zaken: de basisnormen voor stralingsbescherming, de regelgeving voor geclassificeerde gebouwen, controle van de installaties, transport en invoer van radioactieve stoffen, het radiologisch toezicht van het grondgebied en de noodplannen, geneeskundige toepassingen van ioniserende straling, de natuurlijke radioactiviteit, non-proliferatie en de nucleaire veiligheid.

BEL V

Bel V, een dochtermaatschappij van het FANC en opgericht in 2007, is een privaatrechtelijke stichting die de technische ondersteuning verzorgt voor de Belgische veiligheidsoverheid [12]. Het FANC doet beroep op de technische expertise van Bel V voor reglementaire controles in de Belgische kerncentrales en in andere nucleaire en radiologische installaties op Belgisch grondgebied (ziekenhuizen, universiteiten...).

Bel V treedt ook op als expert in de veiligheidsbeoordeling van nucleaire projecten.

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie

De Dienst Nucleaire Toepassingen van de Algemene Directie Energie van de FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, ziet toe op de nucleaire onderzoeksactiviteiten op Belgische, Europese en internationale schaal. Hij superviseert ook de activiteiten van Synatom, NIRAS, het SCK•CEN en het Institute for Radioelements (IRE), onder de voogdij van de ministers van energie en economie. De dienst ziet daarnaast toe op het beheer van de technische passiva en behandelt de dossiers voor nucleaire export.

De taken van de Dienst Nucleaire Toepassingen omvatten de opvolging en omkadering van alle aspecten die te maken hebben met nucleair onderzoek, industriële ontwikkeling, beheer van de splijtstofcyclus en beheer van radioactief afval. In het bijzonder:

- de opvolging verzekeren van bepaalde instellingen en onderzoeksdomeinen: het onderzoek naar kernsplijting en –fusie;
- België vertegenwoordigen binnen de Europese en internationale instellingen die betrekking hebben op de nucleaire sector. Deelnemen aan internationale vergaderingen en instaan voor de opvolging ervan;
- het beheer verzekeren van de kerntechnische passiva;
- de activiteiten van NIRAS en het beheer van radioactief afval in goede banen leiden;
- subsidies toekennen aan bepaalde instanties en het gebruik ervan controleren;
- het secretariaat verzekeren van de Commissie voor nucleaire voorzieningen;
- de verplichtingen uitvoeren die voortvloeien uit het non-proliferatieverdrag (NPV). Het secretariaat verzekeren van de CANVEK (Commissie van Advies voor de Niet-Verspreiding van Kernwapens).

Andere

De Belgische nucleaire sector telt nog verschillende andere actoren. Het is niet de bedoeling om in deze studie de volledige lijst te geven, maar de volgende spelers willen we u niet onthouden:

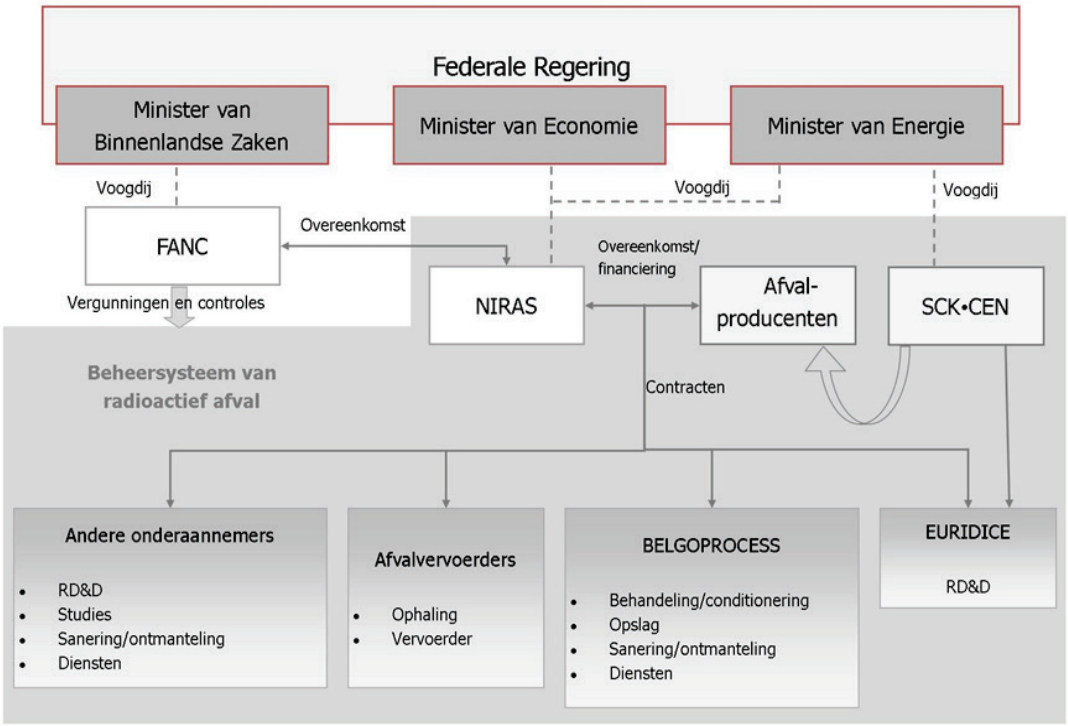
- **MONA** (Mols Overleg Nucleair Afval), het partnerschap tussen de gemeente Mol en NIRAS [13]. Dit partnerschap heeft als doel de dialoog te bevorderen over de huidige en toekomstige nucleaire installaties op het grondgebied van de gemeente, in het bijzonder de bovengrondse bergingsinstallaties voor radioactief afval.
- **STORA** (Studie- en Overleggroep Radioactief Afval), het partnerschap tussen de gemeente Dessel en NIRAS [14]. Dit partnerschap heeft een gelijkaardig doel als dat van MONA.
- Het **BNF** (Belgisch Nucleair Forum), een federatie van de Belgische nucleaire sector, [15] heeft zich als doel gesteld om bij te dragen tot een constructieve dialoog en tot een kwaliteitsvol debat over kernenergie. Het Forum is ook betrokken bij tal van publieke debatten over die kwestie. Het publiceert regelmatig een nieuwsbrief met het laatste nieuws uit de sector. Het organiseert ook jaarlijks bezoeken voor journalisten aan nucleaire installaties in binnen- en buitenland.

- **Greenpeace** is een van de grootste **milieubeschermingsorganisaties** ter wereld. Ze voert campagne om de kerncentrales sneller te sluiten en om investeringen in hernieuwbare energiebronnen en energie-efficiëntie te stimuleren [16].

1.1.2. Organisatie van de splijtstofcyclus

We hebben nu de verschillende actoren binnen de splijtstofcyclus een voor een voorgesteld. Het onderstaande representatieve schema toont de organisatie van de splijtstofcyclus in België en de wisselwerking tussen de voornaamste actoren.

Figuur 1. Actoren in de Belgische nucleaire sector



Bron: NIRAS, aangepaste versie van [23], FOD Economie.

1.1.3. Het beheer van de splijtstofcyclus tot 1998

De ontwikkeling van de eerste reactoren in België

België is een van de pioniers in de ontwikkeling van kernenergie, deels dankzij de aanwezigheid van uranium in Congo. Zo kwam het dat België tijdens de Tweede Wereldoorlog een overeenkomst sloot met de Verenigde Staten en met het Verenigd Koninkrijk om uranium te leveren in ruil voor kennis en technologieën voor civiele (niet-militaire) toepassingen van kernenergie [17].

- In 1956 slaagt België erin om de eerste gecontroleerde kettingreactie op te starten in de onderzoeksreactor BR1 (Belgian Reactor 1), nu nog steeds in werking in het SCK•CEN. Heel snel na dat eerste succes start België met de bouw en de uitbating van 2 nieuwe reactoren:

- een testreactor voor materialen, de BR2, die sinds 1961 in bedrijf is, wordt vandaag nog steeds gebruikt, onder andere voor de productie van radio-isotopen,
- een proefreactor om elektriciteit te produceren (de BR3, in werking sinds 1962). Deze eerste Europese drukwaterreactor werd uitgebaat door de elektriciteitsproducenten en werd ook gebruikt om het personeel van de toekomstige kerncentrales van Doel en Tihange op te leiden. De reactor werd in 1987 definitief stilgelegd en door de Europese Commissie aangeduid als pilootinstallatie voor het onderzoek rond de ontmanteling van kernreactoren [18].

Na een volgende test met een kernreactor voor elektriciteitsproductie, in Chooz in samenwerking met de Fransen, start België zijn elektronucleaire programma op. Er komen 3 nieuwe reactoren, die in 1975 in gebruik worden genomen: Doel 1, Doel 2 en Tihange 1. Met de tijd komen daar zowel in Doel als in Tihange nog eens 2 reactoren bij.

Van de keuze voor opwerking ... tot een parlementair debat

Samen met de bouw van de eerste commerciële kerncentrales draagt België ook bij tot de ontwikkeling van wetenschappelijke kennis en knowhow op het vlak van opwerking van bestraalde splijtstoffen en recyclage van plutonium. Dat is in het bijzonder te danken aan de impulsen die het Parlement en de Belgische regering aan de onderzoeksinstellingen gaven en aan de uitbating van een Belgische pilootfabriek voor opwerking, Eurochemic (1966-1974), een project waar 14 OESO-landen aan deelnamen.

Vanaf 1955 en ook in de volgende decennia wordt de opwerking van bestraalde splijtstof en de recyclage van herbruikbare materialen stilaan beschouwd als de ideale strategie voor het beheer van bestraalde kernbrandstoffen, zowel vanuit ecologische invalshoek als vanuit het streven naar energieonafhankelijkheid. Tot in de jaren 80 blijft de prijs van uranium immers hoog en ziet het ernaar uit dat de wereldwijde voorraden niet zullen volstaan om aan de toekomstige vraag te voldoen. De herwinning en het hergebruik van de energiegrondstoffen uit bestraalde splijtstof - plutonium in de vorm van MOX-brandstof en uranium in de vorm van RTU-brandstof (gerecycleerd uranium) - dienen zich op dat moment dan ook aan als een sterk economisch voordeel en als de ideale manier om de energiehulpbronnen te vrijwaren. De opwerking wordt ook gestimuleerd door de ontwikkeling van reactoren, met als doel om de plutoniuminventaris te beperken. Daarom wordt er beslist men om eerst 'piloot'-opwerkingsfabrieken te bouwen (zoals Eurochemic in België) en vervolgens een aantal industriële fabrieken (zoals de Belgische fabriek Belgonucleaire en de fabrieken in het Franse La Hague en het Engelse Sellafield).

In lijn met de weg die de Belgische overheid in die tijd inslaat, sluit de Belgische firma Synatom in 1976 en 1978 opwerkingscontracten af met de Franse onderneming Cogéma[10], uitbater van de opwerkingsfabriek in het Franse La Hague, voor een totaal van 672 ton bestraalde splijtstof:

- 1976: twee contracten voor 40 ton Belgische UOX-splijtstof (uraniumoxide), opgewerkt in 1980 en 1981;

[10] Cogéma veranderde in 2006 van naam en heet nu Areva. In de rest van dit document wordt dan ook naar de Areva-groep verwezen.

- 1978: een derde contract voor 100 ton Belgische splijtstof, opgewerkt tussen 1981 en 1985;
- In 1978 ondertekent Synatom een vierde contract met Areva in de vorm van een 'Service Agreement', voor een totaal van 530 ton uranium, op te werken tussen 1992 en 2001;
- In 1991 volgt er dan een vijfde contract tussen Synatom en Areva voor de opwerking van 225 ton uranium tijdens de periode 2001-2010, alsook een bijkomende optie voor de opwerking van 120 ton splijtstof (per jaar, te lichten per periode van 5 jaar).

Het uranium herwonnen in het kader van de eerste drie contracten wordt naar een verrijkingsinstallatie overgebracht voor herverrijking en hergebruik. Het plutonium dat naar aanleiding van die contracten wordt herwonnen, gebruikt men in de eerste plaats om nieuwe kernbrandstof te produceren. Een ander deel van het gescheiden plutonium zou dienen als operationele voorraad voor de productie van MOX-splijtstof (Mixed OXide) in de installaties van Belgonucleaire.

Het ultieme radioactieve afval (met uitzondering van het uranium en plutonium gescheiden voor hergebruik) dat ontstaat tijdens de opwerkingsactiviteit voortvloeiend uit de eerste twee contracten van 1976, blijft eigendom van Areva. Het radioactieve afval geproduceerd bij de opwerking voor het derde contract wordt teruggebracht naar België in de vorm van verglaasd en gecompacteerd afval. Het uranium afkomstig van dit opwerkingscontract is niet teruggekeerd naar België en het plutonium werd door Synatom doorverkocht.

Tegen het einde van de jaren 1970 besluit Amerikaans president Carter om in de US niet langer te kiezen voor opwerking. Naar aanleiding van die beslissing nemen de investeringen in nieuwe kerncentrales in de US er een duik. Een trend die nog versterkt wordt door het ongeval in de centrale van Three Mile Island in 1979. Naar aanleiding van het ongeval in Tsjernobyl in 1986 besluiten verschillende westerse landen om hun plannen voor nieuwe kerncentrales in de koelkast te stoppen. Daardoor is er plots een enorm overschot aan uranium en keldert de prijs. In België ziet men af van de verdere uitbreiding van de pilootfabriek Eurochemic, die al sinds acht jaar in werking was. Men besluit om opslaginstallaties te bouwen om er de residu's (geconditioneerd afval) ontstaan uit de contracten met Areva, in onder te brengen. Die installaties warden gebouwd op de site van Belgoprocess, de operationele tak van NIRAS in Dessel.

Het parlementaire debat van 1993

Die radicale ommekeer leidt in 1992 en 1993 tot een parlementair debat in België over de recyclage van plutonium, het gebruik van MOX-splijtstof in de Belgische kerncentrales en de mogelijkheid om verbruikte brandstof op te werken. Dat debat zou uitmonden in de Kamerresolutie van 22 december 1993 (zie verder).

De resolutie van 22 december 1993 geeft de toestemming om de reeds lopende opwerkingscontracten en de daaruit voortkomende recyclage van plutonium voor te zetten, op voorwaarde dat er een grondige evaluatie komt van de mogelijke opties voor de toekomst. De regering wordt geacht om binnen de vijf jaar na het debat een rapport voor te leggen over het onderwerp.

Tijdens de zitting van 24 december 1993 keurt de Ministerraad de Kamerresolutie goed. De verschillende punten uit de resolutie worden stelselmatig uitgevoerd. De subsecties die volgen beschrijven punt per punt hoe de aanbevelingen van het parlement zijn opgevolgd.

a. Opwerkingscontracten

Nadat Areva wordt ingelicht over de beslissing van de Belgische regering, stelt Synatom voor om een deel van de contractuele opwerkingscapaciteit van 1974 over te dragen aan 23 'Baseload Customers' (elektriciteitsproducenten die van hun land de toestemming hebben gekregen om kernbrandstof op te werken en als dusdanig in aanmerking komen voor de fabriek van La Hague). Synatom krijgt geen positieve respons, aangezien aan de opwerkingsbehoefte van de potentiële klanten al volledig voldaan was voor de periode in kwestie.

Synatom meldt aan Areva ook de tijdelijke opschorting, voor een periode van vijf jaar, van het opwerkingscontract ondertekend in 1991 (voor 225 ton) en het verbod om de optie voor de periode 2001-2005 te lichten (een optie die Synatom normaal gezien in 1995 had moeten lichten).

In overeenstemming met de Kamerresolutie wordt de uitvoering van het contract met Areva uit 1978 voortgezet; tegen 2001 wordt zo 530 ton bestraalde splijtstof opgewerkt in de fabriek van La Hague.

b. Opslag van verbruikte splijtstof

De parlementaire resolutie eist tevens van de elektriciteitsproducenten dat ze de bestraalde splijtstof veilig opslaan.

Eind 2016 werd er iets meer dan 4.200 ton bestraalde splijtstof in de vorm van iets meer dan 10.000 brandstofelementen uit de Belgische kernreactoren definitief ontladen. Zo'n 672 ton daarvan werd voor opwerking overgebracht naar La Hague[11]. Zodra ze uit de reactor ontladen is, wordt de bestraalde splijtstof systematisch een aantal jaren bewaard in een desactiveringsbekken dat grenst aan de reactor. Na een eerste afkoelingsperiode wordt de splijtstof vervolgens overgebracht naar de centrale opslagplaats in Tihange of Doel.

Nadat ze een tijd onder water bewaard zijn in het desactiveringsbekken van de reactor, worden de splijtstofelementen getransporteerd naar de centrale opslaginstallaties in de kerncentrale van Tihange of Doel. De technieken die gebruikt worden om bestraalde splijtstof te bewaren in die gecentraliseerde opslaginstallaties, hebben hun deugdelijkheid bewezen:

- in 1997 wordt een groot centraal opslagbekken aangelegd in gebouw DE, dat grenst aan Tihange 3;
- in 1995 bouwt men in Doel een centrale modulaire installatie (gebouw SCG) voor droge opslag van bestraalde splijtstof in metalen containers met dubbel nut (opslag en transport).

De twee opslaginstallaties voor bestraalde splijtstof in de centrales van Doel en Tihange krijgen de nodige vergunningen. Op 31 december 2016 herbergen ze in totaal 48.016 elementen

[11] Enkel de 530 ton bestraalde splijtstof die is opgewerkt in het raam van het vierde opwerkingscontract heeft geleid tot de productie van MOX-brandstof en REU die in België opnieuw gebruikt zijn.

(3.797 in Tihange, 44.219 in Doel). Naar aanleiding van het ongeval in Fukushima worden ze vervolgens onderworpen aan bijkomende veiligheidscontroles, die ze perfect doorstaan.

c. Gebruik van recycleerbare materialen

Jaarlijks wordt gemiddeld 120 ton bestraalde splijtstof uit de zeven kernreactoren in Doel en Tihange ontladen. De 670 ton opgewerkte kernbrandstof is dus gelijk aan de totale hoeveelheid splijtstof die op vijfenhalf jaar tijd uit het hele Belgische kernreactorpark ontladen wordt.

De recycleerbare grondstoffen (splijtbaar uranium en plutonium) die herwonnen werden bij de opwerking van de 530 ton bestraalde splijtstof, zoals overeengekomen in het contract van 1978 tussen Synatom en Areva, waren goed voor de productie van 77 ton REU-brandstof en 66 ton MOX-brandstof. De andere opwerkingscontracten hebben niet geleid tot de productie van splijtstof voor de Belgische centrales.

Met die gerecycleerde brandstoffen heeft men ongeveer 45 TWh elektriciteit opgewekt, even veel als de jaarlijkse productie van de zeven Belgische kernreactoren samen.

d. Het gebruik van MOX-splijtstof in België (1995-2010)

De parlementaire resolutie van 1993 bood de mogelijkheid, bekrachtigd met de koninklijke besluiten van 1 juni 1994, om de 66 ton MOX-splijtstof te gebruiken in de reactoren. Het ging om 144 elementen, die samen 4,8 ton plutonium bevatten afkomstig uit het opwerkingscontract van 1978. Zo waren vanaf 1995 bij elke herlading van splijtstof in Doel 3 en Tihange 2 tussen de 8 en de 12 elementen (op de 157 elementen uit de reactorkern, zie tabel 1), afhankelijk van het jaar en van de reactor , MOX-elementen geproduceerd door Belgonucleaire en geassembleerd door FBFC in Dessel.

In 2006 wordt de productie van MOX in de fabriek van Belgonucleaire gestaakt. De laatste MOX-elementen worden in 2010 ontladen uit de kern van Doel 3.

Zoals blijkt uit de ervaringen in Tihange 2 en Doel 3 levert het gebruik van MOX-splijtstof geen enkel noemenswaardig verschil op in vergelijking met de standaard 'UOX'-splijtstof (uraniumoxide): geen wijziging van de kernreactoren, geen problemen bij het transport of de behandeling, dezelfde ladingmodaliteiten als voor standaard brandstoffen en geen enkel gedragsverschil bij de bestraling.

Tabel 1. Aantal verse MOX-brandstofelementen geladen in de Belgische reactoren in de periode 1995-2006

	Doel 3	Tihange 2	Totaal	Samengevoegd
1995	8	8	16	16
1996	8	12	20	36
1997	8	12	20	56
1998	8	8	16	72
1999	8		8	80
2000	8	8	16	96
2001	8		8	104
2002	8		8	112
2003	8		8	120
2004	8		8	128
2005	8		8	136
2006	8		8	144

Bron: Synatom.

e. Gebruik van uranium herwonnen bij de opwerking

Terwijl plutonium dat herwonnen wordt bij de opwerking omgezet wordt in MOX-brandstof, moet opgewerkt uranium opnieuw verrijkt worden: dat is REU. Dankzij de opwerking van 530 ton bestraalde splijtstof kon iets meer dan 500 ton opgewerkt uranium worden herwonnen, waar na verrijking 77 ton REU-brandstof mee geproduceerd kon worden, goed voor 290 elementen. Die elementen worden tussen 1994 en 2003 in de reactor van Doel 1 geladen. De laatste elementen met herwonnen en herverrijkt uranium worden definitief ontladen in 2009.

f. Studies

Voor 1993 waren het onderzoek en de ontwikkeling toegespitst op de geologische berging van ultiem radioactief afval dat ontstaat bij de opwerking van verbruikte splijtstof, maar door de stopzetting van de opwerkingscontracten moet de O&O-activiteit verruimd worden naar de directe geologische berging van verbruikte splijtstof.

Er wordt een 'fles' ontwikkeld waarin bestraalde splijtstofelementen geconditioneerd worden met het oog op hun geologische berging. Op basis daarvan doet Synatom in samenwerking met studiebureau Tractebel Engineering een technische haalbaarheidsstudie en werkt het een voorontwerp uit voor een conditioneringsinstallatie voor verbruikte splijtstof.

De Ministerraad van 4 december 1998

In 1998 stellen de betrokken instellingen en ondernemingen een synthese- en evaluatierapport op dat de vorderingen tot dan beschrijft. Naar aanleiding van dat rapport neemt de Ministerraad van 4 december 1998 de volgende beslissingen:

- de beëindiging van het vijfde opwerkingscontract voor 225 ton splijtstof, afgesloten in 1991 tussen Synatom en Cogema, met inbegrip van de opties opgenomen in dat contract;
- er mogen geen nieuwe opwerkingscontracten meer worden afgesloten zonder de officiële goedkeuring van de regering;

- er moet tijdig een rapport komen dat een totaalvisie uiteenzet voor de benedenfase van de splijtstofcyclus.

Het opwerkingscontract van 1991 wordt inderdaad stopgezet met een brief, die Areva op 24 december 1998 ontvangt. Ook na 1998 wordt de technische validatie van het conditioneringsprocedé voor verbruikte splijtstof voortgezet, samen met een economische vergelijking tussen de twee opties voor de benedenfase van de splijtstofcyclus.

Sinds 1998 heeft Synatom geen enkel nieuw opwerkingscontract meer afgesloten, noch heeft het daartoe een officiële goedkeuring gevraagd.

De voorbije 15 jaar is er geen enkel rapport ingediend bij de Ministerraad.

1.1.4. De ontwikkelingen sinds 1998

Sinds het synthese- en evaluatierapport dat de betrokken instellingen en ondernemingen in 1998 publiceerden, moeten er een aantal zaken tegen het licht worden gehouden die de Belgische strategie inzake beheer van bestraalde splijtstoffen zouden kunnen beïnvloeden. Een aantal van die elementen komen in detail aan bod in het vervolg van die studie.

- De commissie AMPERE: eind 2000 werd er een Commissie voor de Analyse van de Middelen voor Productie van Elektriciteit en de Reëvaluatie van de Energievectoren (AMPERE) belast met de opdracht om een reeks aanbevelingen en voorstellen te formuleren voor de Belgische elektriciteitsproductie in de 21ste eeuw. AMPERE analyseerde vraag en aanbod binnen ons grondgebied en werkte een reeks scenario's uit die, voor een bepaalde vraag, evalueren welke gevolgen de verschillende energiekeuzes op de CO_2-uitstoot hebben. Uit de conclusies van AMPERE blijkt dat de keuze voor kernenergie een gunstige invloed heeft op de uitstoot van CO_2. Die conclusies benadrukken ook dat de expertise die België de voorbije decennia heeft opgebouwd op het vlak van kernenergie, absoluut niet verloren mag gaan.
- Verbetering van de opwerkingstechnologieën.
- De voortgang van de NIRAS-projecten met betrekking tot de berging van afval van categorie A, en de vorderingen op wetenschappelijk, technisch en veiligheidsvlak voor de ondergrondse berging van afval van categorie B en C (zie delen 0).
- De bewustwording voor de opwarming van het klimaat en voor de uitstoot van broeikasgassen.
- De wet op de kernuitstap van januari 2003 heeft een aantal beperkingen opgelegd voor de totale hoeveelheid splijtstof die bestraald zal worden voor de elektriciteitsproductie in de Belgische kerncentrales, alsook voor de beschikbare tijd om opgewerkt plutonium en uranium te hergebruiken in die centrales.
- De Commissie Energie 2030 [19]: medio 2007 heeft de Commissie Energie 2030, die bestaat uit een reeks Belgische en buitenlandse deskundigen, haar rapport overhandigd. Dat moet als basis dienen voor de uitstippeling van het Belgische energiebeleid tegen 2030. Daarin werd uitgegaan van verschillende scenario's, en met de hulp van het Planbureau konden de kwantitatieve resultaten van die scenario's worden bepaald. Het rapport concludeert dat België best opteert voor een evenwichtige mix van

4 elementen. Elk van die 4 "energiebronnen" moet in overweging worden genomen. Het IEA en de EU zijn immers van mening dat er een niet-optimale energiemix zou ontstaan mochten we een van die bronnen verwaarlozen. Het gaat in het bijzonder om energiebesparingen, energie uit fossiele brandstoffen, kernenergie en hernieuwbare energie.

- MYRRHA: in maart 2010 keurde de Ministerraad de beslissing van het kernkabinet goed om het project MYRRHA van het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN) te subsidiëren. De Ministerraad besliste om het project te steunen door het SCK-CEN een aanvullende subsidie van 60 miljoen euro toe te kennen voor een periode van 5 vijf jaar.
- De ramp in Fukushima Daiichi in maart 2011, die als gevolg had dat alle bestaande kerncentrales aan een nieuwe veiligheidsevaluatie (*'stresstest'*) werden onderworpen en dat landen zoals Duitsland nu volop de kaart trekken van denuclearisatie.
- Het Afvalplan van NIRAS voor het langetermijnbeheer van hoogactief en/of langlevend geconditioneerd radioactief afval. In het kader van haar wettelijke opdrachten stelde NIRAS op 23 september 2011 een afvalplan voor aan de federale regering, vergezeld van een *'Strategic Environmental Assessment'* (SEA), met als doel om een beslissing mogelijk te maken omtrent het langetermijnbeheer van afval van categorieën B en C. De regeerverklaring van 2011 voorzag in een dergelijke beslissing. In overeenstemming met de Afvalrichtlijn beveelt NIRAS aan om in België voor geologische berging te kiezen als strategie voor het beheer van afval van categorieën B en C.
- De ontdekking van microscopisch kleine scheurtjes in de reactorkuipen van Doel 3 en Tihange 2 heeft ertoe geleid dat beide reactoren bijna twee jaar[12] buiten dienst waren (wat gevolgen heeft voor het uiteindelijke volume bestraalde splijtstoffen). Electrabel heeft kunnen aantonen dat de veiligheid in beide reactoren nooit in het gedrang is gekomen, het FANC heeft in mei 2013 dan ook groen licht gegeven voor hun heropstart. Electrabel legde de reactoren echter opnieuw stil in maart 2014 omwille van onverwachte resultaten op een van de testen opgelegd door het FANC. In juli 2015 heeft Electrabel het agentschap de verantwoordingsdossiers over de bekomen resultaten voorgelegd en op basis van de analyse van die dossiers heeft het agentschap in november 2015 beslist dat de twee reactoren opnieuw mochten worden opgestart.
- De wet op de kernuitstap werd gewijzigd door de wetten van 18 december 2013 en van 28 juni 2015. In haar versie van 31.12.2016 bepaalt de wet dat:
  - De kerncentrale Doel 1 mag opnieuw elektriciteit produceren vanaf de inwerkingtreding van de wet van 28 juni 2015 tot wijziging van de wet van 31 januari 2003 houdende de geleidelijke uitstap uit kernenergie voor industriële elektriciteitsproductie met het oog op het verzekeren van de bevoorradingszekerheid op gebied van energie. Ze wordt gedeactiveerd en mag geen elektriciteit meer produceren vanaf 15 februari 2025.

[12].https://fanc.fgov.be/nl/informatiedossiers/kerncentrales-belgie/actualiteit/foutindicaties-de-stalen-wanden-van-de.

- De andere kerncentrales bestemd voor industriële elektriciteitsproductie door splijting van kernbrandstoffen, worden gedeactiveerd op de volgende data en mogen geen elektriciteit meer produceren vanaf deze data:
  - Doel 3: 1 oktober 2022;
  - Tihange 2: 1 februari 2023;
  - Doel 4: 1 juli 2025;
  - Tihange 3: 1 september 2025;
  - Tihange 1: 1 oktober 2025;
  - Doel 2: 1 december 2025

De Ministerraad van 30 juni 2016 heeft een ontwerp goedgekeurd van ministerieel besluit tot vaststelling van het Nationale Programma voor het beheer van verbruikte splijtstoffen en radioactief afval. Op 31.12.2016 was het Belgische Nationale Programma nog niet bekendgemaakt in het Belgisch Staatsblad maar het is openbaar en kan geraadpleegd worden op het internet [20].

Wet op de kernuitstap

De wet van 2003 legt de planning vast voor de Belgische kernuitstap (uiteengezet verderop). Die kernuitstap heeft een aantal rechtstreekse gevolgen:

- het totale aantal bestraalde splijtstofelementen dat beheerd moet worden door Synatom kan op voorhand worden bepaald. De referentiestrategie van Synatom volgens dewelke een deel van de definitief ontladen splijtstoffen wordt opgewerkt, verwacht zo in 2025 een inventaris van 8.604 brandstofelementen, 1.387 CSD-V, 1.103 CSD-C en 35 CSD-B (waarvan respectievelijk 387 CSD-V, 431 CSD-C en alle CSD-B afkomstig zijn van afgesloten opwerkingscontracten) [21].
- het is mogelijk om de vereiste opslagcapaciteit te ramen, in afwachting van het definitieve beheer van de bestraalde splijtstoffen (op dit punt komen we verderop terug);
- de productie van brandstofelementen op basis van opgewerkte bestraalde splijtstoffen is pas mogelijk na een afkoelingsperiode van een aantal jaar. De volledige opwerkingsprocedure neemt volgens Areva ongeveer 10 jaar in beslag [22]. Bijgevolg is de resterende termijn tot aan de sluiting van de laatste reactor, meer bepaald 8 jaar, te kort om de splijtstof te hergebruiken die afkomstig is uit de opwerking van de volledige voorraad Belgische kernbrandstof in onze centrales. Bovenop dat tijdsaspect komt het verkrijgen van een nieuwe exploitatievergunning voor de eventuele MOX-brandstof, op dit moment beschikt geen enkele Belgische kernreactor immers over een dergelijke vergunning. Die factoren hebben ertoe geleid dat Synatom nu een scenario overweegt waarbij de voorraad bestraalde brandstof (met inbegrip van de bestraalde MOX-elementen).

Er zijn tal van andere gevolgen, onder meer op het vlak van veilige elektriciteitsbevoorrading of structuur van ons elektriciteitsnet, maar dat zijn vraagstukken die buiten het kader van deze studie vallen.

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

Ontwikkelde strategieën voor het langetermijnbeheer

Het langetermijnbeheer van radioactief afval is een exclusieve bevoegdheid van NIRAS. Geologische berging is de aanbevolen oplossing als eindbestemming voor radioactief B&C-afval; die zijn hoofdzakelijk afkomstig uit de splijtstofcyclus.

Volgens het juridische kader is de "eindbestemming van het afval" de installatie waar het ondergebracht wordt zonder de intentie om het er weer uit te halen. Dat wil niet automatisch zeggen dat het onmogelijk is om het afval uit de bergingsinstallatie te verwijderen of om er controles op te doen gedurende een bepaalde periode.

In tegenstelling tot de situatie voor afval van categorie A, is er nog geen definitieve politieke beslissing genomen over het langetermijnbeheer van het bestaande en voorziene afval van categorie B en C, met inbegrip van de niet-opgewerkte bestraalde brandstoffen die aangegeven zouden worden als afval (anders gezegd, de verbruikte brandstoffen) en de overtollige hoeveelheden aan splijtbaar en verrijkt uranium.

In de loop van 2011 maakte NIRAS een *afvalplan* [23] op, vergezeld van een SEA (Strategic Environmental Assessment) [24], dat als volgt is ingedeeld:

1. Context en draagwijdte van het Afvalplan,
2. Beschrijving, evaluatie en vergelijking van de mogelijke opties voor het langetermijnbeheer van het B&C-afval en door NIRAS aanbevolen oplossing,
3. Verwante vragen die niet door NIRAS alleen kunnen worden beantwoord,
4. Conclusies en aanbevelingen.

Een aantal aspecten aangesneden in dat Afvalplan, komen ook aan bod in deze studie. Nieuwsgierige lezers kunnen het Afvalplan gerust raadplegen voor aanvullende informatie.

Sinds het Afvalplan heeft NIRAS aan de regering meermaals een voorstel voorgelegd voor een nationaal beleid (in de zin van Richtlijn 2011/70/Euratom) voor het langetermijnbeheer van B- en C-afval. Eind 2016 waren de discussies over de inhoud van dat beleid nog steeds aan de gang; dat beleid stoelt op volgende principes:

- de oplossing voor het langetermijnbeheer is een systeem van geologische berging op het Belgisch grondgebied;
- de realisatie van deze oplossing moet gepaard gaan met een beslissingsproces dat meer bepaald
  - moet verlopen in etappes die behoorlijk gedocumenteerd zijn,
  - alle partijen erbij moet betrekken,
  - ervoor moet zorgen dat de verschillende aspecten van duurzaam afvalbeheer redelijkerwijze worden geïntegreerd,
  - moet zorgen voor de creatie en het behoud van een maatschappelijk draagvlak alsook voor de integratie systeemontwerp voor geologische berging binnen een lokale gemeenschap, met respect voor de bevoegdheden van elke instelling,

- vóór de vergunningsaanvraag (pre-licensing) moet zorgen voor een voorafgaand overleg tussen het FANC en NIRAS en tevens
- een bevraging moet organiseren van de bevoegde overheden en van het publiek;

- De aanpak inzake veiligheid zal systematisch (geïntegreerd) gebeuren waarbij het afval en de afvalcomponenten in hun geheel en in hun milieu worden beschouwd.

Op 31 december 2016 was nog geen enkel nationaal beleid voor het beheer van afval van categorie B en C goedgekeurd. Wij wijzen er evenwel op dat het regeerakkoord van 11 oktober 2014 het volgende bepaalt : " *De regering zal de Nationale Beleidsmaatregelen uitvaardigen voor het beheer van het nucleair afval van categorie B en C. De gemeente(n) die na een breed participatief proces gekozen wordt (worden), zal (zullen) naar analogie met de oppervlakteberging categorie A gecompenseerd worden.*"

Huidig plan voor afval van categorie B & C

Momenteel blijft het referentieontwerp van NIRAS hetgeen werd aanbevolen in haar Afvalplan, namelijk: " *een oplossing die definitief kan worden als oplossing voor het langetermijnbeheer van het B&C-afval is, namelijk:*

- geologische berging;
- in weinig verharde klei (Boomse Klei of Ieperiaanklei);
- in één enkele installatie (gemeenschappelijk voor al het B&C-afval en gerealiseerd op één enkele site);
- op Belgisch grondgebied;
- zodra mogelijk, waarbij het tempo van ontwikkeling en realisatie van de oplossing afgestemd moet zijn op de wetenschappelijke en technische maturiteit en op het maatschappelijk draagvlak van de oplossing.

Deze technische oplossing is voldoende rijp om het voorwerp te zijn van een principebeslissing, aangezien de onzekerheden die nog moeten worden weggenomen niet onoverkomelijk worden geacht.

De andere overwogen beheeroplossingen die definitief kunnen worden, zijn ofwel in strijd met het nationale of internationale reglementaire kader of bieden niet de gewenste graad van veiligheid op lange termijn (dit is met name het geval voor de eeuwigdurende opslag, waarvan de veiligheid afhangt van de duurzaamheid van de onderhoudswerken en van de maatschappelijke context), of zijn niet verenigbaar met het totale volume B&C-afval dat moet worden beheerd (dit is het geval voor berging in diepe boorgaten). Volgens de veiligheidsoverheid (FANC) is een keuze ten gunste van een andere vorm van bovengrondse opslag dan de tijdelijke opslag die thans wordt toegepast, trouwens niet gerechtvaardigd".

Ter informatie, de andere voorgestelde beheeroplossingen in bovenstaand uittreksel zijn eeuwigdurende opslag, langdurige opslag en het status quo. De reden waarom die opties verworpen worden, wordt toegelicht in het Afvalplan.

De aanbevolen oplossing is gericht op "B&C-afval" en is verenigbaar met de verschillende scenario's die hieronder worden uiteengezet. We zullen immers aantonen dat er in elk sce-

nario gedacht moet worden aan de berging van afval van categorieën B en C. De keuze voor een bepaald scenario heeft daarentegen een impact op het afvalvolume en op de conditionering van dat afval, en heeft bovendien gevolgen voor de behandeling, anders gezegd op de fase na de conditionering en op de omvang van de geologische bergingsinstallatie.

Er zit dus een belangrijke nuance in de definitie van de term "radioactief afval": wat betekent deze term eigenlijk precies? Tot op heden werden de bestraalde splijtstoffen in het bezit van Synatom niet aangegeven als "afval" en vallen ze dus niet formeel onder de bergingsstrategie die NIRAS aanbeveelt. Er bestaan in België verschillende wettelijke definities van de term "radioactief afval". De meest recente definitie van de term komt uit de wet van 3 juni 2014 die de Europese Richtlijn 2011/70/EURATOM omzet[13]:

"Radioactief afval : een radioactieve stof in gasvormige, vloeibare of vaste staat waarvoor de Staat of een natuurlijke persoon of rechtspersoon wiens beslissing is aanvaard door de goedkeuring van een Nationale Beleidsmaatregel met betrekking tot deze stof zoals bedoeld in § 6 en § 7 van dit artikel, geen verder gebruik meer voorziet of overweegt en die door de bevoegde regelgevende autoriteit als radioactief afval wordt beschouwd, of indien deze stof dient te worden beschouwd als radioactief afval op grond van een wettelijke of reglementaire bepaling."

Opslag van bestraalde splijtstof en van radioactief afval

In deel 2.2.5 0, dat gewijd is aan de inventaris van radioactief afval afkomstig uit de splijtstofcyclus, is een tabel opgenomen die een idee geeft van de voorinventaris van Synatom in zijn referentieprogramma waarin de opwerking van een deel van de definitief ontladen splijtstof is voorzien[14]. Dat aantal brandstofelementen is afhankelijk van het referentiescenario van Synatom dat effectief wordt toegepast.

Op 31 december 2016 waren er 10.027 bestraalde splijtstofelementen (voor 4.226 tHM) van de Belgische kernreactoren definitief ontladen, waarvan er 2.011 uit de reactoren Doel 1, Doel 2 en Tihange 1 getransporteerd werden naar La Hague voor opwerking (goed voor om en bij de 672 tHM). De rest ligt opgeslagen in Doel en Tihange, in gecentraliseerde opslaginstallaties (in een waterbekken in Tihange en droog opgeslagen in Doel) en in desactiveringsbekkens.

Synatom heeft een raming gemaakt van de opvulling van de beschikbare opslagruimte, en daaruit blijkt dat er op vrij korte termijn (rond 2023) een tekort zal ontstaan [25]. Die naderende termijn kan voor problemen zorgen: gezien de termijnen voor de nodige voorafgaande studies, voor de vergunningsprocedure en voor de eventuele bouw van een extra opslagplaats, had Electrabel de vereiste procedures eigenlijk al moeten opstarten. De keuze voor een bepaald scenario voor splijtstofbeheer zou, los van het gekozen scenario, alvast de onzekerheid over die opslagplaats kunnen wegnemen bij Electrabel (Is ze wel nodig? Hoe groot moet ze zijn? Welke opslagmethode wordt er gebruikt? ...).

---

[13] http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=nl&la=N&cn=2014060303&table_name=wet.

[14] De term referentieprogramma van het K.B. van 31 maart 1980, zie verder. De cijfers werden ons meegedeeld door Synatom [21].

Synatom meent dat een eerste contract voor beperkte opwerking in eerste instantie een oplossing zou kunnen zijn voor het gebrek aan opslagcapaciteit. Daarom heeft Synatom zich bij de raming gebaseerd op twee scenario's:

- een scenario zonder opwerking, waarbij de volledige voorraad opgeslagen moet worden in afwachting van definitieve berging, en
- een scenario met opwerking, waarbij een deel van de bestraalde splijtstof wordt opgewerkt (ongeveer 1.200 tHM).

a. Opslagtechnieken voor bestraalde splijtstof

Er worden al sinds geruime tijd en op industriële schaal opslaginstallaties geëxploiteerd voor bestraalde splijtstof. Dat gebeurt volgens twee technieken: onder water (in een bekken) en droog (gebouw en container). De ervaring leert ons dat beide opslagmethodes tot minstens dertig jaar na de actieve periode van de reactoren onschadelijk zijn voor de gezondheid en voor het leefmilieu.

