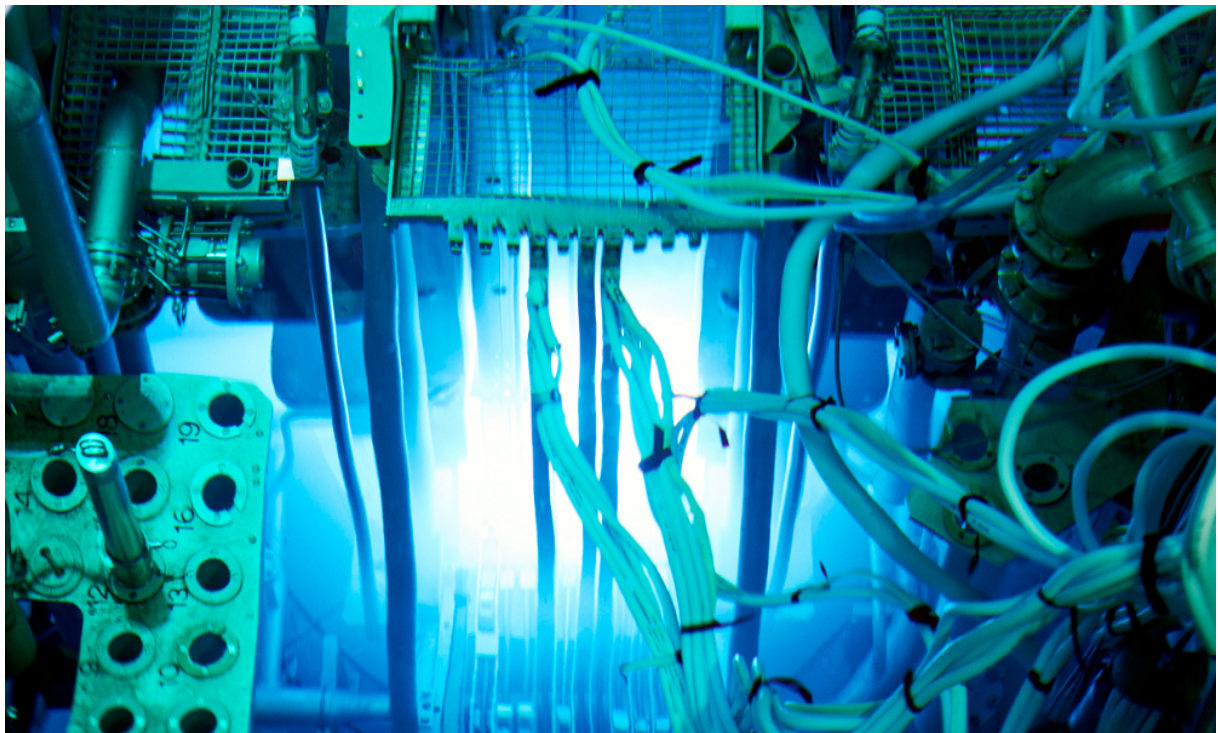


18 juli 2016

Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland

Inventarisatie en relatie met publieke belangen



Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland

Inventarisatie en relatie met publieke belangen

technopolis _{group} Juli 2016

Frank Zuijdam (projectleider)

Joost van Barneveld

Thyra de Jong

Andreas Ligtvoet

Jasper Schipper

Chiel Scholten

Wia Timmerman

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	1
1 Inleiding	4
1.1 Achtergrond	4
1.2 Doel en vraagstelling van deze studie.....	4
1.3 Afbakening van de studie.....	5
1.4 Aanpak	7
1.5 Leeswijzer.....	7
2 De nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland	8
2.1 Overzicht nucleaire kennisinfrastructuur	9
2.2 Belangrijkste domeinen	12
2.2.1 Domein medisch	13
2.2.2 Domein materiaalkunde	16
2.2.3 Domein energie.....	18
2.2.4 Domein omgang met nucleaire faciliteiten en materialen.....	20
2.3 Toegevoegde waarde van de nucleaire kennisinfrastructuur	22
3 Internationale rol en verplichtingen	26
3.1 Overzicht internationale verdragen en daarbij horende verplichtingen	26
3.1.1 Rol en opzegbaarheid van de verdragen	32
3.2 Internationale vergelijking	32
3.3 Wetenschappelijke positie van Nederland in internationaal perspectief.....	34
3.3.1 Nederlandse publicatiepatronen	34
3.3.2 Internationale onderzoekssamenwerking.....	36
4 De relatie tussen de kennisinfrastructuur en publieke belangen	37
4.1 Gedeelde publieke belangen	38
4.2 Domein energie	38
4.3 Domein medisch	40
4.4 Domein materialen	42
4.5 Domein omgang	43
5 Sterkten, zwakten en uitdagingen	46
5.1 Sterkten	46
5.2 Zwakten	47
5.3 Kansen.....	47
5.4 Bedreigingen	48
5.5 Toekomstige uitdagingen.....	49
Bijlage A Overzicht internationale verdragen.....	51

Bijlage B	Landenbenchmarks	63
Bijlage C	Survey.....	75
Bijlage D	Nucleaire toepassingen en gebruik buiten de nucleaire kennisinfrastructuur	77

Tabellen

Tabel 1	Overzicht methoden studie.....	7
Tabel 2	Hoogte uitkering dividend URENCO aan de Nederlandse staat in M€.....	24
Tabel 3	Overzicht structurele uitgaven aan nucleaire kennisinfrastructuur door ministerie van EZ in M€.....	24
Tabel 4	Overzicht eisen en verplichtingen van verdragen en afspraken.....	27
Tabel 5	Overzicht belangrijkste kenmerken nucleaire infrastructuur benchmarklanden.....	32
Tabel 6	SWOT nucleaire kennisinfrastructuur Nederland.....	49
Tabel 7	Overzicht internationale verdragen en afspraken	57

Figuren

Figuur 1	Ringen nucleaire kennisinfrastructuur	6
Figuur 2	Nucleaire waardeketen	8
Figuur 3	Overzicht nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland.....	9
Figuur 4	Aantal keer dat activiteiten voorkomen binnen de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland.....	10
Figuur 5	Aantal keer dat domeinen voorkomen binnen de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland	11
Figuur 6	Aantal keer dat subdomeinen voorkomen in de nucleaire kennisinfrastructuur	11
Figuur 7	Organisaties actief binnen het domein medisch in de Nederlandse nucleaire waardeketen	13
Figuur 8	Organisaties actief binnen het domein materiaalkunde in de Nederlandse nucleaire waardeketen	16
Figuur 9	Organisaties actief binnen het domein energie in de Nederlandse nucleaire waardeketen.....	18
Figuur 10	Organisaties actief binnen het domein omgang in de Nederlandse nucleaire waardeketen	20
Figuur 11	Indicatoren van de landenbenchmark voor nucleair onderzoek (over alle domeinen van 2000-2014)...	35
Figuur 12	Belangrijkste landen voor wetenschappelijke samenwerking met Nederland (aantal co-publicaties in nucleair onderzoek).....	36
Figuur 13	Schematisch overzicht van belangen binnen de domeinen van de nucleaire kennisinfrastructuur.....	37
Figuur 14	Historisch aandeel van kernenergie in de Nederlandse elektriciteitsproductie.....	38
Figuur 15	Overzicht publieke belangen energiedomein	39
Figuur 16	Overzicht publieke belangen medisch domein.....	41
Figuur 17	Overzicht publieke belangen domein materialen.....	43
Figuur 18	Overzicht publieke belangen domein omgang	44
Figuur 19	Overzicht van de belangrijkste Belgische nucleaire infrastructuur	64
Figuur 20	Overzicht van de belangrijkste Duitse nucleaire infrastructuur	67
Figuur 21	Overzicht van de belangrijkste Britse nucleaire infrastructuur	71

Figuur 22 Stellingen rol en meerwaarde publieke belangen (N = 19)	75
Figuur 23 Belang nucleaire kennisinfrastructuur voor domeinen (N = 19)	76