Droge opslag

In verschillende landen kiest men voor droge opslag van verbruikte splijtstof, en dat in verschillende vormen:

- in droge, geventileerde schachten;
- in volledig afgedichte (dichtgelaste) canisters omsloten door geventileerde afschermingen, in beton of metaal en horizontaal of verticaal;
- in metalen verpakkingen, zoals in de SCG-installatie van de kerncentrale van Doel.

Die metalen verpakkingen worden gebruikt sinds het eind van de jaren 1970. De containers worden ofwel voorzien van een systeem met dubbel deksel, om de bestraalde splijtstof veilig in te sluiten, ofwel, zoals in de kerncentrale van Doel, uitgerust met een primair deksel en raketbescherming. In elk geval wordt de dichtheid van de naden die de insluiting van het radioactieve materiaal verzekeren continu gemonitord. Bij problemen gaat er een alarm af.

Opslag in waterbekkens

De ervaring met opslag onder water is nog uitgebreider, aangezien elke kerncentrale is uitgerust met een desactiveringsbekken om gedurende een aantal jaar periodiek ontladen brandstofelementen op te slaan zodra ze uit de reactor komen, alvorens ze naar een gespecialiseerde opslagunit over te brengen.

Omwille van de periodieke ontlading van de kernreactoren, zijn de exploitanten die hun bestraalde splijtstof niet opwerken genoodzaakt om hun opslagcapaciteit ter plaatste uit te breiden. Daarvoor moeten ze de uitrusting van de bestaande waterbekkens aanpassen om hun opslagcapaciteit uit te breiden (zoals men in Spanje heeft gedaan), de bekkens vergroten of nieuwe opslagcapaciteit aanleggen.

Herevaluatie van de veiligheid na de ramp in Fukushima

De veiligheid van de opslaginstallaties voor bestraalde splijtstof werd opnieuw geëvalueerd aan de hand van weerstandtests of stresstests, opgelegd naar aanleiding van het ongeval in de kerncentrale van Fukushima. Die tests zijn in feite een gerichte herevaluatie van de veilig-

heidsmarges in kerncentrales, in het licht van de gebeurtenissen in Fukushima. Anders gezegd, het is gebleken dat extreme natuurverschijnselen de veiligheidsfuncties van een kerncentrale aanzienlijk in het gedrang kunnen brengen en tot een regelrechte ramp kunnen leiden.

Algemeen genomen is uit de evaluaties in het kader van die stresstests gebleken dat de nucleaire installaties in Doel en Tihange perfect in staat zijn om de essentiële veiligheidsfuncties te waarborgen bij een natuurramp, hetzij met behulp van (redundante en gediversifieerde) voorzieningen en systemen die deel uitmaken van het ontwerp van de installaties, hetzij met gebruik van mobiele middelen die worden ingezet op de site[15]. In een aantal gevallen werden er een aantal bijkomende verbeteringen voorgesteld, om de installaties beter bestand te maken tegen situaties die vrij onwaarschijnlijk zijn.

Uit de stresstests is gebleken dat de Belgische installaties voldoende robuust zijn om extreme situaties te doorstaan, gezien de talrijke verdedigingslinies en de mobiele middelen die heel snel na het ongeval in Fukushima werden geïnstalleerd in de Belgische centrales.

Die evaluaties tonen ook aan dat er geen extern materieel gemobiliseerd moet worden in de eerste dagen nadat er zich een van de geanalyseerde situaties heeft voorgedaan. Alle vereiste technische uitrusting is immers ter plaatse aanwezig [27].

Kortom, de extreme natuurverschijnselen die zich in België zouden kunnen voordoen, brengen de veiligheid van bekkenopslag niet in het gedrang: de heel bijzondere voorwaarden om bekkens aan te leggen voor de desactivering van bestraalde splijtstof uit de kokendwaterreactoren (BWR - zie glossarium en bijlage C) van de centrale van Fukushima Daiichi, zijn in niets te vergelijken met die voor de installatie van waterbekkens in drukwatercentrales (PWR) zoals Doel en Tihange, of het nu gaat om desactiveringsbekkens of om centrale opslagbekkens. De Belgische bekkens zijn zodanig ontworpen dat ze de krachtigste aardbevingen in de regio kunnen doorstaan en met het risico op een tsunami hoeven we hier uiteraard geen rekening te houden. Ook overstromingen zijn mee opgenomen in de risicoomstandigheden waarvoor maatregelen zijn voorzien of worden versterkt om de koelsystemen in stand te houden.

b. Situatie van de opslag op de sites Doel en Tihange

De situatie van de opslag op de sites van de kerncentrales wordt bekeken in de *Kennisgeving MilieuEffectrapport* [25].

Volgens de huidige raming zullen de opslaginstallaties voor de bestaande bestraalde splijtstof in de kerncentrales van Doel en Tihange rond 2023 verzadigd zijn. Om een tekort aan opslagcapaciteit voor bestraalde splijtstof te vermijden worden er bijkomende installaties voorzien voor droge opslag ervan in containers voor dubbel gebruik (voor de opslag en voor het transport).

[15] Dat resultaat geldt ook voor de stresstests voor de nucleaire installaties van het IRE, van Belgoprocess en van het SCK•CEN [26].

Die infrastructuur zal tegemoetkomen aan de bijkomende behoeften voor de opslag tot de definitieve sluiting van de kerncentrales. De bouwwerkzaamheden zouden in 2019 van start moeten gaan voor Tihange en in 2020 voor Doel.

c. Langetermijngedrag van opgeslagen bestraalde splijtstof: het project SPAR

Het project SPAR (Spent Fuel Performance And Research Program)[16] van het IAEA is een internationaal onderzoeksprogramma dat het gedrag behandelt van bestraalde kernbrandstof en van de materialen gebruikt voor de langdurige (100 jaar en langer) opslag ervan. Op basis van de programma's die tot op vandaag zijn uitgevoerd, heeft men een aantal afbraakmechanismen kunnen blootleggen voor splijtstofelementen. Na een gedetailleerde analyse is men tot het besluit gekomen dat het weinig aannemelijk is dat die mechanismen op lange termijn de integriteit van de elementen zullen aantasten[28].

Het in stand houden van de integriteit van bestraalde splijtstoffen heeft op lange termijn als doel om alle opties open te kunnen houden voor het beheer van die verbruikte kernbrandstof.

Aangezien nog niet alle landen over een opslaginstallatie beschikken en omdat de vergunningen stilaan vervallen voor sommige van de eerste opslaginstallaties voor bestraalde splijtstof, moeten de installaties dringend uitgebreid of vernieuwd worden. De in bekkenopslag van bestraalde splijtstof in de eerste jaren, nadat ze ontladen is uit de reactorkern, blijft de gekozen aanpak gelet op de enorme warmteontwikkeling van de elementen. Nadat de elementen voldoende zijn afgekoeld, wat doorgaans 5 tot 10 jaar duurt, kunnen ze in droge containers worden geplaatst, rekening houdend met de passieve aard van dit opslagsysteem (passief omdat de containers niet uitgerust zijn met een geforceerd ventilatiesysteem).

De grote Belgische O&O-projecten

Het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN) werkt aan verschillende opties voor de splijtstofcyclus; het neemt onder andere deel aan het Europese programma rond scheiding en transmutatie.

Een van de projecten van het centrum is HADES (High Activity Disposal Experimental Site), een lab dat enorm belangrijk is voor het onderzoek naar geologische berging. Het gaat om een galerij die 224 meter onder de grond ligt. Het laboratorium werd gebouwd sinds 1980 en verder uitgebreid in 1997-1999 en 2001-2002. HADES biedt de mogelijkheid om de Boomse kleilaag, een van de kleisoorten die bestudeerd worden voor de geologische bergingsinstallatie in België, in-situ te onderzoeken. De voorbije decennia kon men dankzij HADES een hele reeks aspecten bestuderen met betrekking tot de langetermijnveiligheid van de geologische bergingsinstallatie. Ook vandaag blijft dit ondergrondse lab een van dé referenties in het onderzoek rond geologische berging in kleiformaties. Dit project wordt beheerd door het ESV EURIDICIE, een economisch samenwerkingsverband tussen NIRAS en het SCK•CEN, waarvan de afkorting staat voor 'European Underground Research Infrastructure for Disposal of nuclear waste in Clay Environment'. Het doel van dit samenwerkingsverband is een actieve bijdrage te leveren aan de haalbaarheidsstudies rond de berging van radioactief afval in kleilagen.

[16] http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1343_web.pdf.

Naast het O&O-programma voor geologische berging bestudeert het SCK•CEN ook de transmutatie van hoogactief afval, met de bedoeling het volume en de levensduur ervan te beperken. In dat opzicht ontwikkelt het SCK•CEN een multifunctionele onderzoeksreactor, die de naam MYRRHA meekreeg. Het gaat om een nucleaire installatie die wordt aangedreven door een deeltjesversneller. Met MYRRHA wil men het pad effenen naar een demonstratie op industriële schaal van de transmutatie van hoogactief afval. In 2010 besliste de Belgische regering om voor 40 % bij te dragen tot het project, in de eerste plaats door een subsidie toe te kennen van 60 miljoen euro om de eerste ontwikkelingsfase tussen 2010 en 2014 te financieren. Die eerste fase was bedoeld om de technologische keuzes te valideren, om een eerste positieve stap te zetten in de prelicentiefase en om het internationaal consortium voor dit project op te zetten. In haar beslissing van 7 oktober 2015 heeft de regering haar steun aan het MYRRHA-project vernieuwd door er een bijkomend budget van 40 miljoen euro aan toe te kennen voor de jaren 2015 tot 2017.

In 2012 is het SCK•CEN erin geslaagd om een subkritische reactor te koppelen aan een deeltjesversneller, alvast een eerste stap richting het verwezenlijken van de doelstellingen van MYRRHA. Deze wereldprimeur maakt deel uit van het project GUINEVERE, dat voortvloeit uit de samenwerking met het Franse Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), met het Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), met een tiental andere Europese laboratoria en met de Europese Commissie. Het MYRRHA-project is door het European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) geïdentificeerd als een project met hoge prioriteit.

Nationaal Programma

Het Nationale Programma voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval is opgesteld door het Comité van het Nationale Programma opgericht door artikel 6 van de wet van 3 juni 2014 houdende wijziging van artikel 179 van de wet van 8 augustus 1980 betreffende de budgettaire voorstellen 1979-1980, wat de omzetting in Belgisch recht betreft van Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval (hierna "wet van 3 juni 2014"). Overeenkomstig de wet bestaat dat comité uit vertegenwoordigers van de federale overheidsdienst belast met energie, van de Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte splijtstoffen(NIRAS) en van Synatom, de vennootschap die verantwoordelijk is voor de splijtstofcyclus van de Belgische kerncentrales, met uitzondering van de activiteiten die zijn overgedragen aan NIRAS, en die eigenaar is van die splijtstof.

Het Nationale Programma [20]:

- maakt de balans op van de bestaande beheermethodes van verbruikte splijtstof en radioactief afval;
- brengt de te voorziene behoeften in kaart inzake opslag- of bergingsinstallaties;
- verduidelijkt de noodzakelijke capaciteit van deze installaties en de duur van de opslag en
- bepaalt de te bereiken doelstellingen voor het radioactieve afval dat nog niet het voorwerp uitmaakt van een definitieve beheermethode.

Het Nationale Programma structureert de uitvoering van de onderzoeken en studies over het beheer van de verbruikte splijtstof en van het radioactieve afval door mijlpalen vast te leggen voor de implementatie van nieuwe beheervormen, de oprichting van installaties of de wijziging van de bestaande installaties om te beantwoorden aan de hierboven gedefinieerde behoeftes en doelstellingen.

Het Nationale Programma wordt regelmatig bijgewerkt en telkens als er een Nationale Beleidsmaatregel wordt aangenomen of gewijzigd.

De samenhang van het Nationale Programma voor het beheer van verbruikte splijtstoffen en radioactief afval moet worden nagestreefd, alsook de technische en economische optimalisatie ervan. In dat kader kan het eveneens nuttig zijn de "Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management" en het nationale rapport hierover te raadplegen.

Het Nationale Programma bevat tevens:

1. de globale doelstellingen die worden nagestreefd door de Nationale Beleidsmaatregelen bedoeld in paragraaf 6 van artikel 6 van de wet van 3 juni 2014 ten aanzien van het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval;
2. de belangrijke mijlpalen en duidelijke tijdsbestekken voor het bereiken van die mijlpalen in het licht van de globale doelstellingen die worden nagestreefd door het Nationale Programma;
3. een inventaris van alle verbruikte splijtstof en radioactief afval en ramingen van toekomstige hoeveelheden, met inbegrip van die welke voortkomen uit ontmanteling. In die inventaris staan duidelijk de locatie en de hoeveelheid radioactief afval en verbruikte splijtstof vermeld, volgens de juiste indeling van radioactieve afvalstoffen en verbruikte splijtstof;
4. concepten, plannen en technische oplossingen voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval, van productie tot berging;
5. concepten of plannen voor de periode na de sluiting van een bergingsinstallatie, met inbegrip van de periode waarin passende controles worden aangehouden, alsook de in te zetten middelen om de kennis over deze installatie op lange termijn te behouden;
6. onderzoeks-, ontwikkelings- en demonstratieactiviteiten die nodig zijn om oplossingen voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval toe te passen;
7. de verantwoordelijkheden voor de uitvoering van het Nationale Programma en de essentiële prestatie-indicatoren bestemd voor toezicht op de vooruitgang van de uitvoering;
8. een raming van de kosten van het Nationale Programma en de basis en de gebruikte hypothesen voor deze raming, met inbegrip van een kalender;

9. de van kracht zijnde financieringsmechanisme(n);
10. het transparantiebeleid of -proces;
11. in voorkomend geval, de met een ander land gesloten overeenkomst(en) betreffende het beheer van verbruikte splijtstof of radioactief afval, inclusief het gebruik van bergingsinstallaties;
12. de identificatie van de bijkomende vereisten die voortvloeien uit de onderlinge afhankelijkheid van de verschillende beheerstadia voor elk type van radioactief afval en verbruikte splijtstof vanaf hun productie tot hun berging, teneinde de afstemming en de globale samenhang ervan te verzekeren;
13. de gegevens betreffende elke voorziene of overwogen wijziging van de installaties en/of van de praktijken die van aard zijn om een impact te hebben op het beheer van het radioactieve afval en van de verbruikte splijtstof;
14. de gegevens betreffende de historische situaties en de voorbije of bestaande beroepsactiviteiten die stoffen hebben opgeleverd of opleveren die mogelijkerwijze van aard zijn om gekwalificeerd te worden als radioactief afval, evenals de basisbeginselen van de beheermethodes die voor dit radioactief afval worden overwogen in de hypothese dat het beheer ervan niet kan verzekerd worden op grond van bestaande beheermethodes.

Eerste uitgave van het Nationale Programma

De eerste uitgave van het Nationaal programma bevat een beschrijving, zonder nieuwe normatieve inhoud, van de bestaande toestand op 31 december 2014 op het gebied van de Nationale Beleidsmaatregelen voor het beheer van verbruikte splijtstoffen en radioactief afval, de uitvoering van deze beleidsmaatregelen en het nationale kader voor deze uitvoering.

De beleidsmaatregelen werden vastgesteld overeenkomstig de wettelijke en reglementaire bepalingen, met name inzake leefmilieu en informatie van het publiek, die van kracht waren op het ogenblik waarop ze werden ingesteld.

De AD Energie heeft op 20 augustus 2015, voorafgaand aan de vaststelling van het Nationaal Programma per ministerieel besluit, na overleg in de Ministerraad, en op vraag van de minister van Economie en de minister van Energie, het Adviescomité SEA verzocht na te gaan of het eerste Nationale Programma een evaluatie van de gevolgen op het milieu vereist.

Op 11 september 2015 heeft het Adviescomité SEA bevestigd dat de eerste uitgave van het Nationaal Programma geen voorwerp moet uitmaken van zo een evaluatie: "Voor het ontwerp van Nationaal Programma voor het beheer van verbruikte splijtstoffen en radioactief afval is geen strategische beoordeling van de gevolgen voor het milieu vereist".

De ministerraad heeft op 30 juni 2016 op voorstel van minister van Economie Kris Peeters en minister van Energie Marie Christine Marghem een ontwerp van ministerieel besluit goedge-

keurd tot vaststelling van het Nationaal Programma voor het beheer van verbruikte splijtstoffen en radioactief afval.

1.2. Samenvatting van het wettelijke kader

De nucleaire industrie valt onder een vrij strenge wetgeving, en dat op drie niveaus: op internationaal vlak, via het IAEA, op Europees niveau via de verschillende overeenkomsten en verdragen die België ondertekent, en op nationale schaal door de verschillende wetten en normen die de organisatie van de nucleaire activiteit en van de splijtstofcyclus in ons land regelen. In dit deel van de studie stellen we de voornaamste teksten voor die betrekking hebben op de splijtstofcyclus, vanaf het nationale tot op het internationale niveau.

Deze samenvatting van het wettelijke kader houdt geen rekening met de wettelijke instrumenten die het kader vormen voor de aspecten stralingsbescherming en verbruikte splijtstof. Het Belgische Nationale Programma [20] geeft een overzicht van de federale reglementering ter zake.

1.2.1 Op Belgisch niveau

Artikel 179 van de wet van 8 augustus 1980

Artikel 179 van de wet van 8 augustus 1980 [29] is enorm belangrijk voor het beheer van de nucleaire splijtstofcyclus en van het radioactieve afval. Dit wetsartikel werd gewijzigd door de wet van 3 juni 2014 met het oog op de omzetting in het interne recht betreft van Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval.

De eerste paragraaf van artikel 179 geeft de Staat de toestemming om deel te nemen in het kapitaal van een gemengde vennootschap die tot doel heeft activiteiten in verband met de splijtstofcyclus te beheren (in dit geval Synatom). Dit punt werd omgezet in de praktijk via een aandeelhouderschap van 50 % in Synatom, tussen 1980 en 1994. In 1994 verkocht de Staat zijn aandelen in de vennootschap, maar behield wel een 'golden share' in het kapitaal van Synatom (KB van 10 juni 1994).

De volledige tweede paragraaf van de wet is gewijd aan de oprichting van de Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Splijtstoffen (NIRAS) en aan haar opdrachten.

De derde paragraaf gaat over de Nationale organisatie voor controle van de kernactiviteiten, die belast is met de controle van de activiteiten van de vennootschap waarvan sprake in paragraaf 1 (Synatom) en van de overheidsinstelling waarvan sprake in paragraaf 2 (NIRAS). In de praktijk kwam dit laatste orgaan nooit echt van de grond.

De vierde paragraaf stelt dat er in België enkel splijtstoffen opgewerkt mogen worden nadat de wetgevende kamers zich specifiek hebben uitgesproken over het principe ervan.

De vijfde paragraaf somt een aantal definities op.

De zesde paragraaf omschrijft het begrip nationaal beleid als volgt : "*...De Koning stelt bij besluit vastgelegd na overleg in de Ministerraad, op voorstel van de Instelling en na advies van de bevoegde regelgevende autoriteit, Nationale Beleidsmaatregelen vast en houdt deze*

in stand met betrekking tot het beheer van radioactief afval en van verbruikte splijtstof, in functie van de fysische, chemische en radiologische eigenschappen van het afval en van de verbruikte splijtstof, gebaseerd ten minste op de volgende algemene uitgangspunten:

- *de productie van radioactief afval wordt beperkt tot een zo laag als redelijkerwijze haalbaar niveau, wat de activiteit en het volume betreft, door middel van gepaste ontwerpmaatregelen en praktijken inzake bedrijfsvoering en ontmanteling, met inbegrip van opwerking en hergebruik van stoffen;*
- *er wordt rekening gehouden met de onderlinge afhankelijkheid van alle stappen in de productie en het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval;*
- *verbruikte splijtstof en radioactief afval worden op een veilige manier beheerd, waarbij de veiligheid op lange termijn van een bergingsinstallatie onder meer op veiligheidsmaatregelen berust die op lange termijn passief moeten kunnen worden;*
- *de maatregelen worden ten uitvoer gelegd volgens een graduele aanpak;*
- *de kosten voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval zijn ten laste van diegenen die deze stoffen hebben geproduceerd;*
- *in alle stadia van het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval wordt een met bewijskrachtige gegevens onderbouwd en gedocumenteerd besluitvormingsproces gevolgd."*

De zevende paragraaf bevat bepalingen met betrekking tot de grensoverschrijdende aspecten van het beheer van radioactief afval.

De achtste paragraaf bepaalt de oprichting van het Comité van het Nationale Programma belast met het opstellen van het Nationale Programma voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval. De eerste datum waarop het Nationaal Programma aan de Europese Commissie moet worden voorgelegd is 23 augustus 2015.

De laatste paragrafen bepalen onder meer de verschillende rapporteringen die vereist waren in de Europese richtlijn.

Koninklijk besluit van 30 maart 1981 houdende bepaling van de opdrachten en de werkingsmodaliteiten van de openbare instelling voor het beheer van radioactief afval en splijtstoffen

Dit koninklijk besluit [30] sluit aan bij artikel 179 van de wet van 8 augustus 1980 en legt de werkingsmodaliteiten van NIRAS vast. De bevoegdheden en opdrachten van NIRAS staan erin beschreven, samen met de statuten van de instelling en de bepalingen voor de samenstelling van haar raad van bestuur en van haar bureau.

Het koninklijk besluit bepaalt ook de voorwaarden voor de relatie tussen de instelling en de producenten van radioactief afval, de exploitanten van te ontmantelen nucleaire installaties en de houders van verrijkte splijtstoffen, plutoniumhoudende stoffen of ongebruikte of bestraalde splijtstof. Ook de beheermodaliteiten (inkomsten, begroting en rekeningen, leidende principes) worden gepreciseerd in dit koninklijk besluit.

Dit koninklijk besluit introduceert de begrippen "referentiescenario van NIRAS" op basis waarvan de door de afvalproducenten verschuldigde bijdragen worden geraamd en "referentieprogramma" dat door elke producent wordt opgesteld en dat de hoeveelheid afval bevat die hij van plan is te produceren of die zich in de installaties bevindt en/of die hij van plan is te laten weghalen of te leveren aan de Instelling, alsook de daarbij horende planning.

Resolutie van de Kamer van Volksvertegenwoordigers van 22 december 1993

In 1993 was er een parlementair debat over het beheer van bestraalde splijtstof in België en over het gebruik van MOX-brandstof in de Belgische kerncentrales. Dit is de integrale tekst van de resolutie [31] die voortvloeide uit dat debat:

"*De Kamer, gelet op het Syntheseverslag van de werkzaamheden in de commissie voor het Bedrijfsleven, het wetenschapsbeleid, het onderwijs en de nationale wetenschappelijke en culturele instellingen, opgesteld door de rapporteurs, draagt de regering op:*

1. *voortaan de strategie van de opwerking niet langer te bevoordeligen ten opzichte van de strategie van conditionering en directe berging (*once through *cyclus). De regering mag aldus de opwerking van bestraalde splijtstof niet langer als vanzelfsprekende referentiestrategie hanteren. Ze moet de voorwaarden scheppen opdat de strategie van conditionering en directe berging als alternatief kan worden ontwikkeld;*
2. *gedurende een periode van 5 jaar:*
   - *het opwerkingscontract gesloten in 1990 niet uit te voeren;*
   - *de opties in dat contract, welke België zou moeten lichten in 1995, niet te lichten;*
   - *over geen enkel nieuw opwerkingscontract te onderhandelen tijdens deze periode bestemd voor het onderzoek van de alternatieven;*
3. *voorrang te verlenen aan onderzoek en ontwikkeling, ook in internationaal verband, met het doel op termijn de directe berging van bestraalde splijtstof te kunnen uitvoeren, zonder afbreuk te doen aan het huidige onderzoeksprogramma inzake de berging van opwerkingsafval in diepe geologische lagen. Het jaarverslag van de NIRAS aan de Wetgevende Kamers dient een precieze stand van de voortgang van deze onderzoeksprogramma's te bevatten;*
4. *haar binnen vijf jaar de elementen over te zenden voor een nieuwe globale evaluatie van de situatie op basis van onder meer de volgende criteria: de non-proliferatie, het beheer van het kernafval, de veiligheid, de bescherming van de werknemers, van de bevolking en van het leefmilieu alsook de economische aspecten;*
5. *rekening houdend met de resultaten van de juridische analyses uitgevoerd op vraag van de regering en de Kamer van Volksvertegenwoordigers met betrekking tot de financiële gevolgen voortvloeiend uit de opzegging van het opwerkingscontract gesloten in 1978, toe te laten dat dit contract volledig wordt uitgevoerd. De regering zal onderzoeken of een deel van de voorziene capaciteit voor de opwer-*

king van bestraalde brandstof, voor zover deze bestraalde brandstof nog niet naar La Hague is verzonden, aan derden kan worden overgedragen;

6. *de aanwending toe te laten aan het plutonium afkomstig van het opwerkingscontract gesloten in 1978 onder de vorm van MOX-brandstof in de Belgische kerncentrales, overeenkomstig de uitslag van het onderzoek naar de vandaag mogelijke aanwendingen en de resultaten van de veiligheidsanalyse. Laatstgenoemde analyse voorziet onder meer dat de kerncentrales niet mogen worden gewijzigd;*
7. *zich er ondertussen van te vergewissen dat:*
   - *de elektriciteitsproducenten en Synatom een veilige tussentijdse stockage verzekeren van de bestraalde brandstof;*
   - *de elektriciteitsproducenten en Synatom veiligheidsstudies uitvoeren (voor werknemers en bevolking) en haalbaarheidsstudies voor de industriële conditionering van de bestraalde splijtstof*
   - *alle kosten, investeringen en diverse lasten, hoofdzakelijke of bijkomstige, die verband houden met de productie van kernenergie en de nucleaire brandstofcyclus ten laste worden gelegd van de elektriciteitsproducenten. Deze kosten mogen niet afgewenteld worden op derden;*
8. *voldoende financiële middelen ter beschikking te stellen van NIRAS om haar opdrachten te realiseren binnen haar huidige of eventueel verruimde bevoegdheden;*
9. *de nodige maatregelen te treffen in het raam van de eventuele privatisering van de NIM[17] en haar dochteronderneming Synatom, om aan de federale staat een vetorecht toe te kennen inzake elke beslissing die strijdig is met het algemeen belang;*
10. *via haar bestuurders, het volledige overheidsgezag waarmee zij is bekleed uit te oefenen ten aanzien van de publieke instellingen en de gemengde ondernemingen in de energiesector;*
11. *het federaal agentschap voor nucleaire controle, na de aanvaarding van het wetsontwerp door de wetgevende kamers zo snel mogelijk operationeel te maken;*
12. *door een efficiënt toezicht, de veiligheid van het transport van bestraalde splijtstof en van de producten afkomstig van de opwerking te garanderen;*
13. *de informatie aan de bevolking omtrent de nucleaire activiteiten te verbeteren;*

deze besluiten met het oog op hun uitvoering mede te delen aan de vertegenwoordigers van alle betrokken instanties in de energiesector."

De Ministerraad keurde de opdracht goed tijdens zijn zitting van 24 december 1993. Daarop werden de verschillende punten uit de resolutie stelselmatig uitgevoerd tussen 1993 en 1998.

[17] Nationale Investeringsmaatschappij.

Ministerraad van 4 december 1998

In overeenstemming met punt 4 uit de Kamerresolutie van 1993 werd er een synthese- en evaluatierapport opgemaakt. Naar aanleiding van dat rapport besloot de Ministerraad het volgende: "

1. *De Ministerraad heeft akte genomen van de communicatie in de nota uitgedeeld tijdens de zitting.*
2. *Vaststellende dat de huidige vorderingen van de werkzaamheden van de betrokken administraties het niet mogelijk maken om alle elementen te verzamelen die nodig zijn voor een globale evaluatie van de situatie met betrekking tot het gebruik van plutonium- en uraniumhoudende splijtstoffen in de Belgische kerncentrales en met betrekking tot de mogelijkheid om splijtstofstaven op te werken, vraagt de Raad aan de betrokken administraties om binnen de gepaste termijn een rapport op te stellen dat een meer omvattende en beter onderbouwde visie beschrijft voor de benedenfase van de splijtstofcyclus, door de analyse in het bijzonder toe te spitsen op volgende punten:*

- Er moet een vergelijking worden gemaakt voor de radiologische impact van beide opties voor de benedenfase van de splijtstofcyclus.
- Wat de conditionering van verbruikte brandstof betreft, moeten de hypotheses, de basisopties en de technische beslissingen opnieuw onderzocht worden, om de huidige concepten te optimaliseren en de technische samenhang te waarborgen.
- Wat de berging betreft is het noodzakelijk om de haalbaarheidsstudies, de optimalisering van de concepten vanuit technische en economische invalshoek en de toename van het vertrouwen in de veiligheidsstudies af te wachten.
- Wat de non-proliferatie betreft moet er een bijkomende studie worden gedaan omtrent de doeltreffendheid van de controletechnieken voor de operationele fase van een berging voor bestraalde splijtstof en over de vereiste controlemaatregelen nadat een opslagplaats gesloten wordt.

3. *De Raad beslist bovendien dat tijdens de onderzoeksperiode er geen enkel nieuw initiatief opgestart mag worden omtrent deze materie. De huidige wacht- en onderzoeksperiode naast de verschillende opties wordt vanaf nu gedurende een jaar aangehouden.*
4. *In overeenstemming met zijn beslissing onder punt 3. keurt de Raad de ontbinding goed van het opwerkingscontract voor 225 ton afgesloten in 1991 tussen Synatom en Cogema met inbegrip van, in voorkomend geval, de opties voorzien in dat contract. Die ontbinding moet zo snel mogelijk en ten laatste op 23 december 1998 in werking treden. De regering vraagt tevens aan Synatom om geen nieuwe opwerkingscontracten af te sluiten zonder haar formele goedkeuring.*
5. *De Kamer van Volksvertegenwoordigers zal ingelicht worden over onderhavige beslissingen.*

De regering zal voor het einde van 1999 rapporteren over het geheel."

Wet van 31 januari 2003 houdende de geleidelijke uitstap uit kernenergie voor industriële elektriciteitsproductie

Deze wet bepaalt dat de geleidelijke kernuitstap van België moet gebeuren volgens 2 principes [32]:

- de bouw en/of ingebruikname verbieden van nieuwe kerncentrales die draaien op splijting van kernbrandstoffen;
- De mogelijkheid voor de **kerncentrale Doel 1 om opnieuw elektriciteit te produceren vanaf de inwerkingtreding van de wet van 28 juni 2015 tot wijziging van de wet van 31 januari 2003 houdende de geleidelijke uitstap uit kernenergie voor industriële elektriciteitsproductie met het oog op het verzekeren van de bevoorradingszekerheid op gebied van energie. Ze wordt gedeactiveerd en mag geen elektriciteit meer produceren vanaf 15 februari 2025.**

Desactivering van de andere kerncentrales bestemd voor industriële elektriciteitsproductie door splijting van kernbrandstoffen en verbod om nog elektriciteit te produceren vanaf deze data :

- Doel 3: 1 oktober 2022;
- Tihange2 : 1 februari 2023;
- Doel 4: 1 juli 2025;
- Tihange 3: 1 september 2025;
- Tihange 1: 1 oktober 2025;
- Doel 2: 1 december 2025.

Steun aan het MYRRHA-project

Op 5 maart 2010 keurde de Ministerraad de beslissing van het kernkabinet goed om het project MYRRHA van het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN) te subsidiëren. MYRRHA zal vanaf 2022-2023 bijdragen tot de ontwikkeling van innoverende oplossingen, zowel voor de nucleaire sector als voor de geneeskunde, de industrie en de hernieuwbare energieën.

De Ministerraad besliste om het project te steunen door het SCK•CEN een aanvullende subsidie van 60 miljoen euro toe te kennen voor een periode van 5 vijf jaar. Daarnaast heeft de Ministerraad ook beslist om het IRE een bijkomende subsidie van 20 miljoen euro te geven, gespreid over vijf 5 jaar [33].

Op 7 oktober 2015 heeft de regering haar steun aan het MYRRHA-project vernieuwd door er een bijkomend budget van 40 miljoen euro aan toe te kennen voor de jaren 2015 tot 2017.

1.2.2 Op Europees niveau

Op Europees niveau bepalen verschillende richtlijnen de wetgeving inzake de nucleaire installaties en de splijtstofcyclus[18] in ons land. We beperken ons tot een beschrijving van twee

[18] De volledige teksten van de EU-richtlijnen die hier vermeld worden, zijn online beschikbaar via de website: http://eur-lex.europa.eu/nl/index.htm.

van die richtlijnen: de Euratom-richtlijn van 25.06.2009 op het vlak van nucleaire veiligheid en Euratom-richtlijn 19.07.2011, ook wel de Afvalrichtlijn genoemd.

Hoewel ze in deze studie niet aan bod komen, kunnen ook de onderstaande Europese richtlijnen een impact hebben op het beheer van de splijtstofcyclus:

- Europese Rrichtlijn 96/29/EURATOM van de Raad van 13 mei 1996 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling;
- Richtlijn 98/83/EG van de Raad van 3 november 1998 betreffende de kwaliteit van voor menselijke consumptie bestemd water;
- Richtlijn 2001/42/EG van het Europees Parlement en de Raad van 27 juni 2001 betreffende de beoordeling van de gevolgen voor het milieu van bepaalde plannen en programma's;
- Richtlijn 2003/4/EG van het Europees Parlement en de Raad van 28 januari 2003 inzake de toegang van het publiek tot milieu-informatie en tot intrekking van richtlijn 90/313/EEG van de Raad;
- Richtlijn 2003/35/EG van het Europees Parlement en de Raad van 26 mei 2003 tot voorziening in inspraak van het publiek in de opstelling van bepaalde plannen en programma's betreffende het milieu en, met betrekking tot inspraak van het publiek en toegang tot de rechter, tot wijziging van de richtlijnen 85/337/EEG en 96/61/EG van de Raad.

Richtlijn 2009/71/Euratom van 25 juni 2009 tot vaststelling van een communautair kader voor de nucleaire veiligheid van kerninstallaties

Richtlijn 2009/71/Euratom [34] heeft als doel om

- een communautair kader in te stellen om de nucleaire veiligheid en de regelgeving ter zake in stand te houden en de continue verbetering ervan te bevorderen;
- ervoor te zorgen dat de lidstaten voorzien in passende nationale regelingen voor een hoog niveau van nucleaire veiligheid om werknemers en de bevolking te beschermen tegen de aan ioniserende straling van kerninstallaties verbonden gevaren.

Deze richtlijn verplicht de partijen er meer bepaald toe om een regelgevende autoriteit voor nucleaire veiligheid in te stellen, onafhankelijk van de andere nucleaire actoren. Daarnaast moeten de lidstaten die autoriteit alle nodige middelen geven om haar opdracht te kunnen vervullen.

Met deze richtlijn verbinden de lidstaten zich er ook toe om de Commissie ten laatste op 14 juli 2014 een eerste rapport te bezorgen over de tenuitvoerlegging ervan, en vervolgens om de drie jaar een nieuw rapport over te maken. Naast die rapporten is er een permanente evaluatie gepland van het nationale kader en van de regelgevende overheid, om de continue verbetering van de nucleaire veiligheid te garanderen.

Naar aanleiding van het ongeval in Fukushima werd deze richtlijn gewijzigd door Richtlijn 2014/87/EURATOM [35].

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval

Richtlijn 2011/70/Euratom [36] heeft als doel om op Europees niveau de internationale IAEA-standaarden te versterken en om een eigen juridisch EU-kader in te stellen voor het beheer van bestraalde splijtstof en van radioactief afval, om de toekomstige generaties niet buitensporig te belasten. Deze Afvalrichtlijn berust op de Nuclear Safety Directive 2009/71/Euratom van 25 juni 2009[34] op de Safety Standards Series en op de Joint Convention van het IAEA [37].

De lidstaten worden belast met de implementering van een nationaal beleid dat:

- de productie van radioactief afval tot het praktisch haalbare minimum beperkt, zowel wat de activiteit als het volume ervan betreft, door middel van aangepaste ontwerpmaatregelen en praktijken inzake bedrijfsvoering en ontmanteling, met inbegrip van recyclage (zie glossarium) en hergebruik van materialen Die principes hoeven niet beschouwd te worden als een verplichting voor de lidstaten om verbruikte splijtstoffen op te werken: elke lidstaat blijft vrij om zelf de strategie te kiezen om de benedenfase van de cyclus te beheren. Niettemin, en ongeacht de gekozen optie (opwerking, directe berging van verbruikte splijtstof...), moet er gedacht worden aan een eindbestemming voor het afval, of het nu gaat om hoogactief afval dat wordt gescheiden bij de opwerking of om verbruikte splijtstoffen.
- de onderlinge afhankelijkheid verzekert van alle stappen in de productie en het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval;
- een veilig beheer verzekert van de verbruikte splijtstof en van het radioactieve afval, voor de lange termijn onder meer met passieve veiligheidsmaatregelen;
- de gepaste maatregelen implementeert volgens een graduele aanpak;
- alle stadia regelt in het beheer van de bestraalde splijtstoffen en van het radioactieve afval.

Daarnaast legt de Afvalrichtlijn op dat alle informatie over het beheer van bestraalde splijtstoffen en radioactief afval beschikbaar moet zijn voor werknemers en voor de bevolking in het algemeen. Voorts moeten de lidstaten ervoor zorgen dat het publiek daadwerkelijk betrokken wordt bij de besluitvorming inzake het beheer van bestraalde splijtstoffen en radioactief afval.

Voor het beheer van bestraalde splijtstoffen en radioactief afval moet elke lidstaat ook een Nationaal Programma uitstippelen, implementeren en up-to-date houden dat alle stappen omvat, van beheer, over productie, tot de uiteindelijke berging. Die Nationale Programma's moeten regelmatig opnieuw onder de loep worden genomen en bijgewerkt. Ze moeten de volgende zaken bevatten:

- de algemene doelstellingen van het nationale beleid;
- de belangrijke termijnen en duidelijke tijdschema's;
- een inventaris van alle bestraalde splijtstoffen en radioactief afval en ramingen voor de toekomstige hoeveelheden;
- de concepten of plannen en technische oplossingen voor het beheer van bestraalde splijtstoffen en radioactief afval, van productie tot berging;

- de concepten of plannen voor de periode na de sluiting van een opslaginstallatie;
- de onderzoeks-, ontwikkelings- en demonstratieactiviteiten;
- de verantwoordelijkheden;
- een kostenraming;
- de geldende financieringsmechanismen;
- het beleid of de procedure op het vlak van transparantie;
- eventueel de akkoorden gesloten met een lidstaat of derde land.

Daarnaast moeten de lidstaten erop toezien dat hun nationaal kader oplegt dat er voldoende financiële middelen kunnen worden vrijgemaakt op het moment dat de Nationale Programma's worden geïmplementeerd. Tot slot moeten de lidstaten er ook over waken dat het publiek in alle transparantie geïnformeerd wordt, in overeenstemming met de nationale wetgeving, en dat het inspraak heeft in de besluitvorming.

De Nationale Programma's moeten ten laatste op 23 augustus 2015 worden voorgelegd aan de Europese Commissie, met inbegrip van latere ingrijpende wijzigingen. De Commissie kan om verduidelijking vragen en/of haar advies geven over de conformiteit van de voorgestelde inhoud.

Voorts moeten de lidstaten minstens om de tien jaar een zelfevaluatie houden en hun nationaal kader (bevoegde veiligheidsoverheid en/of Nationaal Programma) internationaal laten evalueren door peers, om te garanderen dat het veilige beheer van bestraalde splijtstoffen en radioactief afval voldoet aan de hoge veiligheidsnormen.

De Afvalrichtlijn moest ten laatste tegen 23 augustus 2013 zijn omgezet in nationale wetgeving. Ze werd omgezet in Belgische wetgeving met de wet van 3 juni 2014 houdende wijziging van artikel 179 van de wet van 8 augustus 1980 betreffende de budgettaire voorstellen 1979-1980, wat de omzetting in het interne recht betreft van Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval

1.2.3. Op internationaal niveau

Het Internationaal Agentschap voor Atoomenergie (IAEA), opgericht in 1957, is een onafhankelijke internationale instelling verbonden aan de VN. Het IAEA werkt samen met de lidstaten en met andere partners van over de hele wereld om een veilig en vreedzaam gebruik van de beschikbare nucleaire technologieën te promoten. In het bijzonder de IAEA-afdeling 'Safeguards' heeft als hoofdopdracht om de verspreiding van kernwapens tegen te gaan, door elk onjuist gebruik van materiaal of van nucleaire technologie te voorkomen en door te controleren of de staten hun verplichtingen wel nakomen.

Het verdrag inzake nucleaire veiligheid van het IAEA

De 'Convention on Nuclear Safety' (CNS) werd goedgekeurd in Wenen op 17 juni 1994 [38]. Doel van dit verdrag is om de deelnemende landen die nucleaire installaties exploiteren ertoe aan te zetten een hoog veiligheidsniveau aan te houden, aan de hand van internationale criteria die de staten onderschrijven.

De verplichtingen van de betrokken partijen zijn in grote mate geënt op de principes uit het document 'Fundamental Safety Principles (SF-1)' van het IAEA [39]. Die verplichtingen draaien onder andere rond implementering, ontwerp, bouw en exploitatie, beschikbaarheid van financiële en menselijke middelen om de veiligheid van elke nucleaire installatie te waarborgen tijdens haar volledige levensduur, evaluatie en verificatie van de veiligheid, kwaliteitsborging en beheer van noodsituaties.

Het CNS is een stimulerend instrument; het verdrag is niet bedoeld om te verzekeren dat de partijen hun verplichtingen naleven, aan de hand van controles en sancties; het is gebaseerd op hun gemeenschappelijk belang om te voldoen aan de hogere veiligheidsnormen die ontwikkeld en gepromoot worden tijdens geregelde bijeenkomsten van die partijen. Het verdrag verplicht de partijen ertoe om tijdens die bijeenkomsten hun rapport over de naleving van hun verplichtingen ter controle voor te leggen aan peers.

Het verdrag trad in werking op 24 oktober 1996. Tegen juli 2012 hadden 75 landen zich erbij aangesloten, waaronder België, en tegenwoordig is elk land dat nucleaire installaties exploiteert aangesloten. 10 ondertekenende landen hebben het verdrag nog niet bekrachtigd.

De CNS-staten komen om de drie jaar samen, de laatste vergadering vond plaats op 14 april 2011. Tijdens die vergadering bespreken de delegaties van de 'verdragsluitende partijen' de grote vraagstukken omtrent veiligheid op lange termijn. Bij de laatste bijeenkomst ging er heel wat aandacht naar het verloop van de noodsituatie in de kerncentrale van het Japanse Fukushima. Daarop besloten de verdragsstaten om over te gaan tot een veiligheidsanalyse van hun eigen nucleaire installaties, inclusief een nieuw onderzoek van de veiligheidsmaatregelen in kerncentrales die blootgesteld zijn aan mogelijke extreme natuurverschijnselen.

Het Gezamenlijke Verdrag inzake de veiligheid van het beheer van bestraalde splijtstof en inzake de veiligheid van het beheer van radioactief afval

Het Gezamenlijke Verdrag werd goedgekeurd op 5 september 1997 [37], tijdens een diplomatieke conferentie georganiseerd door het IAEA, op de maatschappelijke zetel van het agentschap. België heeft het Gezamenlijk Verdrag ondertekend op 8 december 1997. De Belgische wetgever bevestigde zijn instemming met de verplichtingen voortvloeiend uit dat verdrag door de wet van 2 augustus 2002, bekrachtigd op 5 september van datzelfde jaar. Het Verdrag trad in werking op 4 december 2002, 90 dagen na de ratificering.

Dit verdrag is het eerste internationale instrument voor het veilige beheer en de veilige opslag van radioactief afval en van bestraalde splijtstoffen in landen met en zonder een kernprogramma. Het ontwikkelt en vervolledigt het bestaande IAEA-systeem voor nucleaire veiligheid en promoot de invoering van internationale normen op dat vlak. Het Gezamenlijke Verdrag heeft tot doel om een hoog veiligheidsniveau te bereiken en aan te houden in het beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval, erop toe te zien dat er doeltreffende verdedigingsinstrumenten bestaan om te beschermen tegen de potentiële risico's in elk stadium van het beheer van dergelijk materiaal, en om ongevallen met radiologische gevolgen te voorkomen.

Het verdrag draait met andere woorden rond de veilige omgang met bestraalde splijtstoffen en met radioactief afval afkomstig uit civiele toepassingen. Het roept de verdragspartijen op

om de veiligheidseisen te onderzoeken en milieubeoordelingen uit te voeren voor de installaties die het beheer verzekeren van bestraalde splijtstof en van bestaand en/of toekomstig radioactief afval. Het voorziet daarnaast in de uitwerking en de handhaving van een wettelijk en regelgevend kader dat het veilige beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval regelt.

Het verdrag voorziet ook in een verplicht rapportagesysteem op driejaarlijkse basis, dat de maatregelen moet behandelen die getroffen zijn om de verplichtingen uit het verdrag na te komen, met inbegrip van een rapport over de nationale inventarissen van radioactief afval en verbruikte kernbrandstof. Bij het laatste rapport in mei 2012, voor België gecoördineerd door het FANC en NIRAS, werd de uitklaring van het statuut van de bestraalde splijtstoffen, met het oog op hun opwerking of directe berging, opgeworpen als een uitdaging van formaat [40].

Herstructurering van de "Safety Fundamentals" van het IAEA

In 2008 werd er een nieuwe structuur ingevoerd voor de veiligheidsnormen. Daardoor weten gebruikers nu heel gemakkelijk welke veiligheidsnormen er van toepassing zijn op een bepaalde installatie of specifieke activiteit. De "Safety Fundamentals" (SF-1) [41], de "General Safety Requirements" (GSR) in zeven delen en de 'General Safety Guides' (GSG) opgemaakt door het IAEA, beslaan alle installaties en activiteiten. Ze worden, afhankelijk van het geval, aangevuld door "Specific Safety Requirements" (SSR) en "Specific Safety Guides" (SSG), die gelden voor bepaalde, specifieke installaties en activiteiten. Al deze normen zijn te vinden op de website van het IAEA [42].

Non-proliferatieverdrag

Sinds de jaren 50 is de proliferatie van kernwapens een reëel gevaar voor de mensheid. Na de oprichting van het IAEA, met als doel het gebruik van kernenergie voor civiele en niet-militaire doeleinden te promoten, vaardigde de VN een verdrag uit om de verspreiding van kernwapens tegen te gaan: het zogeheten non-proliferatieverdrag (NPV).

Het non-proliferatieverdrag werd van kracht op 5 maart 1970 [43]. De meeste landen ondertekenden het verdrag. Slechts drie landen met significante hoeveelheden nucleaire materialen zijn geen lid, namelijk India, Pakistan en Israël.

Het non-proliferatieverdrag houdt tal van rechten en plichten in voor de partijen.

- Niet-kernwapenstaten verbinden zich ertoe geen kernwapens te ontwikkelen of te vervaardigen.
- Kernwapenstaten verbinden zich ertoe geen kernwapens over te dragen aan niet-kernwapenstaten en niet samen te werken met niet-kernwapenstaten om kernwapens te ontwikkelen of te vervaardigen.
- Niet-kernwapenstaten verbinden zich ertoe de vereiste veiligheidscontroles van het IAEA op hun grondgebied toe te laten met een akkoord met het IAEA. Tot nu toe hoort dat een veralgemeende veiligheidscontroleovereenkomst te zijn, waarbij alle nucleaire materialen op het grondgebied van de betrokken niet-kernwapenstaat aan de IAEA-veiligheidscontrole onderworpen is. Verschillende partijen hebben bovenop een veralgemeende veiligheidscontroleovereenkomst een aanvullend protocol met het

IAEA getekend, waarbij alle nucleaire activiteiten van de betrokken niet-kernwapenstaat met betrekking tot de nucleaire brandstofcyclus aan de veiligheidscontrole van IAEA zijn onderworpen. Er geldt een specifieke regeling voor de lidstaten van de Europese Unie. De niet-kernwapenstaten van de Europese Unie hebben namelijk een gemeenschappelijke veiligheidscontroleovereenkomst afgesloten met Euratom en het IAEA, aangevuld met een bijkomend protocol. Voor Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk als kernwapenstaten geldt een vrijwillige regeling, in overeenstemming met Euratom.

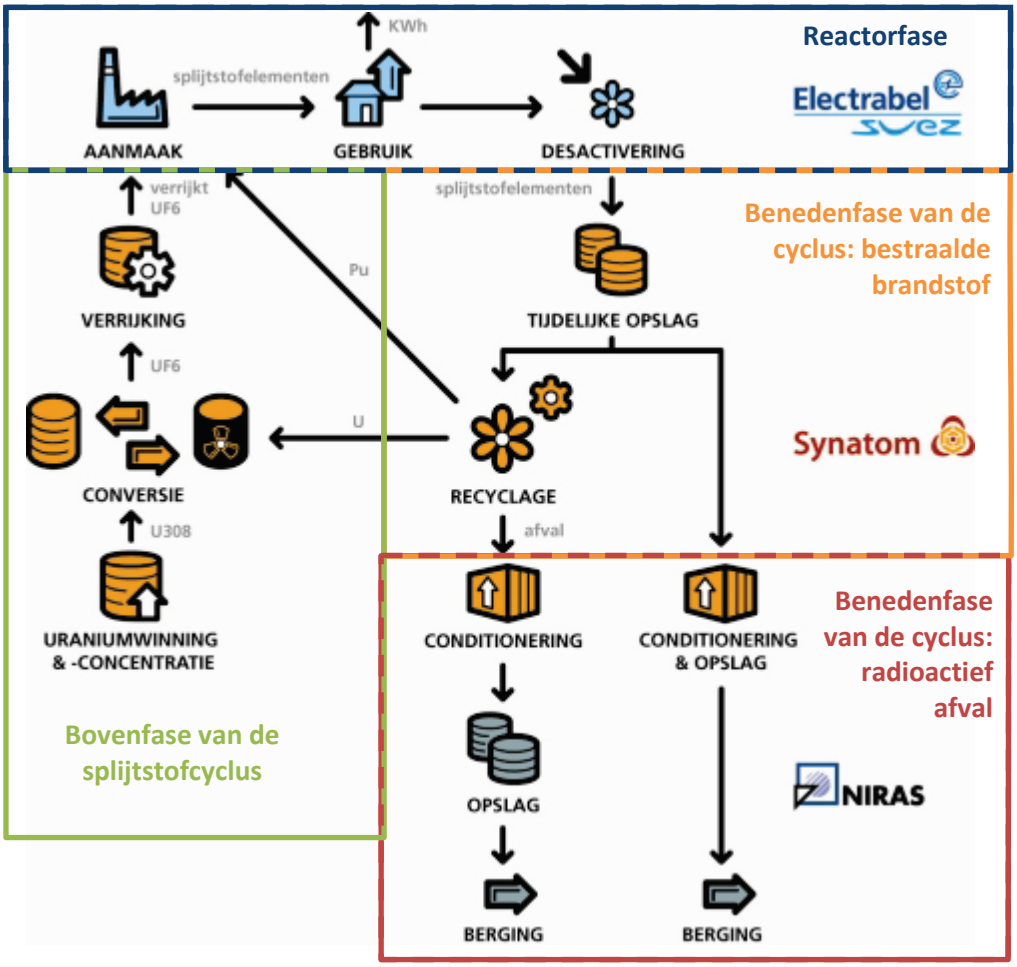
- Niet-kernwapenstaten en kernwapenstaten verbinden zich ertoe samen te werken op het gebied van kernenergie door de overdracht van nucleaire materialen en nucleaire uitrusting en door de uitwisseling van technologie en wetenschappelijke gegevens. De overdracht van nucleaire materialen en nucleaire uitrusting kan slechts gebeuren als het vreedzame gebruik van kernenergie gewaarborgd is via de toepassing van de vereiste veiligheidscontroles (van het IAEA). Deze verplichtingen op het vlak van nucleaire exportcontrole werden verder verfijnd en aangevuld in fora zoals het Zangger Committee en de Nuclear Suppliers Group.
- Kernwapenstaten verbinden zich ertoe om te streven naar een complete ontwapening van kernwapens en effectieve maatregelen te nemen om de kernwapenwedloop te doen stoppen.
- Alle partijen hebben het recht op vreedzaam gebruik van kernenergie.

2. TECHNISCHE INFORMATIE OVER DE CYCLUS VAN SPLIJTSTOFFEN EN RADIOACTIEF AFVAL

2.1. De splijtstofcyclus

De term splijtstofcyclus (hieronder geïllustreerd) omvat alle industriële stappen die gevolgd moeten worden om splijtstof te kunnen benutten, meer bepaald in kernreactoren, maar ook de verwerking voor en na het verblijf in een reactor.

Figuur 2. Schematische weergave van de splijtstofcyclus



De 3 delen van de cyclus worden duidelijk getoond, met alle stappen die ze omvatten: het groene gedeelte is de "bovenfase van de cyclus", beheerd door Synatom, het blauwe gedeelte de "reactorfase", beheerd door Electrabel, de "benedenfase van de cyclus" staat in rood en oranje. Op de afbeelding wordt een onderscheid gemaakt tussen de benedenfase van de cyclus beheerd door Synatom (de bestraalde splijtstoffen), in oranje, en de benedenfase beheerd door NIRAS (het afval), in het rood; de overlapping tussen beide verwijst naar de overdracht van het afval van Synatom aan NIRAS.
Bron: geïnspireerd op een figuur van Synatom.

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

2.1.1. De kernreactoren

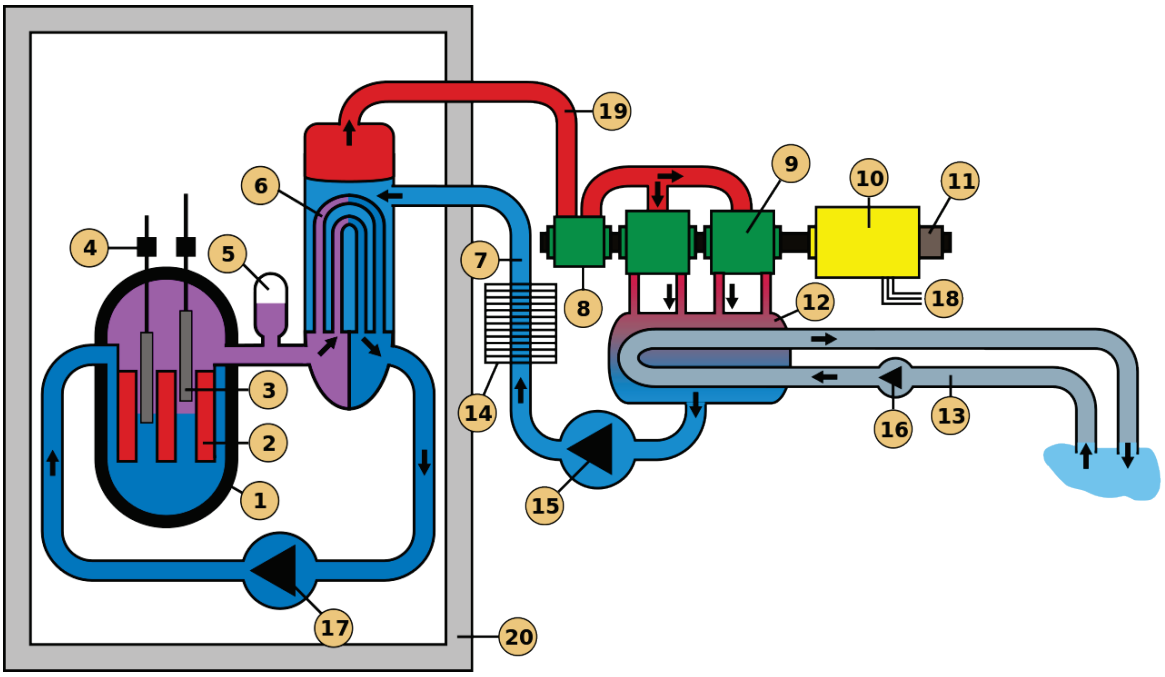
België beschikt over 7 industriële kernreactoren van het PWR-type (*Pressurized Water Cooled Reactor* of drukwatterreactor). Het gaat meer bepaald om zogeheten 'lichtwaterreactoren' (*Licht Water-cooled Reactor* - LWR) en verder een reeks onderzoeksreactoren. In dit deel zetten we de specifieke kenmerken van de PWR-reactoren uiteen. We beschrijven ook het principe van de snellekweekreactor en van de reactor aangedreven door een deeltjesversneller. Die nieuwe reactoren kunnen een rol spelen in het beheer van radioactief afval, het is daarom dat ze ons interesseren.

De Belgische industriële reactoren: de PWR's

België beschikt over 7 reactoren van het type dat wereldwijd het meest gebruikt wordt, de PWR-reactor. 66% van het wereldwijde vermogen komt van PWR's.

In PWR's zoals die in België wordt de energie die vrijkomt door kernsplijting van verrijkt uranium getransporteerd door een warmtegeleidende vloeistof (in de vorm van vloeibaar water). De warmte die die vloeistof opneemt bij haar passage door de reactorkern of door de 'verwarmingsketel', wordt van de reactorkern naar de secundaire kring in de wisselaar gevoerd. De drukhouder van de primaire kring houdt het water op een druk die voldoende hoog is om te vermijden dat het gaat koken (155 bar) en om het in vloeibare vorm te houden: nadat het door de reactorkern is gestroomd, is het water van de primaire kring warmer dan 320°C.

Figuur 3. Schematische weergave van een PWR-reactor.



1. reactorvat 2. splijtstofelementen 3. regelstaven 4. aandrijving van de regelstaven 5. drukregelvat 6. warmtewisselaar 7. toevoer van koud water 8. hogedrukturbine 9. lagedrukturbine 10. generator 11. bekrachtiger 12. condensor 13. koelwater 14. voorverwarmer 15. koudwaterpomp 16. koelwaterpomp 17. pomp van de primaire kring 18. aansluiting op het elektriciteitsnet 19. stoom 20. betonnen wand.
Bron : Wikipedia, [65].

Dat primaire water stroomt in een gesloten kring tussen de kern en een warmtewisselaar, ook wel stoomgenerator genoemd. Die zorgt ervoor dat de warmte van het water uit de primaire kring wordt overgedragen op het 'secundaire water', dat begint te koken omdat de druk veel lager is (75 bar). De stoom die het secundaire water opwekt wordt naar de turboalternator gevoerd, die elektriciteit opwekt door de energie op te vangen die in het water zit.

Het gebruik van licht water[19] in een PWR heeft evenwel een negatief effect op de handhaving van de kettingreactie in de reactor; het absorbeert immers neutronen. Daarom moet de splijtstof geoptimaliseerd worden zodat de reactie in stand kan worden gehouden (zo niet zal de kettingreactie geleidelijk stilvallen door de neutronenabsorptie van het water). Die optimalisering gebeurt door de splijtstofconcentratie in de brandstof te verhogen. In de Belgische centrales wordt kernbrandstof op basis van uranium gebruikt. Die bevat 0,7 % uranium-235 in zijn natuurlijke staat, het splijtbaar isotoop van uranium. Die concentratie aan splijtbaar uranium wordt verhoogd via een industrieel verrijkingsprocedé, tot het gehalte tussen 4 % en 5 % ligt. Zo kan de reactor de kettingreactie in stand houden. Wanneer de reactor in werking is en er dus uranium-235 wordt verbruikt, wordt er plutonium-239 (ook splijtbaar) geproduceerd binnen de reactor door de neutronen op het uranium-238 te absorberen. Dat plutonium zorgt er mee voor dat de kernreactie kan worden aangehouden (de splijting van plutonium-239 in een UOX-brandstof is goed voor een derde van de totale energieproductie in een drukwaterreactor).

De 7 Belgische kernreactoren hebben in 2016 iets meer dan 50 % van de Belgische elektriciteit geleverd. Ze staan gespreid over twee locaties, of centrales, een in Wallonië (Tihange) en de andere in Vlaanderen (Doel):

- Tihange 1: reactor met een vermogen van 962 MWe[20],
- Tihange 2: reactor met een vermogen van 1.008 MWe,
- Tihange 3: reactor met een vermogen van 1.038 MWe,
- Doel 1: reactor met een vermogen van 433 MWe,
- Doel 2: reactor met een vermogen van 433 MWe,
- Doel 3: reactor met een vermogen van 1.006 MWe,
- Doel 4: reactor met een vermogen van 1.033 MWe.

Andere technologieën

Er worden of werden ook andere reactortechnologieën gebruikt, afhankelijk van de aard van de brandstof, van de *warmtegeleidende* vloeistof en van de eventuele aanwezigheid van een *moderator* om de neutronen te vertragen. Het gaat voornamelijk om:

- BWR-reactoren: deze lichtwaterreactoren zijn vrij gangbaar over de hele wereld. Ze gebruiken een concept dat te vergelijken is met dat van een PWR-reactor, met dat verschil dat het water (dat dient als moderator en warmtegeleider) begint te koken en wordt omgezet in stoom in het bovenste gedeelte van de reactorkern. Er wordt dus onmiddellijk stoom opgewekt voor de turboalternator.

[19] Deze term wordt gebruikt in tegenstelling tot zwaar water dat chemisch gezien overeenkomt met deuterium oxide D_2O waarin het deuterium een zware isotoop van de waterstof is.
[20] Het vermogen van de reactoren zijn afkomstig van [44]

- Reactoren die zwaar water gebruiken als moderator en warmtegeleider: deze technologie wordt vooral in Canada gebruikt, in de reactoren van het zogeheten CANDU-type. Het interessante aan zwaar water is dat het minder neutronen absorbeert dan licht water, zodat natuurlijk uranium gebruikt kan worden als splijtstof en verrijking niet nodig is.
- UNGG-reactoren (Uranium Natural Graphite-Gaz), ontwikkeld in Frankrijk in de jaren 1950, werken op niet-verrijkte splijtstof (natuurlijk uranium) in metallische vorm, met een grafietmoderator en een gasvormige warmtegeleider (koolstofdioxide). In het Verenigd Koninkrijk werd een gelijkaardige technologie ontwikkeld: de Magnox-reactor, die van het UNGG-type verschilt door de splijtstofhulzen en door de andere configuratie van de reactorkern,
- AGR-reactoren (Advanced Gas-cooled Reactor), ook ontwikkeld in Groot-Brittannië, zijn de opvolgers van de Franse UNGG- en de Magnox-reactoren. AGR's gebruiken grafiet als moderator en koolstofdioxide als warmtegeleider. Als brandstof maakt dit type reactor gebruik van verrijkte UOX-tabletten.
- De Russische RBMK-reactoren werken op basis van verrijkt uranium. Als moderator-warmtegeleiderkoppel wordt geopteerd voor grafiet en gas (net zoals in de UNGG-, de Magnox- en de AGR-reactoren) of voor grafiet en water.
- De VVER-reactoren, ook van Russische makelij, zijn vermogensreactoren die water gebruiken als warmtegeleider en als moderator.

Tegenwoordig, op basis van meer dan 40 jaar ervaring met reactoren van de tweede generatie en dankzij nieuwe en meer geavanceerde veiligheidsspecificaties, worden er geleidelijk reactoren van generatie 3 en 3+ gebouwd en in gebruik genomen [45]:

- de EPR™-reactor, ontwikkeld door Areva, is een PWR met een vermogen van 1.650 MWe,
- de AP 1000-reactor, ontwikkeld door Westinghouse, is een PWR met passieve veiligheid en een vermogen van 1.250 MWe,
- de ESBWR-reactor van General Electrics is een BWR met passieve veiligheid, waarvan er al een aantal tussenmodellen in gebruik zijn in Zuid-Korea met een vermogen van 1.600 MWe,
- de laatste VVER-reactor van ROSATOM gebruikt een klassiek PWR-ontwerp met horizontale stoomgeneratoren en heeft een vermogen tussen 1.000 MWe en 1.250 MWe.

Deze lijst is verre van volledig. Overal ter wereld worden nog andere types reactoren van de 3e generatie ontwikkeld en gebouwd, bijvoorbeeld in India, China, Korea en Canada.

De vierde generatie kernreactoren omvat een reeks reactorconcepten die op dit moment bestudeerd worden, om tegen 2030 industrieel inzetbaar te zijn. Het aantal reactoren van de vierde generatie werd beperkt tot 6 verschillende types, waarvan 3 reactoren met thermische neutronen:

- de hoogtemperatuurreactor (VHTR of Very High Temperature Reactor),

- de superkritische watergekoelde reactor (SCWR of Supercritical-water-cooled reactor),
- de gesmoltenzoutreactor (MSR of Molten-salt Reactor);

en 3 snellekweekreactoren:

- gasgekoelde snelle reactor (GFR of Gas-cooled fast Reactor),
- natriumgekoelde snelle reactor (SFR of Sodium-cooled fast Reactor),
- loodgekoelde snelle reactor (LFR of Lead-cooled fast Reactor).

Onderzoeksreactoren

Het onderzoekscentrum in Mol (SCK•CEN) beschikt over een aantal nucleaire onderzoeksreactoren:

- BR1 (Belgian Reactor one): deze luchtgekoelde en grafietgemodereerde proefreactor met een vermogen van enkele duizenden kilowatt, voor de eerste keer kritisch op 11 mei 1956, was de eerste werkende Belgische reactor. Deze reactor wordt nog steeds gebruikt (maximaal 8 uur per dag) voor experimenten, onderzoek en opleiding.
- BR2: een heel krachtige onderzoeksreactor voor bestralingtests met allerhande materialen. Hij wordt hoofdzakelijk gebruikt om structuurmaterialen te testen voor de bestaande reactoren, voor toekomstige reactoren (generatie 4 en kernfusie) en voor nieuwe onderzoeksreactoren, maar ook voor tests met nieuwe splijtstoftypes voor alle soorten kernreactoren. De BR2 wordt ook gebruikt voor de productie van radioactieve isotopen (radio-isotopen bestemd voor industriële en medische toepassingen), die verwerkt worden op het Instituut voor Radio-Elementen (IRE) in Fleurus, en om gedopeerd silicium voor halfgeleiders te produceren.
- VENUS-F: oorspronkelijk was VENUS geïnstalleerd om de optimale configuratie te bestuderen van de splijtstoffen die door de diverse kernreactoren werden gebruikt. Dank zij zijn flexibiliteit konden met deze reactor diverse samenstellingen van splijtstoffen worden gesimuleerd. Het SCK-CEN is in 2008 gestart met de complete transformatie van de VENUS-reactor voor het GUINEVERE-project dat van start ging in 2010.Sindsien draagt hij de naam VENUS-F[21]

Dan is er ook nog de reactor BR3, een onderzoeksreactor op drukwater (PWR). Het was de eerste kernreactor die op niet-Amerikaanse bodem werd geïnstalleerd, meer bepaald door de firma Westinghouse eind jaren 1950. Hij werd voor het eerst kritisch in 1962 en na 25 jaar dienst definitief buiten werking gesteld in 1987 (hij diende aanvankelijk hoofdzakelijk om de operatoren van de toekomstige Belgische centrales op te leiden en vervolgens om tests te doen met de nieuwste kernbrandstoffen). De ontmanteling van onderzoeksreactor BR3 werd benut om ontmantelingstechnieken te bestuderen en te verfijnen, met de bedoeling om afval tot het minimum te beperken. De ervaring die zo werd vergaard, zal zeker van pas komen bij andere geplande ontmantelingen, zowel in België als in het buitenland.

[21] https://www.sckcen.be/nl/Research/Infrastructure/VENUS.

De universiteit van Gent exploiteerde sinds 1967 de Thetis-reactor met een maximale capaciteit van 250 kWh. Deze reactor werd definitief stilgelegd in 2003. De ontmanteling van de reactor werd voltooid in 2014.

Reactorprototypes

a. Het MYRRHA-project van het SCK•CEN

Het studiecentrum voor kernenergie SCK•CEN te Mol werkt sinds 1998 aan het project MYRRHA, [46] dat als doel heeft om een subkritische snellekweekreactor voor onderzoek te ontwerpen, te bouwen en te exploiteren, met een vermogen van ongeveer 50 thermische MW en gekoeld met een vloeibare lood-bismutlegering.

In maart 2010 volgden de ministers van energie en wetenschapsbeleid de aanbeveling van het MIRT door een voorstel in te dienen om 40 % van de vereiste investering van 960 miljoen euro te financieren, weliswaar met een tussenpauze eind 2014 om het dossier grondig onder de loep te nemen. Het SCK•CEN tracht nu een internationaal consortium op te zetten om de bijkomende financiering te verzekeren.

Op 7 oktober 2015 heeft de regering haar steun aan het MYRRHA-project vernieuwd door er een bijkomend budget van 40 miljoen euro aan toe te kennen voor de jaren 2015 tot 2017. Een nieuwe evaluatie van het project staat gepland tegen eind 2017.

De MYRRHA-reactor is een tussenstap in de ontwikkeling van een eerste industrieel prototype van een loodgekoelde snelle reactor, de zogeheten LFR (Lead-cooled Fast Reactor).

Die onderzoeksreactor, gedoopt tot 'ADS' (Accelerator Driven System), zal worden aangedreven door een deeltjesversneller. Met deze configuratie kan de splijtingsreactie onder controle worden gehouden, dankzij een externe neutronenbron. Die neutronenbron laat toe dat de MYRRHA-reactor subkritisch kan worden gehouden, zodat het potentiële gevaar dat de kettingreactie op hol slaat beperkt kan worden en de reactor op elk moment kan worden 'gedoofd'. Bovendien zullen de snelle neutronenstromen die eigen zijn aan dit type ontwerp het mogelijk maken om verschillende soorten radio-isotopen te produceren, vooral bedoeld voor medische toepassingen.

De doelstellingen van het MYRRHA-project van het SCK•CEN:

- de haalbaarheid van ADS-technologie aantonen,
- transmutatie bestuderen,
- onderzoek doen naar brandstoffen bestemd voor innoverende reactorsystemen en naar materialen voor geavanceerde reactorsystemen van de vierde generatie, reactoren op kernfusie en andere toepassingen, zoals de ruimtevaart.

De MYRRHA-reactor zou in 2023 in gebruik worden genomen.

De ontwerpstudies voor MYRRHA zijn in een vergevorderd stadium. Alvorens het project te ondersteunen, heeft de Belgische overheid een onafhankelijke evaluatie aangevraagd bij het Agentschap voor Kernenergie van de OESO. Daarop stelde het agentschap een groep met deskundigen samen, het zogeheten MYRRHA International Review Team (MIRT). In januari 2010 stelde dat team zijn eindrapport voor. Een van de voornaamste aanbevelingen uit het

rapport was om het project groen licht te geven, met inbegrip van de financiering voor een nieuwe werkfase die de gedetailleerde ontwerpstudies zou omvatten, de omzetting van intentieverklaringen in sterke engagementen, de uitklaring van het internationale belang van afvalverbranding met neutronenversnellers en de positionering van MYRRHA als Europese pionier op het vlak van ADS-installaties.

b. Het project ASTRID van het CEA

Het Franse prototype voor een snelle SFR-reactor van de vierde generatie, dat de naam 'Astrid' meekreeg *(Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)*, zou tegen 2020 klaar moeten zijn. Die nieuwe reactor heeft tal van voordelen: een volledige recyclage van de grondstoffen, [47] vrijwaring van de hulpbron en een "duurzaam" beheer dankzij transmutatie. Deze techniek, waarvan de haalbaarheid reeds is aangetoond in laboratoria, zal dankzij Astrid op industriële schaal kunnen worden toegepast. Het prototype van 600 MWe zou in het Franse Marcoule worden geïnstalleerd.

Astrid krijgt een financiering van 650 miljoen euro voor de periode 2010-2017, in de vorm van een grote staatslening. Het CEA verwacht ook ondersteuning in het kader van het project PCRDT (Programme Cadre de Recherche et Développement Technologique - kaderprogramma voor onderzoek en technologische ontwikkeling). Dat project steunt op een reeks samenwerkingen in Frankrijk (Areva, EDF en GDF Suez) en in het buitenland, waaronder een versterkt partnership met Japan.

De behandeling van het veiligheidsdossier dat bij de Franse veiligheidsoverheid is ingediend, is lopend.

c. De projecten ALFRED en ALLEGRO

Via het SNETP[22]-platform [48] ondersteunt het ESNII[23]-initiatief naast MYRRHA en ASTRID ook de onderzoeksprojecten voor lood- en gasgekoelde reactoren van de vierde generatie, respectievelijk ALFRED[24] en ALLEGRO genoemd.

Het concept van een gasgekoelde snellekweekreactor (RNR-G) bundelt de voordelen van een efficiënt gebruik van uranium, een minimale productie van radioactief afval en een productiecapaciteit voor warmte op hoge temperatuur, wat heel interessant is voor de industrie. Het RNR-G-demonstratieproject, Allegro, is toegespitst op twee kerndoelstellingen om de haalbaarheid van dergelijke reactoren te verzekeren: de ontwikkeling van een brandstof die bestand is tegen heel hoge temperaturen en het uitwerken van een betrouwbare veiligheidsstrategie. Uitgebreide informatie over dit prototype is te vinden in het CEA-rapport rond duurzaam beheer van nucleaire materialen [49].

Het concept van een loodgekoelde snellekweekreactor wordt al sinds 2006 bestudeerd. In dat opzicht werd het project ALFRED ontwikkeld als een eerste, beperkte model dat dit type reactor zo dicht mogelijk benadert. De reactor zou een elektrisch vermogen van 125 MWe moe-

[22] Sustainable Nuclear Energy Technology Platform.
[23] European Sustainable Nuclear Industrial Initiative.
[24] Advanced Lead Fast Reactor Experimental Demonstrator.

ten hebben, inbedrijfstelling is voorzien voor 2025 (net zoals voor ALLEGRO). Alle informatie over de demonstratiereactor ALFRED is te vinden op de website van het SNTEP [48].

2.1.2 De bovenfase van de splijtstofcyclus

De bovenfase van de cyclus omvat alle industriële stappen voor omzetting van het uraniumerts, vanaf de winning tot de omzetting in 'reactorklare' splijtstof. Het gaat met andere woorden om verschillende fases, te beginnen bij:

- de winning en de concentratie van het uraniumerts, handelingen die meestal gebeuren in de buurt van de uraniumvindplaatsen. Het product dat daarbij ontstaat heet "yellowcake" of "gele koek" en bevat voornamelijk uranium in de vorm van U_3O_8;
- de omzetting (zie glossarium) van het uraniumconcentraat in gasvormig uraniumhexafluoride (UF_6 - zie glossarium) om de verrijking te vergemakkelijken;
- de isotopische verrijking (zie glossarium) van het uranium, om het te lage gehalte aan splijtbare kernen (isotoop 235 van uranium) in het natuurlijk uranium te verhogen. Natuurlijk uranium bevat 0,7 % U235[25], een gehalte dat door verrijking verhoogd kan worden tot 4-5 % voor UOX-splijtstoffen. Die verrijking moet ook gebeuren met het uranium herwonnen uit opwerking, dat bij aanvang een U235-concentratie van iets minder dan 1 % heeft.

Zodra het verrijkte uranium de vorm van uraniumoxide heeft, kan het gebruikt worden voor de productie van kernbrandstof. Elk reactortype gebruikt zijn eigen splijtstoffen, met hun eigen specifieke kenmerken. Zo gebruiken bepaalde reactoren bijvoorbeeld metallische splijtstof. We bespreken hier enkel de splijtstoftypes die gebruikt worden in de PWR-centrales, de splijtstoffen op basis van oxide.

De splijtstoffen

Er werden drie verschillende soorten kernbrandstof gebruikt in de Belgische PWR-reactoren: UOX-splijtstof, REU en MOX. Deze drie types splijtstof werden gebruikt in de Belgische reactoren, maar om veiligheidsredenen was het toegelaten aandeel MOX-splijtstof in de reactorkern nooit hoger dan 20 %. Die grens werd vastgelegd door het FANC om de veiligheid in de reactoren te handhaven en ingrijpende wijzigingen te vermijden. Enkel de reactoren van Doel 3 en Tihange 2 hebben een vergunning gekregen om MOX-splijtstof te gebruiken.

Het productieprocedé voor splijtstof staat hierna beschreven. De tabel in bijlage C toont de isotopische samenstelling (in massapercentage) van elk splijtstoftype voor en na bestraling.

a. UOX-splijtstof

UOX-splijtstof, op basis van uraniumoxide (UO_2), is de kernbrandstof die het meest gebruikt wordt in België. Het uranium dat gebruikt wordt om UOX te maken is natuurlijk uranium

[25] Om de isotopen van hetzelfde scheikundig element (hier uranium, aangeduid met het symbool U) te onderscheiden, wordt na het symbool van het element het massagetal vermeld (in dit geval 235). Twee isotopen van hetzelfde element worden aangeduid met een verschillend massagetal (bij voorbeeld 235 en 238 voor uranium).

waarvan het splijtstofgehalte, anders gezegd het gehalte aan uranium 235, verrijkt werd tot een concentratie tussen 4 en 5 %.

Tijdens de reactorfase wordt het uranium beschoten met neutronen. Die zetten de uranium-atomen ofwel om in zwaardere elementen, ofwel ontketenen ze de splijting van de uranium-235-atomen. Het is door die omzetting of 'transmutatie' dat er zich plutonium-239 vormt, dat ook gespleten kan worden door neutronen.

Bij de splijting van een atoom (uranium of plutonium) komen er nieuwe neutronen vrij, zodat de kettingreactie binnen de reactor in stand kan worden gehouden. Naast die neutronen worden er ook grote hoeveelheden warmte vrijgegeven in een elektronucleaire reactor. Die warmte wordt omgezet in elektriciteit. Merk op dat terwijl er enkel uranium zit in verse UOX-splijtstof, tussen 30 en 40 % van de warmte die de splijtstof afgeeft tijdens haar bestraling afkomstig is van de splijting van het plutonium dat geproduceerd is door de transmutatie in de splijtstof.

b. REU-splijtstof

Deze kernbrandstof is sterk te vergelijken met UOX-splijtstof, met dat verschil dat het uranium dat ze bevat afkomstig is van opwerking. Anders gezegd, het uranium werd reeds bestraald en vervolgens gerecycleerd en opnieuw verrijkt. Opgewerkt uranium heeft een isotopische samenstelling die licht verschilt van die van natuurlijk uranium: het bevat onder meer een kleine hoeveelheid uranium, ontstaan tijdens de eerste reactorfase. Die isotoop heeft eerder de neiging om neutronen te absorberen, waardoor er bijkomend neptunium wordt geproduceerd tijdens de bestraling van REU-splijtstof (zie tabel in bijlage C).

Bij de opwerking van 530 ton Belgische bestraalde splijtstof werd er in België 77 ton REU geproduceerd en gebruikt.

c. MOX-splijtstof

MOX-splijtstof verschilt van de twee vorige splijtstoffen omdat ze bestaat uit een fijn mengsel van plutonium- en uraniumoxide. Elk MOX-splijtstofelement bevat tussen de 7 % en de 10 % plutonium (er bestaan ook elementen met een hogere concentratie, maar die vormen eerder de uitzondering).

Dit type splijtstof wordt gebruikt om de recyclage mogelijk te maken van plutonium dat herwonnen wordt bij opwerking. Ongeveer 30 % van het plutonium in MOX-splijtstof wordt verbruikt tijdens de reactorfase (zie tabel in bijlage C). Het gebruik van MOX maakt het mogelijk om niet enkel de globale plutoniumvoorraad terug te schroeven, maar vooral om dat plutonium onbruikbaar te maken. Gespleten plutonium is immers het plutonium waarvoor het proliferatierisico het hoogst is. De MOX-splijtstofelementen zijn evenwel uitsluitend afkomstig uit de opwerking van bestraalde splijtstof, waardoor er een aantal bijkomende handelingen op hoogradioactieve stoffen nodig zijn om ze te kunnen maken.

En bestraalde MOX-elementen hebben een activiteit die hoger ligt dan die van UOX/RTU. Daardoor vergt hun gebruik meer voorzorgsmaatregelen en is het definitieve beheer ervan iets delicater.

De productie van splijtstoffen

Om splijtstof te produceren, wordt het verrijkte uraniumhexafluoride vervolgens omgezet in uraniumoxide UO_2, dat eruitziet als een zwart poeder. Bij de vervaardiging van MOX-splijtstof wordt in dit stadium PuO_2 toegevoegd aan het UO_2-poeder.

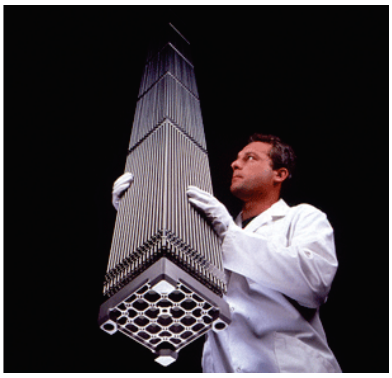
Vervolgens wordt het poeder gesinterd (gebakken in een oven) waarbij kleine staafjes ontstaan van ongeveer 1 cm lang, die men ook wel "tabletten" noemt. Die tabletten worden op elkaar gestapeld in lange metalen kokers van ongeveer 4 meter lang, gemaakt uit een zirkoniumlegering: de "hulzen". De uiteinden van die hulzen worden volledig afgedicht, en zo ontstaan de "brandstofstaven".

De brandstofstaven worden samengevoegd tot een "splijtstofelement", zoals te zien is in figuur 5. Bij wijze van voorbeeld: de kern van een drukwaterreactor van 900 MWe bevat 157 elementen, die elk bestaan uit 264 brandstofstaven, voor een totale hoeveelheid van 460 kg verrijkt uranium. De splijtstofelementen hebben uiteenlopende vormen en grootes, afhankelijk van de reactor waarvoor ze bestemd zijn.

Figuur 4. Brandstofstaaf met Uranium-tabletten

Bron : Wikipedia [81]

Figuur 5. Foto van een splijtstofelement met vierkante doorsnede, bestemd voor een PWR-reactor.