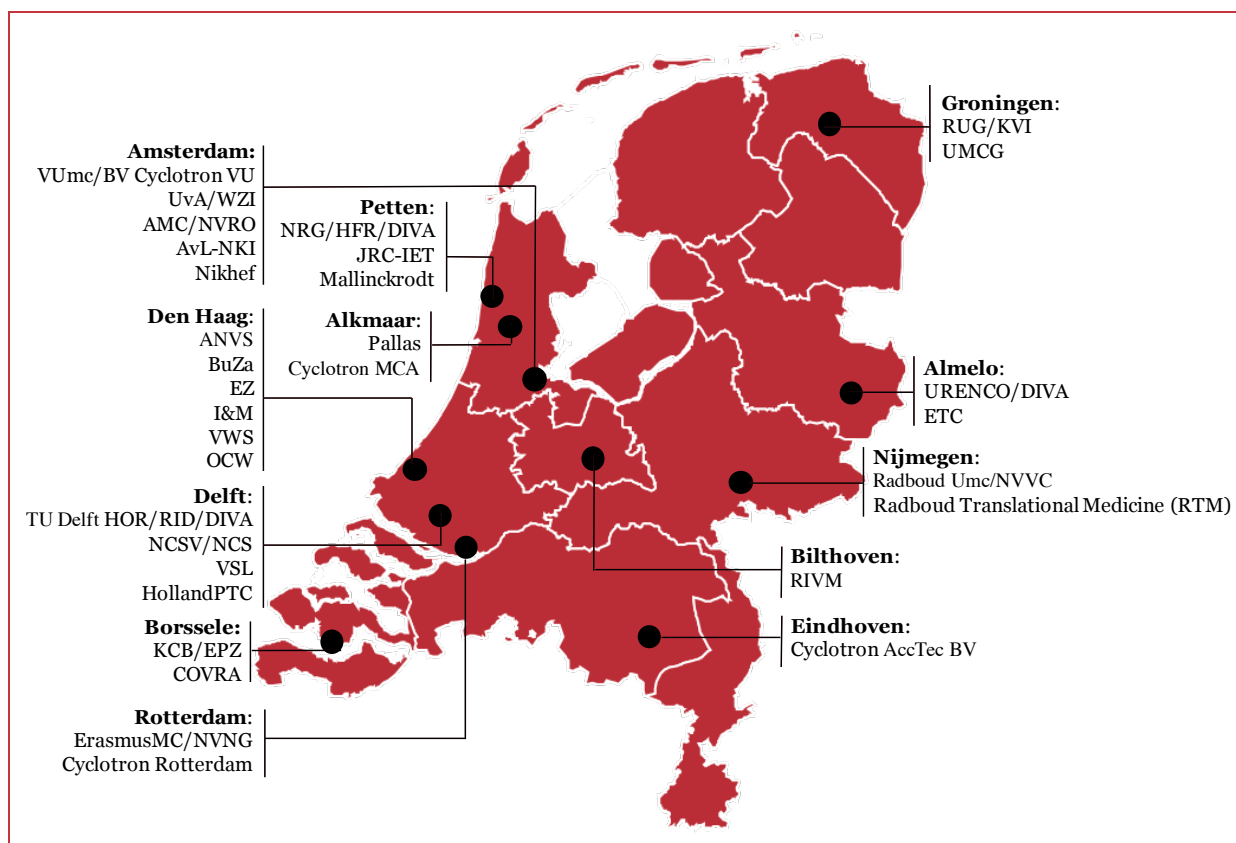
Samenvatting

Deze studie dient twee doelen. De eerste is het in kaart brengen van de nucleaire kennisinfrastructuur, omdat de kennis daarover fragmentarisch voorhanden is. Een tweede doelstelling van de studie is het inzichtelijk maken van de economische en publieke belangen die er met (het in stand houden van) de nucleaire kennisinfrastructuur gemoeid zijn. De voorliggende studie wordt door het Kabinet als input gebruikt bij het formuleren van een visie en strategie op de toekomst van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland.

Voor deze studie is de nucleaire kennisinfrastructuur als volgt afgebakend:

- Onderzoek en ontwikkeling waarbij radioactiviteit (ioniserende straling) een rol speelt (actieve ontwikkelaars). Geen fundamenteel onderzoek naar deeltjesfysica of plasmafysica, geen pure toepassingen zonder R&D (passieve gebruikers).
- Zowel de harde infrastructuur (faciliteiten, fysieke entiteiten) als de mensen die aan onderzoek en ontwikkeling doen (de organisatorische entiteiten).
- Alleen publieke organisaties of private organisaties met een duidelijk publieke component.

Binnen de scope van dit onderzoek zijn als nucleaire kennisinfrastructuur diverse installaties of organisaties (entiteiten) geïdentificeerd. Ze zijn op de kaart hieronder weergegeven.



Technopolis Group (2016)

De nucleaire sector in Nederland is divers en zeker meer dan kernenergie alleen. Het omvat verschillende domeinen, de belangrijkste vier domeinen zijn:

- **Medisch:** werkzaamheden op het gebied van diagnostiek en therapie met behulp van medische radio-isotopen;
- **Materiaalkunde:** werkzaamheden op het gebied van nieuwe of verbeterde materialen, materiaalkarakterisering of materiaaltests voor diverse toepassingen;
- **Energie:** werkzaamheden op het gebied van kernenergie, nieuwe reactoren en reactorprocessen in kerncentrales;
- **Omgang met nucleaire materialen en faciliteiten:** onderzoek en diensten op het gebied van stralingshygiëne/-bescherming, afvalverwerking en (eind)berging.

De nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland ondersteunt verschillende publieke belangen. In het domein energie gaat het om duurzaamheid (CO₂-arm) en een betrouwbare energievoorziening, in het domein medisch om volksgezondheid en (patiënt)veiligheid, in het domein materialen om veiligheid en duurzaamheid en in het domein omgang om volksgezondheid, een leefbaar milieu, veiligheid en vrede.

Naast de genoemde maatschappelijke belangen spelen ook economische belangen een rol: de kennisinfrastructuur en de daaraan verbonden organisaties bieden werkgelegenheid aan circa 3100 FTE en zetten jaarlijks circa een miljard euro om. Deze bedragen zijn vanwege de beperkte beschikbare (openbare) gegevens een inschatting. Buiten ons onderzoek viel een veel grotere groep gebruikers van nucleaire producten en faciliteiten (denk bijvoorbeeld aan medische beeldvorming door middel van MRI-scans, inspecties van materialen, of bestraling van voedingsmiddelen): Nederland kent ruim 1000 organisaties die radioactieve materialen hanteren (en als zodanig gemeld zijn bij de ANVS).

In onderstaande matrix zijn de belangrijkste sterktes, zwaktes, kansen en bedreigingen van de nucleaire kennisinfrastructuur weergegeven.

<p>Sterktes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nagenoeg de hele keten is aanwezig in Nederland met verschillende organisaties die (internationaal) een vooraanstaande positie hebben • Goede samenwerking tussen organisaties in de keten • Hoge kwaliteit wetenschappelijk onderzoek en state-of-the-art onderzoeksfaciliteiten • Sterke positie op terrein van medische isotopen en nucleaire geneeskunde • Goede inbedding in internationale organisaties en samenwerkingsverbanden • Verantwoord afvalbeleid en een ontmantelingsfonds 	<p>Zwaktes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dunne keten met enkele spelers; kwetsbaarheid van de keten (met name energie, minder in medisch) • Fragmentatie van kennisgebieden, overzicht over geheel ontbreekt • Onduidelijk toekomstig overheidsbeleid t.a.v. cruciale elementen van de nucleaire kennisinfrastructuur
<p>Kansen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Continueren sterke positie in medische domein en ontwikkelen nieuwe toepassingen • Ontwikkeling nieuwe reactortechnologieën (bijvoorbeeld gesmoltenzoutreactoren) als bron voor duurzame energievoorziening • Niche in ontmantelingsindustrie: bewerken en recycelen van radioactief besmette materialen uit voormalige nucleaire installaties • Groeiende markt van stabiele isotopen voor de halfgeleiderindustrie 	<p>Bedreigingen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gebrek aan coördinatie op het medische domein: overbodige investeringen en inefficiëntie in het systeem • Vergrijzing werknemers, verdwijnen kennis • Verdwijnen kennis stralingsbescherming • Weinig transparantie over kosten en gebrek aan marktwerking: leidt mogelijk tot inefficiëntie en discontinuïteit productie medische isotopen • Afhankelijkheid van buitenlandse kennis, technologie en leveranciers