Bron: Synatom [23].

De gebruikte splijtstoftypes in België

De 7 Belgische reactoren gebruiken niet allemaal splijtstofelementen van dezelfde grootte. Tabel 2 bevat de voornaamste eigenschappen van de splijtstofelementen die in onze reactoren gebruikt worden

Tabel 2. Splijtstofelementen en hun eigenschappen.

Reactor	Doel 1-2	Tihange 1	Tihange 2 - Doel 3	Tihange 3 - Doel 4
Aantal brandstofstaven	14 x 14	15 x 15	17 x 17	17 x 17
Diameter (mm)	198	214	214	214
Totale lengte (mm)	2.940	4.110	4.110	4.855
Totale massa (kg)	385	650	670	780
Massa U (kg)	265	431	461	528
Structuurmassa (kg)	120	219	209	242

Bron: NIRAS [50].

2.1.3. De reactorfase

De reactorfase omvat het laden van de splijtstofelementen in de kernreactor en hun bestraling met neutronen om de kernreactie in stand te houden.

De splijtstofelementen vormen de kern van de reactor. Elk element ondergaat 3 tot 4 bestralingscycli (elke bestralingscyclus neemt 12 tot 18 maanden in beslag naar gelang van de reactor). Aan het einde van elke cyclus wordt een derde - of een vierde - van de elementen definitief ontladen uit de kern, omdat ze niet voldoende rijk meer zijn om de kernreactie in stand te houden. Die ontladen elementen worden vervangen door een gelijk aantal nieuwe, zogeheten verse, elementen.

De geometrie van de reactorkern is heel nauwkeurig ontworpen om het prestatievermogen ervan te optimaliseren.

In de Belgische reactoren ligt het aanvankelijke gehalte aan uranium-235 in UOX- of REU-splijtstofelementen iets hoger dan 4 %. Tijdens de reactorfase wordt dat uranium-235 geleidelijk verbruikt en vernietigd door de splijtingsreacties, en geeft het zijn energie vrij. Het gehalte is afgenomen tot iets minder dan 1 % op het moment dat het element definitief ontladen wordt uit de kern.

2.1.4. De benedenfase van de cyclus

De benedenfase van de splijtstofcyclus omvat de stappen die bestraalde splijtstoffen ondergaan nadat ze uit de reactor ontladen zijn, tot en met de berging van het ultieme radioactieve afval dat ze voortbrengen.

Zoals het schema in figuur 2 toont, worden er doorgaans twee opties overwogen om de bestraalde splijtstof te beheren:

- de optie "**niet-opwerking**" of "**directe berging**", waarbij de bestraalde splijtstoffen in hun staat op dat moment geconditioneerd worden, opgeslagen en uiteindelijk overgebracht naar een berging[26]: dat noemen we de open cyclus. Binnen deze cyclus worden de verbruikte splijtstoffen beschouwd als afval;
- optie **opwerking** of de zogeheten gesloten cyclus, waarbij de recycleerbare delen in de splijtstof na de reactorfase gescheiden worden van de niet-recycleerbare delen. De eerste worden opgewerkt om hergebruikt te worden in de splijtstofcyclus, terwijl de overschot, het afval, geconditioneerd wordt met het oog op definitief beheer.

Bij de tweede optie moeten een reeks opeenvolgende keuzes gemaakt worden over het scheidingsproces, de opwerking van de materialen en de conditionering van het afval. Wat de gekozen optie ook is, geologische berging wordt op internationaal vlak beschouwd als de beste manier om het afval te beheren.

[26] De term "berging" verwijst altijd naar een installatie waarin de verbruikte splijtstoffen geplaatst worden zonder de intentie om ze er weer uit te halen, in tegenstelling tot de term 'opslagplaats', die steeds verwijst naar een tijdelijke bewaarruimte.

De bestanddelen van bestraalde splijtstoffen

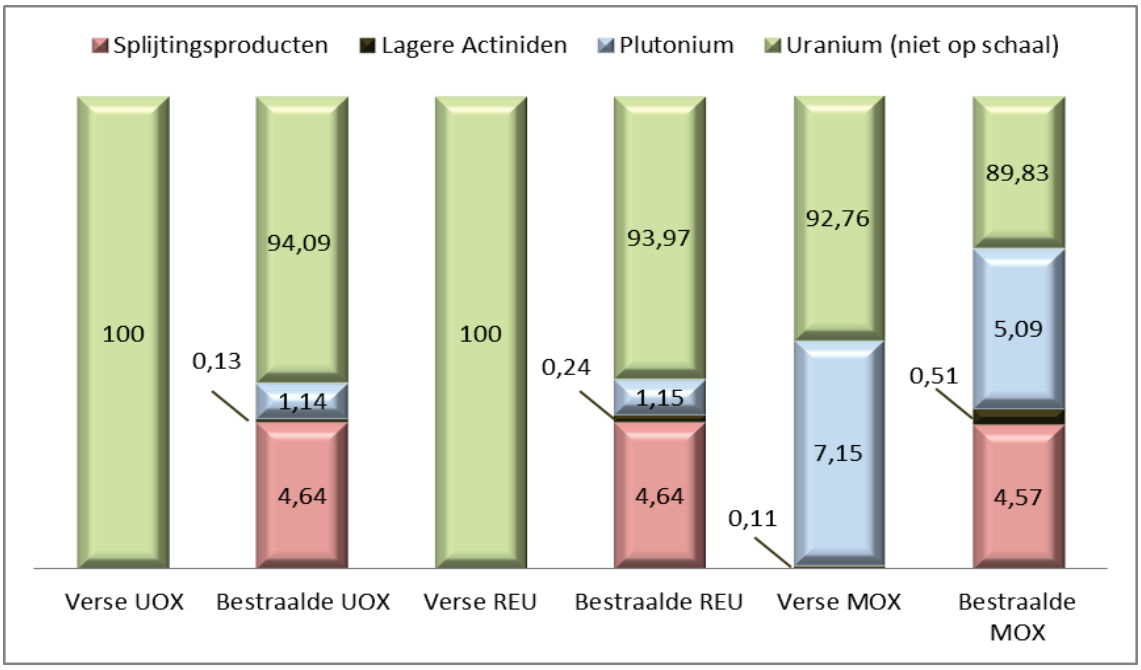
Na bestraling heeft kernbrandstof uiteenlopende isotopische samenstellingen, die afhangen van een hele reeks factoren, zoals de oorspronkelijke samenstelling, de neutronenstroom waar de splijtstof aan blootgesteld wordt en de verbrandingsgraad (de zogeheten burn-up). Zonder al te veel in detail te treden over de precieze isotopische samenstelling van elke splijtstof, kunnen we de bestanddelen van een element onderverdelen in 4 aparte groepen, elk met hun eigen specifieke kenmerken op het vlak van langetermijnbeheer.

- **Uranium** (U): deze groep bevat alle uraniumisotopen na de reactorfase van de splijtstof, anders gezegd de isotopen aanwezig in het natuurlijk uranium (U235 en U238) en de isotopen die ontstaan bij de bestraling (in hoofdzaak U236). Uranium-234 is het isotoop met de kortste halveringstijd: 247.000 jaar. Uranium is niet het gevoeligste element voor het langetermijnbeheer van de splijtstof; het bevat evenwel een hoog energiepotentieel dat het interessant maakt voor opwerking.
- **Plutonium** (PU): bij de bestraling van splijtstof worden er verschillende plutoniumisotopen geproduceerd. Die productie wordt opgewekt door neutronabsorptie van het uranium-238 dat de splijtstof bevat. Na bestraling bevat de splijtstof plutoniumisotopen 238 tot 242, waaronder de splijtbare isotopen plutonium-239 en -241. In het langetermijnbeheer van de splijtstofcyclus is plutonium een van de belangrijkste elementen, omdat het de voornaamste bron van radiotoxiciteit wordt na een afkoelperiode van 300 jaar.
- **De lagere actiniden** (LA): dit zijn elementen uit de familie van de actiniden, die in kleine hoeveelheden vrijkomen bij de bestraling van splijtstof, vandaar "lagere" actiniden. Het gaat in hoofdzaak om neptunium (Np), americium (Am) en curium (Cm). De groep met lagere actiniden levert de tweede grootste bijdrage op het vlak van radiotoxiciteit op lange termijn. De lagere actiniden geven bovendien heel wat warmte en alfastraling af. In de huidige opwerkingscenario's, zoals in Frankrijk, worden die elementen aangegeven als afval en verglaasd, maar er wordt ook heel wat onderzoek gedaan naar technieken om ze te vernietigen in reactoren (transmutatie). Sommige zijn immers splijtbaar en zouden kunnen dienen als brandstof in bepaalde, specifieke toepassingen [51].
- **De splijtingsproducten** (SP): alle atomen die afkomstig zijn uit de splijting van uranium of plutonium maken deel uit van deze groep. Deze elementen zijn lichter dan uranium of plutonium, met een massagetal gaande van ongeveer 80 tot ongeveer 160 (in de plaats van 235 en 238 voor uranium). Door de eigenlijke splijting zelf, een statistisch gegeven, is het aantal geproduceerde isotopen enorm talrijk. Dat verklaart waarom de mogelijke massa's zo sterk uiteenlopen. Bovendien worden splijtingsproducten doorgaans gekenmerkt door een overschot aan neutronen en zijn ze radioactief. Ze stellen ons voor serieuze problemen op korte termijn: ze geven enorm veel warmte af, de meeste ervan hebben bovendien een vrij korte halveringstijd[27]. Door de verbruikte splijtstof gedurende 60 jaar te laten afkoelen alvorens ze geologisch te bergen, daalt de warmteafgifte van splijtingsproducten met factor 5 tot 10. Tot op heden is

[27] Bij het verlaten van de reactor geeft een verbruikte splijtstof enorm veel warmte en straling af. Alvorens ze naar een externe opslagplaats te vervoeren, wordt ze in een koelbekken geplaatst waar de warmte afgevoerd wordt en de splijtstof, de naam zegt het zelf, kan afkoelen.

er geen enkel nuttig gebruik voorzien voor splijtingsproducten, ze worden dan ook beschouwd als radioactief afval. De insluiting van splijtingsproducten is echter heel complex, omdat deze groep een breed spectrum aan elementen bevat met uiteenlopende chemische eigenschappen, zoals technetium-99, dat uiterst beweeglijk is in de bestudeerde gastgesteenten.

Figuur 6. Isotopische samenstelling van UOX-, REU- en MOX-elementen, vers of bestraald (burn-up van GWd/t en afkoelperiode van 3 jaar)



De waarden staan aangegeven in %. Groen staat voor uranium, blauw voor plutonium, zwart voor de lagere actiniden en rood voor de splijtingsproducten. Slechts 15 % van het totaal wordt getoond in de figuur, de resterende 85 % is immers nog steeds uranium.
Bron: cijfers van Synatom, [23], aangepast door de FOD Economie.

De grafiek (figuur 6) toont de isotopische samenstellingen van drie splijtstoftypes (UOX, MOX en REU), zowel vers als bestraald en onderverdeeld in groepen: de splijtingsproducten (in het rood), de lagere actiniden (in het bruin), plutonium (in het blauw), uranium (in het groen, niet op schaal). De hypotheses die geleid hebben tot deze indeling zijn:

- een burn-up gaande tot 45.000 MWd[28] per ton en
- een afkoelingsperiode van drie jaar.

De tabel in bijlage C toont de samenstelling van verse of bestraalde splijtstoffen, isotoop per isotoop. De onderstaande waarden zijn op die tabel gebaseerd.

De scheidingstechnieken

In dit deel bespreken we de verschillende scheidingstechnieken die de voorbije 60 jaar ontwikkeld werden. Er zijn heel wat inspanningen geleverd om die technieken te ontwikkelen en te verfijnen. Al is het PUREX-procedé dan het enige dat tot op heden industrieel geëxploi-

[28] 1 MWd (megawatt-dag) = 24 MWh (megawatt-uur).

teerd werd, er is meer en meer sprake van om op industriële schaal nieuwe procedés uit te werken, vooral als het gaat om de ontwikkeling van nieuwe reactortypes. Elk procedé heeft zo zijn eigen voor- en nadelen op het vlak van non-proliferatie, opslagmethodes voor afgescheiden materialen, behandeling van die materialen enz.

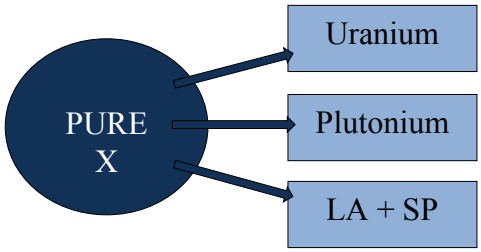
Het is hier niet de bedoeling om heel diep in te gaan op de chemisch-fysische reacties die scheiding mogelijk maken; we willen vooral de bestaande scheidingsprocessen op een rijtje zetten en nagaan welke materialen er nog beheerd moeten worden na afscheiding, hetzij door ze opnieuw in de splijtstofcyclus te brengen, hetzij door ze definitief te bergen.

De scheidingstechnieken kunnen opgedeeld worden in 2 verschillende metallurgische processen: de hydro- en de pyrometallurgie. Tot op heden zijn de ontwikkelde processen voor de verwerking van splijtstof vooral van hydrometallurgische aard, denken we bijvoorbeeld aan PUREX, UREX, COEX, TRUEX, DIAMEX, SANEX en GANEX, die hieronder in detail worden besproken. De pyrometallurgische procedés staan uiteengezet in punt e hierna. Het principe van dit type procedé bestaat erin om de brandstof op te lossen in een oplossing die gezuiverd kan worden om de elementen te scheiden.

Meer informatie over de scheidingstechnieken vindt u in de referenties [52], [53], [54].

a. PUREX

Het PUREX-procedé, voluit *Plutonium en Uranium Extraction*, is de scheidingstechniek voor splijtstof waar men wereldwijd de meeste ervaring mee heeft. Bij deze hydrometallurgische methode worden bestraalde splijtstofelementen versneden in stukken van een paar centimeter lang. Die worden vervolgens ondergedompeld in een oplossing van geconcentreerd salpeterzuur waardoor de splijtingsproducten en de uraniummatrix oplossen, maar de stukken huls en de eindstukken van de elementen intact blijven. Daarna kunnen aan de hand van deze techniek de splijtingsproducten en lagere actiniden, de hulzen en eindstukken en het uranium en plutonium selectief gescheiden worden.



Figuur 7. Illustratie van het PUREX-scheidingsprocedé.

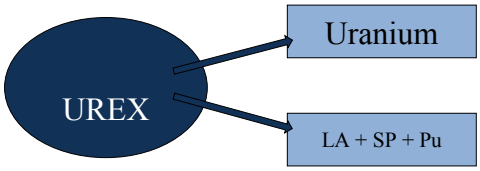
De eerste Europese fabriek die het PUREX-procedé gebruikte om bestraalde splijtstoffen afkomstig uit industriële reactoren op te werken, was de fabriek van Eurochemic in Dessel, die tussen 1966 en 1974 werd uitgebaat onder OESO-voogdij. Het is ook de gebruikte methode in de Areva -fabrieken in La Hague, aanvankelijk voor splijtstof uit de Franse grafietgasreactoren en vervolgens ook voor splijtstof uit lichtwaterreactoren.

Het PUREX-procedé is ook de techniek die werd toegepast op de opgewerkte Belgische splijtstof. Het uranium en het plutonium werden gebruikt om REU- en MOX-splijtstof te produceren, de lagere actiniden en splijtingsproducten werden verglaasd en in canisters geplaatst (CSD-V). Die canisters zijn teruggekeerd en worden tegenwoordig bewaard in gebouw 136 van Belgoprocess. Ook de structuurelementen, de eindstukken en de hulzen van de ele-

menten werden gescheiden van de splijtstof en vervolgens samengeperst en in canisters geplaatst (CSD-C) en eind 2013 naar België gerepatrieerd.

b. UREX

Het UREX-procedé (wat staat voor Uranium Extraction) is een variant van het PUREX-procedé. Bij deze techniek wordt uranium gescheiden van de rest van de bestraalde splijtstof. Met deze methode wordt het plutonium niet afgescheiden en worden de proliferatierisico's dus beperkt, door het vereiste volume voor de opslag van verbruikte splijtstof aanzienlijk terug te dringen (quasi 95 % van de splijtstof is uranium).

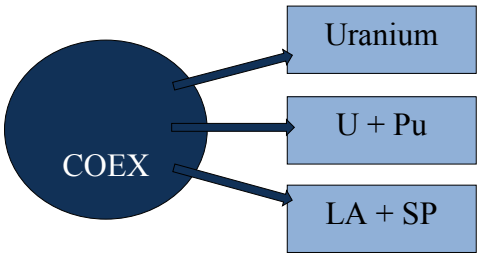


Figuur 8. Illustratie van het UREX-scheidingsprocedé.

Het UREX-procedé kan perfect gecombineerd worden met andere scheidingstechnieken, zoals TRUEX bijvoorbeeld (zie verder). Met deze methode wordt het ook mogelijk om technetium-99 te scheiden van de rest van het afval. Dat kan interessant zijn, aangezien technetium door zijn hoge beweeglijkheid een van de splijtingsproducten is die het moeilijkst te beheren zijn op lange termijn. Eens het element gescheiden is, kan het behandeld worden en omgezet in een vorm die de berging ervan vergemakkelijkt.

c. COEX

Dit procedé (waarvan de naam de verkorting is van "Co-Extraction") wordt op dit moment volop bestudeerd. Deze methode zou het mogelijk maken om een "afvalstroom" die bestaat uit splijtingsproducten, lagere actiniden, hulzen en eindstukken te scheiden van een uraniumstroom en een uranium-plutoniumstroom. Het nut van de techniek is dat er geen stroom zuiver plutonium afgescheiden zou worden, waardoor het risico op nucleaire proliferatie dus beperkt is én het mogelijk blijft om het plutonium te recycleren tot MOX-splijtstof.

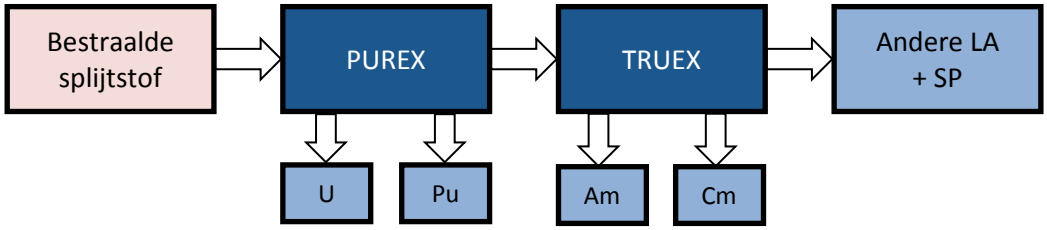


Figuur 9. Illustratie van het COEX-scheidingsprocedé.

d. TRUEX, DIAMEX, SANEX, GANEX

Er bestaan ook andere procedés, die ontwikkeld werden om nog verder te gaan in de scheiding van lagere actiniden en splijtingsproducten. Denken we bijvoorbeeld aan het TRUEX-procedé (*Transuranic Extraction*) dat, in combinatie met de PUREX-methode, de mogelijkheid biedt om americium en curium te scheiden uit de stroom met andere lagere actiniden en splijtingsproducten. Die twee actiniden zijn alfastralers, door ze te scheiden wordt het gemakkelijker om de rest van het afval te verwerken.

Figuur 10. Illustratie van de opeenvolgende toepassing van de PUREX- en de TRUEX-methode op bestraalde splijtstof.



Bron: FOD Economie.

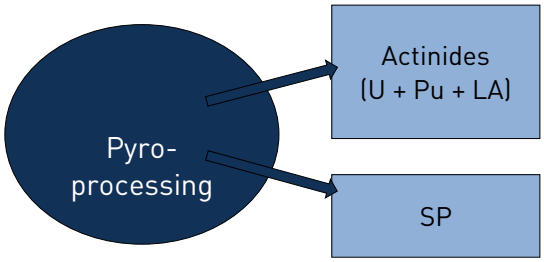
Een tweede variant is het DIAMEX-procedé (wat staat voor *DIAMide EXtraction*). Dit procedé, ontwikkeld in Frankrijk, moet de vorming voorkomen van organische verbindingen in het afval (beperkt het gebruik van organische elementen zoals koolstof, waterstof, stikstof en zuurstof). Het maakt het mogelijk om de actiniden en lanthaniden te scheiden van de splijtingsproducten.

Nog een andere variant is het SANEX-procedé, dat een selectieve scheiding toelaat van de lagere actiniden, zodat ze apart geconditioneerd kunnen worden. Deze methode kan toegepast worden na het DIAMEX-procedé om de actiniden van de lanthaniden te scheiden. Er werden gelijkaardige processen ontwikkeld in de US (TALSPEAK) en in Japan (TOGDA).

Het GANEX-procedé (Global ActiNide EXtraction), ontwikkeld door CEA, verloopt in 2 stappen: een selectieve onttrekking van het uranium, gevolgd door een gegroepeerde onttrekking van de andere actiniden (Pu, Np, Cm, Am). De lanthaniden en de splijtingsproducten komen terecht in de afvalstroom. Het bijzondere aan dit procedé is dat de materiaalstroom curium bevat, wat noopt tot strenge beperkingen op het vlak van productie, behandeling en transport.

e. Pyroprocessing

Bij pyrometallurgische (of pyrochemische) procedés wordt de splijtstof thermisch behandeld om chemische transformaties in gang te zetten die de scheiding mogelijk maken van de bestanddelen van de splijtstof. Deze technieken heeft men overwogen voor de ontwikkeling van een snellekweekreactor, omdat ze het mogelijk maken voldoende elementen te scheiden aan een lagere kostprijs dan die van hydrometallurgische procedés. De procedés hebben echter een aantal beperkingen die nog niet verholpen konden worden: ze gebruiken gesmolten chloor- en fluorzouten waarmee het heel gevaarlijk werken is, het is niet mogelijk om elke actinide te scheiden, en de factoren voor decontaminatie in de splijtingsproducten blijven laag.



Figuur 11. Illustratie van pyroprocessing.

Pyroprocessing maakt het mogelijk om metalen (anders gezegd, alle actiniden) te scheiden van andere verbindingen (de splijtingsproducten). Het resultaat van die scheiding heeft een metallische en niet-geoxideerde vorm, wat de opslag en het latere hergebruik vergemakke-

lijkt. Bovendien wordt plutonium nooit gescheiden van de andere actiniden, wat het risico op proliferatie beperkt ten opzichte van het gebruik van het PUREX-procedé.

f. Andere

Er bestaan nog andere procedés, die op dit moment volop onderzocht worden. Daar gaan we in deze studie niet dieper op in.

Opwerking

Doorgaans wordt scheiding enkel overwogen om de energiematerialen te recycleren die nog aanwezig zijn in de brandstof (in de eerste plaats uranium en plutonium. De herwinning van lagere actiniden is echter ook denkbaar dankzij snellekweekreactoren en ADS-technologie). Splijtingsproducten daarentegen worden nog steeds beschouwd als afval en daarom geconditioneerd om ze te kunnen bergen. De term "opwerking" slaat meestal op de combinatie van beide processen (scheiding en recyclage). Strikt genomen is er niets dat verhindert om scheiding en hergebruik van materialen van elkaar los te koppelen. Het is mogelijk om gescheiden materialen uit bestraalde splijtstof te verwerken met een ander doel dan hun recyclage, bijvoorbeeld om de conditionering te kunnen afstemmen op elk van die materialen om de insluitkwaliteit[29] bij de geologische berging te verhogen of, eenvoudiger nog, om materiaal met energiepotentieel door te verkopen en op die manier het volume aan geborgen radioactief afval te beperken. In deze studie gebruiken we de term "opwerking" in de algemeen aanvaarde betekenis van "PUREX-scheiding gevolgd door hergebruik in MOX en REU". Dekt de term een andere lading, dan verduidelijken we de aard van de toegepaste behandeling.

Opwerking wordt al jarenlang op industriële schaal toegepast over de hele wereld, zo werd er bijvoorbeeld 670 ton Belgische splijtstof opgewerkt. De parlementaire resolutie van 1993, bevestigd met de beslissing van de Ministerraad in 1998, maakte echter een einde aan de opwerking van de Belgische splijtstof. Sindsdien wordt de bestraalde splijtstof opgeslagen op de terreinen van de kerncentrales, in afwachting van een beslissing over het einde van hun levenscyclus.

Het is dus niet ondenkbaar dat opwerking in België weer toegelaten wordt. Het betreft hier het scenario op basis waarvan de provisies worden geëvalueerd maar in 2013 werd de discussie gestart rond de optie om slechts een deel van de bestraalde splijtstof op te werken. Om de opwerking van kernbrandstof herop te starten moet Synatom dat het monopolie heeft voor het beheer van de splijtstofcyclus, dat allereerst vragen én moet het parlement daartoe zijn fiat geven. Vervolgens moeten er contracten worden gesloten met een opwerkingsfabriek (hoogstwaarschijnlijk Areva) en moet bepaald worden welke elementen er opgewerkt worden. Na een eerste afkoelperiode in de koelbekkens van de reactor moet het transport van de elementen naar de opwerkingsfabriek georganiseerd worden.

Om redenen van optimalisering worden de splijtstofelementen niet een per een verwerkt, maar in reeksen. De opwerkingscontracten moeten zodanig worden opgesteld dat elk land

[29] Hoe dan ook, de insluitkwaliteit zal moeten voldoen aan de normen die de regulator oplegt. Maar als de technologie het toelaat om die nog te verhogen, dan zijn het voorzorgsbeginsel en het "ALARA"-principe van toepassing om een optimaal evenwicht te vinden.

afval terugkrijgt dat bij de opwerking ontstaat, in verhouding tot de verzonden splijtstof en met verificatie van de activiteit in dat afval.

EDF heeft berekend dat de recyclage van kerntechnische materialen uit de opwerking van bestraalde splijtstof het mogelijk maakt om de behoefte aan natuurlijk uranium van haar kernreactorpark[30] met 17 % terug te dringen, en dat dankzij het gebruik van REU- en MOX-splijtstof. In België kwam men tot een gelijkaardige conclusie na de recyclage van opwaardeerbare materialen (U en Pu), herwonnen naar aanleiding van de opwerkingscontracten gesloten in 1976 en 1978.

a. De ervaringen met opwerking

Opwerking is de enige optie voor het beheer van bestraalde splijtstof waarmee men reeds uitgebreide industriële ervaring heeft. Die ervaring situeert zich op verschillende vlakken:

- opwerking van splijtstof uit reactors van het PWR- en het BWR-type;
- opwerking van splijtstof uit UNGG-reactoren.

Dankzij die ervaring kon het hele proces geoptimaliseerd worden. Zo bereikt het scheidingsprocedé nu zuiverheden die de 100 % benaderen voor uranium en plutonium, elementen die bijgevolg niet meer achterblijven in het verglaasde afval. De installaties konden verbeterd worden, waardoor het volume aan afval en secundair afval en het aantal lozingen beperkt wordt en de veiligheid van het personeel toeneemt.

De Franse groep Areva trok, na een eerste ervaring met de opwerking van splijtstof uit UNGG-reactoren, volop de kaart van de opwerking van splijtstof uit lichtwaterreactoren (PWR en BWR), met de geleidelijke ingebruikname van twee fabrieken in La Hague. Beide fabrieken, UP2 en UP3, hebben tot eind 2010 om en bij de 26.400 ton bestraalde splijtstof opgewerkt (voor Frankrijk en voor verschillende andere landen), waarvan ongeveer 65 ton MOX-splijtstof.

In het Verenigd Koninkrijk werd de opwerkingsfabriek THORP in Sellafield vanaf 1994 geleidelijk in bedrijf gesteld. Tegen eind 2009 had men daar 6000 ton bestraalde splijtstof uit AGR-reactoren (zie bijlage C) en PWR-reactoren opgewerkt. In 2010 besliste de NDA[31] echter om ze definitief stil te leggen[32].

In het noorden van Japan moest de fabriek van JNFL in Rokkasho, ontwikkeld in samenwerking met Areva, in dienst worden genomen in oktober 2013. Nieuwe veiligheidsreglementeringen hebben de ingebruikstelling ervan echter vertraagd[33]. Die is momenteel gepland tegen uiterlijk september 2018[34].

---

[30] http://energie.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/En_Direct_Centrales/Nucleaire/General/Notes_Info/gestion_du_combustible.pdf.
[31] Nuclear Decommissioning Authority.
[32] http://www.world-nuclear-news.org/WR_Britain_looks_for_reprocessing_strategy_1803101.html.
[33] http://www.jnfl.co.jp/english/topics/131219-1.pdf.
[34] http://www.japantimes.co.jp/news/2015/11/17/national/fuel-reprocessing-plant-northern-japan-delayed-2018/.

b. Ervaring met de recyclage van opgewerkt uranium

Een bestraald UOX-brandstofelement bestaat voor ongeveer 94 % uit uranium. Dat uranium bevat iets meer U235 dan natuurlijk uranium (iets minder dan 1 % tegenover 0,07 %) en kan gerecycleerd worden om te worden gebruikt op dezelfde manier als natuurlijk uranium na herverrijking.

Na tests in 1990 in de reactoren van Doel 4 en Tihange 2 werd de recyclage van opgewerkt uranium vanaf 1994 op industriële schaal toegepast in België, zo kwam het dat de reactorkern van Doel 1 een aantal jaar volledig uit 'gerecycleerd' uranium bestond. Na (her-) verrijking werd er zo 77 ton REU gebruikt in Doel, in de vorm van 290 splijtstofelementen.

In het buitenland [55] kozen twee Franse eenheden (die van de centrale van Cruas) voor dezelfde aanpak. En ook Zweden heeft al het opgewerkte uranium in zijn bezit gerecycleerd. Sinds het begin van de jaren 1990 hergebruikte het Verenigd Koninkrijk 1.500 ton opgewerkt uranium in zijn AGR-reactoren. Landen zoals Japan, Duitsland, Zwitserland en Nederland volgen tot op heden programma's waar duizenden tonnen opgewerkt uranium uit zijn voortgekomen. Rusland recycleert uranium in zijn RBMK-reactoren (zie bijlage C) en laadt op dit moment verschillende VVER-reactoren met opgewerkt uranium. Ook China heeft aangegeven dat het zijn opgewerkt uranium wil gaan hergebruiken, om zijn afhankelijkheid van steenkool te beperken en de energieveiligheid in het land te waarborgen [56].

De ervaring leert ons dat de recyclage van REU noch de prestaties, noch de exploitatieveiligheid van de reactoren aantast. We stellen evenwel vast dat de samenstelling van bestraalde REU-splijtstof wel licht verschilt van die van bestraalde UOX-splijtstof (zie tabel in bijlage C), omwille van de aanwezigheid van U236 in die splijtstof voor ze in de reactor gaat.

c. Ervaring met de recyclage van plutonium

Plutonium, dat 1 % van de bestraalde splijtstof vertegenwoordigt, wordt hoofdzakelijk gerecycleerd door het gebruik van MOX-kernbrandstof waarin plutoniumoxide wordt vermengd met een poeder van verarmd uraniumoxide, dat overblijft bij de verrijking van natuurlijk uranium. Ongeveer twee derde van de isotopen van dat plutonium zijn splijtbaar.

België geldt als pionier op dit vlak: MOX-splijtstof is de vrucht van intensief onderzoek door Belgonucleaire en het SCK•CEN. In de jaren 1960 en 1970 werd geproduceerd in de fabriek van Belgonucleaire in Dessel, op een piloot-productieketen. Het werd voor het eerst getest in 1963, in reactor BR3 van het SCK•CEN in Mol. Sinds het einde van de jaren 1980 wordt het over de hele wereld op industriële schaal ingezet. De methode die Belgonucleaire vervolgens ontwikkelde, het zogeheten MIMAS-procedé, leidde tussen 1986 en 2006 tot de productie op industriële schaal van een totale hoeveelheid van ongeveer 660 ton MOX-splijtstof, in elementen gegoten door FBFC. Die splijtstofelementen werden hoofdzakelijk gebruikt in Franse, Duitse, Zwitserse en Belgische kerncentrales. De huidige Areva -productiesite voor MOX-splijtstof, die de naam MELOX draagt en in 1995 in gebruik werd genomen, bevindt zich in Marcoule[35].

[35] http://www.areva.com/FR/activites-1206/melox.html.

Een tweede fabriek voor de productie van MOX, de Britse plant van Sellafield (SMP - Sellafield Mox Plant), die over een iets lagere productiecapaciteit beschikt, werd opgestart in 2001, maar staakte zijn activiteit eind 2011. De plutoniumvoorraad in Groot-Brittannië groeide daarop aanzienlijk aan. De Britse regering heeft dan ook beslist om een nieuwe MOX-fabriek te bouwen, waar het plutonium indien mogelijk in MOX-splijtstof kan omgezet worden of anders geconditioneerd kan worden als afval. Van de verschillende opties die op dit moment onderzocht worden om de Britse plutoniumvoorraad te benutten, stelt GE Hitachi voor om een natriumgekoelde kweekreactor van 311 MW te bouwen, het zogeheten PRISM-project.

In Japan heeft de regering in 2010 zijn fiat gegeven voor de bouw van de J-MOX-site, nadat men verschillende bijkomende en ingrijpende voorzorgsmaatregelen had getroffen om de bestendigheid tegen aardschokken te versterken. Deze fabriek, met een productiecapaciteit van 130 ton per jaar, zou in gebruik worden genomen in oktober 2017[36].

Medio 2016 schat men dat er meer dan veertig reactoren met MOX-splijtstof geladen waren of werden[37]. Het ging in het bijzonder om 36 Europese en 4 Japanse reactoren, waaronder unit 3 van Fukushima Daiichi. De meeste lichtwaterreactoren wereldwijd kunnen op MOX draaien, mits de nodige technische aanpassingen.

In België werd er vanaf maart 1995 plutonium gerecycleerd in de reactoren van Doel 3 en Tihange 2. De laatste MOX-elementen werden ontladen in juni 2010. Alles bijeen werd er in die periode 4,8 ton plutonium gerecycleerd. Omdat het bij de ingebruikname van die reactoren niet voorzien was dat ze met MOX-splijtstof zouden werken, werd de hoeveelheid MOX in de reactoren dan ook beperkt tot 20 % van de kern. De veiligheidsautoriteiten stemden in met die hoeveelheid, als een goed compromis om het veiligheidsniveau te handhaven zonder al te grote wijzigingen aan de reactor.

Een kwaliteitsindicator voor splijtstof is het aantal vastgestelde hulsbreuken. Voor de standaard splijtstof met uranium is dat aantal extreem laag (ongeveer 1 miljoenste per jaar; dat komt overeen met heel wat minder dan één niet afgedichte brandstofstaaf par jaar en per schijf)[38]. Voor MOX-splijtstof is er zelfs nooit een hulsbreuk geweest toe te schrijven aan een productie- of ontwikkelingsfout. De bereikte verbrandingsgraad is relatief hoog in dezelfde veiligheidsomstandigheden als voor de standaard splijtstoffen. We mogen dus gerust spreken van een rijp industrieel proces, zowel op exploitatie- als op productievlak.

d. De vooruitzichten voor plutoniumrecyclage

Een EPR-reactor kan voor 100 % geladen worden met MOX-elementen. Concreet komt dat erop neer dat er ongeveer 7 ton plutonium nodig is om de eerste reactorkern samen te stellen en vervolgens nog eens 2,2 ton per jaar voor de navulling[39]. Bij elke reactorfase daalt de hoeveelheid plutonium met iets meer dan 25 % ten opzichte van de oorspronkelijke hoeveel-

[36]. https://www.iaea.org/safeguards/symposium/2014/home/eproceedings/sg2014-papers/000054.pdf.
[37] http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx.
[38] http://www.cea.fr/Documents/monographies/combustibles-nucléaires_réacteurs-eau.pdf.
[39] Het plutoniumgehalte van MOX-splijtstof was iets meer dan 7 % voor de splijtstof gebruikt in België.

heid (waarvan meer dan 50 % Pu239 is, het isotoop dat het grootste proliferatierisico inhoudt omdat het splijtbaar is).

De meeste lichtwaterreactoren (LWR) die op dit moment in gebruik zijn, kunnen draaien op MOX, op voorwaarde dat hun exploitatievergunning wordt aangepast en dat er een paar wijzigingen worden doorgevoerd om hun veiligheid te handhaven. De PWR-reactoren van Doel 3 / Tihange 2 of Doel 4 / Tihange 3 zouden plutonium kunnen hergebruiken in de MOX-elementen, op voorwaarde dat ze daartoe de vereiste exploitatievergunningen krijgen voor de kernuitstap een feit is. Dat lijkt echter onwaarschijnlijk, gezien de gangbare termijnen van de vergunningsprocedures. Derhalve wordt het vandaag de dag weinig waarschijnlijk om plutonium te hergebruiken in de Belgische PWR-reactoren.

De reactoren van generatie 3+ of 4 die in de toekomst in het buitenland gebouwd worden, kunnen gebruikmaken van een nieuw neutronconcept dat van bij aanvang wordt uitgewerkt om het gebruik van plutonium in de kern te maximaliseren (tot 100 % MOX voor een EPR-reactor die daarvoor voorzien is).

Merk ook op dat we niet mogen uitsluiten dat er nieuwe splijtstoffen ontwikkeld worden voor reactoren van de vierde generatie, die plutonium in een andere vorm gebruiken dan MOX.

e. Vooruitzichten voor recyclage buiten België

Als het scenario van gedeeltelijke opwerking dat voor de berekening van de provisies gebruikt wordt, werkelijk wordt toegepast dan moet er een oplossing worden gevonden voor het gescheiden plutonium aangezien het referentiescenario van NIRAS op dit ogenblik niet voorziet in de berging van gescheiden plutonium.

Een mogelijke oplossing zou erin bestaan het gescheiden plutonium buiten het Belgische grondgebied te recycleren en het aan de gebruiker door te verkopen/ over te dragen volgens de modaliteiten die moeten worden bepaald. De splijtstof die met dat plutonium zou worden geproduceerd of het afval dat daaruit zou voortkomen, zou a priori onder de verantwoordelijkheid van de opkoper vallen en er zou dus niet op lange termijn moeten worden beheerd.

Een recent voorbeeld vinden we in het akkoord gesloten tussen de Franse en de Nederlandse regering. Artikel 8 van dat akkoord stelt: "*Het plutonium afkomstig van de verwerking van de gebruikte splijtstoffen wordt door* Areva *NC gebruikt voor het aanvullen van de lopende voorraad grondstoffen van haar MELOX-fabriek, of voor het leveren van MOX-brandstof aan haar cliënten. Daartoe kan* Areva *NC de eigendom van het plutonium overnemen om het gebruik ervan in haar fabrieken mogelijk te maken.*"[57]

Bij alle contracten voor eigendomsoverdracht zijn drie partijen betrokken: de eigenaar verkoper en de opkoper, met medeondertekening van EURATOM. In het kader van een extracommunautaire eigendomsoverdracht (een Europese entiteit draagt het eigendom over aan een entiteit buiten de Europese Gemeenschap) is het belangrijk dat het Voorzieningsagentschap van EURATOM wordt ingelicht over de context van die overdracht en over de redenen waarom ze geen invloed heeft op het materiaalpatrimonium van de Europese Gemeenschap, noch de Europese bevoorradingszekerheid in het gedrang brengt.

Het is in dat daglicht dat Synatom de opwerking van ongeveer 1.200 ton bestraalde Belgische splijtstof bestudeert.

f. Conditionering van opwerkingsafval

Ondanks verschillende jaren van afkoeling, eigen aan de wachtperiodes binnen het opwerkingsproces, krijgen de opwerkingsklanten toch nog actief afval terug: de contracten stellen dat de totale activiteit in het afval overeenstemt met die van de bestraalde splijtstoffen op het moment dat ze in de fabriek toekomen, en de concentratie van de verschillende isotopen wordt vooraf gepreciseerd.

Net zoals in elke industriële keten en in het bijzonder in de fabrieken die radioactief materiaal gebruiken, doen opwerkingsfabrieken er alles aan om hun afval te beperken. Om dat mogelijk te maken worden de afvalverpakkingen gestandaardiseerd en de volumes tot het minimum beperkt, om de procedures en de vereiste logistieke middelen te vereenvoudigen en tegelijk de latere opslag- en bergingsbehoefte terug te dringen. In het licht daarvan stelt de Areva -fabriek in La Hague al sinds 1995 voor om het cementeringsprocedé stop te zetten en te kiezen voor compactering van metallisch technologisch afval en van de hulzen en eindstukken van de splijtstofelementen, waardoor hun volume met een factor 4 zou verminderen. In dezelfde zin is sinds 1996 de productie van middelactieve effluenten, die tot dan met een bitumenmatrix werden omhuld, sterk teruggeschroefd. De methode wordt enkel nog gebruikt voor de effluenten van laboratoria. Door procedés wat aan te passen en aan de hand van bepaalde concentratieoperaties komen de resterende effluenten nu terecht in het hoogactief vloeibaar afval dat verglaasd moet worden. Areva gebruikt sinds juni 2010 een procedé waarbij de middelactieve effluenten die al sinds lange tijd op de site zijn opgeslagen in een koude kroes verglaasd worden op een van de verglazingsketens, om te voorkomen dat de klanten bitumineus afval terugkrijgen. Het afval dat op die manier verglaasd wordt, komt terecht in standaardcolli die helemaal identiek zijn aan de colli gebruikt voor hoogactief verglaasd afval.

In het kader van de contracten voor de opwerking van verbruikte Belgische splijtstof, uitgevoerd door Areva in de installaties van La Hague, werden de volgende overschotten teruggegeven:

- CSD-V (standaardcollo met verglaasd afval): het hoogactief afval (splijtingsproducten en lagere actiniden), dat het overgrote deel van de activiteit aanwezig in de verbruikte splijtstoffen bevat, wordt in verglaasde vorm geconditioneerd. Het komt er eigenlijk op neer dat het verwerkt wordt in borosilicaatglas, alom geprezen omwille van zijn uitstekende vermogen om de chemische elementen die het afval bevat te immobiliseren.

  In het Afvalplan [23] is sprake van 387 colli van dit type, elk met een inhoud van 180 liter, die beheerd moeten worden door NIRAS. De terugkeer van deze colli gebeurde via 14 transporten die tussen 2000 en 2007 hebben plaatsgevonden. De opwerking van de splijtstof afkomstig van de onderzoeksreactor BR2 heeft geleid tot de productie van 3 bijkomende colli;

- CSD-C (standaardcollo met samengeperst afval): het middel- en hoogactief metallisch afval (de hulzen en uiteinden en het technologisch afval) wordt samengeperst. In

het Afvalplan is sprake van 432 colli van dit type, elk met een inhoud van 180 liter, die beheerd moeten worden door NIRAS maar 1 van de colli is afkomstig van de opwerking van de splijtstof van de onderzoeksreactor BR2. De terugkeer van die colli gebeurde tussen 2010 en 2013 via 9 transporten;

- CSD-B (standaardcollo met verglaasd afval van categorie B): de middelactieve effluenten worden verglaasd en geconditioneerd in standaardcolli. In het Afvalplan is sprake van 62 colli van dit type, elk met een inhoud van 180 liter, die beheerd moeten worden door NIRAS. Op heden werd dit totaal herzien op 35 [58] en de terugkeer is gepland in de loop van 2017.

De residu's die ontstaan bij de opwerking van de Belgische splijtstof worden opgeslagen in een speciaal daarvoor voorzien gebouw, beschreven in de onderstaande subsecties.

Areva heeft zijn buitenlandse klanten erover ingelicht dat de nieuwe opwerkingscontracten voorzien in de repatriëring van twee afvalcategorieën in de plaats van drie: hoogactief verglaasd afval en samengeperst afval.

g. Opslag van opwerkingsresidu's

Het hoogactief verglaasde afval (CSD-V) dat ontstaat bij de opwerking geeft nog gedurende honderdduizenden jaren warmte en straling af. Die afgifte neemt weliswaar af met de tijd[40]. Omdat de warmteafgifte aanvankelijk nog zeer hoog is, moet dat afval voor een bepaalde duur worden opgeslagen alvorens ze definitief te bergen. Het gebouw waar ze in België worden opgeslagen is bekend onder de naam 'Gebouw 136' (site 1 van Belgoprocess). Het is voorzien op een levensduur van 75 jaar, een termijn die verlengd kan worden als de uitrusting goed onderhouden wordt en eventueel vernieuwd.

Het modulaire ontwerp van dit gebouw maakt het mogelijk om de opslagcapaciteit uit te breiden. Het gebouw biedt evenwel nu al voldoende capaciteit voor alle verglaasde residu's die worden gerepatrieerd vanuit de fabriek in La Hague in het kader van de opwerkingscontracten die in de jaren 70 werden gesloten tussen Synatom en Areva.

Het samengeperste afval (CSD-C) en het middelactief verglaasde afval (CSD-B), dat veel minder radioactief is en veel minder warmte afgeeft dan het hoogactief verglaasde afval, wordt opgeslagen in sectie D van gebouw 136, een sectie die ook een modulair ontwerp heeft.

h. Belgische ervaring inzake productie en tijdelijke opslag van verglaasde residu's

Tussen 1985 en 1991 werden er radioactieve effluenten verglaasd in de 'Pamela'-installatie (zie glossarium) op de site van Belgoprocess in Dessel. Dat hoogactieve vloeibare afval was afkomstig uit de exploitatie van de Eurochemic-pilootfabriek voor opwerking en is het eigendom van de Belgische Staat. De verglaasde producten, die in 2.203 roestvrijstalen containers werden gegoten (met een totaal volume van 195 m^3), worden op dit moment ter plaatste opgeslagen in een speciaal gebouw. Noch de verglazing van de residu's, noch hun opslag is schadelijk voor de omwonenden en voor het leefmilieu.

[40] Figuur 19 geeft een beeld van het radioactieve verval, wetende dat die vaten lagere actiniden (Np, Cm, Am enz.) en splijtingsproducten bevatten.

i. Veiligheid en bescherming van werknemers, bevolking en leefmilieu

De industriële activiteit op het vlak van opwerking is met de tijd aanzienlijk toegenomen. Er zijn incidenten en problemen geweest. Die ervaringen hebben er mee toe bijgedragen dat de globale veiligheid van die activiteiten geleidelijk is verbeterd. Ook de industriële productie van MOX-splijtstoffen is intussen vrij aanzienlijk.

Op regelgevend vlak wordt er een onderscheid gemaakt tussen de blootstelling van werknemers en de gevolgen voor de bevolking van de opwerking / recyclage van verbruikte splijtstof. De regelgeving is heel wat beperkender wat de blootstellingsrisico's voor de bevolking betreft. In België zorgt het algemeen reglement op de bescherming tegen ioniserende straling (afgekort het ARBIS) [59] voor de omkadering van deze problematiek. Omdat de opwerkingsfabriek in het Franse La Hague ligt, moet ze zich voegen naar de Franse regelgeving via haar Autorité de Sûreté Nucléaire, ASN [60].

Wat de blootstelling van de werknemers betreft, zowel in de opwerkingsfabrieken als op de productiesites voor MOX-splijtstoffen, blijven de doses algemeen genomen ver onder de opgelegde dosislimieten.

De gevolgen voor de bevolking zijn verbonden aan de vloeibare en gasvormige lozingen van de opwerkings- en productiefabrieken. Net zoals bij elke andere industriële of menselijke activiteit komen er ook bij de opwerking/recyclage van splijtstof immers resten terecht in de omgeving.

j. Potentiële dosiseffecten door opwerking/recyclage: voorbeeld voor de opwerkingsfabriek van La Hague

Voor de fabriek van La Hague [61] zijn dit de activiteitsniveaus in de lozingen die de overheid toelaat: het "kritisch individu" (zie glossarium) mag niet blootgesteld worden aan een dosis hoger dan 0,5 millisievert per jaar (de limiet aanbevolen door de ICRP (International Commission on Radiological Protection – zie glossarium) is 1 millisievert per jaar). Volgens Areva [61] bedraagt de daadwerkelijke blootstelling van de bevolking op basis van metingen 0,01 millisievert per jaar.

Bovenop een systeem voor monitoring van de lozingen moet ook het bewijs worden geleverd, volgens de wetenschappelijke methodes goedgekeurd door de Franse overheid, dat zelfs in de meest pessimistische hypotheses de lozingen van de fabriek nooit de opgelegde maximumdoses voor het kritisch individu overschrijden. Dit werd onderzocht en bevestigd door de Europese Commissie.

Het activiteitsniveau in de lozingen wordt eerst geanalyseerd alvorens ze in het leefmilieu terechtkomen. In Frankrijk legt het IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) de programma's vast voor monstername en meting. Het ziet ook toe op de uitvoering ervan. Via eigen bemonsteringen en analyses controleert het IRSN op onafhankelijke wijze de waarheidsgetrouwheid van de resultaten die de Areva -fabrieken doorgeven.

Daarnaast wordt er een permanent milieutoezicht gegarandeerd door regelmatig monsters te nemen (water, bodem, melk, fauna, flora, landbouwproducten enz.) in de buurt van de fa-

briek. Volgens hetzelfde systeem als voor de lozingen bezorgt de fabriek maandelijks de resultaten aan het IRSN, dat trouwens zelf ook toezicht uitoefent via eigen bemonsteringen.

De gasvormige lozingen van de fabriek van La Hague worden permanent gecontroleerd op drie niveaus:

- metingen bij het verlaten van de schouwen,
- metingen aan de omheiningen van de vestiging,
- metingen in vijf "dorpstations" op een paar kilometer van de vestiging.

De vloeibare effluenten worden behandeld en gefilterd om er de radioactieve en chemische elementen uit te verwijderen. Na behandeling worden de effluenten gecontroleerd en pas geloosd als uit de metingen blijkt dat ze voldoen aan de niveaus vastgelegd in de lozingsvergunningen.

Areva publiceert op zijn website [62] de resultaten van de analyse van de monsters die de eigen teams elke maand nemen van de fauna en flora van het watermilieu rond de fabriek. De monstername in zee gebeurt door de Franse zeemacht, die om de drie maand sedimenten, zand en zeewater verzamelt. Verder publiceert Areva de resultaten van de controles in de beken op het plateau van La Hague en van de melk en het gras uit de dorpen rond de site.

Uit al die controles blijkt dat de fabriek van La Hague de toegestane lozingslimieten mooi naleeft. Dat is de vrucht van de inspanningen die Areva levert om de impact van haar lozingen tot het redelijke minimum te beperken (ALARA-principe - zie bijlage A).

Sinds de eerste installaties in 1966 in dienst werden genomen, is de impact van de lozingen vanuit de vestiging in La Hague met een factor vijf verminderd, terwijl de hoeveelheid verwerkte splijtstof de voorbije 30 jaar aanzienlijk is toegenomen.

Tabel 3. Lozingen van Areva in het milieu in 2016, in TBq (10^{12} becquerel), en de toegelaten limieten in absolute waarde, geklasseerd per isotoop [63].

Vloeibare lozingen			Gasvormige lozingen		
Elementen	2016 (TBq)	Limiet (TBq)	Elementen	2016 (TBq)	Limiet (TBq)
Tritium	12.3000	18 500	Tritium	74,5	150
Radioactief jodium[41]	1,44	2,60	Radioactief jodium	0,00641	0,018
Koolstof-14	7,55	14	Koolstof-14	19,1	28
Strontium 90	0,097	11	/	/	/
Cesium 137	0,659	8	/	/	/
Cesium 134	0,0503	0.5	/	/	/
Ruthenium 106	1,37	15	/	/	/
Kobalt 60	0,058	1.4	Zeldzame gassen	320.000	470.000
Andere β- en γ-	1,52	60	Andere β- en γ-	0,0001	0,0010
α-stralers*	0,023	0.14	α-stralers*	4,09 E-7	0,00001

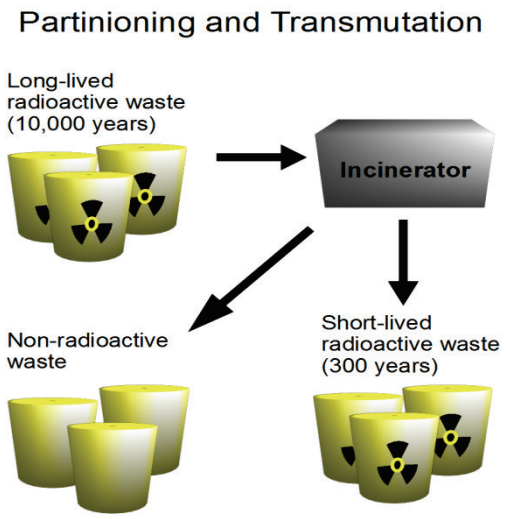
Bron: Areva [63].

Transmutatie

Bij de transmutatie van een element wordt dat element omgezet in een ander. In het kader van het beheer van de splijtstofcyclus worden er strategieën ontwikkeld die gebaseerd zijn op de scheiding van elementen en op hun transmutatie (P&T- of 'partitioning and transmutation'-strategieën in het Engels). Het idee is dat door transmutatie toe te passen op radioactief afval met lange halveringstijd, in optimale omstandigheden die nog bepaald moeten worden, het mogelijk wordt om dat afval om te zetten in elementen met kortere radioactieve periodes om hun langetermijnbeheer te vergemakkelijken.

Het mooiste praktijkvoorbeeld van transmutatie heeft betrekking op isotoop 99 van technetium (een splijtingsproduct in bestraalde splijtstof dat een lange halveringstijd heeft en vrij mobiel is in het bestudeerde gastgesteente, de reden waarom dit element moeilijk te isoleren is bij geologische berging). Door een neutron te absorberen wordt technetium-99 technetium-100, dat binnen een paar minuten ontbindt in stabiel ruthenium.

Transmutatie wordt vooral overwogen voor het beheer van transuranisch afval (lagere



Figuur 12. Illustratie van het scheidingsprincipe gevolgd door transmutatie.

[41] Hoofdzakelijk jodium-129, met halveringstijd van 15,7 miljoen jaar en een activiteitsconcentratie van 6,74 MBq/g.

actiniden en Pu) met een heel lange halveringstijd (die zo'n honderdduizend jaar kan bedragen), om het om te zetten in elementen die hun radioactiviteit veel sneller verliezen. Maar de P&T-strategieën (partitionering en transmutatie) die het zouden toelaten om die processen te optimaliseren, zijn nog in volle ontwikkeling en vergen nog het nodige O&O-werk. Bovendien zijn ze hoogstwaarschijnlijk enkel mogelijk met het gebruik van snellekweekreactoren of ADS-reactoren, waar de neutronenstromen constant en hoog zijn.

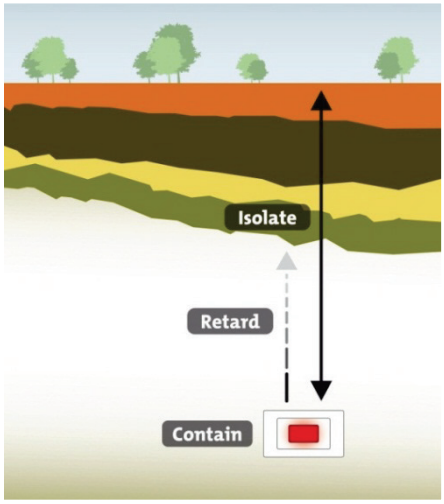
Transmutatie opent wel perspectieven voor het beheer van radioactief afval met lange halveringstijd:

- gebruik van transuranisch afval, met mogelijke opwekking van energie,
- vermindering van de halveringstijd van het geborgen afval.

Transmutatie lost echter het probleem van het radioactieve afval niet volledig op (het afval moet nog steeds beheerd worden). Bovendien vergt de toepassing ervan nog jaren onderzoek om te bepalen wat de optimale omstandigheden zijn om de techniek te gebruiken: keuze van de materialen via de scheidingsprocessen, samenstelling van de splijtstofelementen die getransmuteerd moeten worden, optimale stralingsomstandigheden, eventuele behandeling na bestraling enz.

Geologische berging

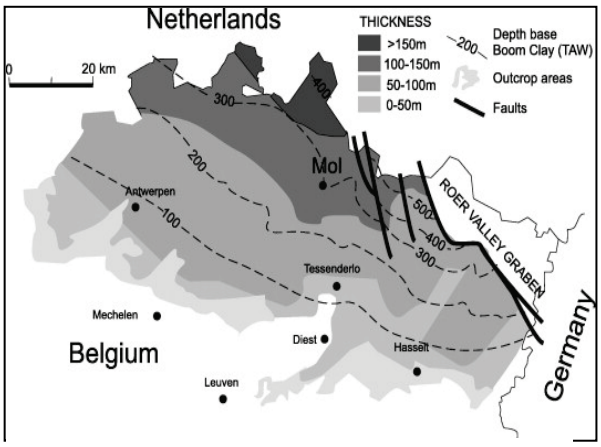
De verschillende cyclusopties brengen afval voort dat heel sterk kan verschillen naargelang de optie in termen van volume, conditionering, warmteafgifte en radiotoxiciteit. Wat de gekozen optie ook wordt, er zal nog steeds afval overblijven dat op lange termijn beheerd moet worden. Voor dat beheer wordt geologische berging beschouwd als een mogelijke uitweg om het probleem van het radioactieve afval te verhelpen. NIRAS heeft in haar afvalplan de verschillende mogelijke eindbestemmingen voor het radioactieve afval onderzocht en raadt geologische berging in een verharde kleilaag aan voor België.



Figuur 13. Veiligheidsfunctie van een geologische berging

NIRAS werkt al sinds 30 jaar aan haar concept van geologische berging: het gaat om een globale oplossing die definitief kan worden en de veiligheid op een passieve manier kan garanderen, dankzij de verschillende kunstmatige[42] en natuurlijke barrières van de bergingsinstallatie, zoals getoond op figuur 13 [23]. De bergingsinstallatie zelf wordt zo ontworpen dat ze het afval zo lang mogelijk kan insluiten; wanneer de radionucliden zich vervolgens erbuiten beginnen te verspreiden, dan nemen de verschillende grondlagen, vooral dan de kleilaag, het over om die verspreiding te vertragen en te verhinderen dat de radionucliden de oppervlakte bereiken voor ze voldoende in kracht zijn afgenomen (natuurlijke barrière).

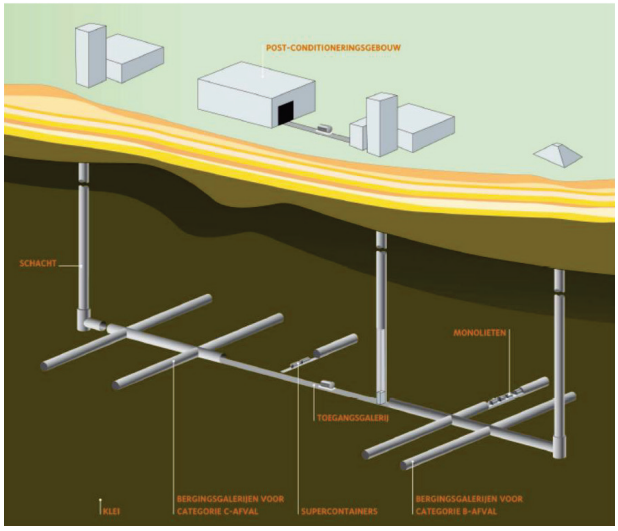
[42] Onder de term 'kunstmatige barrière' verstaan we het geheel gevormd door de wanden van de berging en de conditionering van het afval.



Figuur 14. De Boomse kleilaag in België.

In België ziet NIRAS weinig verharde kleilagen die geschikt zijn voor een dergelijke geologische berging: Ieperiaanklei en Boomse klei. Beide kleisoorten treffen we aan in het noorden van België, op verschillende dieptes (tussen ongeveer 200 m en 600 m). In de buurt van Mol, waar het ondergrondse laboratorium HADES zich bevindt[43], heeft de Boomse klei (zie Figuur 14. [50]) een dikte van ongeveer 100 m en situeert zich tot op een diepte van 290 meter, terwijl de laag Ieperiaanklei met haar 110 meter nog net iets dikker is en tot op een diepte van 440 meter komt [64]. Tot op heden werd vooral berging in Boomse klei in detail bestudeerd, meer bepaald dankzij het ondergrondse laboratorium HADES. De kennisuitwisseling en de specifieke werkzaamheden over Ieperiaanklei zijn in volle gang.

Het huidige NIRAS-referentieconcept voor geologische berging (geïllustreerd in Figuur 15) staat uiteengezet in het Afvalplan [23] en werd gebruikt bij de opmaak van de tarieven van NIRAS in 2013 [65]. Een bijwerking van dat referentiedesign is gepland tegen eind 2017 en een nieuwe evaluatieoefening voor de kostprijs is gepland tegen eind 2018. Het referentieconcept van NIRAS omvat een hoofdgalerij, de zogenaamde toegangsgalerij, van waaruit bijgalerijen, de zogenaamde bergingsgalerijen, vertrekken die loodrecht op de toegangsgalerij staan en waarin de supercontainers met verglaasd afval of verbruikte geconditioneerde splijtstof of de afvalmonolieten van categorie B geplaatst worden. De toegangsgalerij is verbonden met de oppervlakte via drie toegangsschachten: de schacht waarlangs de afvalcontainers worden binnengebracht bevindt zich in het midden van de toegangsgalerij in het design van NIRAS, de twee schachten aan de uiteinden van de toegangsgalerij zijn voor het personeel. De bergingsinstallatie is opgesplitst in twee delen die zich allebei bevinden tussen een "schacht personeel" en de "schacht afval"; beide delen dienen om één enkele categorie afval te herbergen. Deze indeling laat een verluchting toe waarbij het personeel altijd met de luchtstroom mee staat, zodat het risico op inademen van radioactief stof van de colli veel kleiner is. Zij biedt eveneens de mogelijkheid



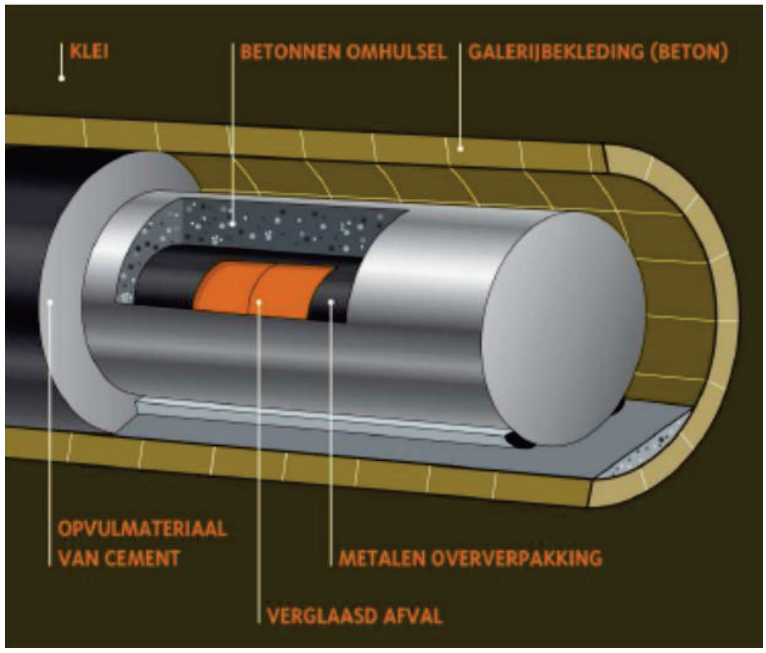
Figuur 15. Concept voor geologische berging zoals beschreven in het NIRAS-afvalplan.

[43] We kiezen voor deze referentie omdat de meeste studies in Mol-Dessel werden gedaan en omdat die plek het best is gekenschetst. Er is nog geen principebeslissing genomen omtrent de keuze van van geologische berging, bijgevolg is dus ook nog niet geweten waar ze zal komen.

om de installatie fasegewijs te exploiteren (d.w.z. de bouw en de exploitatie van deel B van de bergingsinstallatie in een eerste fase gevolgd door de bouw en de exploitatie van deel C).

De afstand tussen de bijgalerijen hangt af van het afval: afval van categorie C geeft meer warmte af, de omringende klei moet die warmte kunnen afvoeren zonder gevaar voor de installatie of voor het milieu (meer in het bijzonder mogen de watervoerende lagen boven de klei niet te veel opwarmen). Het is om die reden dat er bij een eventuele directe berging van de bestraalde splijtstof die als afval is verklaard, meer afstand is voorzien tussen de bijgalerijen voor C-afval (dat allemaal langs dezelfde kant van de centrale schacht wordt opgeslagen) dan tussen de galerijen die afval van categorie B herbergen (en geplaatst langs de andere kant van de centrale schacht).

Figuur 16. Kunstmatige barrières in de geologische berging.



De geplande conditionering (kunstmatige barrières) verschilt naargelang het aanwezige afval:

- Voor afval van categorie C, dat veel warmte afgeeft, is het systeem gebaseerd op het gebruik van supercontainers, eenheden die gevormd worden door een afdichtende overpack uit staal, rond de container(s) met verglaasd afval of verbruikt geconditioneerd afval en de dikke beschermende cementlaag errond.
- Afval van categorie B wordt, voor een vlotte behandeling, in betonnen behuizingen geplaatst, die worden vastgezet in cement en monolieten vormen.

In het vervolg van dit document refereren wij aan dat ontwerp als het gaat over het referentiescenario van NIRAS.

a. Grootte van de bergingsinstallatie

De keuze van de cyclusoptie zal een aanzienlijke invloed hebben op de geologische bergingsinstallatie, aangezien aan elke optie een bepaald in te graven afvalvolume verbonden is. Dat volume is bepalend voor de verdeling in de bergingsgalerijen en voor de omvang van de zones voorzien voor afval van categorie B en C.

NIRAS bestudeert het concept van een geologische bergingsinstallatie al sinds geruime tijd en publiceert regelmatig een verslag over de voortgang van die studies. De grootte van de geologische bergingsinstallatie werd geëvalueerd in twee scenario's: "volledige opwerking"

en "niet-opwerking"[44]. Tabel 4 bevat een aantal kerncijfers over de afmetingen van de installatie voor beide scenario's.

Tabel 4. Grootte van de installatie voor geologische berging in de twee referentiescenario's.

	Scenario Niet-opwerking	Scenario Volledige opwerking
Afvalvolume (m³)	Cat. B: 10.430 Cat. C: 4.500	Cat. B: 11.100 Cat. C: 600
Lengte van de hoofdgalerij (m)	1.700	900
Aantal bijgalerijen	38	31
Samengetelde lengte van de galerijen (m)	~ 31.350	~24.500

Bron: NIRAS, [23].

b. Conditionering van verbruikte splijtstof

De bestraalde kernbrandstof die ligt opgeslagen op de sites van de centrales (of nog geproduceerd moet worden), wordt niet geconditioneerd. Sinds de beslissingen van 1993 en 1998 en de verplichting om strategieën te voorzien voor directe berging en opwerking van de bestraalde splijtstoffen rijst de vraag naar de conditionering van de splijtstoffen indien zij als afval zouden worden verklaard zonder opgewerkt te worden.

In 2007 deden NIRAS en Synatom een gezamenlijke analyse van de mogelijke pistes voor de conditionering, de opslag, de postconditionering en de berging van verbruikte splijtstoffen. Die analyse werd gedaan om te verzekeren dat de conditionering van verbruikte splijtstof verenigbaar is met de verpakkingen voor postconditionering die NIRAS voorziet na overdracht van de geconditioneerde verbruikte splijtstoffen.

Concreet gesproken zal Synatom, indien het scenario van niet-opwerking wordt toegepast, de verbruikte splijtstof conditioneren met het oog op de overdracht ervan aan NIRAS. Hiervoor moet er een geschikte conditioneringsfabriek ontworpen worden, moeten de vereiste vergunningen voor de bouw en de exploitatie bekomen worden en moet de fabriek gebouwd en in gebruik genomen worden. De conditionering die door Synatom voorzien is voor de bestraalde splijtstoffen bestaat uit een conditioneringsfles die hierna beschreven wordt.

Na conditionering worden de verbruikte splijtstoffen overgebracht naar NIRAS, waar ze opgeslagen blijven in afwachting van hun postconditionering (d.w.z.. de plaatsing van de verbruikte splijtstoffen in de supercontainers). Die is pas mogelijk na een afkoelperiode van minstens 60 jaar te rekenen vanaf het moment dat ze uit de reactor ontladen worden, kort voordat ze geborgen worden.

b.1. Het concept van de conditioneringsfles voor bestraalde splijtstof

In de periode 1994-2001 heeft Synatom er alles aan gedaan om gevolg te geven aan de parlementaire resolutie van 22 december 1993, waarin gevraagd werd om studies te doen naar de veiligheid (van werknemers en bevolking) en de haalbaarheid van de industriële conditionering van verbruikte kernbrandstof.

[44] Beide scenario's werden geïntroduceerd met de parlementaire resolutie van 1993 en met de beslissing van de Ministerraad van 1998.

Synatom besloot om het concept van een fles (zie glossarium) te bestuderen en te ontwikkelen voor de conditionering van verbruikte splijtstof, een idee dat overeenstemde met het NIRAS-referentieconcept voor geologische berging, op basis van de volgende ontwerpcriteria:

- resterend warmtevermogen, bepaald door het gastgesteente (klei),
- kritikaliteit[45]: garantie op subkritikaliteit in alle configuraties,
- de radiologische impact op de klei,
- de corrosiebestendigheid.

Die studies gebeurden in een aantal stappen:

- bepaling van de referentiecontainer voor de verbruikte kernbrandstof (fles) met het oog op de berging ervan;
- uitwerking van de ontwerpcriteria en de veiligheidsregels voor de conditioneringsinstallatie;
- voorontwerp van een industriële installatie;
- laboratoriumvalidatie van de essentiële procesfases.

Op dit moment stelt Synatom als referentieconcept een methode voor waarbij een bestraald brandstofelement in een stalen fles geplaatst wordt met een vierkante doorsnede van 256 mm en met een wanddikte van 12 mm. Afhankelijk van het soort element zou de lengte van de fles variëren tussen 3,2 en 5,0 m en het leeggewicht 481 kg bedragen (voor de langste flessen). De fles wordt uitgerust met een behandelingskop en krijgt een platte bodem.

Via het midden van het deksel wordt de fles, terwijl ze vibreert, gevuld met een fijn verdeeld vulmateriaal. Aanvankelijk stelde NIRAS voor om de flessen te vullen met zand, vervolgens gaf men de voorkeur aan glaskorrels en sinds kort opteert men voor kalk. Het lijkt erop dat de validatieproeven met zand, uitgevoerd in de periode 1994-2011, ook toepasbaar zijn voor andere fijn verdeelde materialen. Dat punt zal evenwel te gepasten tijde uitgeklaard worden.

De lucht in de fles wordt vervolgens gevuld met een inert gas om corrosie van de brandstofelementen tegen te gaan en ze in goede staat te houden.

Tot slot wordt er een dop op de fles gelast, de centrale opening wordt dichtgelast onder een overdrukstolp.

De ontwerpstudie van de fles werd intussen volledig voltooid door Synatom. Er worden een flesontwerp en een conditioneringstechniek voorgesteld, zowel voor MOX- als voor UOX-splijtstof.

[45] Het kritikaliteitsrisico is het risico dat er, via de splijtstoffen in een bepaalde configuratie, een ongecontroleerde splijtingsreactie wordt ontketend. De kern van een reactor in werking is 'kritiek', wat eigenlijk wil zeggen dat de kettingreactie gecontroleerd verloopt. Een kernbom is een 'superkritiek' systeem: de kettingreactie verloopt ongecontroleerd, wat leidt tot een explosie. Buiten de reactorkern is het raadzaam om, in alle configuraties, te verzekeren dat een systeem dat splijtstoffen bevat "subkritiek" is, met de gepaste marges.

Hierbij weze opgemerkt dat het afvalvolume van categorie C vermeld in tabel 5 (4.500 m³) berekend is op basis van een flesconcept dat dateert van vóór het hier beschreven concept. De herschatting van het afval van categorie C waarbij rekening wordt gehouden met het huidige design van splijtstoffles, brengt dat volume op 2.900 m³ (3.040 m³ indien men rekening houdt met de levensverlenging met 10 jaar van de reactor Tihange 1). Het aantal flessen per supercontainer blijft echter vastgesteld op 4. Daarom blijft de impact op de lengte van de galerij voor de berging beperkt, ook al daalt het volume aanzienlijk.

b.2. Het "supercontainer"-concept van NIRAS

NIRAS ontwikkelde een uniek supercontainerconcept voor MOX- en UOX-splijtstofelementen. Die supercontainer zou bestaan uit de volgende elementen [66]:

- een stalen overpack waarin de primaire colli (in principe de flessen indien het door Synatom voorgestelde concept aanvaard wordt) worden geplaatst;
- een betonnen cilindervormig omhulsel dat die overpack insluit;
- vulmateriaal op basis van beton om de ruimte tussen de overpack en het cilindervormig omhulsel te dichten;
- een betonnen deksel om het betonnen omhulsel te sluiten en zo de overpack in te sluiten;
- een roestvrij stalen omhulsel dat het betonnen cilindervormig omhulsel en het deksel ervan insluit, met een voorziene dikte van 6 mm.

De lengte van een gevulde en bergingsklare supercontainer hangt af van de splijtstofelementen die hij bevat (de langste zou 6,25 meter lang zijn). De diameter bedraagt 2,15 m, het gewicht niet meer dan 70 ton.

c. Voorziene planning

NIRAS heeft een planning opgemaakt voor de aanleg van een geologische bergingsinstallatie volgens het huidige concept. Die planning werd in 2012 voorgesteld en beschrijft elke projectfase, van aankoop en voorbereiding van het terrein tot de sluiting van de berging. De planning werd opgemaakt op basis van de hypothese van een berging in Mol/Dessel; dit impliceert een diepte van ongeveer 210 meter onder de grond voor de installatie. Volgens de voorziene planning voor de verschillende operaties, binnen een scenario van volledige opwerking, zou het project in 2032 aanvatten en verlopen in de volgende fases:

- **Voor 2032**: verkrijgen van de bouwvergunning;
- **2032-2034:** Voorbereiden van de site. Deze fase omvat de aankoop van het terrein, de nodige graafwerken en het verwijderen van de begroeiing waar nodig. De aanleg van een afwaterings- en veiligheidssysteem en het plaatsen van een omheining rond het terrein. Elektriciteit en water worden aangevoerd naar het terrein.
- **2034-2047:** Eerste bouwfase van de bergingsingstallatie, met de afvalschacht, een van de twee schachten voor het personeel, de toegangsgalerij die de schachten verbindt, de bergingsgalerijen en de bovengrondse installaties. Dit deel van de installatie is hoofdzakelijk bestemd voor afval van categorie B.
- **2047-2062:** Eerste bergingscampagne. In deze fase wordt het afval geborgen dat zich reeds in de opslagplaatsen bevindt en dat tot 2025 geproduceerd wordt.

- **2062-2067:** Tweede bergingscampagne. Deze fase is hoofdzakelijk gericht op het afval dat ontstaat bij de ontmanteling van de nucleaire installaties.
- **2067-2070:** Toezichtsfase voor het eerste deel van de installatie. Deze fase moet garanderen dat de bergingsinstallatie evolueert zoals verwacht eens ze is gevuld met afval. Deze fase is absoluut nodig alvorens de galerijen gesloten kunnen worden.
- **2070-2074:** Gedeeltelijke afsluiting van het eerste deel van de installatie.
- **2074-2092:** Slaapfase. Deze fase verzekert dat het einde van de afkoelperiode van 60 jaar wordt bereikt voor het afval dat als laatste werd toegevoegd.
- **2092-2100:** Tweede bouwfase van de bergingsinstallatie, waarbij de tweede schacht voor het personeel wordt aangelegd, samen met de bergingsgalerijen bestemd voor het afval van categorie C.
- **2100-2110:** Derde bergingscampagne. Tijdens deze campagne wordt het afval afkomstig uit de splijtstofcyclus geborgen.
- **2110-2115:** Toezichtsfase voor het tweede deel van de installatie
- **2115-2121:** Definitieve afsluiting van de installatie voor geologische berging.

d. Bijwerking van het referentiescenario van NIRAS

Ondanks het gebrek aan een nationaal beleid voor het langetermijnbeheer van afval van categorie B en C zetten het onderzoek en de ontwikkeling die gepaard gaan met de opdracht van NIRAS op het vlak van het beheer van radioactief afval die instelling ertoe aan haar referentiescenario verder uit te werken. Tegen 2020 plant NIRAS immers bij het veiligheidsagentschap een methodologisch veiligheidsdossier in te dienen (dat dossier heet SFC-1 en staat voor "*Safety and Feasability Case 1*"). Dat dossier zou de eerste fase moeten zijn voor het bekomen van een vergunning voor de bouw van een installatie voor geologische berging.

In die context zou een bijwerking van het referentiescenario van NIRAS moeten plaatsvinden. Die bijwerking omvat een nieuw design voor geologische berging, nog steeds gebaseerd op het monoliet- en supercontainerconcept en is geldig voor verschillende diepten, gaande van 200 m tot 600 m (dat zijn de verschillende diepten die in de weinig verharde kleilagen beschikbaar zijn). Die bijwerking wordt momenteel opgemaakt en zou door NIRAS tegen het einde van 2017 moeten worden voorgesteld.

Een nieuwe evaluatie van de kosten op basis van dit nieuwe scenario (dit wil zeggen zowel op basis van een design van bergingsinstallatie, van een afvalinventaris en van een bijgewerkt operationeel scenario) zou tegen het einde van 2018 moeten klaar zijn. Die zou moeten leiden tot nieuwe tarieven die in werking treden op 1 januari 2019.

De economische aspecten

a. De evaluaties van Synatom in het kader van de nucleaire voorzieningen

Synatom heeft een aantal economische evaluaties gedaan over de benedenfase van de twee opties voor de splijtstofcyclus. Het deed dat naar aanleiding van zijn driejaarlijkse herzieningsoefening met betrekking tot de beheerprovisies voor verbruikte splijtstof, verplicht sinds de wet van 11 april 2003.

Deze periodieke herziening houdt rekening met:

- de beste huidige kennis van de kostprijs voor de aankoop van containers, voor het laden en transporteren van containers, voor de bouw van bijkomende installaties om bestraalde kernbrandstof op te slaan, voor de exploitatie van de opslaginstallaties enz.
- de contractuele tarieven voor de overname van afval door NIRAS, om de tijdelijke opslag en de afvoer van geconditioneerd radioactief afval te verzekeren,
- de technisch-economische haalbaarheidsstudie rond de industriële conditionering van bestraalde splijtstoffen, opgesteld door Synatom in de periode 1994-2001,
- een eerste evaluatie van de kostprijs voor diepe berging van geconditioneerde bestraalde splijtstoffen, opgesteld door NIRAS.

In het huidige stadium zijn de onzekerheidsmarges nog vrij aanzienlijk, zeker wat betreft de kosten voor het afvalbeheer van NIRAS. Daarbij moeten we wel opmerken dat het erom gaat een scenario te becijferen waarvoor nog geen enkele politieke beslissing is genomen, noch een industriële uitvoering is gebeurd en om de uitgaven te evalueren tot en met 2120. Een periode van meer dan 100 jaar dus.

De vergelijking op financieel vlak tussen de verschillende scenario's van Synatom wordt bemoeilijkt onder meer door de onbekende factoren die blijven bestaan over het scenario voor het beheer van B- en C-afval dat effectief zal worden toegepast en over de kosten ervan. Die onbekende factoren hangen af zowel van institutionele beslissingen (bij voorbeeld de keuze van een nationaal beleid) maar ook van de toelating om de verbruikte splijtstoffen verder gedeeltelijk op te werken als van de maatschappelijke beslissingen (bij voorbeeld de lokalisering van de installatie voor de berging van radioactief afval die een impact kan hebben op de kostprijs) en van redenen die inherent zijn aan dat soort projecten (bij voorbeeld de onzekerheden waarmee rekening wordt gehouden op het gebied van de kostprijs van de grondstoffen in verschillende decennia).

Om de 3 jaar (2004, 2007, 2010, 2013 en 2016) maakt Synatom een vergelijkend dossier op van de opties voor het beheer van bestraalde splijtstoffen. Dat dossier wordt overgemaakt aan de Commissie voor Nucleaire Voorzieningen (CNV), die haar conclusies en aanbevelingen geeft na NIRAS te hebben geraadpleegd. De conclusies van de CNV worden meegedeeld via het jaarverslag van de commissie, dat gepubliceerd wordt op 1 oktober van het volgende jaar.

Daarnaast, om de tarieven vast te leggen voor het beheer van radioactief afval, evalueert NIRAS de kostprijs van haar referentiescenario.

b. Studies van het Agentschap voor Kernenergie van de OESO

In 1994 publiceerde het Agentschap voor Kernenergie van de OESO een studie over de economische aspecten van de splijtstofcyclus [67]. Die studie werd uitgevoerd door deskundigen uit 14 OESO-landen en van vier internationale organisaties.

Dit zijn enkele conclusies uit het rapport:

- "De beginfase van de splijtstofcyclus (aankoop van uranium, omzetting, verrijking) is goed voor ongeveer 80 % van de gemiddelde kostprijs gedurende de levensduur van de reactor. De kostprijs van die beginfase staat los van de gekozen strategie voor het beheer van de bestraalde splijtstof.

- De kostprijs voor de eindfase van de splijtstofcyclus hangt af van de gekozen strategie om de bestraalde splijtstof te beheren.
- In absolute waarde blijkt opwerking (rekening gehouden met het herbruikbare uranium en plutonium dat ontstaat) bijna dubbel zo duur als directe berging. Als het evenwel gaat om de globale kostprijs van de splijtstofcyclus, dan valt de cyclus met eenmalig gebruik maar 10 % goedkoper uit dan de opwerkingscyclus, getoetst aan de referentiehypothese [drukwaterreactor].
- Gezien de onzekerheden op het vlak van kosten kan het beperkte verschil tussen de cyclussen met snelle opwerking en met eenmalig gebruik niet als significant beschouwd worden en is het dan ook verwaarloosbaar ten aanzien van de globale kostprijs voor de elektriciteitsproductie."