Nederland is ondertekenaar van een reeks verdragen en deelnemer in internationale verbanden die leiden tot verplichtingen ten aanzien van de nucleaire kennisinfrastructuur. Deze verplichtingen zijn

grotendeels van toepassing op het domein omgang en betreffen wet- en regelgeving, controle en toezicht, veiligheid en beveiliging, en stralingshygiëne.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Het nucleaire domein in Nederland omvat vele onderdelen. Van die onderdelen is kernenergie vaak onderwerp van maatschappelijke discussie geweest. Zo kende Nederland in de jaren zeventig en tachtig van de vorige eeuw een Brede Maatschappelijke Discussie (BMD) over kernenergie. Die discussie ging over de wenselijkheid van de bouw van nieuwe kerncentrales als alternatieve energiebron in antwoord op de oliecrisis. De voorstanders redeneerden met name vanuit een economisch en geopolitiek perspectief (goedkope energie zonder afhankelijkheid van oliestaten), terwijl de tegenstanders met name wezen op de gevaren van radioactief afval en zorgen over de veiligheid rond de opwekking van kernenergie en de opslag van kernafval. De discussie mondde uit in een (genuanceerd) ‘nee’.¹ Het Kabinet-Lubbers wilde aanvankelijk de uitkomst van de BMD terzijde leggen, maar het pleit werd beslecht door de ramp in de kerncentrale van Tsjernobyl in 1986. Van de bouw van nieuwe kerncentrales werd daarna afgezien.

In het begin van deze eeuw kantelde de publieke opinie: steeds meer mensen dachten positief over kernenergie. Tsjernobyl was inmiddels lang geleden en de nucleaire sector had bewezen veilig te werken. Bovendien bleven de geopolitieke spanningen in het Midden-Oosten aanwezig en steeg de olieprijs, terwijl de uraniumprijs stabiel bleef. Daar kwamen bovendien nieuwe argumenten bij. In de eerste plaats waren er toenemende zorgen over het milieu en de opwarming van de aarde (o.a. onder invloed van het internationaal klimaatpanel IPCC en Al Gore’s *An Inconvenient Truth*) en werd de noodzaak van schone energie benadrukt. De significant lagere CO₂-uitstoot van kernenergie ten opzichte van fossiele brandstoffen maakt in het kader van klimaatverandering van kernenergie een serieuze kandidaat voor nieuw te plaatsen elektriciteitscentrales.²

Het kernongeval in Fukushima (Japan) in 2011 zorgde vervolgens weer voor een omslag. Door het ongeval is de publieke aandacht voor veiligheidsrisico’s van nucleaire technologie sterk gestegen. Onder invloed van Fukushima heeft Duitsland bijvoorbeeld afgezien van het langer openhouden van kerncentrales en besloten volledig over te stappen op duurzame energie, waarmee de *Energiewende* versneld wordt uitgevoerd. Anderzijds kiest het Verenigd Koninkrijk in het kader van CO₂-reductie voor het uitfasen van kolencentrales en ter compensatie daarvan voor een groter belang voor nucleaire energie. Nederland heeft lange tijd een open standpunt ingenomen ten aanzien van kernenergie.

Andere onderdelen van het nucleaire domein zijn niet omstreden. Zo wordt het belang van nucleaire geneeskunde alomtorekend. Wereldwijd worden veel patiënten behandeld met medische isotopen die met de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten worden gemaakt. In zijn randvoorwaardenbrief van 2011 geeft de Minister van Economische Zaken aan de sterke positie van Nederland op dit gebied te willen behouden en versterken.³ Andere onderdelen van het nucleaire domein, zoals toepassingen bij materialen(onderzoek), zijn eveneens niet omstreden.

1.2 Doel en vraagstelling van deze studie

De kennis over de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland blijkt fragmentarisch voorhanden, onder meer omdat de verschillende subdomeinen historisch onder de verantwoordelijkheid van verschillende departementen vallen. De voorliggende studie heeft met name een inventariserende en consoliderende functie: het **in kaart brengen van de nucleaire kennisinfrastructuur**. Een tweede doelstelling van de studie is **inzichtelijk te maken welke economische en publieke belangen** er met (het in stand houden van) de nucleaire kennisinfrastructuur gemoeid zijn. Beide

¹ G. van Hengel, ‘De Brede Maatschappelijke Discussie over kernenergie’ in Historisch Nieuwsblad, nummer 4, 2007.

² Zie onder meer: <https://nucleairnederland.nl/historie/nucleaire-renaissance> en SCP, *De publieke opinie over kernenergie* (Den Haag 2010).