In 2013 heeft de OESO een studie gepubliceerd over de economische aspecten van de benedenfase van de splijtstofcyclus [68]. Die meest recente studie stelt zich tot taak inzicht te krijgen in de methodologieën en moeilijkheden waarmee de OESO-landen te maken hebben bij het beheer van de bestraalde splijtstoffen alsook in de mechanismen die gepland of uitgewerkt zijn om dat beheer te financieren. Het tweede doel van die studie bestond erin de kennis van elk land te evalueren met betrekking tot de kosten van de verschillende opties voor het beheer van de bestraalde splijtstof en, voor zover mogelijk, de prijsschattingen van de verschillende landen met elkaar te vergelijken. Tenslotte besteedde de studie ook aandacht aan de onzekerheden die met deze prijsramingen gepaard gaan.

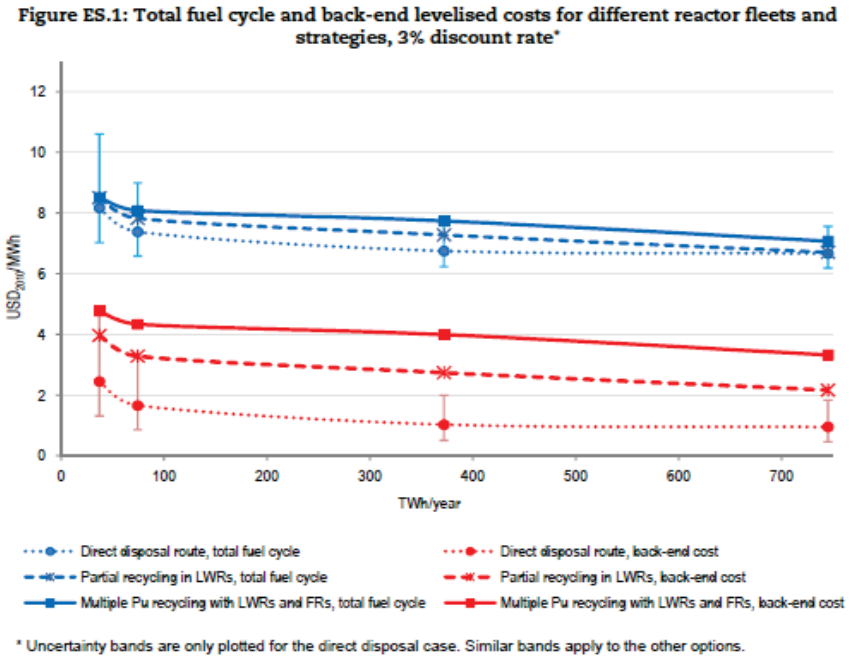
De studie beschrijft een aantal conclusies waarvan het ons interessant leek ze hier te samen te vatten:

- Beide industriële opties van de splijtstofcyclus, de directe berging of de gedeeltelijke opwerking, net zoals eender welke prospectieve optie die naar voor wordt geschoven, vergt uiteindelijk een operationele installatie voor de ultieme opslag. Het grote verschil met de installatie voor diepe geologische berging die voor de verschillende opties vereist is, is haar beperkte omvang.
- De uitgaven voor de opslag zullen gespreid worden over lange tijdsperioden en het grootste deel van de kosten zich zal voordoen lange tijd nadat de vermogensopwekking en de inkomsten van de elektriciteitsproductie opgehouden zijn. Het is van belang dat er passende financiële schikkingen voorhanden zijn en dat de accumulatie van beschikbare en passende fondsen voor de eventuele implementatie van de strategie die gekozen wordt voor de benedenfase van de splijtstof, nauwlettend wordt opgevolgd.
- De resultaten van de berekeningen die gebeurd zijn voor de kosten van de splijtstofcyclus, tonen aan dat de kosten die berekend zijn voor de optie open cyclus minder hoog zijn dan die voor de andere geëvalueerde opties. De verschillen tussen de 3 opties van de volledige splijtstofcyclus van de genormaliseerde kosten in elektriciteit blijven echter lager dan de onzekerheidsmarges en dat wegens de onzekerheden over de gebruikte gegevens. Voor de opties opwerking worden de bijkomende kosten die gepaard gaan met de opwerking gecompenseerd door de besparingen op de kosten in de

bovenfase van de cyclus[46]. De verschillen zijn des te opmerkelijk wanneer enkel rekening wordt gehouden met de component kostprijs van de benedenfase van de cyclus aangezien geen rekening wordt gehouden met de compensatie-effecten.

Het is van belang vast te stellen dat voor alle geëvalueerde opties de component kostprijs van de splijtstofcyclus, samen met het beheer van de bestraalde splijtstof, een gering onderdeel vertegenwoordigt van de genormaliseerde kostprijs van de elektriciteitsproductie. Die verschillen kunnen zich echter vertalen in aanzienlijke absolute kosten naar gelang van de omvang van het nucleaire programma en de periode van elektriciteitsproductie.

Figuur 17. Kosten van de splijtstofcyclus en van de benedenfase van de cyclus voor de verschillende reactorvloten en strategieën, met een actualiseringspercentage van 3%



Bron: OESO [68].

c. Meer recente studies

Er verschenen nog andere studies met betrekking tot de economische aspecten van de splijtstofcyclus:

- in de Verenigde Staten (JFK School of Government – Harvard University in december 2003, MIT in 2003, Universiteit van Chicago in augustus 2004, Boston Consulting Group in 2006),
- in Frankrijk (het Rapport Charpin/Dessus/Pellat van juli 2000, rapport van het Franse directoraat-generaal voor energie en grondstoffen (DGEMP) in december 2003).

[46] Meer bepaald door de kosten voor de aankoop van uranium. Deze conclusies moeten op heden iets getemperd worden omdat de koers van uranium de laatste 30 jaar fors heeft geschommeld. In 2007 bereikte hij een piek tot 135 USD/pond en is sindsdien is hij gedaald tot 20 USD/pond in 2017. In 2013 bedroeg de koers ervan tussen 40 en 45 USD/pond.

Uit de analyse van die studies werden de volgende conclusies getrokken:

- per ton bestraalde splijtstof is de kostprijs van de gesloten cyclus beter te vergelijken met die van directe berging;
- een precieze evaluatie van de meerprijs van de splijtstofcyclus in geval van opwerking is niet evident:
  - recente opwerkingscontracten zijn zeldzaam en gegevens van commerciële aard zijn vertrouwelijk,
  - geen enkel land heeft tot op heden hoogactief afval definitief geborgen, of het nu gaat om verglaasde residu's uit opwerking of om geconditioneerde bestraalde splijtstof,
  - feedback over de open cyclus, met inbegrip van de conditionering van bestraalde splijtstof, is tot op heden onbestaande;
- de geraadpleegde studies erkennen trouwens dat er nog heel wat onzekerheid bestaat wat betreft de evolutie van de uraniumprijzen en van de kostprijs voor omzetting, verrijking, splijtstofproductie en opwerking;
- in de gemaakte voorspellingen schommelt de eenheidsprijs voor opwerking, volgens de studies, tussen 450 en 1.500 euro per kilogram zware metalen; het is overigens niet zeker dat die kostprijs in alle studies dezelfde diensten dekt;
- verschillende van de geraadpleegde studies besluiten dat er een aanzienlijk verschil is tussen de kostprijs van de twee cyclusopties, in het voordeel van de open cyclus; de actualiseringsgraad is daarbij van belang: een toename van die graad vergroot de kloof tussen beide opties. Volgens bepaalde studies kan dat verschil zodanig toenemen dat de prijs per kWh in een gesloten cyclus dubbel zo hoog is als in een open cyclus;

Meerdere studies spreken van een prijstarget voor opwerking dat rond de 400 à 500 euro per kg uranium ligt voor toekomstige opwerkingsfabrieken waar het huidige procedé (PUREX) eventueel vervangen wordt door bijvoorbeeld een proces van "co-extractie" van U en Pu (het zogeheten COEX-procedé). Volgens die studies stemt die kostprijs voor de benedenfase overeen met het evenwichtspunt tussen beide strategieën indien de uraniumprijs hoog blijft.

2.1.5. Het transport

In België wordt het transport van radioactief afval georganiseerd door NIRAS en onder haar verantwoordelijkheid uitgevoerd door gespecialiseerde firma's. Krachtens het koninklijk besluit van 20 juli 2011 kent het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) de transportvergunningen toe aan die firma's.

De geldende Belgische wetgeving inzake transport van radioactieve stoffen is de Europese ADR-wetgeving, die voor radioactief afval verwijst naar de aanbevelingen van het IAEA[47].

[47] http://www.fanc.fgov.be/nl/news/update-van-de-specifieke-handleiding-voor-het-iaea-reglement-voor-het-vervoer-van-radioactieve-stoffen-editie-2012/695.aspx.

In ons land is voor elk transport van radioactief materiaal de voorafgaande toelating van het FANC nodig, behalve bij het vervoer van heel kleine hoeveelheden. Die toelating kan onderworpen zijn aan bijzondere voorwaarden.

Op technisch vlak zijn het de bepalingen uit de internationale regelgeving die gelden.

Verschillende bevoegde autoriteiten inzake transport[48] van radioactief materiaal (uit Duitsland, België, Spanje, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk) en hun ondersteunende technische diensten, alsook het WNTI (World Nuclear Transport Institute) en Areva als vertegenwoordiger van de industrie, hebben een handleiding uitgegeven om veiligheidsdossiers op te maken van collomodellen bestemd voor het transport van radioactief materiaal.

De handleiding beschrijft welke informatie een veiligheidsdossier moet bevatten om aan te tonen dat een collomodel bestemd voor het transport van radioactief materiaal in overeenstemming is met de internationale, Europese en nationale regels.

Hoewel het gebruik ervan niet wettelijk verplicht is, ondersteunt het FANC het initiatief en raadt het alle ontwikkelaars van dergelijke modellen aan om hun veiligheidsdossiers op te stellen volgens de handleiding.

Het transport van bestraalde of verbruikte splijtstof, van geconditioneerd afval (of van residu's, zie glossarium) uit opwerking, van plutonium en van MOX-splijtstof gebeurt in colli van type B. Voor elk collomodel (verpakking + inhoud) wordt een veiligheidsrapport opgemaakt waarin wordt aangetoond dat het model voldoet aan de wettelijke bepalingen. Dat kan aan de hand van berekeningen of via de proeven die de wetgeving voorschrijft.

Dat veiligheidsrapport wordt vervolgens bezorgd aan de bevoegde transportautoriteiten van elk land om een goedkeuringscertificaat te bekomen. Dat certificaat wordt enkel afgeleverd als de autoriteiten in kwestie van mening zijn dat het verpakkingsmodel voldoet aan de bepalingen uit de transportwetgeving en dat het in het bijzonder voldoet aan de prestatievereisten.

Wetgeving

Alle internationale regels zijn geënt op de aanbevelingen van het IAEA (zie glossarium) die zijn opgenomen in zijn verordening voor het transport van radioactief materiaal ("Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", Specific Safety Requirements, No. SSR-6, uitgave 2012). De verordening heeft als doel om het grote publiek, het personeel van transportbedrijven, goederen en het leefmilieu te beschermen tegen de gevolgen van radioactief materiaal tijdens het transport ervan, zowel in normale omstandigheden als in ongevalsituaties, zonder nodeloos het (internationale) transport van dat materiaal te belemmeren.

Die bescherming veronderstelt:

- dat het getransporteerde materiaal is ingesloten om te voorkomen dat het zich kan verspreiden en in het milieu kan terechtkomen;

[48] http://www.fanc.fgov.be/nl/page/dossier-de-surete-des-modeles-de-colis-destines-au-transport-de-matieres-radioactives/1330.aspx.

- dat men schade door warmteafgifte voorkomt, door de temperaturen aan de buitenkant van de colli te beperken en te eisen dat ze zodanig zijn vastgemaakt dat de warmte goed kan ontsnappen;
- dat de uitwendige straling van het collo gereduceerd wordt door de maximale stralingsintensiteit te beperken en door te eisen dat het collo correct wordt vastgemaakt tijdens het hele transport (de maximale stralingsintensiteit moet aangegeven worden via de juiste labeling);
- dat men voorkomt dat de juiste omstandigheden ontstaan om een kettingreactie te ontketenen, zelfs bij een ongeval.

De verordening legt de nadruk op de prestatienormen voor de colli (verpakking en radioactieve inhoud) in termen van instandhouding van de insluiting en bescherming, die een intrinsieke veiligheidsfactor vormt. Die prestatienormen hangen af van de hoeveelheid en de aard van het getransporteerde radioactieve materiaal, in die mate dat hetzelfde veiligheidsniveau wordt aangehouden voor alle collotypes, zowel in normale omstandigheden als bij een incident. De normen worden met andere woorden opgesteld in functie van het risico dat het radioactieve collo inhoudt. Ze bevatten ontwerpvoorschriften en proeven die de transportomstandigheden simuleren.

De wetgeving onderscheidt verschillende collotypes, afhankelijk van hun prestaties:

- colli van type A zijn bestemd voor de normale transportomstandigheden (met inbegrip van kleine incidenten); hun radioactieve inhoud is zodanig beperkt dat bij een ernstig ongeval de radiologische impact binnen de perken blijft, zelfs indien de insluiting en afscherming volledig vernietigd worden;
- colli van type B zijn ontworpen om ongevallen te weerstaan. Hun inhoud is groter dan die van type A-colli, al wordt die geval per geval beperkt in de goedkeuringscertificaten voor het collomodel;
- de "uitgezonderde" colli worden gebruikt om kleine hoeveelheden te transporten en hoeven enkel aan de minimale prestatievereisten te voldoen, gezien de beperkte impact bij een ernstig ongeval;
- de industriële colli worden gebruikt voor het transport van laagactief afval. De drie soorten industriële colli moeten bestand zijn tegen de routine-vervoersomstandigheden en, in functie van hun inhoud, aan de normale vervoersomstandigheden.

Bepalingen voor bijzondere omstandigheden

Zoals hierboven al aangegeven kunnen transportvergunningen gebonden zijn aan bijzondere voorwaarden. Bij het transport van verbruikte splijtstoffen, van residu's uit opwerking, van MOX-splijtstof en van plutonium is één van die voorwaarden de begeleiding door een agent van de dienst voor fysische controle van de transporteur en, bij uitzonderlijk vervoer (groot gewicht), een politie-escorte om het transport vlotter te laten verlopen. Een transport van plutonium en MOX-splijtstof gebeurt altijd onder begeleiding van de federale politie.

Bij een ongeval op Belgisch grondgebied moet de chauffeur onmiddellijk de dienst voor fysische controle van het transportbedrijf en van de bevoegde autoriteit (het FANC) inlichten. Daar treft men, in overleg met de bevoegde interventiediensten, onmiddellijk de nodige maatregelen om de gevolgen in te dijken. Is er toch een grootscheepse interventie nodig, dan treedt het nucleair noodplan in werking.

Ervaringen en feedback

De prestatienormen opgelegd door de internationale wetgeving en de veiligheidsmarges ingebouwd bij het ontwerp van de verpakkingen garanderen een hoog veiligheidsniveau.

Voor de goede werking van de Belgische en buitenlandse kerncentrales en voor de industriele activiteiten verbonden aan de splijtstofcyclus, worden er jaarlijks ongeveer 20.000 colli met kerntechnische materialen vervoerd op ons grondgebied (doorgevoerd of met een Belgische installatie als eindbestemming). Die 20.000 colli zijn goed voor zo'n 2000 transporten per jaar, verdeeld als volgt:

- naar de Belgische kerncentrales (Doel en Tihange): een tiental transporten;
- voor diverse industriële activiteiten (vervoer van nieuwe splijtstofelementen of afval naar Mol/Dessel): een honderdtal transporten;
- in transit en naar de haven van Antwerpen (vervoer van verse of verbruikte splijtstofelementen, van mineralen, van UF6): meer dan 1000 transporten.[49]

In België werden er in de periode 1978-1999 zo'n 450 colli met bestraalde splijtstof vervoerd over de weg of per spoor. Er waren ook honderden transporten van plutonium en MOX-splijtstof op Belgisch grondgebied. Daarbij was er geen enkel incident met gevolgen voor de bevolking of voor het leefmilieu.

Het vervoer van verglaasde residu's verschilt in wezen niet echt van het transport van bestraalde of verbruikte splijtstof. De ervaring verworven bij het transport van bestraalde splijtstof is met andere woorden zo toepasbaar. Bij het transport van de andere categorieën met opwerkingsafval gelden dezelfde veiligheidsnormen.

2.1.6. De impact op het leefmilieu

Op vraag van de OSPAR-commissie in 1995 startte het Agentschap voor Kernenergie van de OESO (het AEN of Agence pour l'Energie Nucléaire) een vergelijkende studie naar de radiologische effecten[50] verbonden aan het beheer van verbruikte splijtstof. Die studie had als voornaamste doelstellingen om de meest recente gegevens en informatie te verzamelen met betrekking tot de radioactieve uitstoot bij de verschillende stappen in beide splijtstofcycli (respectievelijk met en zonder opwerking van de verbruikte brandstof), om stelselmatig de effecten te analyseren en om de resultaten te interpreteren vanuit wetenschappelijk en technologisch standpunt, om zo het debat binnen de lidstaten van het NEA te verhelderen.

De studie werd uitgevoerd door een *ad-hocgroep* met deskundigen op het vlak van de mogelijke opties om bestraalde splijtstof te beheren, onder de vleugels van het Comité voor stra-

[49] Bron: Persdossier: Vervoer van radioactief materiaal, FANC, 2011.
[50] Les incidences radiologiques des options de gestion du combustible nucléaire irradié – AEN – 2000.

lingsbescherming en volksgezondheid van het AEN. België was betrokken bij de studie via een deskundige van het SCK•CEN.

De resultaten van de studie worden uitgedrukt in termen van gecumuleerde collectieve dosis (zie bijlage B) voor de gewone bevolking over een tijdsspanne van 500 jaar en in termen van jaarlijkse collectieve dosis voor de werknemers.

De expertgroep kwam tot de volgende conclusies:

- het totale radiologische effect (collectieve dosis per geproduceerde eenheid elektriciteit) op de hele bevolking voor de twee gekozen types splijtstofcycli is gelijkaardig, rekening gehouden met de onzekerheden. In die zin zou het onterecht zijn om uitdrukkelijke conclusies te trekken uit de lichte verschillen op het vlak van de collectieve en individuele radiologische effecten, vooral gelet op de beperkingen die algemene berekeningen met zich meebrengen. De radiologische effecten zijn bijgevolg niet doorslaggevend in de keuze voor de ene of de andere optie. Andere factoren, zoals het efficiënte gebruik van hulpbronnen, de energieveiligheid en economische overwegingen zouden daarentegen wel sterker kunnen doorwegen in de beslissing;
- globaal genomen blijft de blootstelling van de bevolking in beide opties beperkt ten opzichte van de vastgelegde wettelijke limieten en bovendien onbeduidend ten opzichte van de blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit (de jaarlijkse gemiddelde individuele dosis uit de blootstelling aan achtergrondstraling bedraagt 2,4 mSv voor de hele planeet).

Ten opzichte van de situatie in 2000 moeten we wel opmerken dat, voor alle stappen van de splijtstofcyclus, de uitstoot gevoelig is teruggenomen dankzij het gebruik van nieuwe technologieën en betere procedures. Dat is meer bepaald het geval voor de uitstoot van kerncentrales en, zoals eerder reeds vermeld, van opwerkingsfabrieken.

Voor de bovenfase van de splijtstofcyclus worden er bijvoorbeeld gepaste maatregelen getroffen om de radiologische langetermijneffecten van radon[51] afgegeven door opgeslagen residu's afkomstig uit de winning en de opwerking van uraniumerts, terug te brengen tot een verwaarloosbaar niveau; het lijkt daarentegen moeilijk om de radonuitstoot tijdens de eigenlijke winning en verwerking van het erts te beperken.

2.2. Radioactief afval

2.2.1. Radioactiviteit

Radioactiviteit is een fysisch verschijnsel waarbij de kern van een instabiel atoom spontaan omgezet wordt of uiteenvalt in een stabielere atoomkern. Die "desintegratie" gaat gepaard met de afgifte van straling en deeltjes. De verschillende vormen van radioactiviteit die een bron afgeeft worden aangeduid in functie van het afgegeven deeltje. We spreken van:

[51] Radon is een radioactief gas dat gevormd wordt door het uranium in de bodem en in de rotsen.

- α-radioactiviteit: wanneer er een heliumkern wordt afgegeven (die bestaat uit 2 protonen en 2 neutronen), ook wel "α-deeltje" genoemd. Een paar centimeter lucht, de menselijke huid of een gewoon blad papier volstaat om die deeltjes tegen te houden.
- ß(-)-radioactiviteit: wanneer een neutron omgezet wordt in een proton binnen de kern van de bron. Die omzetting gaat gepaard met de afgifte van een elektron. Een stuk aluminiumfolie of een doodgewoon raam volstaat om het traject van de elektronen te onderbreken. Ook de omgekeerde omzetting, van proton in neutron, bestaat en wordt ß(+)-radioactiviteit genoemd, maar die vorm treffen we weinig aan binnen de splijtstofcyclus.
- γ-radioactiviteit: wanneer er elektromagnetische straling wordt afgegeven, van dezelfde aard als zichtbaar licht of röntgenstralen, maar dan met veel meer energie en veel doordringender. Er zijn al een aantal centimeter lood of enkele tientallen centimeter beton nodig om gammastralen tegen te houden.

Natuurlijke bronnen van radioactiviteit desintegreren steeds op dezelfde manier, daarom is het voor die bronnen mogelijk om een aantal parameters te bepalen. Een van die parameters is de intensiteit van de radioactieve bron, gekenmerkt door wat we de activiteit noemen en gemeten in becquerel (of Bq). Eén becquerel stemt overeen met één desintegratie per seconde. Dat wil eigenlijk zeggen dat er één deeltje per seconde wordt afgegeven. In het geval van natuurlijke radioactiviteit bezit het afgegeven deeltje altijd dezelfde energie, een parameter die bepalend is voor de doordringingslengte van het deeltje en dus voor het gevaar ervan, zoals we later nog zien.

Een andere belangrijke eigenschap van radioactiviteit is de snelheid waarmee ze afneemt. De halveringstijd is de tijd die een radioactieve stof nodig heeft voor ze de helft van haar activiteit kwijt is, met andere woorden de tijd die het duurt voor de helft van de kernen van de radioactieve bron zijn uiteengevallen en hun straling hebben afgegeven. De halveringstijd is in wezen verbonden aan de activiteit. Hoe actiever een stof immers is, hoe meer straling ze afgeeft en hoe sneller ze ontbindt in een andere soort.

De halveringstijden kunnen sterk uiteenlopen van het ene isotoop tot het andere, van een fractie van een seconde (of zelfs een micro- of nanoseconde) tot een miljard jaar (stabiele halveringstijden). De halveringstijd van plutonium-238 bijvoorbeeld is 87 jaar, die van plutonium-239 is dan weer 24.119 jaar. De halveringstijd van de voornaamste isotopen uit de splijtstofcyclus staan vermeld in de tabel in bijlage C.

Het kan gebeuren dat de overblijvende kern na desintegratie nog steeds een radioactieve kern is die op zijn beurt zal desintegreren, in dat geval spreken we van een vervalreeks. De zware kernen, zoals lagere actiniden[52] moeten doorgaans meerdere desintegraties ondergaan alvorens er een stabiele kern ontstaat, waardoor de activiteit van de verschillende isotopen in die vervalreeks gecumuleerd wordt aan ritmes die afhangen van de halveringstijd van elk element. Er bestaan 4 vervalreeksen voor zware kernen, beschreven in bijlage B.

[52] Zie glossarium in bijlage A.

De isotopen van eenzelfde chemisch element verschillen door het aantal neutronen die ze in hun kern dragen (het aantal fotonen in de kern blijft constant). Bij wijze van voorbeeld: koolstof-12, koolstof-13 en koolstof-14 zijn drie verschillende isotopen van hetzelfde chemisch element, namelijk koolstof. Ze bevatten respectievelijk 6, 7 of 8 neutronen en 6 protonen. Daarom bedraagt hun atoomnummer, of het totale aantal deeltjes in de kern, ook wel 'nucleonen' genoemd, respectievelijk 12, 13 of 14.

Een isotoop is splijtbaar wanneer bij een botsing met een neutron de kern breekt of "splijt" (zie glossarium) in kleinere kernen, zogeheten "splijtingsproducten" en er energie vrijkomt. Enkel de oneven isotopen van plutonium en uranium zijn splijtbaar bij botsingen met laagenergetische neutronen, zogeheten "thermische" of "trage" neutronen. Uranium-235 en plutonium-239 zijn dus splijtbare isotopen.

De kernen van uranium-238 kunnen een neutron opvangen en zich omzetten in plutonium-239, dat splijtbaar is. De kernen die kunnen leiden tot de productie van splijtbare isotopen via het opvangen van een neutron noemt men fertiele kernen.

Om de impact van de straling op het materiaal te beoordelen, kunnen we teruggrijpen naar het begrip dosis. Een van de eenheden om de geabsorbeerde dosis te meten is de gray (Gy), die staat voor de hoeveelheid energie die de straling aan het materiaal afgeeft. Eén gray komt overeen met de absorptie van 1 joule energie (J) per kilogram (kg) materie of weefsel.

De biologische schadelijkheid voor de mens bij inname (door ingestie of inademen) van een radioactieve stof wordt vaak beoordeeld aan de hand van de grootheid *radiotoxiciteit*.

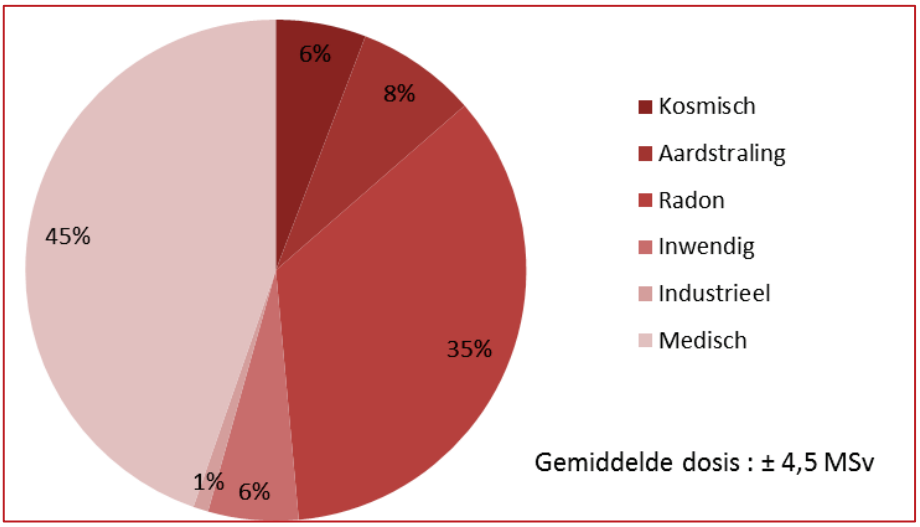
De radiotoxiciteit door ingestie (of inademen) van een bepaald isotoop kan worden uitgedrukt in sievert en wordt gedefinieerd als het product van de activiteit van dat isotoop (in becquerel, zie bijlage B) en het 'effectief dosisequivalent bij ingestie'[53] (of inademing), uitgedrukt in sievert maal becquerel. Het dosisequivalent verwijst naar de afgeleverde dosis per ingenomen activiteitseenheid en houdt rekening met de impact van de aard van de straling op de verschillende weefsels van een volwassen menselijk lichaam. Onder de radio-elementen van verbruikte splijtstof zijn alfastralers uit de actinidenreeks sterker radiotoxisch bij inname dan splijtingsproducten met een lange halveringstijd.

Merk op dat de globale radiotoxiciteit van een afvalcollo kan worden berekend door het aantal radionucliden te vermenigvuldigen met de dosisfactor 'ingestie' van elke radionuclide. Het is met andere woorden een indicator voor de schadelijkheid van een radioactief collo. Daarnaast kan het potentiële radiologische risico op heel lange termijn ook beoordeeld worden op basis van de globale radioactiviteit van een afvalcollo indien de radionucliden in het afval terug terechtkomen in de biosfeer en worden opgenomen door de mens (door ingestie, hoofdzakelijk via het water).

[53] Le cycle du combustible nucléaire, Louis Patarin, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires.

In België krijgt een persoon elk jaar een dosis radioactiviteit binnen van gemiddeld 4,5 millisievert[54] [69], zie figuur 18. Die dosis heeft verschillende herkomsten: kosmische straling, aardstraling, radon, inwendige oorsprong en industriële en medische herkomst. De medische dosis is grotendeels toe te schrijven aan radiologische onderzoeken of bepaalde therapieën. Figuur 18 toont naar bron de gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling in België.

Figuur 18. Verdeling naar bron van de dosis uit ioniserende straling in België .



Bron: Cijfers van FANC [69], aangepast door de FOD Economie

Een aantal Europese en nationale wetsbepalingen, gebaseerd op de aanbevelingen van internationale instanties, leggen de toelaatbare dosislimieten vast voor straling afkomstig uit menselijke activiteiten. Die limieten hebben zowel betrekking op de sector van de nucleaire elektriciteitsproductie als op de medische sector, de transportsector en de industrie in het algemeen.

De nucleaire industrie hanteert het "ALARA"-principe (As Low As Reasonably Achievable), wat betekent dat de grootte van de individuele doses, het aantal blootgestelde personen en de waarschijnlijkheid van blootstelling niet enkel de dosislimieten moeten naleven, maar ook zo laag moeten worden gehouden als redelijk mogelijk is, gelet op de economische en maatschappelijke factoren.

2.2.2 De radiotoxiciteit

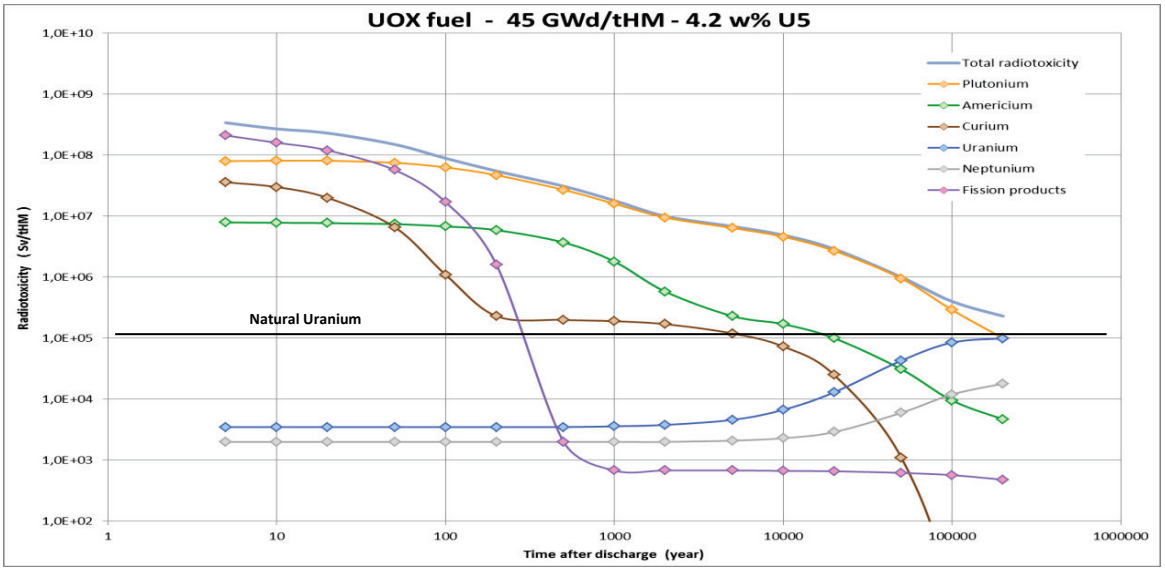
Radiotoxiciteit is het vermogen van een ingenomen stof om schade te berokkenen aan een organisme omwille van de radioactiviteit die ze bevat. Het gaat hier om een van dé doorslag-

[54] Bij volwassenen stellen we een duidelijke statistische toename vast van het aantal kankergevallen wanneer de blootstelling 100 mSv/jaar overschrijdt. In België verbiedt het FANC, op grond van zijn algemeen reglement op de bescherming van de bevolking, van de werknemers en van het leefmilieu tegen het gevaar van de ioniserende stralingen (ARBIS), een blootstelling aan meer dan 20 mSv over 12 glijdende maanden voor werknemers die in hun beroep regelmatig met straling te maken krijgen. De limiet voor blootstelling van industriële oorsprong voor de rest van de bevolking ligt op 1 mSv/jaar.

gevende factoren inzake langetermijnbeheer van radioactief afval, aangezien de tijdschalen in kwestie extreem lang zijn en de betrokken materialen uitermate radioactief kunnen zijn.

De tabel in bijlage C bevat naast de isotopensamenstelling van de splijtstofelementen ook de halveringstijden en de activiteit van de voorgestelde elementen. Als we rekening houden met die gegevens en met de activiteit van alle isotopen binnen de vervalreeks van de oorspronkelijke isotopen (zie bijlage B), dan kunnen we inschatten hoe de radiotoxiciteit van een bestraald element zal evolueren met de tijd (zie figuur 19, in dit geval voor UOX-splijtstof).

Figuur 21. Radiotoxiciteit van bestraalde UOX-splijtstof met de bijdrage van de verschillende elementen die ze bevat.



De oranje curve toont de bijdrage van plutonium. Dat is het hoofdbestanddeel gedurende meer dan 100.000 jaar. Bron: NIRAS.

De figuur toont ook het 'referentiepeil'. Deze lijn toont de radiotoxiciteit van het uraniumerts dat gebruikt werd voor de productie van 1 ton splijtstof, met andere woorden om en bij de 7 ton uraniumerts. Door ook het referentiepeil op de figuur te zetten is heel duidelijk te zien dat er bij de bestraling van de splijtstof radiotoxiciteit ontstaat, die afneemt met de tijd. In tegenstelling tot wat de term 'referentiepeil' zou kunnen doen vermoeden, is de radiotoxiciteit van uraniumerts niet onschadelijk en mogelijk zelfs gevaarlijk voor de mens.

De veronderstellingen waarvan men is uitgegaan voor de berekeningen zijn de volgende: de splijtstof is van het UOX-type, verrijkt met 4,2 % U235 en gebruikt in een reactor tot een burn-up van 45 GWdagen/tHM. De curves tonen de radiotoxiciteit van een bepaalde soort, ongeacht de isotopen, door rekening te houden met de bijdrage die de volledige vervalreeks van elk startisotoop levert aan de radiotoxiciteit.

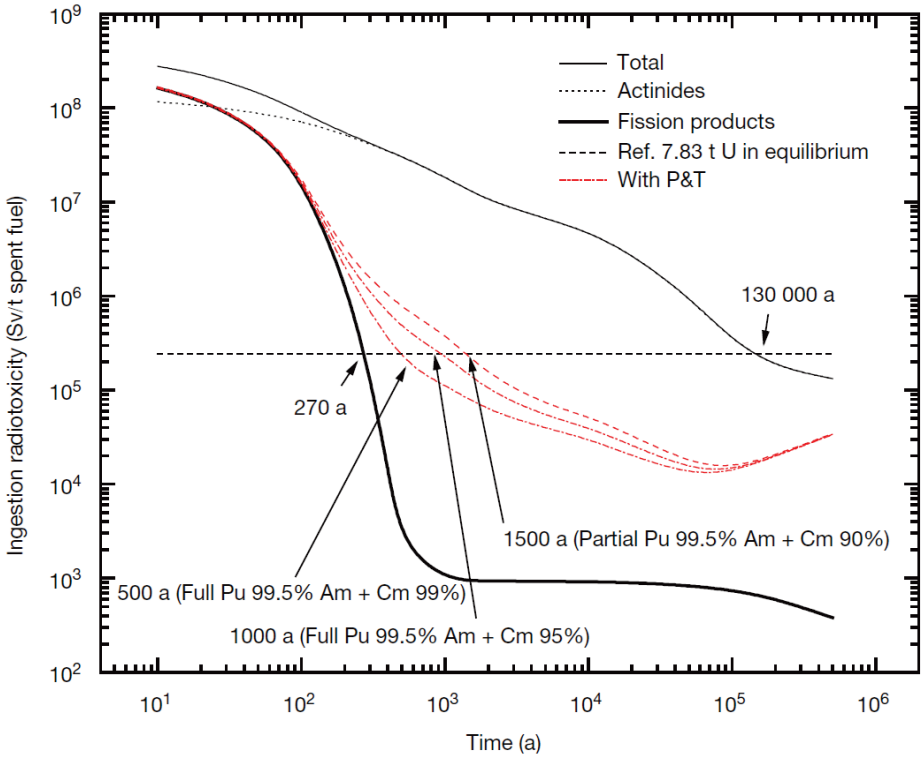
Deze figuur legt een aantal interessante aspecten bloot:

- Allereerst stellen we vast dat de radiotoxiciteit van uranium (de blauwe curve), uraniumisotopen 234, 235, 236 en 238 in overweging genomen, meer dan een factor 10 lager is ten opzichte van het referentiepeil bij het verlaten van de reactor. Na ongeveer

1000 jaar neemt de radiotoxiciteit van uranium weer toe. Dat fenomeen is te verklaren door de evolutie van bepaalde uraniumisotopen waarvan de vervalketen kortlevende elementen bevat: na het eerste verval komt elk volgende verval heel snel, waardoor de totale radiotoxiciteit "tijdelijk" toeneemt.

- De splijtingsproducten (weergegeven door de paarse curve) zijn uiterst radiotoxisch en zijn de eerste 50 tot 100 jaar de voornaamste opwekkers van radiotoxiciteit. De isotopen waarmee rekening is gehouden in de berekening zijn strontium-90, zirkonium-93, technetium-99, palladium-107, jodium-129, cesium-134, -135 en -137 en promethium-147.
- Plutonium, weergegeven met de gele curve die plutoniumisotopen 238 tot 242 en de vervalproducten van plutonium omvat, wordt de grootste bijdrager na 60-100 jaar en blijft dat vervolgens ook gedurende minstens een miljoen jaar.
- Ook de lagere actiniden (americium-241 en -243, weergegeven met de groene curve, curium-244 en -245, weergegeven met de bruine curve, en neptunium-237, weergegeven met de grijze curve) dragen bij tot de radiotoxiciteit van de verbruikte splijtstof.

Figuur 20. Ingenomen radiotoxiciteit uitgedrukt in Sv/t bestraalde splijtstof



Bron: IAEA [71].

De radiotoxiciteit is een factor waarmee rekening moet worden gehouden voor de veiligheid van de bovengrondse of geologische bergingsinstallatie. Er worden nadelige scenario's uitgewerkt, en de dosis waar de bevolking aan wordt blootgesteld in die scenario's wordt berekend. De regulator legt een dosislimiet vast en de installatie moet zodanig ontworpen zijn dat die limiet nooit overschreden wordt.

In dat opzicht wint de recyclage van plutonium aan belang: door bijvoorbeeld MOX-splijtstof te gebruiken wordt de totale plutoniumbalans met ongeveer 30 % teruggeschroefd[55], waardoor de radiotoxiciteit in de bergingsinstallatie met even veel afneemt aangezien die radiotoxiciteit recht evenredig is met de hoeveelheid radioactief materiaal. Die radiotoxiciteitswinst zou nog kunnen oplopen door een keten te ontwikkelen met meervoudige recyclage en waar de transmutatie van de lagere actiniden ervoor zou kunnen zorgen dat de radiotoxiciteit van de verbruikte splijtstof op lange termijn beperkt wordt. De meest gevorderde plannen voor die meervoudige recyclage, die ook een gedeelte transmutatie van lagere actiniden behelzen, voorzien dat de radiotoxiciteit terugkeert naar het referentiepeil na ongeveer 300 jaar, zoals te zien is op figuur 20.

In het geval van België is een dergelijke beperking van de radiotoxiciteit ondenkbaar, en dat om verschillende redenen: enerzijds is er in het verleden 530 ton bestraalde brandstof opgewerkt en de vaten met afval, die splijtstoffen en lagere actiniden bevatten, moeten hoe dan ook in België beheerd worden; anderzijds is geavanceerde meervoudige recyclage voor de Belgische inventaris weinig aannemelijk tenzij wanneer deze plaatsvindt in het raam van een internationale samenwerking [70].

2.2.3. De problematiek van radioactief afval

De impact van de radioactiviteit van afval zet zich door op drie vlakken:

- op thermisch vlak: de warmteproductie van het afval, die in de tijd beperkt is, vloeit voort enerzijds uit de bijdrage van een klein aantal splijtingsproducten (voornamelijk Cs-137 en Sr-90 en hun vervalproducten) en anderzijds uit de meerderheid van de transuranen (plutonium, americium, curium). De warmteafgifte van het afval is bepalend voor het ontwerp van het bergingssysteem.
- op radiotoxisch vlak: de inhoud aan radiotoxische nucliden in het afval geeft de intrinsieke radiologische schadelijkheid aan, die bepalend is bij rechtstreeks contact van de radionucliden met de biosfeer (ongeval bij behandeling van het afval, indringing in het bergingssysteem na de sluiting). De transuranen dragen in grote mate bij tot de radiotoxiciteit van het afval, maar op basis van de uitgevoerde veiligheidsevalutaties voor bergingssystemen in klei hebben ze slechts een klein aandeel in het radiologische risico.
- op het vlak van het radiologische risico: het gelopen risico is een gecombineerd gevolg van het vermogen van een bergingsinstallatie om een radionuclide in te sluiten en van de intrinsieke radiotoxiciteit van die radionuclide. Het radiologische risico hangt hoofdzakelijk af van een beperkt aantal splijtings- en activeringsproducten met lange halveringstijd en waarvan de mobiliteit binnen het bergingssysteem vrij hoog is (denken we bijvoorbeeld aan Se-79, I-129, Tc-99, Cl-36, C-14...).