³ Tweede Kamer, Kamerstuk 32645 nr. 1, Vergaderjaar 2010-2011, 11 februari 2011

elementen vormen een belangrijke input voor de overheid bij het formuleren van een visie en strategie op de toekomst van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland.

In de offerteaanvraag van deze studie zijn concreet de volgende vragen opgenomen:

- Wie zijn de **relevante spelers** in de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland en hoe verhouden deze spelers zich tot elkaar?
- Wat zijn de **sterkten, zwakten, kansen en bedreigingen** van/voor de huidige nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland?
- Wat is het **belang** van de huidige kennisinfrastructuur voor de bestaande nucleaire industrie, de gezondheidszorg en andere relevante sectoren in Nederland?
- Wat zijn de **internationale verplichtingen** ten aanzien van de instandhouding van een nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland?
- Wat is de **toegevoegde waarde** van de nucleaire kennisinfrastructuur in termen van werkgelegenheid, export, (wetenschappelijke) reputatie etc.?
- Wat is de (financiële) **betrokkenheid** van de verschillende partijen (ministeries, kennisinstellingen, industrie) bij de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland?
- Wat is de **positie** van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland ten opzichte van die in **andere relevante landen**?
- Wat is de **bijdrage** van de nucleaire kennisinfrastructuur aan de borging van de **publieke belangen** die gemoeid zijn met de energievoorziening (betrouwbaar, betaalbaar, veilig en schoon), met volksgezondheid en met eventuele andere publieke belangen?

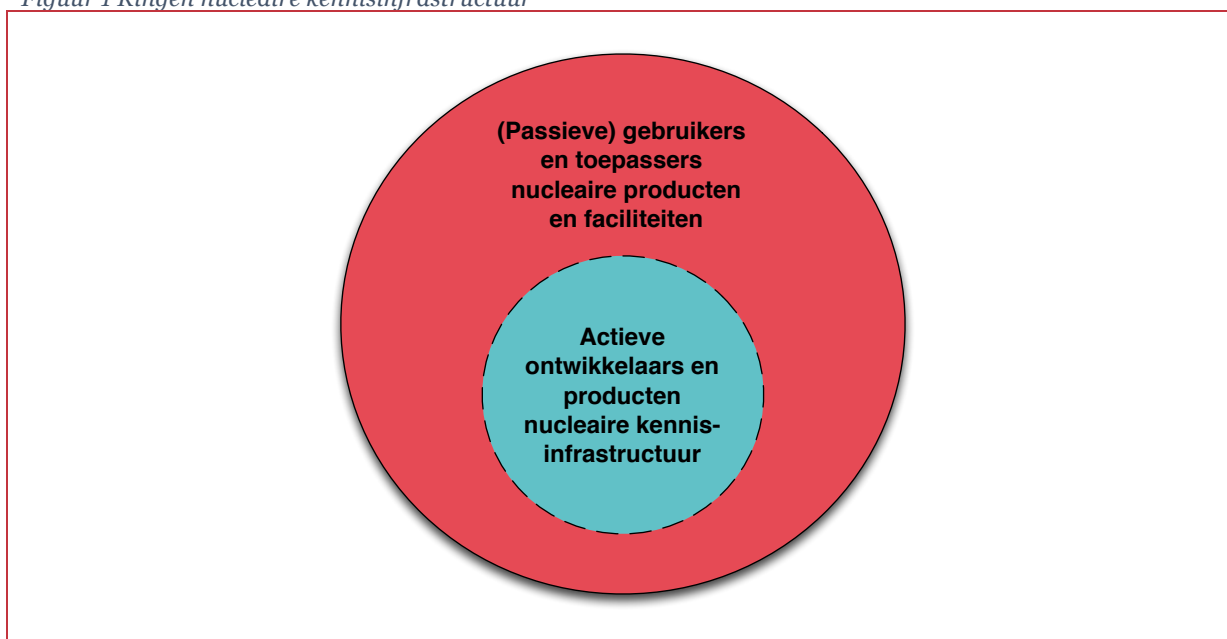
1.3 Afbakening van de studie

Kennisinfrastructuur in het algemeen is “het geheel aan (semi-)publieke, structurele voorzieningen en arrangementen op het terrein van (wetenschappelijk) onderwijs en onderzoek, fundamenteel speurwerk en inzichtontwikkeling”.⁴ Het woord "nucleair" kan echter breder geïnterpreteerd worden dan voor deze studie de bedoeling was. Op verzoek van de opdrachtgever is subatomair onderzoek, bijvoorbeeld de deeltjesfysica, zoals die bedreven wordt bij het CERN, plasmafysica, zoals bij kernfusie en halfgeleiderproductie, en Nuclear Magnetic Resonance, zoals toegepast in de MRI, buiten de afbakening van de studie gehouden. De eerste onderwerpen liggen te veel aan de kant van fundamenteel onderzoek, terwijl het laatste onderwerp puur een toepassing betreft. Binnen dit project beperken wij ons tot *onderzoek en ontwikkeling (R&D)* waarbij radioactiviteit (ioniserende straling) een rol speelt.