De radioactiviteit is met andere woorden een van de bepalende factoren in de klassering van radioactief afval.

---

[55] De tabel in bijlage C toont dat het plutoniumgehalte in MOX-splijtstof ongeveer 7,5 % bedraagt voor en 5,09 % na bestraling. Tijdens de reactorfase wordt er met andere woorden 28,8 % van het aanwezige plutonium vernietigd.

In België wordt geconditioneerd radioactief afval ingedeeld in 3 categorieën, op basis van twee criteria: de radioactiviteit en de halveringstijd van de radio-elementen in het afval. De koppeling van die twee criteria houdt dus rekening met het gevaar van het afval en met de tijdsspanne dat het gevaarlijk is. Dit classificatiesysteem maakt het met andere woorden mogelijk om het afval in te delen in functie van de manier waarop het op lange termijn wordt beheerd. NIRAS hanteerde een classificatie in drie categorieën[56] [20] die gedefinieerd zijn conform de classificatie die in 1994 door het IAEA is voorgesteld [72] en conform die welke in 1999 door de Europese Commissie is aanbevolen [73]:

- **Afval van categorie A** is geconditioneerd laag- en middelactief kortlevend afval dat beperkte hoeveelheden langlevende radionucliden bevat. Het houdt gedurende enkele honderden jaren een risico in voor mens en milieu. Het komt in aanmerking voor oppervlakteberging of berging op geringe diepte. Het stemt overeen met het laagactieve afval van de classificatie van het IAEA van 2009. In 2006 werd beslist dat dat afval bovengronds geborgen zal worden op het grondgebied van de gemeente Dessel;
- **Afval van categorie B** is geconditioneerd laag- en middelactief afval besmet met langlevende radionucliden, in dusdanige hoeveelheden dat het in sommige gevallen verscheidene tienduizenden tot honderdduizenden jaren een risico inhoudt voor mens en leefmilieu [57]. Het warmtevermogen van dat afval kan aanzienlijk zijn op het ogenblik van zijn conditionering, maar het afval zal na de opslagperiode te weinig warmte afgeven om ondergebracht te worden in categorie C. Het stemt overeen met het middelactieve afval van de classificatie van het IAEA van 2009.
- **Afval van categorie C** is geconditioneerd hoogactief afval dat grote hoeveelheden langlevende radionucliden bevat en dus in sommige gevallen, zoals het afval van categorie B, verscheidene tienduizenden tot honderdduizenden jaren een risico inhoudt. Na de periode die momenteel beschouwd wordt voor de opslag van dat afval (zestig jaar, in de hypothese van berging in weinig verharde klei) brengt zijn thermisch vermogen nog een aanzienlijke temperatuurstijging van het gastmidden van de bergingsinstallatie teweeg. Het stemt overeen met het hoogactieve afval van de classificatie van het IAEA van 2009.

Splijtstof valt onder categorie C, net als verglaasd opwerkingsafval. Daar moeten we evenwel aan toevoegen dat wanneer bestraalde splijtstof wordt opgewerkt (scheiding gevolgd door herverrijking, met productie van REU en eventueel MOX), het verarmde uranium dat daaruit voortkomt en goed is voor ongeveer 80 % van het volume van de splijtstof niet beschouwd wordt als radioactief materiaal. Het wordt bewaard in de verrijkingsfabriek.

NIRAS plant om het afval van categorie A op te slaan in een oppervlaktebergingsinstallatie in Dessel, die niet beschreven wordt in deze studie. Geïnteresseerde lezers kunnen altijd terecht op de NIRAS-webpagina gewijd aan die installatie[58] voor meer informatie. Het NIRAS-

[56] Die categorieën houden geen rekening met het radiumhoudende afval dat zich bevindt in de toegelaten bergingsinstallaties van Umicore in Olen.
[57] De ingekapselde bronnen die als radioactief afval moeten worden beheerd, komen na verwerking en conditionering terecht in de categorie B.
[58] http://www.niras-cat.be.

afvalplan beveelt aan om het afval van categorie B en C in een gemeenschappelijke geologische bergingsinstallatie onder te brengen, ingegraven in een verharde kleilaag op Belgische bodem. Overeenkomstig de wet heeft NIRAS aan de regering een voorstel van nationaal beleid voorgelegd dat strookt met hetgeen in 2015 bepleit werd in haar afvalplan. Op 31 december 2016 was er nog geen enkel nationaal beleid inzake het afval van categorie B en C aanvaard.

2.2.4. De "safeguards" en de non-proliferatie

Het non-proliferatiebeleid is erop gericht om het bezit van kernwapens te verbieden aan landen die nog geen dergelijke wapens hebben, om op die manier de hoeveelheid kernwapens in de wereld binnen de perken te houden. De internationale non-proliferatiestelsels omvatten alle internationale instrumenten en beleidsmaatregelen die moeten voorkomen dat staten toegang krijgen tot massavernietigingswapens, een schending van hun internationale verbintenissen.

De internationale stelsels voor de non-proliferatie van kernwapens zijn geënt op drie pijlers:

- het Non-Proliferatieverdrag voor Kernwapens (NPV);
- het safeguards- en controlesysteem van het IAEA; binnen de Europese Gemeenschap overlapt dat instrument het EURATOM-controlesysteem;
- het aanvullende garantieprotocol van het IAEA, dat erop gericht is clandestiene activiteiten op te sporen die gericht zijn op de ontwikkeling van kernwapens;
- de richtlijnen van de CANVEK-Commissie (Commissie van advies voor de niet-verspreiding van kernwapens) in het kader van het NPV en de richtlijnen van de "Nuclear Suppliers Group" inzake nucleaire export;
- bi- en multilaterale samenwerkingsakkoorden.

Het safeguardssysteem van het IAEA heeft als doel om snel vast te stellen dat er ergens technologieën of aanzienlijke hoeveelheden kerntechnisch materiaal afkomstig uit vreedzame nucleaire activiteiten zijn verduisterd, met de bedoeling om er kernwapens of andere nucleaire explosieven mee te ontwikkelen.

Voor elke categorie kerntechnisch materiaal zijn de safeguardscontroles door de inspecteurs van het IAEA en/of Euratom gebaseerd op twee criteria: een kwantitatief criterium en een tijdscriterium. Voor bestraalde splijtstof bijvoorbeeld is de relevante hoeveelheid vastgelegd op 8 kg, het tijdsdoel bedraagt 3 maanden tussen de opeenvolgende bezoeken van de inspecteurs.

De boekhouding of de inventaris van de kerntechnische materialen, opgemaakt door Euratom en het IAEA, is onmisbaar in dat hele proces. Daar komen nog een hele reeks belangrijke aanvullende maatregelen bij, zoals:

- de insluiting van en het toezicht op de kerntechnische materialen: gebruik van zegels, bewegingsdetectoren, stralingsdetectoren, cameratoezicht enz.
- de verificatie van de "design information": de inspecteurs gaan na of de afmetingen en de exploitatie van de installatie wel conform zijn;

- niet-destructieve analysetechnieken.

Al deze maatregelen van het IAEA moeten toegepast worden in alle installaties die deel uitmaken van de nucleaire cyclus. Enkel zo zijn ze immers conform het NPV en de NSG-richtlijnen.

2.2.5. De previsionele inventaris voor het radioactieve afval uit de splijtstofcyclus

NIRAS heeft de opdracht gekregen een inventaris op te maken. Die inventaris wordt momenteel bijgewerkt. De laatste inventarisoefening dateert van 2013 en gaf als resultaat de previsionele hoeveelheden afval weergegeven in tabel 5.

Tabel 5. Previsionele inventaris voor het radioactieve afval (2013)

Soort afval	Volume [m³] (volledige opwerking)	Volume [m³] (niet-opwerking)
Categorie A	69.900	69.900
Categorie B	11.100	10.430
Categorie C	600	4.500

Bron : OESO [75].

Deze volumes omvatten al het nucleaire afval dat in België is geproduceerd en beperken zich dus niet tot het radioactieve afval afkomstig van de splijtstofcyclus van de Belgische krachtcentrales (waarvan men kan schatten dat zij bijna de volledige hoeveelheid van het volume van categorie C en tussen 15 % en 25 % van het volume van categorie B vertegenwoordigen, naar gelang van het gekozen scenario). De afvalvolumes afkomstig van de splijtstofcyclus werden geëvalueerd op basis van een levensduur van 40 jaar voor alle Belgische reactoren. De impact op het afvalvolume van de levensduurverlenging met 10 jaar van de reactor Tihange 1 was als volgt geëvalueerd :

- 300 m³ afval van categorie A en B en 150 m³ afval van categorie C in het scenario niet-opwerking en
- 330 m³ afval van categorie A en B en 30 m³ afval van categorie C in het scenario volledige opwerking.

De impact van de levensverlenging van de reactoren Doel 1 en Doel 2 was niet geëvalueerd maar zou van dezelfde grootorde zijn als de impact van de verlenging van Tihange 1.

De previsionele inventaris van het radioactief afval afkomstig van de splijtstofcyclus.

De inventarisoefening die in dit deel aan bod komt werd uitgevoerd door NIRAS en Synatom, rekening houdend met de bepalingen van de wet van 2003 in de versie van 31 december 2016, dit wil zeggen rekening houdend met de verlenging met 10 jaar van de reactoren Doel 1, Doel 2 en Tihange 1 en met een levensduur van 40 jaar voor de andere kernreactoren.

Sinds het begin van de uitbating van de Belgische kernreactoren en tot in 1993 werd de bestraalde splijtstof (UOX) afkomstig uit bepaalde reactoren (Doel 1 en 2 en Tihange 1) gedeeltelijk opgewerkt. De opwerking van Belgische kernbrandstof gebeurde in de fabriek van Cogéma, later Areva NC, in het Franse La Hague. België had in 1975 voor die strategie gekozen, tot het in 1993 besloot de opwerkingscontracten op te schorten en enerzijds opwerking en

anderzijds directe berging na de conditionering van bestraalde splijtstof uit de vermogensreactoren te behandelen als gelijkwaardige opties voor de splijtstofcyclus.

Het afval dat ontstaat bij de opwerking van splijtstof bestaat enerzijds uit hoogactief glas (CSD-V) dat splijtingsproducten en lagere actiniden bevat (vooral americium, curium en neptunium) en anderzijds uit de structuurdelen van de elementen (hulzen en eindstukken) en uit samengeperst technologisch afval (CSD-C). Ook met middelactief glas (CSD-B), afkomstig uit de verglazing van diverse effluenten die sinds lange tijd opgeslagen lagen in La Hague, moet rekening worden gehouden. Dat glas komt in de plaats van effluenten die in bitumen geconditioneerd werden en in oorsprong mee opgenomen waren in de opwerkingscontracten. Al dit afval zit in roestvrijstalen containers van 180 liter.

In België worden sinds 1993, het jaar waarin de opwerking van splijtstof uit de commerciële reactoren en de directe berging ervan werden gelijkgesteld, de ontladen splijtstofelementen door Engie-Electrabel opgeslagen op het terrein van de centrales zelf, in waterbekkens (Tihange) of in droge opslagruimtes (Doel). Ze zijn door hun eigenaar niet aangegeven als radioactief afval.

Het afval dat die splijtstoffen voortbrengen hangt af van de optie(s) die Synatom kiest, en eventueel ter goedkeuring aan het Federaal Parlement en de Belgische regering wordt/worden voorgelegd, om in de toekomst de bestraalde kernbrandstof te beheren.

Impact van de keuze voor een bepaalde cyclusoptie

De opties voor de splijtstofcyclus, die hier beknopt werden geschetst, hebben ontegensprekelijk een impact op de hoeveelheid radioactief afval dat geborgen zal moeten worden. De twee referentiescenario's die tot op heden onderzocht zijn (directe berging en volledige opwerking) vormen in zekere zin twee tegenpolen op het vlak van beheer van bestraalde splijtstof:

- Het scenario "directe berging" houdt in dat opwerking wordt opgeschort of zelfs definitief wordt opgegeven en dat daarnaast alle bestraalde splijtstoffen als radioactief afval worden beschouwd. Nadat ze zijn aangegeven als afval, moeten de verbruikte splijtstoffen geconditioneerd en ingesloten worden bij NIRAS met het oog op hun geologische berging.
- Het scenario "opwerking" impliceert logischerwijs dat de opwerkingsactiviteit hervat wordt (de keuze van de gebruikte scheidingsprocedés is de bevoegdheid van Synatom). Er wordt overwogen om het uranium te recycleren in de Belgische kerncentrales. Mocht het niet mogelijk blijken om al het uranium te hergebruiken, dan zal dat vermoedelijk worden doorverkocht aan derden. Ook het plutonium zou "verkocht"[59] worden aan een derde.

Elke tussenliggende of 'gemengde' strategie houdt het midden tussen beide extreme strategieën, denken we bijvoorbeeld aan gedeeltelijke opwerking of scheiding (volgens een nader te bepalen procedé) gevolgd door opslag in een geologische bergingsinstallatie.

[59] Naar analogie met het uranium gebruiken wij hier de term "verkopen" maar er zou veeleer sprake zijn van overdracht van het plutonium.

Bijlage D beschrijft de manieren waarop men in andere landen omspringt met radioactief afval.

Previsionele inventarissen van te beheren afval

De hoeveelheid afval die beheerd moet worden hangt af van de optie die men kiest voor de bestraalde brandstof die nog niet is opgewerkt. De twee opties, "opwerking" en "directe berging", zijn de referentiescenario's waarop NIRAS zich baseert om een voorlopige inventaris op te maken van het afval dat in de geologische bergingsinstallatie geborgen zal moeten worden. Ongeacht de gekozen optie, het te beheren afval komt hoe dan ook bovenop het afval dat afkomstig is uit eerdere opwerkingen.

a. Geproduceerde hoeveelheden voor het opschorten van de opwerking in België

De reeds uitgevoerde opwerkingscontracten hebben 672 ton zware metalen[60] (tHm) voortgebracht. De hoeveelheid radioactief afval uit die opwerking, intussen gerepatrieerd of in afwachting van repatriëring naar België, komt overeen met 632 tHM, omdat het afval uit de eerste opwerkingscontracten, goed voor 40 tHM, in Frankrijk blijft. Het opgewerkte uranium en plutonium werd opgewaardeerd door de eigenaar. Hieronder een overzicht van de totale hoeveelheden:

- CSD-V (hoogactief glas): 387 colli of 70 m^3, volledig gerepatrieerd in de periode 2000-2007.
- CSD-C (samengeperst afval): 431 colli of 78 m^3, waarvan:
- CSD-B (middelactief glas): 35 colli of iets meer dan 6 m^3

b. Verwachte hoeveelheden in geval van volledige opwerking

Als er beslist wordt om weer te starten met opwerking, dan zouden de toekomstige opwerkingscontracten volgens Synatom [74] de volgende hoeveelheden te repatriëren afval voortbrengen:

- CSD-V (hoogactief glas): 3.732 colli of 672 m3.
- CSD-C (samengeperst afval): 3.153 colli of 568 m^3.

Als scheidingsprocedé zou voor PUREX geopteerd worden. Zoals eerder al aangegeven zou er uit de uitvoering van die contracten geen CSD-B-afval voortkomen. Synatom voorziet dat in dit scenario het uranium deels zou terugkeren naar België om er gebruikt te worden in de kerncentrales en deels worden verkocht aan derde partijen. Het plutonium dat voortkomt uit de opwerking zou niet terugkeren naar België, maar worden doorverkocht aan een derde partij.

De hoeveelheden bestraalde splijtstof die in de toekomst opgewerkt zouden moeten worden en waarvoor dus nieuwe contracten gesloten moeten worden, worden in detail vermeld in het volgende deel.

[60] Metric tons initial heavy metal = ton initiële zware metalen. Deze eenheid verwijst naar de massa van de zware metalen aanwezig in de verse splijtstof.

c. Verwachte hoeveelheden in geval van niet-opwerking

Ziet men definitief af van de opwerkingsoptie, dan mogen we ons verwachten aan de hoeveelheden[61] vermeld in tabel 6, na veertig jaar exploitatie van de reactoren in kwestie.

Tabel 6. Raming (eind 2012) van het aantal verbruikte brandstofelementen na 40 jaar exploitatie, per reactor- en elementtype.

Reactor en elementtype	Aantal elementen	tHM
Doel 1-2 (UOX)	1.750	465
Doel 3 – Tihange 1-2 (UOX)	4.950	2.275
Doel 3 – Tihange 2 (MOX)	144	66
Doel 4 – Tihange 3 (UOX)	3.550	1.915
Totaal	10.394	4.711

Bron: Synatom [74].

Het aantal elementen stemt overeen met de aantallen in het Afvalplan.

d. Toekomstige hoeveelheden in geval van gedeeltelijke opwerking

Het referentieprogramma van Synatom is de laatste jaren geëvolueerd naar een scenario dat voorziet in de opwerking van een deel van de zijn inventaris van verbruikte splijtstof. De previsionele inventaris van radioactief afval afkomstig van de splijtstofcyclus op 31 december 2016 volgens Synatom staat in tabel 7. [21]:

[61] De hoeveelheden werden geëvalueerd in 2012. Wij beschikken niet over recentere gegevens waarbij rekening wordt gehouden met de langere levensduur van de reactoren Doel 1, Doel 2 en Tihange 1.

Tabel 7. Previsionele inventaris op 31 december 2016 van de hoeveelheid verbruikte brandstof-elementen in het referentiescenario van Synatom

Reactor en soort elementen	Aantal elementen	tHM
Doel 1-2 (UOX en REU)	1.580	425
Doel 3 – Tihange 1-2 (UOX)	4.586	2.110
Doel 3 – Tihange 2 (MOX	0	0
Doel 4 – Tihange 3 (UOX)	2.438	1.316
Total	8.604	3.851
Afval colli afkomstig van opwerking	**Aantal colli**	**Volume (m³)**
CSD-V	1.387	250
CSD-C	1.103	199
CSD-B	35	6,3

Bron: Synatom [21].

Bijlagen

Bijlage A. Glossarium

Actiniden

De 15 chemische elementen met een atoomnummer tussen 89 en 103.

Vier actiniden zijn natuurlijke elementen (actinium, thorium, protactinium, uranium), de elf andere kunnen enkel kunstmatig worden opgewekt (neptunium, plutonium, americium, curium, berkelium, californium, einsteinium, fermium, mendelevium, nobelium, lawrencium).

Afvoer / geologische berging

Het onderbrengen van geconditioneerd afval of verbruikte geconditioneerde kernbrandstof in speciale installaties bovengronds, net onder het aardoppervlak of in diepe geologische lagen, zonder de intentie om er iets weer uit te halen.

Berging

Installatie of site aangelegd om radioactief afval in onder te brengen zonder de intentie om het er later weer uit te halen. NIRAS raadt aan om in België een dergelijke installatie aan te leggen in een verharde kleilaag (Boomse klei of Ieperiaanklei).

Bestraalde splijtstof

Splijtstoffen van uranium en/of plutoniumhoudende stoffen vervat in een structuur die het gebruik ervan in een reactor mogelijk maakt, nadat ze definitief uit de reactor zijn ontladen.

Na een opslagperiode waarbij de radioactiviteit en de restwarmte afnemen, kan de bestraalde splijtstof worden opgewerkt om er nieuwe splijtbare materialen aan te onttrekken of beschouwd worden als afval en worden geconditioneerd om definitief geborgen te worden. In dat laatste geval spreken we van verbruikte splijtstof (zie onder).

Biosfeer

Het gedeelte van de aarde waar leven mogelijk is, met inbegrip van de atmosfeer. De biosfeer omvat alle zones die normaal toegankelijk zijn voor de mens, met inbegrip van de bodem, de atmosfeer, het drinkwater en het mariene milieu, maar met uitzondering van mijnactiviteiten.

BWR

Zie LWR.

Classificatie van het radioactieve afval in België

In België gebruikt men doorgaans drie heel algemene categorieën om geconditioneerd radioactief afval in te delen:

- categorie A: laag- of middelactief afval met korte halveringstijd;
- categorie B: laag- of middelactief afval dat aanzienlijke hoeveelheden isotopen met lange halveringstijd bevat;

- categorie C: hoog- of zeer hoogactief afval, dat aanzienlijke hoeveelheden isotopen met lange halveringstijd bevat en veel warmte afgeeft.

Conditioneren

Radioactief afval klaarmaken voor opslag en berging.

Bij rechtstreekse berging van de verbruikte splijtstof wordt in België de bestraalde splijtstof geconditioneerd in een 'fles' met duidelijk beschreven eigenschappen, die vervolgens wordt opgevuld met een inert materiaal.

Bij opwerking onderscheiden we naargelang het ultieme afval:

- splijtingsproducten: worden verwerkt in borosilicaatglas, dat op zijn beurt in een vat wordt gegoten. Dat geheel noemen we ook wel een 'standaardcollo';
- hulzen en eindstukken (metalen stukken splijtstofhuls die versneden worden): ze worden samengeperst, de schijven die zo ontstaan worden ondergebracht in een 'standaardcollo';
- slib en effluenten (procesafval): voor de opwerkingscontracten die in het verleden gesloten zijn, wordt dat afval teruggestuurd naar België in de vorm van middelactief verglaasd afval verpakt in standaardcolli.

Fles

Ondoordringbaar metalen omhulsel in roestvrij staal, ontworpen om een bestraald splijtstofelement in te verpakken en het rechtstreeks in een geologische bergingsinstallatie onder te brengen. De fles heeft de vorm van een parallellepipedum met platte bodem en is aangepast aan de afmetingen van de elementen.

Halveringstijd van een radio-element

De halveringstijd van een radioactief isotoop is de tijd dat het duurt voor het aantal radionucliden in het monster met de helft is afgenomen.

IAEA

Engelse afkorting die staat voor International Atomic Energy Agency.

In het Nederlands: Internationaal Agentschap voor Atoomenergie.

ICRP - International Commission on Radiological Protection.

De ICRP is een onafhankelijke internationale organisatie die aanbevelingen doet en normen bepaalt om mens en milieu te beschermen tegen de risico's van ioniserende straling.

Kernsplijting

Een fysisch verschijnsel waarbij een zware kern (zoals uranium of plutonium) in meerdere kernen uiteenvalt (de splijtingsproducten). Kernsplijting kan spontaan gebeuren of veroorzaakt worden door een neutron en gaat doorgaans gepaard met de afgifte van meerdere neutronen en van een grote hoeveelheid warmte. Wanneer die neutronen nieuwe splijtingen veroorzaken, dan ontstaat er een kettingreactie.

Die kettingreactie wordt benut in kernreactoren, waar de afgegeven warmte gerecupereerd wordt via de koelcircuits om omgezet te worden in elektriciteit.

Kritisch individu

Een individu dat in het huis woont dat het sterkst wordt blootgesteld aan een stralingsbron en dat het meest 'risicovolle' gedrag vertoont, in het bijzonder op het vlak van voeding ten aanzien van die stralingsbron.

Kweekreactor

Kweekreactoren zijn nucleaire reactoren die meer splijtstof produceren dan ze verbruiken; de energie wordt geleverd door splijting van plutoniumatomen, en de kernen met uranium-238 worden omgezet in plutoniumatomen, waardoor de hoeveelheid splijtstof in de reactorkern gelijk blijft of zelfs toeneemt.

Lagere actiniden

Alle actiniden met uitzondering van uranium en plutonium, de hogere actiniden. De lagere actiniden vertegenwoordigen een fractie van het langlevend afval. Neptunium, americium en curium zijn lagere actiniden.

LWR

'Light Water Reactor' - lichtwaterreactor. Een reactor die afgekoeld wordt met licht water (en niet met zwaar water, zie 'Zwaar water'). Op basis van de eigenschappen eigen aan de koelvloeistof, meer bepaald water, moet UOX-splijtstof slechts licht verrijkt worden met uranium-235 (4-5 %). LWR-reactoren zijn van het PWR-type ('Pressurized Water-cooled reactor' of drukwaterreactor) of van het BWR-type ('Boiling Water-cooled reactor' of kokendwaterreactor). Deze reactoren worden doorgaans geladen met UOX-splijtstof en kunnen ook draaien op MOX- en REU-kernbrandstof.

Materiaal met energiepotentieel

Verwijst naar materialen die gebruikt kunnen worden om energie te produceren. In het kader van deze studie gaat het hoofdzakelijk om uranium (verarmd, natuurlijk of verrijkt) en plutonium.

NIRAS

Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijtstoffen

OESO

Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling. Krachtens het verdrag dat op 14 december werd ondertekend in Parijs en in werking trad op 30 september 1961, heeft de OESO de taak om beleidsmaatregelen te promoten die bevorderlijk zijn voor de economie, de werkgelegenheid en de levensstandaard in de lidstaten, zonder dat hun financiële stabiliteit in gevaar komt, en om op die manier bij te dragen tot de ontwikkeling van de wereldeconomie.

Omzetting

Ook wel conversie. Het procedé waarbij uraniumoxide wordt omgezet in een chemische vorm die bruikbaar is in het verrijkingsprocedé, in deze context uraniumhexafluoride (UF6).

Opslag

Het onderbrengen en bewaren van radioactief afval en bestraalde of verbruikte splijtstof in een gebouw dat speciaal daarvoor is voorzien en gedurende een bepaalde tijdsspanne.

Opwerking

Procedé waarbij splijt- en kweekstoffen herwonnen worden uit bestraalde kernbrandstof met als doel om ze later te hergebruiken.

Overpack

Volgens het conditioneringsconcept voor bestraalde splijtstof dat België overweegt, is een overpack een omhulsel in staal of carbon dat gemaakt is om een of vier flessen met verbruikte splijtstofelementen in te bewaren. Dat omhulsel wordt op zijn beurt in een 'supercontainer' geplaatst.

PAMELA

"Pilot-Anlage Mol Zur Erzeugung Lagerfähiger Abfälle". Pilootinstallatie in Dessel (België) voor de verglazing van radioactief afval.

Plutonium

Chemisch element met atoomnummer 94. Een zwaar metaal. De voornaamste isotopen van plutonium zijn Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241 en Pu-242. Enkel de oneven isotopen, voornamelijk Pu-239 en Pu-241, zijn splijtbaar in LWR-reactoren. Het plutonium dat gerecupereerd wordt bij de opwerking kan worden hergebruikt, hetzij in snellekweekreactoren, hetzij in LWR-reactoren in de vorm van MOX-brandstof.

PWR

Zie LWR.

Radioactief afval

Alle radioactieve stoffen, ongeacht hun fysieke vorm en oorsprong, waarvoor geen enkel gebruik is gepland of voorzien, niet nu en niet in de toekomst, en die een of meerdere radionucliden bevatten en/of besmet zijn door een of meerdere radionucliden waarvan de activiteit of de concentratie hoger ligt dan de drempel die is vastgelegd door de veiligheidsoverheid en door de bevoegde regelgevende autoriteit, en waaronder een stralingsbron vrijgesteld of ontheven kan worden van de wettelijke controles op stralingsbescherming door de bevoegde regelgevende autoriteit.

Radioactieve stof

Elke stof die een of meerdere radioactieve elementen bevat waarvan de activiteit of de concentratie niet mag worden genegeerd om redenen van stralingsbescherming, en die overblijft na productie, industrialisering, commercieel gebruik, onderzoek of een andere activiteit en nog op haar bestemming wacht, met uitzondering van bestraalde splijtstof, uraniumcake en de overblijvende categorie met splijtingsproducten en splijtstoffen.

Radiotoxiciteit

Het vermogen van een ingenomen stof om schadelijke gevolgen te hebben voor een organisme omwille van de radioactiviteit die ze bevat.

Recyclage

Hergebruik van uranium en/of plutonium dat herwonnen wordt bij de opwerking van bestraalde splijtstof. Uranium moet herverrijkt worden om splijtstof te produceren die hergebruikt kan worden in LWR's. Het gaat hier om herverrijkt opgewerkt uranium (REU of gerecycleerd uranium). Plutonium op zijn beurt wordt meestal vermengd met 'verarmd' uranium (uranium met een laag gehalte aan U235 afkomstig uit de verrijkingsfabriek) om zo MOX-splijtstof te produceren.

Residu

Geconditioneerd afval uit de opwerking van bestraalde splijtstof.

Scheiding

Procedé met als doel om splijt- en kweekstoffen, splijtingsproducten en lagere actiniden te scheiden van bestraalde kernbrandstof.

SCK•CEN

Studiecentrum voor Kernenergie (te Mol).

Splijtbaar (materiaal)

De eigenschap van bepaalde isotopen om gespleten te worden in wisselwerking met 'trage' neutronen in kernreactoren. De oneven isotopen van uranium (U233, U235) en plutonium (Pu 239, Pu 241) bijvoorbeeld zijn splijtbaar.

Splijtstofcyclus

De verschillende stappen (winning, verwerking, omzetting, verrijking, productie, transport, reactorfase, opslag enz.) die een splijtstof doormaakt voor het uiteindelijk definitief geologisch geborgen wordt. We spreken van een gesloten cyclus wanneer herbruikbare kerntechnische materialen worden opgewerkt en gerecycleerd en van een open cyclus wanneer de bestraalde splijtstof beschouwd wordt als afval en afgevoerd wordt na conditionering.

Supercontainer

Gemaakt van beton en bedoeld om 'overpacks' in te bewaren. Een supercontainer schermt gamma- en neutronstraling af en beschermt de flessen met bestraalde splijtstoffen tegen chemische aantasting door de grondlaag. Een laag roestvrij staal dekt het geheel af.

Splijtingsproducten

De elementen die ontstaan bij de splijting van splijtbare materialen met neutronen en door het radioactieve verval van die elementen. De volgende isotopen zijn bijvoorbeeld splijtingsproducten: cesium-134 en -137, jodium-129 en -131 en krypton-85.

Synatom

De Belgische kenprovisievennootschap, verantwoordelijk voor het beheer van de splijtstofcyclus in België.

UF_6

Uraniumhexafluoride. Vorm van uranium voor de verrijking met U-235.

Uranium

Natuurlijk element met atoomnummer 92. Het bevat drie natuurlijke isotopen: 99,28 % uranium-238, 0,71 % uranium-235 en 0,01 % uranium 234.

Verbrandingsgraad

De hoeveelheid thermische energie die een massa-eenheid splijtstof produceert gedurende haar verblijf in een reactor. De verbrandingsgraad wordt uitgedrukt in megawatt-dag per ton. Met de huidige stand van de technologie halen de brandstoffen verbrandingsgraden van 50.000 tot 55.000 megawatt-dag per ton en zelfs meer. Anders gezegd, een ton kernbrandstof heeft een thermisch vermogen gelijk aan 55.000.000 x 24 kilowattuur. Gelet op het feit dat een kerncentrale een rendement heeft van ongeveer 34 %, is dat ton goed voor een elektriciteitsproductie van 55.000.000 x 24 x 0,34 Kwh = 450 miljoen kWh elektriciteit.

Verbruikte splijtstof

Bestraalde splijtstof waarvoor geen enkel ander gebruik is voorzien en die door de producent geconditioneerd wordt in een vorm goedgekeurd door NIRAS; geconditioneerde verbruikte splijtstof wordt gelijkgesteld aan radioactief afval.

Verrijking

Procedé waarbij de concentratie aan splijtbare uraniumisotopen (U235) wordt verhoogd. De industriële verrijkingsprocedés die op dit moment beschikbaar zijn, zijn gasdiffusie en ultracentrifugatie.

Het gehalte aan uranium-235 in natuurlijk uranium bedraagt doorgaans 0,71 %, dat van uranium herwonnen bij de opwerking ligt tussen de 0,80 en de 0,90 %. De concentratie aan splijtbaar uranium die nodig is om ongebruikte splijtstof in een elektronucleaire reactor te kunnen gebruiken, moet ergens tussen 4 en 5 % liggen.

Zwaar water

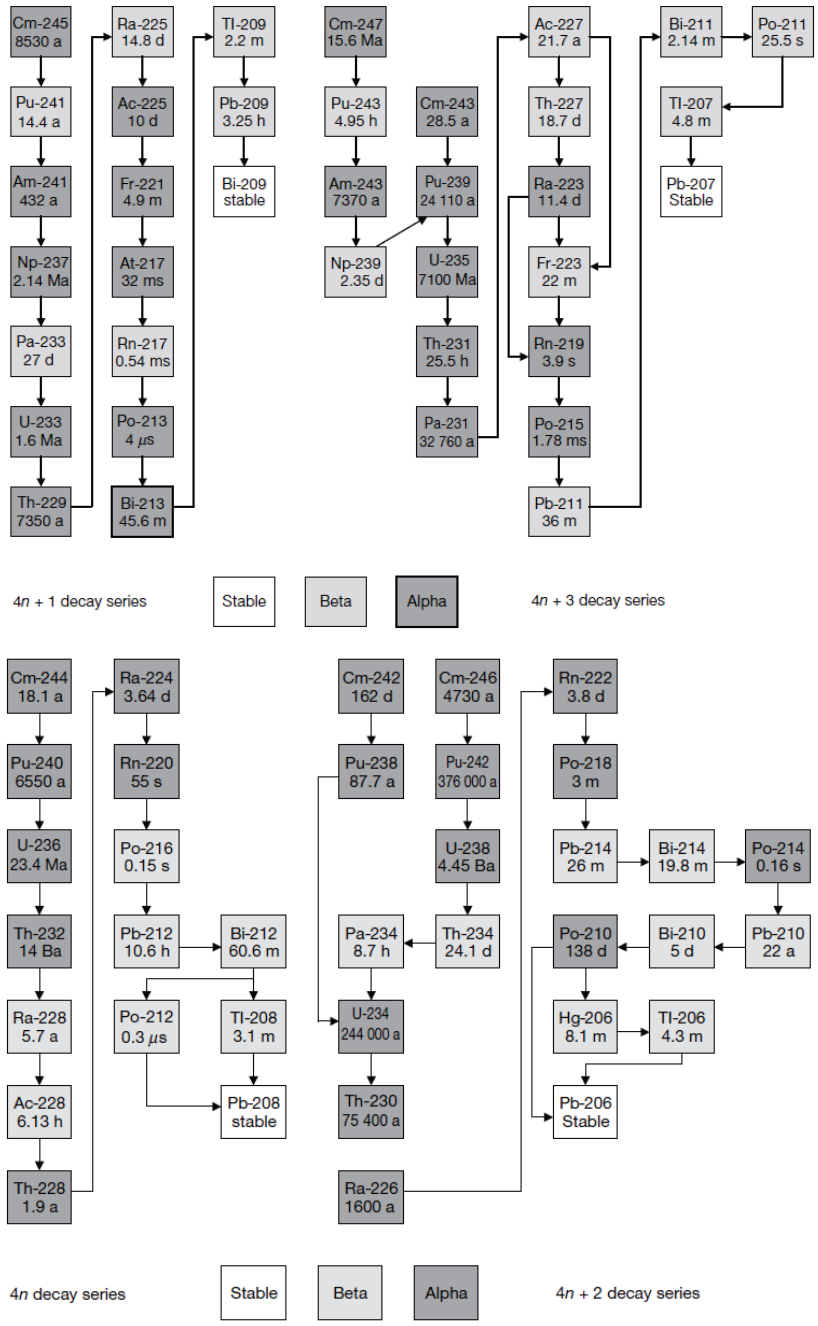
Water (H_2O) waarin de waterstofatomen vervangen zijn door deuterium (een isotoop van waterstof dat een extra neutron bevat). De scheikundige formule is in dat geval D_2O.

Zwaar water wordt in bepaalde kernreactoren gebruikt als neutronenmoderator, met als doel om de neutronen die voortkomen uit kernsplijting te vertragen. Die vertraagde neutronen bezitten een hoger potentieel om nieuwe splitsingen van uraniumkernen te veroorzaken en op die manier een kettingreactie mogelijk te maken.

Bijlage B. Vervalreeksen

De 4 radioactieve vervalreeksen worden hieronder geïllustreerd; de kleur van de vakjes toont de vervalmethode (alfa in donkergrijs, bèta in lichtgrijs) dan wel of het element stabiel is (in wit).

Figuur 21. Vervalreeksen '4n+1' (linksboven), '4n+3' (rechtsboven), '4n' (linksonder) en '4n+2' (rechtsonder).



Bron: IAEA [71].

Bijlage C. Massasamenstelling van verse en verbruikte UOX-, MOX- en REU-splijtstof

Tabel 8. Niet-limitatieve massasamenstelling van verse en verbruikte splijtstof

Radio-isotoop	Halve-ringstijd (jaren)	massapercen-tage UOX		massapercentage MOX		massapercentage REU	
		Vers	Ontla-den	Vers	Ontla-den	Vers	Ontla-den
Uranium							
U234	$2,47 \times 10^5$	0	0,02	0	0,01	0,11	0,06
U235	$7,08 \times 10^8$	4,2	0,97	0,24	0,12	4,26	0,98
U236	$2,34 \times 10^7$	0	0,55	0	0,03	1,47	1,80
U238	$4,47 \times 10^9$	95,8	92,55	92,52	89,67	94,16	91,12
TOTAAL		100	94,09	92,76	89,83	100	93,96
Plutonium							
Pu238	87,7	0	0,03	0,12	0,15	0	0,08
Pu239	24.119	0	0,63	4,26	2,02	0	0,61
Pu240	6.569	0	0,26	1,8	1,69	0	0,26
Pu241	14,4	0	0,15	0,57	0,78	0	0,14
Pu242	$3,7 \times 10^5$	0	0,07	0,4	0,45	0	0,06
TOTAAL		0	1,14	7,15	5,09	0	1,15
Lagere actiniden							
Np237	$2,14 \times 10^6$	0	0,07	0	0,02	0	0,19
Am241	432,2	0	0,03	0,11	0,2	0	0,03
Am243	7.380	0	0,02	0	0,2	0	0,02
Cm244	18,1	0	0,01	0	0,08	0	0,01
Cm245	8.500	0	<0,00	0	0,01	0	< 0,00
TOTAAL		0	0,13	0,11	0,51	0	0,25
Splijtingsproducten							
Sr90	28	0	0,07	0	0,03	0	0,07
Zr93	$1,5 \times 10^6$	0	0,1	0	0,07	0	0,1
Tc99	$2,1 \times 10^5$	0	0,1	0	0,1	0	0,1
Pd107	$6,5 \times 10^6$	0	0,03	0	0,07	0	0,03
I129	$1,57 \times 10^7$	0	0,02	0	0,03	0	0,02
Cs134	2,05	0	0,01	0	0,01	0	0,01
Cs135	2×10^6	0	0,05	0	0,05	0	0,05
Cs137	30	0	0,15	0	0,15	0	0,15
Pm147	2,62	0	0,01	0	0,01	0	0,01
Andere splijtings-producten	N.v.t.	0	4,1	0	4,05	0	4,1
TOTAAL		0	4,64	0	4,57	0	4,64

Bron: Synatom [21].

De waarden in de tabel werden berekend voor splijtstof met de volgende eigenschappen:

- UOX-splijtstof initieel verrijkt met 4,2 % U-235, bestraald in een PWR-reactor met een verbrandingsgraad (zie glossarium) van 45.000 MWd/t en 3 jaar afgekoeld na ontlading uit de reactor;
- MOX-splijtstof met een initieel gehalte aan splijtbaar plutonium van 4,8 %, bestraald in een PWR-reactor met een verbrandingsgraad (zie glossarium) van 45.000 MWd/t en 3 jaar afgekoeld na ontlading uit de reactor;
- REU-splijtstof geladen in de reactoren van Doel 1 en 2, initieel verrijkt met 4,25 % U-235 PWR-reactor met een verbrandingsgraad (zie glossarium) van 45.000 MWd/t en 3 jaar afgekoeld na ontlading uit de reactor;

"De voorwaarden scheppen voor een competitieve, duurzame en evenwichtige werking van de goederen- en dienstenmarkt in België."

Bijlage D. Strategieën in de andere landen

Het beleid dat de andere landen hanteren om hun splijtstofcyclus te beheren, varieert aanzienlijk naargelang de omstandigheden die eigen zijn aan elk kernenergieland. Dit deel zet kort de strategieën uiteen die de voornaamste kernenergielanden volgen.

De onderstaande tabel[62] toont een overzicht van de situatie[63] voor andere kernenergielanden. Dit overzicht is niet limitatief en hoofdzakelijk toegespitst op twee aspecten: of bestraalde splijtstoffen opgewerkt worden of niet in het land in kwestie en wat de eindbestemming is van kernafval dat niet hergebruikt kan worden.

D.1 Europa

D.1.1. Duitsland

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Tot 1994 koos Duitsland voor de opwerking van verbruikte splijtstof. Na 1994 kregen de operatoren van kerncentrales de keuze tussen opwerking of directe berging van hun bestraalde splijtstof. Sinds 1 juli 2005 is opwerking volledig verboden. Zo is de directe berging van bestraalde kernbrandstof nu de enige optie voor de Duitse splijtstofcyclus.

De splijtstof wordt bewaard op de sites van Gorleben en Ahaus, in afwachting van de aanleg van een berging. Het gaat om twee gecentraliseerde installaties voor droge opslag. Duitsland is een land in "phase-out" dat tegen 2020 de generatie elektriciteit door kernsplijting achter zich zou moeten laten. De opslagcapaciteit volstaat om het hoofd te bieden aan de voorziene hoeveelheid bestraalde splijtstof en afval afkomstig van de opwerking.

Op 27 juli 2013 trad een wet in werking voor het onderzoek naar en de selectie van een installatie voor de opslag van radioactief afval dat warmte afgeeft. Bijgevolg werd in 2014 een commissie voor de opslag van hoogradioactief afval opgericht. Die commissie heeft eind 2016 haar verslag voorgesteld waarin als volgt werd geconcludeerd[64]: "De commissie beschouwt de veilige opslag van hoogradioactief afval niet als een louter technische opdracht. De best mogelijke berging moet ook rekening houden met de sociale en culturele dimensie van een dergelijke uitdaging zodat de criteria en de voorstellen een breed draagvlak krijgen in de maatschappij en dat zij duurzaam zijn conform het aansprakelijkheidsprincipe. De wetenschappelijk onderbouwde procedure voor de selectie van de site die door de commissie wordt aanbevolen, houdt derhalve rekening met twee elementen die nodig zijn zowel voor een consensus binnen de maatschappij als voor de best mogelijke berging: de kwaliteit van de technische en wetenschappelijke criteria en de maatschappelijke modernisering. Beiden moeten binnen dezelfde context in aanmerking worden genomen.

---

[62] Bronnen: ENS http://www.euronuclear.org, WNA http://www.world-nuclear.org/info, AIEA http://www-pub.iaea.org, DOE http://www.energy.gov/news/8698.htm.

[63] Het kan zijn dat de onderstaande gegevens de meest recente ontwikkelingen niet weergeven, ondanks onze inspanningen om de informatie up-to-date te houden.

[64] Dit is een vertaling van de conclusies van de uitvoerende samenvatting (in het Engels: http://www.nuclear-transparency-watch.eu/wp-content/uploads/2017/02/Summary_Report-of-the-German-Commission-on-the-Storage-of-High-Level-Radioactive-Waste_EN.pdf.

Tabel 9. Overzicht van de situatie op 15 september 2012 inzake beheer van bestraalde splijtstoffen en de bijhorende wettelijke basis in de verschillende OESO-landen met een of meerdere kerncentrales

Land	Wordt de commercieel gebruikte bestraalde splijtstof opgewerkt?	Gebeurt de keuze voor (niet-) opwerking op basis van de nationale wetgeving?	Bestaat er een overheidsbeleid voor het langetermijnbeheer van bestraalde splijtstof of van het afval dat ontstaat bij de opwerking ervan?	Wat is, in voorkomend geval, de gekozen eindbestemming (indien van toepassing, het gastgesteente)?
Duitsland	Neen	Ja	Ja	Geologische berging (klei, graniet of zout)
België	Neen	Ja	Neen	n.v.t.
Canada	Neen	Neen	Ja	Geologische berging
Zuid-Korea	Neen	Neen	Ja	Geologische berging (graniet)
Spanje	Neen	Ja	Neen: 100 jaar opslag	n.v.t.
Verenigde Staten	Neen	Neen	Neen. Aanbeveling ten gunste van geologische berging	n.v.t.
Finland	Neen	Ja	Ja	Geologische berging (graniet)
Frankrijk	Ja	Ja	Ja	Geologische berging (klei)
Japan	Ja	Ja	Ja	Geologische berging (klei of graniet)
Nederland	Ja	Neen	Ja	Geologische berging (klei of zout)
Verenigd Koninkrijk	Ja	Neen	Ja	Geologische berging
Zweden	Neen	Ja	Ja	Geologische berging (graniet)

D.1.2. Spanje

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Spanje kiest sinds 1983 voor de open splijtstofcyclus, zonder opwerking. Het merendeel van de bestraalde splijtstoffen ligt op dit moment opgeslagen in de koelbekkens van de kerncentrales. De stroomlijning van de opslag en de aanleg van extra capaciteit voor droge opslag en van een centrale opslaginstallatie moeten Spanje in staat stellen om zijn bestraalde splijt-

stoffen op te slaan gedurende de tijd die nog is om zijn programma voor het definitieve beheer van splijtstoffen en van hoogactief afval met succes te voltooien.

De Spanjaarden onderzoeken sinds 1985 of geologische berging in diepe bodemlagen (zout, klei, graniet) mogelijk is. De toekomstige vorderingen hangen nu af van de definitieve keuze van een site uit de geselecteerde locaties [75].

D.1.3. Finland

Finland beschikt over 4 nucleaire eenheden; in 2018 zou een bijkomende eenheid (EPR van 1600 MWe) in gebruik moeten worden genomen. In hetzelfde jaar zal de regering zich moeten uitspreken over de eventuele bouw van nog een eenheid.

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Finland werkt zijn bestraalde splijtstoffen niet op. Het heeft de bestraalde splijtstof van de centrale van Loviisa (uitgebaat door FORTUM) tot 1994 teruggestuurd naar zijn Russische leveranciers. Sindsdien weigert Rusland om de bestraalde splijtstof terug te nemen en zag de centrale zich genoodzaakt om ze op te slaan. Daardoor was er extra opslagcapaciteit nodig, die in 2000 in gebruik werd genomen.

In de andere centrale, die van Olkiluoto (uitgebaat door TVO), gebruikt men sinds 1987 een opslagbekken voor de bestraalde splijtstof. De installatie is zodanig ontworpen dat ze gedurende 50 jaar kernbrandstof kan bewaren in afwachting van de definitieve berging in diepe geologische lagen. Een uitbreiding van de installatie is in 2014 in gebruik genomen.

Sinds 1985 werkt Finland aan een eigen concept voor berging in diepe geologische lagen. Daartoe hebben de exploitanten van de kerncentrales in 1995 een vereniging opgericht om het project in goede banen te leiden. In 1999 besliste men om de bergingsinstallatie aan te leggen op de site van Olkiluoto, op 500 meter diepte in een stollingsgesteente van 2 miljard jaar oud. Het voorstel werd eind 2000 goedgekeurd door de Finse regering en in mei 2001 bekrachtigd door het Parlement. In november 2015 heeft de Finse regering aan Posiva de bouwvergunning voor de bergingsinstallatie afgeleverd.

De volgende stappen zijn het verkrijgen van een vergunning om de activiteiten op de site in 2020 en de activiteiten in de bergingsinstallatie in 2023 op te starten.

D.1.4. Frankrijk

Frankrijk is een land waarvan de elektriciteitsbevoorrading grotendeels gebaseerd is op kernenergie. Sinds 2011 zijn op het Franse grondgebied 58 kernreactoren operationeel. Op de site van Flammanville is een reactor in aanbouw maar de ingebruikstelling ervan – die gepland is voor 2018 – zou vertraging kunnen oplopen wegens een anomalie in de samenstelling van het staal in sommige zones van het deksel en van de bodem van het reactorvat[65].

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Frankrijk kiest, sinds de start van zijn kernprogramma, voor opwerking als referentiebeleid.

[65] https://www.asn.fr/Informer/Actualites/EPR-de-Flamanville-anomalies-de-fabrication-de-la-cuve.

In de wet van 28 juni 2006 betreffende het duurzame beheer van radioactieve materialen en afval is een roadmap uitgestippeld voor het beheer van al het radioactieve afval, die in het bijzonder eist dat er een nationaal plan voor het beheer van radioactief materiaal en afval (PNGMDR - Plan National de Gestion des Matières et des Déchets Radioactifs) komt, dat om de drie jaar wordt bijgewerkt. Het huidige plan bevestigt dat de berging in diepe geologische lagen de beste keuze is voor het langetermijnbeheer van hoogactief afval, op voorwaarde dat het afval gedurende minstens 100 jaar toegankelijk blijft.

ANDRA, het Franse agentschap belast met beheer van het radioactieve afval, kreeg in 1999 de toelating om een ondergronds onderzoekslab te bouwen in een kleiformatie in Bure, in de Maas, om zich voor te bereiden op de berging van hoogactief verglaasd afval en van langlevend middelactief afval. ANDRA hoopt ten laatste eind 2014 een vergunningsaanvraag te kunnen indienen voor de bouw en de exploitatie van een centrum voor geologische berging in Bure ('Cigéo' genaamd), met als doel om het tegen 2025 in gebruik te nemen. De neerlegging van de aanvraag voor de vergunning werd uitgesteld naar 2018 maar de ingebruikstelling van de berging is nog steeds gepland voor 2025.

D.1.5. Nederland

Nederland beschikt over een vrij beperkt nucleair programma aangezien het land slechts één enkele kerncentrale heeft te Borssele. Die reactor is in gebruik genomen in 1973 en het is de bedoeling dat hij operationeel blijft tot 2033.

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Ook in Nederland geldt opwerking als het referentiebeleid voor het beheer van bestraalde splijtstof. De bestraalde splijtstof van de reactor van Dodewaard (55 MWe - uit dienst genomen in 1997) werd opgewerkt in Sellafield, die van de reactor in Borssele in La Hague.

Sinds 1984 bestaat het referentiebeleid van de Nederlandse regering voor het beheer van radioactief afval erin om al dat afval op één centrale locatie op te slaan, meer bepaalde de COVRA-site te Borssele, en dat gedurende een periode van 50 tot 100 jaar. In 2003 werd er op die COVRA-site een speciaal gebouw (HABOG, te vergelijken met gebouw 136 van Belgoprocess) in gebruik genomen voor de opslag van opwerkingsafval.

Die opslag op lange termijn maakt het mogelijk om een beslissing over de definitieve strategie uit te stellen en zo het onderzoek over de berging voort te zetten, in het kader van een internationale samenwerking. Het onderzoeksprogramma OPERA[66] dat in 2016 ten einde liep, heeft bevestigd dat er een installatie voor geologische berging kan worden gebouwd in de zout- of kleilagen in de Nederlandse ondergrond [76]

D.1.6. Verenigd Koninkrijk

Ongeveer een vijfde van de elektriciteit van het Verenigd Koninkrijk wordt geproduceerd uit kernenergie die wordt opgewekt in 15 kernreactoren verspreid over 9 sites. Volgens de planning zou ongeveer de helft van de geïnstalleerde capaciteit gesloten worden tegen 2025. De regering heeft maatregelen genomen om nieuwe kernreactoren in gebruik te nemen om bij-

[66] OPERA = OnderzoeksProgramma Eindberging Radioactief Afval

komend nog 16 GWe voor het land aan te leveren. Het Verenigd Koninkrijk beschikt over eenheden die betrekking hebben op de volledige spijtstofcyclus [77].

Ingevolge het referendum van 2016 over de uitstap van het land uit de Europese Unie, zal het land zijn terugtrekking uit het Euratomverdrag moeten aankondigen. Dit zal onvermijdelijk grote gevolgen hebben voor de nucleaire industrie van het land.

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

De Britten hebben gekozen voor de opwerking van alle bestraalde splijtstof (waarvoor de exploitanten wettelijk aansprakelijk zijn). Nadat de bestraalde elementen zijn afgekoeld, worden ze overgebracht naar de opwerkingsfabriek van Sellafield. Daar worden ze opgeslagen in een bekken. Die fabriek heeft zijn opwerkingsactiviteiten intussen gestaakt.

De SMP-fabriek produceerde sinds 2005 MOX-brandstof voor het buitenland, weliswaar in heel kleine hoeveelheden. In 2010 bereikten de Nuclear Decommissioning Authority (NDA) en tien Japanse elektriciteitsproducenten een akkoord over een plan om de SMP-fabriek op drie jaar tijd volledig te vernieuwen, met de hulp van Areva. De NDA besliste echter om voor het einde van 2011 een einde te maken aan de activiteiten van de fabriek.

Het verglaasde afval afkomstig uit de opwerking wordt gedurende minstens 50 jaar opgeslagen in Sellafield, zodat het kan afkoelen. Nadat in 1997 de vergunning voor de bouw van een ondergronds lab geweigerd werd, startte de Britse regering in 2001 een consultatieronde om te onderzoeken wat de beste piste was. Daaruit bleek in juli 2006 dat van de beschikbare beheerscenario's geologische berging op lange termijn de beste keuze was.

D.1.7. Zweden

Zweden beschikt over 10 kernreactoren op 2 verschillende sites die iets meer dan een derde van de elektriciteit van het land aanleveren. De kernuitstap van het land was beslist vanaf 1980 maar dat moratorium werd in 2010 opgeheven. De beslissing van 2010 maakt zelfs de vervanging mogelijk van de huidige reactoren door meer moderne wanneer er een einde komt aan hun levensduur.

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Zweden beschikt niet over een programma voor de opwerking van zijn verbruikte splijtstof. In het verleden werd er al 140 ton overgebracht naar Sellafield, evenwel zonder dat het restafval werd teruggestuurd naar Zweden. In dezelfde lijn sloot Zweden een contract met Areva voor de opwerking van 551 ton, maar de contractuele hoeveelheden werden in 1987 overgeheveld naar de contracten afgesloten tussen Areva en de Duitse elektriciteitsproducenten.

Sindsdien wordt de bestraalde splijtstof opgeslagen op de CLAB-site, in de buurt van de centrale van Oskarshamn. De bestraalde splijtstof wordt er bewaard in een waterbekken, in ondergrondse grotten die zijn uitgegraven in het graniet, en dat gedurende 40-50 jaar. De CLAB-site is in gebruik sinds 1985. De oorspronkelijke opslagcapaciteit van 5000 ton werd reeds uitgebreid naar 8000 ton, om er alle bestraalde splijtstof uit het Zweedse kernprogramma te kunnen onderbrengen. Medio 2009 lag er al ongeveer 5000 ton gebruikte kernbrandstof opgeslagen.

De referentiestrategie van SKB, het Zweedse bedrijf dat instaat voor het beheer van de verbruikte splijtstof, is directe berging: de bestraalde splijtstof wordt in koperen canisters geplaatst die overgebracht worden naar de bergingsinstallatie. Halverwege 2009 kondigde SKB aan dat de bergingsinstallatie in Östhammar zou komen, omdat van alle geselecteerde locaties de bodem daar het best bleek. SKB diende in 2010 een aanvraag voor vergunning in die nog steeds ter studie ligt.

D.1.8. Zwitserland

Zwitserland heeft besloten tot een kernuitstap naar aanleiding van het ongeval in Fukushima. Tussen 2020 en 2034 zou er een einde moeten komen aan de levensduur van zijn vijf reactoren [78].

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

In Zwitserland zijn de eigenaars en de operatoren van de centrales verantwoordelijk voor de brandstofcyclus. De door hen gekozen strategie omvat zowel de opwerking als de opslag van bestraalde splijtstof gevolgd door de berging of de opwerking ervan.

De maatschappij ZWILAG exploiteert een centrale opslaginstallatie in Würenlingen. Er bestaan ook opslaginstallaties op de sites van Beznau en Gösgen.

Voor de definitieve berging voorziet de wet het gebruik van geologische berging zowel voor het laag- en middelhoogactief afval (LMAA) als voor het hoogactief afval (HA). De haalbaarheidsstudies voor diepe berging voor het LMAA werden door de federale Raad (Zwitserse regering) in 1988 goedgekeurd en voor het HA afval in 2006. De bergingsinstallaties zullen gevestigd worden in daarvoor geschikte rotslagen op verschillende honderden meters diepte. Op dit moment is men volop op zoek naar een geschikte locatie. Overeenkomstig de vastgestelde procedure heeft Nagra (de Zwitserse afvalbeheerder) in 2008 verscheidene sites voorgesteld voor geologische berging. In 2015 heeft Nagra een vergelijkende studie gemaakt van de gebieden voor geologische vestiging op grond van de veiligheid. Op basis van die resultaten heeft Nagra in januari 2015 zijn voorstellen voor de regio's neergelegd; die moeten grondig worden bestudeerd om de selectieprocedure voort te zetten.

D.2 De rest van de wereld

D.2.1. Canada

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

De Canadese vennootschap voor het beheer van kernafval (Nuclear Waste Management Organization - NWMO)) plant de bouw van een geologische bergingsinstallatie. Na een eerste prospectiefase tussen 2002 en 2005 concludeerde de NWMO dat ze de Canadese bodem niet definitief kon uitsluiten zonder bijkomend onderzoek. Daarop nodigde ze de gemeentes uit om aan te geven of ze geïnteresseerd zouden zijn in een geologische berging op hun grondgebied. Elke gemeente die positief reageert op de oproep, wordt gevraagd om een grondige studie te maken van haar ondergrond. Als daaruit blijkt dat er geen enkel obstakel bestaat voor een eventuele geologische berging, dan kan de volgende stap in de procedure worden aangevat.

Die omvat een aantal socio-economische en culturele studies voor de gemeente in kwestie, die opgenomen worden in het lopende project. De NWMO moet het grote publiek, de provinciale besturen, de Canadese regering, de nationale en provinciale organisaties van de autochtone bevolking en de veiligheidsautoriteit informeren over haar activiteiten. Ze moet ook het nodige materiaal voorbereiden om de revisieprocedure in goede banen te leiden en om een akkoord te sluiten met de gemeente in kwestie [79].

Bij aanvang van de procedure hadden 20 gemeenschappen hun belangstelling getoond. Vervolgens is SGDN begonnen met de fase voor de selectie van de site en tijdens een eerste voorafgaande evaluatie konden de regio's die het minst beantwoordden aan de vereisten van het project reeds worden geëlimineerd. Zo bleven er nog 9 gemeenschappen over. Sinds 2015 wordt de tweede evaluatiefase grondiger voortgezet. Die evaluatie heeft tot doel ervoor te zorgen dat de site niet alleen veilig is voor de bevolking en het milieu maar ook na te gaan welke impact het project zal hebben op de leefbaarheid en het welzijn van de gastgemeenschap. De voorkeurssite zou in 2023 geïdentificeerd worden. De betrokken gemeenschap zal beslissen of er al dan niet in het project wordt gestapt.

D.2.2. China

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

China kiest voor opwerking als referentiebeleid. Omdat het land op dit moment nog niet over een fabriek beschikt om bestraalde splijtstof op industriële schaal op te werken, wordt die voorlopig opgeslagen om later opgewerkt te worden.

In 2006 opende men in Lanzhou wel al een piloot-opwerkingsfabriek (50-100 t/jaar) die het PUREX-procedé gebruikt. Tegen 2025-2030 zou er een grote commerciële opwerkingsfabriek (800-1000 t/jaar) volgen. Het ontwerp, de bouw en de inbedrijfstelling zouden tien tot vijftien jaar in beslag nemen, te rekenen vanaf 2010. Daarnaast plant China ook de bouw van een MOX-productiefabriek.

Bergingsconcept

Het hoogactieve afval dat ontstaat bij de opwerking wordt verglaasd, ingekapseld en in een geologische berging geplaatst die zich op ongeveer 500 meter onder de grond bevindt. De zoektocht naar een geschikte site is bezig sinds 1986, op dit moment blijven er nog 3 mogelijke terreinen over in de provincie Gansu. Op alle drie de locaties zit er graniet in de bodem. Tegen 2020 zou men een site gekozen moeten hebben. Daar zou dan een ondergronds onderzoekslab gebouwd worden en gedurende 20 jaar geëxploiteerd. De berging van hoogactief afval zou uiteindelijk tegen 2050 aanvatten.

D.2.3. Zuid-Korea

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Een akkoord met de US stelt dat Zuid-Korea op dit moment geen verbruikte splijtstof mag laten opwerken, noch in eigen land, noch in het buitenland. Omdat het land zijn eigen opwerkingsactiviteit zou willen opzetten, tracht het op dit moment om dat akkoord te laten herzien. KHNP (Korea Hydro & Nuclear Power) is van mening dat overzeese opwerking te duur is. Dat

bevestigen recente cijfers gebaseerd op de contracten die Japan heeft gesloten met het Franse bedrijf Areva. Die hoge kostprijs is vooral te wijten aan de hoge transportkosten.

De bestraalde splijtstof wordt op dit moment opgeslagen op de terreinen van de kernreactoren. Het nationale beleid inzake de aanbouw van een tijdelijke bergingsinstallatie wordt uitgesteld tot later [80]. Voor de definitieve berging overweegt men om het afval in te graven in diepe geologische lagen.

D.2.4. Verenigde Staten

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

In 1977, na een beslissing van toenmalig president Jimmy Carter, werd de opwerking voor civiele doeleinden gestaakt. Sindsdien wordt bestraalde splijtstof beschouwd als hoogactief afval, dat de regering moet laten bergen in diepe geologische lagen. De keuze voor directe berging van bestraalde splijtstof wordt op dit moment evenwel in vraag gesteld.

Begin 2010 riep de Amerikaanse minister van Energie, op vraag van president Obama, de "Blue Ribbon Commission"[67] in het leven. Die commissie moet zich buigen over het beheer van de bestraalde Amerikaanse kernbrandstof en een nieuwe strategie uitwerken en aanbevelen. Onder de vleugels van het Department of Energy (het DOE, zeg maar het ministerie van Energie) heeft de commissie als opdracht gekregen om een uitvoerig onderzoek te doen naar de mogelijke strategieën om de benedenfase van de nucleaire cyclus te beheren, met inbegrip van alle mogelijke alternatieven voor opslag, transport, verwerking en berging van verbruikte kernbrandstof, van hoogactief afval en van de materialen gebruikt voor nucleaire activiteiten.

Naast de evaluatie van de technische aspecten verbonden aan de opwerking en de directe berging, werd aan de werkgroepen ook gevraagd om een set aanbevelingen te formuleren over de maatschappelijke aspecten, om de transparantie van de beslissingen en een zo groot mogelijke participatie te verzekeren, maar ook over de eventuele noodzaak om de huidige wetgeving bij te sturen of aan te vullen.

Het eindrapport[68] van de Blue Ribbon Commission werd gepubliceerd op 26 januari 2012. Het rapport bevat een aantal aanbevelingen, onder andere om een aparte organisatie op te zetten die belast wordt met het beheer van de benedenfase van de splijtstofcyclus, ondersteund door de Amerikaanse overheid. Die nieuwe organisatie zou onder andere een of meerdere afvoersites moeten ontwikkelen, maar ook de ontwikkeling van de gecentraliseerde opslag en van de transportcapaciteit moeten sturen. Ze zou een budget krijgen dat speciaal voor die doeleinden wordt aangelegd. De commissie beveelt overigens ook aan om zo snel mogelijk een oplossing te vinden voor het geschil tussen het DOE en de elektriciteitsproducenten met betrekking tot de acceptatie van de bestraalde splijtstof.

In augustus 2013 heeft het hof van beroep van de Verenigde Staten van het district Columbia een vonnis gewezen waarbij de NRC (National Research Council) verplicht werd zijn vergun-

[67] http://brc.gov.
[68] http://brc.gov/sites/default/files/documents/brc_finalreport_jan2012.pdf.

ningsaanvraag voor Yucca Mountain voort te zetten. Naar aanleiding daarvan heeft de NRC gewerkt aan de publicatie van een evaluatierapport over de veiligheid van die site.

In 2015 werd nieuwe wetgeving van kracht voor het beheer, de opslag en de berging van gebruikte splijtstoffen. Intussen bereiden privébedrijven de aanvraag voor met betrekking tot de aanbouw van centrale bergingsinstallaties voor gebruikte splijtstoffen. In april 2016 werd een vergunningsaanvraag ingediend voor een dergelijke installatie in Texas.

Bergingsconcept

Sinds 1999 hebben de US, als enige land ter wereld, een geologische berging in gebruik. Het gaat om de WIPP-installatie (Waste Isolation Pilot Plant), opgetrokken in een zoutlaag in de buurt van Carlsbad, in de staat New Mexico, en bestemd voor het Amerikaanse langlevend militair afval.

Naar aanleiding van de wet van 1982 betreffende het beheer van kernafval was het DOE wettelijk en contractueel verplicht om, vanaf 31 januari 1998, de verbruikte splijtstof van de nucleaire exploitanten te beheren. Daartoe moest het twee sites voor ondergrondse berging onderzoeken, bouwen en exploiteren. De wet werd in 1987 gewijzigd, waarbij Yucca Mountain, in de Nevada-woestijn, werd aangeduid als enige site voor de berging van 70.000 ton hoogactief afval.

Het project liep heel wat vertraging op: pas in juli 2002 keurde de Senaat de ontwikkeling van de site goed, zodat het DOE uiteindelijk in 2008 een vergunningsaanvraag kon indienen bij de Amerikaanse nucleaire autoriteit. De autoriteit kreeg 3 jaar om de aanvraag te onderzoeken. In 2009 besloot de regering Obama echter om af te zien van het project in Yucca Mountain, waarop de "Blue Ribbon Commission" de opdracht kreeg om een aantal alternatieven voor te stellen.

Intussen wordt de bestraalde splijtstof nog steeds opgeslagen op de terreinen van de kerncentrales. In verschillende centrales is de maximale capaciteit van de opslagbekkens bereikt en moeten er nieuwe installaties gebouwd worden die gebruikmaken van droge opslag in containers.

D.2.5. Japan

Strategie voor de benedenfase van de cyclus

Omdat Japan sterk afhangt van het buitenland voor zijn energievoorziening en bovendien weinig plaats over heeft, koos het land ervoor om zijn bestraalde splijtstof te laten opwerken. In die zin werden er al contracten gesloten met Frankrijk (fabriek van La Hague) en Groot-Brittannië (fabriek van Sellafield), in afwachting van de ingebruikname van een nationale opwerkingsfabriek op de site van Rokkasho-Mura.

Het hoogactieve afval dat voortkomt uit de opwerking in La Hague en Sellafield wordt gerepatrieerd naar Japan, waar het voorlopig wordt opgeslagen tot het definitief geborgen kan worden. Die opslag gebeurt in een installatie op de site van Rokkasho-Mura die daar speciaal voor werd ontwikkeld en sinds 1995 in gebruik is.

Eens ze uit de kern is ontladen, wordt de bestraalde splijtstof opgeslagen op de terreinen van de centrales zelf, in afwachting van opwerking. Sinds 1999 wordt de bestraalde splijtstof ook voorlopig opgeslagen op de site van Rokkasho-Mura tot de opwerkingsfabriek wordt opgestart. In 2010 kreeg Recyclable Fuel Storage Co - een joint venture van twee Japanse elektriciteitsproducenten - een vergunning om in Mutsu een installatie te bouwen waar bestraalde splijtstof 50 jaar kan opgeslagen worden alvorens ze te laten opwerken. Die installatie zou normaal gezien dit jaar in gebruik worden genomen.

In mei 2000 keurde het Japanse parlement een wet goed om hoogactief afval (uitsluitend gedefinieerd als verglaasd afval uit de opwerking van verbruikte splijtstoffen) in diepe geologische lagen te bergen. Op dit moment is men op zoek naar een geschikte site voor definitieve berging. Die zou tegen 2030 gekozen moeten zijn. Er is onderzoek bezig in sedimentair gesteente op 500 meter diepte en in stollingsgesteente op 1000 meter diepte.

Na de ramp in Fukushima besloot Japan om zijn beleid voor kernafvalbeheer te herzien in het kader van zijn volgende "Energy Plan", dat in 2015 verschenen is.

Bibliografie

[1] Synatom, http://www.synatom.be/ [geraadpleegd in 2017].

[2] Synatom, Jaarveralag 2015, http://synatom.be/uploads/files/rapports/Synatom_RA2015_NL_V5.pdf [geraadpleegd in 2017], Bruxelles, 2016.

[3] Electrabel, http://corporate.engie-electrabel.be/nl/100-jaar-ervaring/ [geraadpleegd in 2017].

[4] EDF Luminus, Duurzaamheidsrapport 2016, https://edfluminus.edf.com/sites/default/files/Lot%203/EDF%20LUMINUS/ENGAGEMENTS/RDD/rapport_luminus_2017_nl_interactif.pdf [geraadpleegd in 2017].

[5] FBFC, FBFC-Dessel, http://www.areva.com/FR/activites-996/fbfc-dessel-fabrication-d-assemblages-de-combustible-pour-rep.html [geraadpleegd in 2017].

[6] SCK•CEN = Studiecentrum voor Kernenergie, , https://www.sckcen.be/nl/About/Introduction [geraadpleegd in 2017].

[7] Belgonucléaire, https://nl.wikipedia.org/wiki/Belgonucleaire [geraadpleegd in 2017].

[8] NIRAS, Opdrachten, http://www.niras.be [geraadpleegd in 2017].

[9] Belgoprocess, http://www.belgoprocess.be/eng/AboutUs.htm [geraadpleegd in 2017].

[10] EURIDICE= European Underground Research Infrastructure for Disposal of nuclear waste In Clay Environment http://www.euridice.be/ [geraadpleegd in 2017].

[11] FANC, Samen beschermen, Brussel, http://fanc.fgov.be/nl, [geraadpleegd in 2017].

[12] Bel V, Bel V - filiaal van het FANC, http://www.belv.be/index.php/nl/ [geraadpleegd in 2017].

[13] MONA = Mols Overleg Nucleair Afval vzw, http://www.monavzw.be/ [geraadpleegd in 2017].

[14] STORA = Studie en Overleggroep Radioactief Afval in Dessel, http://www.stora.org/nl [geraadpleegd in 2017].

[15] Nucleair Forum, Wie zijn wij?, https://www.nucleairforum.be/over-ons [geraadpleegd in 2017].

[16] Greenpeace, Wat doet Greenpeace? http://www.greenpeace.org/belgium/nl [geraadpleegd in 2017].

[17] Belgian Nuclear Society, Kernenergie beter begrijpen, http://www.bnsorg.be/wp-content/uploads/2015/02/BNS_Kernenergie-beter-begrijpen.pdf [geraadpleegd in 2013], Brussel, 2012.

[18] NIRAS, Passief van het SCK•CEN, http://www.niras.be/content/passief-van-het-sck%E2%80%A2cen, [geraadpleegd in 2014].

[19] Commission Energie 2030, Final report, http://www.ce2030.be/finalrep_publ.htm [geraadpleegd in 2014].

[20] FOD Economie, het Nationaal Programma voor het beheer van verbruikte splijtstoffen en radioactief afval, 2015, http://economie.fgov.be/nl/ondernemingen/energie/nucleaire/nationaal_programma_beheer_verbruikte_splijtstof_radioactief_afval/comite/#.WdSmOmcUnzA [geraadpleegd in 2017].

[21] Synatom, brief van 31 augustus 2017.

[22] AREVA, Traiter pour recycler, http://www.Areva.com/FR/activites-3024/traitement-des-combustibles-nucleaires-uses-reduction-du-volume-de-dechets.html [geraadpleegd in 2017].

[23] NIRAS, Afvalplan, http://www.niras-afvalplan.be/nieuw/htm/getpage.php?i=44 [geraadpleegd in 2017].

[24] NIRAS,Strategic Environmental Assessment (SEA) over het afvalplan van NIRAS, 2010, http://www.niras-afvalplan.be/nieuw/downloads/pdf/5249-506-068-06%20SEA%20Afvalplan.pdf [geraadpleegd in 2017].

[25] Engie Electrabel NV,Kennisgeving Milieueffectrapport Spent Fuel Facility Kerncentrale Doel, https://mer.lne.be/merdatabank/uploads/merkennis4974.pdf [geraadpleegd in 2017].

[26] FANC, Stresstesten: publicatie nationaal verslag voor andere inrichtingen van klasse I, april 2013, http://www.fanc.fgov.be/nl/news/stress-tests-publication-du-rapport-national-de-l-afcn-pour-les-autres-etablissements-nucleaires-de-classe-i/605.aspx, [geraadpleegd in 2017].

[27] FANC, Belgian stress tests: National progress report for nuclear power plants, september 2011, http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/2800/2876.pdf, [geraadpleegd in 2017].

[28] IAEA, Spent fuel performance assessment and research, Wenen, 2003, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1343_web.pdf [geraadpleegd in 2017].

[29] Wet van 08 augustus 1980,Budgettaire voorstellen 1979-1980, http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=nl&la=N&cn=1980080801&table_name=wet [geraadpleegd in 2017].

[30] Koninklijk besluit van 30 maart 1981 houdende bepaling van de opdrachten en de werkingsmodaliteiten van de openbare instelling voor het beheer van radioactief afval en splijtstoffen, http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=nl&la=N&cn=1981033001&table_name=wet [geraadpleegd in 2017].

[31] Kamer van Volksvertegenwoordigers, Resolutie 541/9-91/92 betreffende het gebruik van plutonium- en uraniumhoudende brandstoffen in Belgische kerncentrales en de opportuniteit van de opwerking van nucleaire brandstofstaven, 1993, http://www.dekamer.be/digidoc/DPS/K2335/K23350812/K23350812.pdf, [geraadpleegd in 2017].

[32] Wet van 31 januari 2003 houdende de geleidelijke uitstap uit kernenergie voor industriële elektriciteitsproductie, http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=nl&la=N&cn=2003013138&table_name=wet, [geraadpleegd in 2017].

[33] PressCenter, Financiële ondersteuning voor MYRRHA-project, 05 maart 2010, http://www.presscenter.be/nl/pressrelease/20100305/sck-cen?setlang=1 [geraadpleegd in 2017].

[34] Euratom, Richtlijn 2009/71/EURATOM van de Raad van 25 juni 2009 tot vaststelling van een communautair kader voor de nucleaire veiligheid van kerninstallaties, http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:172:0018:0022:NL:PDF [geraadpleegd in 2017].

[35] Euratom, Richtlijn 2014/87/EURATOM van de raad van 8 juli 2014 houdende wijziging van Richtlijn 2009/71/Euratom tot vaststelling van een communautair kader voor de nucleaire veiligheid van kerninstallaties, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0087&from=EN [geraadpleegd in 2017].

[36] Euratom, Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval, http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0070&from=NL [geraadpleegd in 2017].

[37] IAEA, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.asp, [geraadpleegd in 2017] .

[38] IAEA, Convention on Nuclear Safety, http://www-ns.iaea.org/conventions/nuclear-safety.asp?s=6&l=41, [geraadpleegd in 2017].

[39] IAEA, IAEA Safety Standards, http://www-ns.iaea.org/standards/default.asp?s=11&l=90#, [geraadpleegd in 2017].

[40] FANC, Fourth meeting of the Contracting Parties to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management - National report, Brussel, 2012, http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/2900/2922.pdf [geraadpleegd in 2017].

[41] IAEA, Fundamental Safety Principles, Wenen, 2006.

[42] IAEA, List of all valid Safety Standards, http://www-ns.iaea.org/standards/documents/pubdoc-list.asp?s=11&l=83, [geraadpleegd in 2017].

[43] Nations Unies, Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires, http://www.un.org/fr/disarmament/instruments/npt, [geraadpleegd in 2017].

[44] IAEA, Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2016, Wenen, 2017, http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/12246/Operating-Experience-with-Nuclear-Power-Stations-in-Member-States-in-2016 [geraadpleegd in 2017].

[45] AIEA, Nuclear Power Reactors in the world, Wenen, 2017, http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS_2-37_web.pdf, [geraadpleegd in 2017].

[46] SCK•CEN, http://sckcen.be/en/Technology_future/MYRRHA, [geraadpleegd in 2017].

[47] A. e. e. ETI, Cycle du combustible nucléaire : de la mine à la fabrication du combustible, http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/cycle-du-combustible-nucleaire-de-la-mine-a-la-fabrication-du-combustible-42201210/, [geraadpleegd in 2017].

[48] SNETP = Sustainable Nuclear Energy Technology Platform, 2013, http://www.snetp.eu/, [geraadpleegd in 2017].

[49] Commissariat à l'Energie Atomique, Rapport sur la gestion durable des matières nucléaires, december 2012, http://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communiques/institutionnel/rapport-gestion-durable-matieres-nucleaires.aspx, [geraadpleegd in 2014].

[50] NIRAS, Safety Assessment and Feasability Interim Report 2, Brussel, 2001.

[51] World nuclear news, Positive results from space battery work, juli 2013, http://www.world-nuclear-news.org/ON-Positive_results_from_space_battery_work-2607135.html, [geraadpleegd in 2017].

[52] Commissariat à l'énergie atomique - Direction de l'énergie nucléaire, Le traitement-recyclage du combustible nucléaire usé, Parijs, Jean-François Parisot, 2008.

[53] Commissariat à l'Energie Atomique - Direction de l'énergie nucléaire, Séparation-transmutation des éléments radioactifs à vie longue, Parijs, 2012.

[54] Forschungszentrum Jülich GmbH, IEF, RED-IMPACT, Impact of partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal, Forschungszentrum Jülich GmbH, IEF, Julich, 2008.

[55] OECD-NEA, Données sur l'énergie nucléaire 2010, édition OECD, Parijs, 2010, https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2010/6893-BB-2010.pdf [geraadpleegd in 2014].

[56] BBC, La Chine va recycler son uranium, 03 januari 2011, http://www.bbc.co.uk/afrique/monde/2011/01/110103_china_uranium.shtml, [geraadpleegd in 2014].

[57] Décret n° 2010-1167 du 30 septembre 2010 portant publication de l'accord sous forme d'échange de lettres entre le Gouvernement de la République française et le Gouvernement du Royaume des Pays-Bas relatif au traitement en France d'éléments combustibles irradiés, Paris, 2010.

[58] NIRAS, brief ALE/mvl/2017-1637 van 30 juni 2017.

[59] Koninklijk besluit van 20 juli 2001 houdende algemeen reglement op de bescherming van de bevolking, van de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van de ioniserende stralingen http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=nl&la=N&cn=2001072046&table_name=wet, [geraadpleegd in 2017].

[60] ASN = Autorité de sûreté nucléaire (Frankrijk), http://www.asn.fr, [geraadpleegd in 2017].

[61] Areva, Bilan: impact sur l'homme, 2013, http://www.areva.com/FR/activites-1186/bilan-impact-sur-l-homme-des-activites-d-areva-la-hague.html, [geraadpleegd in 2014].

[62] Areva, Areva: Leader mondial de l'énergie nucléaire, 2013, http://www.areva.com, [geraadpleegd in 2017].

[63] Areva, Les rejets liquides et gazeux, 2016, http://www.areva.com/FR/activites-2315/rsultats-du-contrle-des-rejets-de-l-usine-areva-la-hague.html, [geraadpleegd in 2017].

[64] NIRAS, The Ypresian Clays as Possible Host Rock for Radioactive Waste Disposal: an Evaluation, http://www.niras-afvalplan.be/nieuw/downloads/NIROND-TR-2005-01.pdf, [geraadpleegd in 2017],Brussel, 2005.

[65] NIRAS, Cost Evaluation of Geological Disposal of Category B&C Waste for the Long Term Fund (Revision of 2013), NIROND-TR 2013-04 E,Brusseel, 2013.

[66] NIRAS, Evaluation of the overnight cost of geological disposal of category B&C waste, NIROND TR 2015-06 E, Brussel, 2015.

[67] OECD-NEA, Les aspects économiques du cycle du combustible nucléaire, https://oecd-nea.org/ndd/reports/efc/efc-fr.pdf, Parijs, 1994, [geraadpleegd in 2017].

[68] OECD-NEA, The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2013/7061-ebenfc.pdf, Parijs, 2013, [geraadpleegd in 2017].

[69] FANC, Gemiddelde blootstelling aan ioniserende stralingen in België, 2013,. http://www.fanc.fgov.be/nl/informatiedossiers/wat-radioactiviteit-ioniserende-straling/de-gemiddelde-blootstelling-aan, [geraadpleegd in 2017].

[70] M. Salvatores, V. Meyer, V. Romanello, A. Boucher and A. Schwenk-Ferrero, PATEROS D2.2: Results of the scenario studies, http://pateros.sckcen.be/en/Deliverables, 2008, [geraadpleegd in 2017].

[71] IAEA, Implications of Partitioning and transmutation in radioactive waste management, Oostenrijk, 2004.

[72] IAEA/AIEA, Classification of Radioactive Waste — A Safety Guide, Safety Series No. 111-G-1.1, Wenen, Mei 1994

[73] Aanbeveling van de Commissie van 15 september 1999 inzake een classificatiesysteem voor vast radioactief afval (1999/669/EG, Euratom), Publicatieblad nr. L 265, 13 oktober 1999

[74] Synatom, privaat medeleling, 2012.

[75] OECD-NEA, Spain Country profile, Parijs, 2013.

[76] OPERA, Stakeholder Engagement in the Implementation of a Geological Disposal for Radioactive Waste (Main Report), https://covra.nl/downloads/opera/OPERA-PU-ECN121&122&123&124.pdf , AE Vlissingen, 2015, [geraadpleegd in 2017].

[77] AIEA, Country Nuclear Profile – United Kingdom 2015, http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CNPP2015_CD/countryprofiles/UnitedKingdom/UnitedKingdom.htm, 2016, [geraadpleegd in 2017].

[78] AIEA, Country Nuclear Profile – Switzerland 2013, https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Switzerland/Switzerland.htm, 2016, [geraadpleegd in 2017].

[79] Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Designing the Process for Selecting a Site, 02 2014, http://www.nwmo.ca/designingasitingprocess, [geraadpleegd in 2014].

[80] AIEA, Country Nuclear Profile – Republic of Korea, 2016, https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/KoreaRepublicof/KoreaRepublicof.htm, 2016, [geraadpleegd in 2017].

[81] Wikipedia, Uranium, https://nl.wikipedia.org/wiki/Uranium [geraadpleegd in 2014].