Deze studie richt zich dus niet op de brede groep van organisaties die alleen nucleaire producten toepassen maar daar zelf geen (productie of onderzoeks-)faciliteit voor hebben of zelf actief onderzoek naar doen. Er zijn feitelijk twee ringen te onderscheiden: de eerste ring betreft de actieve ontwikkelaar of producent, de tweede ring betreft de (passieve) gebruikers van nucleaire producten of faciliteiten. De laatste groep is niet het onderwerp van studie, maar is middels een enquête wel benaderd voor haar mening en inzichten over het belang van de nucleaire kennisinfrastructuur.

⁴ Nijkamp, P., Bovenberg, A.L. en Soete, L. (2000). *Kennis is kracht: het belang van goede kennisinfrastructuur in Nederland*. Den Haag: Ministerie van OCW.

Figuur 1 Ringen nucleaire kennisinfrastructuur



Technopolis Group (2016)

Een ander punt voor de afbakening is de vraag wat er precies onder de kennisinfrastructuur valt. In het kader van dit project betreft dit zowel de harde infrastructuur (fysieke faciliteiten) als de mensen die onderzoek en ontwikkeling doen (binnen de organisaties). Bij het eerste valt bijvoorbeeld te denken aan de diverse reactoren in Nederland, de verrijkingsfabriek van URENCO en de cyclotrons. Bij het laatste gaat het om onderzoeksgroepen of organisaties die bijdragen aan nucleaire kennisontwikkeling. Dat wil zeggen dat ze regelmatig nucleaire (onderzoeks)activiteiten ontplooiën en meer dan eens per jaar daarover publiceren of een andere output hebben (bijvoorbeeld in de vorm van nucleaire producten).

Een laatste afbakening betreft de focus op publieke infrastructuren en organisaties. We hebben alleen infrastructuren en organisaties meegenomen die een publieke component hebben. Dit kunnen volledig publieke organisaties zijn, maar ook infrastructuren en organisaties waar overheden aandeelhouder zijn, waar overheden een substantieel deel financieren, die onder toezicht staan van overheden of gerelateerd zijn aan een publiek/maatschappelijk belang.

Afbakening studie:

- *Onderzoek en ontwikkeling waarbij radioactiviteit (ioniserende straling) een rol speelt (actieve ontwikkelaars). Geen fundamenteel onderzoek naar deeltjesfysica of plasmafysica, geen pure toepassingen zonder R&D (passieve gebruikers).*
- *Zowel de harde infrastructuur (faciliteiten, fysieke entiteiten) als de mensen die aan onderzoek en ontwikkeling doen (de organisatorische entiteiten).*
- *Alleen publieke organisaties of private organisaties met een duidelijk publieke component.*

De hierboven toegelichte afbakening laat een belangrijk deel van de toepassingen van nucleaire technologie buiten beschouwing. Het gevolg daarvan is dat deze studie niet de volle breedte van de nucleaire sector laat zien. Dit betekent natuurlijk niet dat toepassingen als minder waardevol worden gezien, maar een beschrijving van de volle breedte van toepassingen past eenvoudigweg niet binnen de scope van de onderhavige studie (een zeer beknopte schets staat in Bijlage D). Daarbij komt dat de grens tussen meer actieve ontwikkelaars en (passieve) gebruikers niet altijd even scherp is te maken en keuzes dus arbitrair zijn. Die keuzes zijn zo goed mogelijk onderbouwd en ook gevalideerd, maar zeker

voor discussie vatbaar. Of anders gezegd, deze studie beoogt een foto te geven van een deel van Nederlandse nucleaire sector, waarbij de randen soms grijs tinten vertonen.

1.4 Aanpak

Voor deze studie hebben we verschillende methoden ingezet. In onderstaande tabel zijn de belangrijkste elementen weergegeven.

Tabel 1 Overzicht methoden studie

Methoden	Toelichting
Database met gegevens over de belangrijkste faciliteiten en organisaties	Op basis van deskresearch hebben we in eerste instantie openbare gegevens verzameld over de belangrijkste faciliteiten en organisaties van nucleaire kennisinfrastructuur. Op basis daarvan hebben we een database met beschrijvingen van de faciliteiten en organisaties gebouwd. Vervolgens is contact gezocht met de organisaties om de database verder aan te vullen.
Inventarisatie van internationale verdragen	Op basis van deskresearch is een overzicht gemaakt van de internationale verdragen die Nederland heeft afgesloten op het terrein van de nucleaire kennisinfrastructuur en welke verplichtingen daar uit voortvloeien.
Interviews	Er zijn zo'n 20 interviews gehouden met de belangrijkste vertegenwoordigers van de nucleaire kennisinfrastructuur. In de interviews is onder meer ingegaan op de publieke belangen.
Survey	Een enquête onder de belangrijkste vergunninghouders over het omgaan met nucleaire materialen. Centrale thema in de survey waren de publieke belangen die met de nucleaire kennisinfrastructuur zijn gemoeid.
Bibliometrische analyse	Met behulp van de publicatiedatabase Scopus is een bibliometrische analyse gemaakt van de publicaties en citaties op het terrein van nucleair onderzoek. Deze analyse is gebruikt voor het in kaart brengen van de belangrijkste spelers, internationale samenwerkingsverbanden en positionering.
Benchmark	Via deskstudie is een korte beschrijving gemaakt van de nucleaire kennisinfrastructuur in drie andere landen: België, Verenigd Koninkrijk en Duitsland. De volledige benchmark is opgenomen in Bijlage B.
Focusgroep	De concept resultaten van de studie zijn op 16 juni 2016 besproken met zo'n 15 vertegenwoordigers van de nucleaire kennisinfrastructuur. Doel was een validatie van de analyse.

De uitkomsten van al deze methoden zijn integraal geanalyseerd (door middel van triangulatie van de uitkomsten) en verwerkt in de voorliggende rapportage.

1.5 Leeswijzer

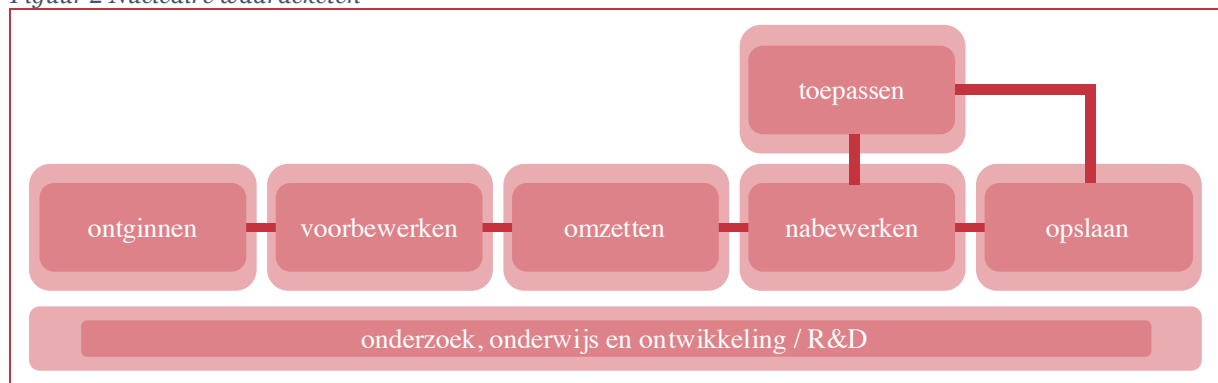
Deze rapportage is als volgt opgebouwd. Hoofdstuk 2 bevat een overzicht van de belangrijkste infrastructuren en organisatie van de nucleaire kennisinfrastructuur. Hoofdstuk 3 gaat in op de internationale rol van Nederland (onder meer op de internationale verplichtingen en een vergelijking met het buitenland). In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op relatie tussen publieke belangen en de nucleaire kennisinfrastructuur. Hoofdstuk 5 ten slotte bevat een analyse van de sterktes en zwaktes van de nucleaire kennisinfrastructuur.

2 De nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland

De nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland kunnen we onderverdelen in een nucleaire keten van ontginnen tot en met opslaan van nucleair materiaal en een kennisketen waarin met name onderzoek wordt gedaan. De nucleaire keten bestaat uit zes activiteiten. De eerste activiteit is het ontginnen van grondstoffen voor nucleaire toepassingen. De activiteit voorbewerking richt zich op alle processen die voorafgaan aan een nucleaire reactie. Hieronder valt het verrijken van elementen, zoals uranium. Omzetten betreft alle werkzaamheden waarbij een nucleaire reactie plaatsvindt, bijvoorbeeld het omzetten in energie in kernreactoren. Nabewerken omvat alle werkzaamheden na de nucleaire reactie. Dit is bijvoorbeeld de scheiding van specifieke radio-isotopen uit het reactieproduct, onder meer voor medische toepassingen. De activiteit 'opslaan' ten slotte heeft betrekking op het tijdelijk en langdurig opslaan van radioactief materiaal (afval). Na het nabewerken kan er nog een cluster van werkzaamheden plaatsvinden: toepassen. Hierbij gaat het om bijvoorbeeld het toepassen van gedoteerde halfgeleiders in de industrie of het toepassen van medische isotopen (nadat ze door farmaceuten zijn nabewerkt) in de nucleaire geneeskunde of in medische beeldvormende apparatuur. Veel toepassingen van nucleaire materialen leiden op hun beurt tot radioactief afval dat vervolgens weer ingezameld en opgeslagen dient te worden. Figuur 2 geeft de bovengenoemde elementen nog eens weer.

De nucleaire kennisinfrastructuur kent naast de spelers in de nucleaire keten ook diverse onderzoeksinstellingen. Zij doen (fundamenteel) onderzoek of ontwikkelen innovaties voor de praktijk (Research & Development). In Figuur 2 is onderzoek en ontwikkeling als parallelle activiteit weergegeven in de waardeketen.

Figuur 2 Nucleaire waardeketen



Technopolis Group (2016)

Op ontginnen na, zijn er in Nederland werkzaamheden binnen elk onderdeel van de nucleaire waardeketen (R&D-voorbewerken-omzetten-nabewerken-toepassen-opslaan). Nederland is dus breed in de waardeketen actief, maar het aantal werkzaamheden binnen een activiteit is soms beperkt – hoewel die werkzaamheden wel door enkele grote spelers als Urenco en NRG worden uitgevoerd. Zo is Nederland binnen het voorbereken wel actief bij de verrijking van uranium, maar niet op het gebied van de productie van splijtstofstaven. Ook bij nabewerken is Nederland bijvoorbeeld niet actief op het gebied van het opwerken van gebruikte splijtstoffen. De activiteiten omzetten, voorbereken, nabewerken en toepassen zijn het stevigst vertegenwoordigd in Nederland, dat wil zeggen: bij deze activiteiten zijn de meeste organisaties betrokken.

Naast activiteiten binnen de waardeketen onderscheiden we domeinen binnen de nucleaire kennisinfrastructuur. Een domein is een thematische afbakening gericht op de toepassing waarin we de verschillende entiteiten binnen de nucleaire kennisinfrastructuur onderverdelen. We onderscheiden vier domeinen: energie, medisch, materiaalkunde en omgang. Energie is een belangrijk domein in de nucleaire kennisinfrastructuur, maar ioniserende straling speelt ook een voorname rol in

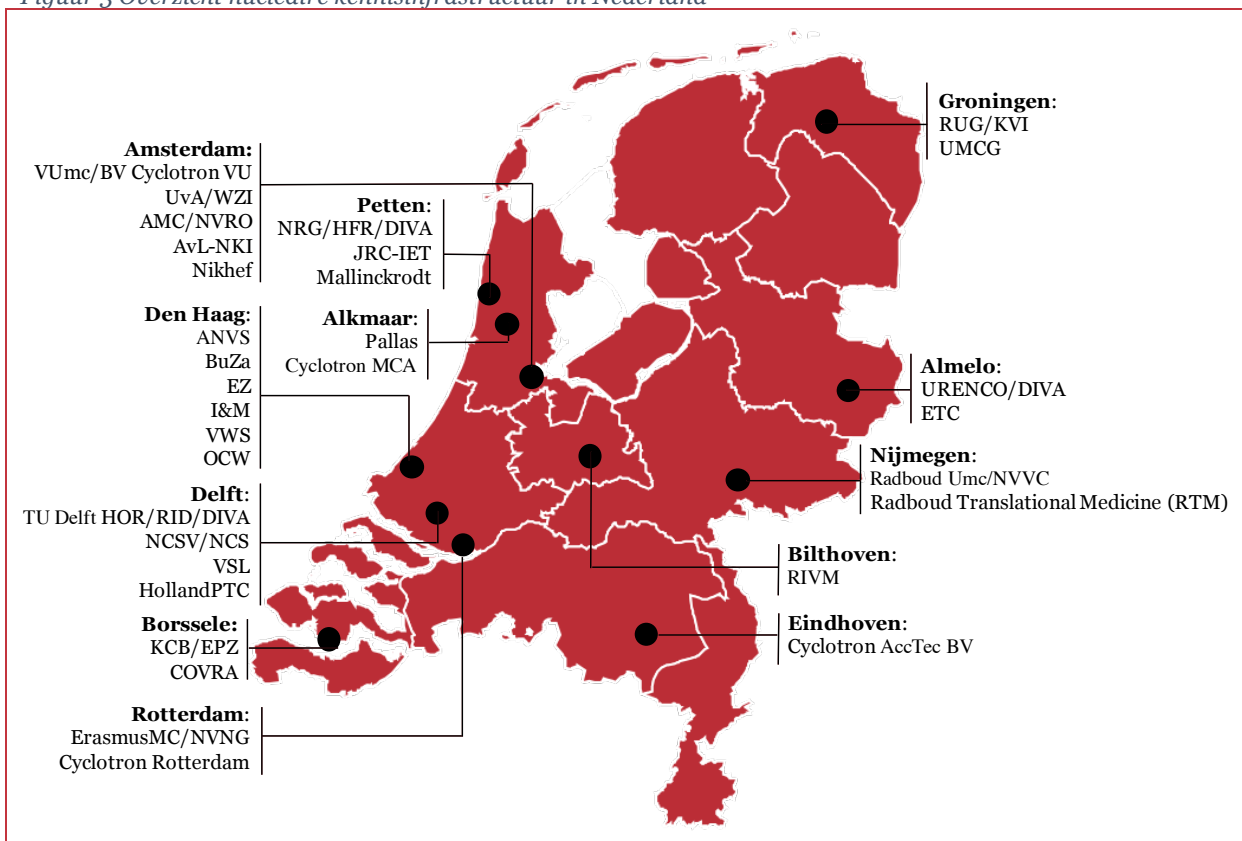
de domeinen medisch en materialen. Bovendien is er een doorsnijdend domein dat het contact met, controle van, en toezicht op radioactieve materialen behelst: het materiaal en de betreffende infrastructuur vereisen zorgvuldige omgang om de veiligheid van gebruikers en de Nederlandse bevolking te waarborgen (stralingsbescherming en stralingshygiëne). Dit domein noemen we daarom omgang.

In de onderstaande paragrafen geven wij achtereenvolgens een overzicht van de meest prominente activiteiten binnen de nucleaire kennisinfrastructuur, de belangrijkste domeinen – hun toepassingen en belangen, de wetenschappelijke stand van zaken in internationaal perspectief en een inschatting van de toegevoegde waarde in termen van werkgelegenheid en omzet van de grote infrastructuur.

2.1 Overzicht nucleaire kennisinfrastructuur

Binnen de scope van dit onderzoek zijn als nucleaire kennisinfrastructuur diverse installaties of organisaties (entiteiten) geïdentificeerd. Ze zijn op de kaart hieronder weergegeven. Zoals reeds vermeld in de afbakening van paragraaf 1.3, zijn deze entiteiten slechts een subset van alle vergunninghouders en toepassers in de gehele nucleaire sector.

Figuur 3 Overzicht nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland



Technopolis Group (2016)

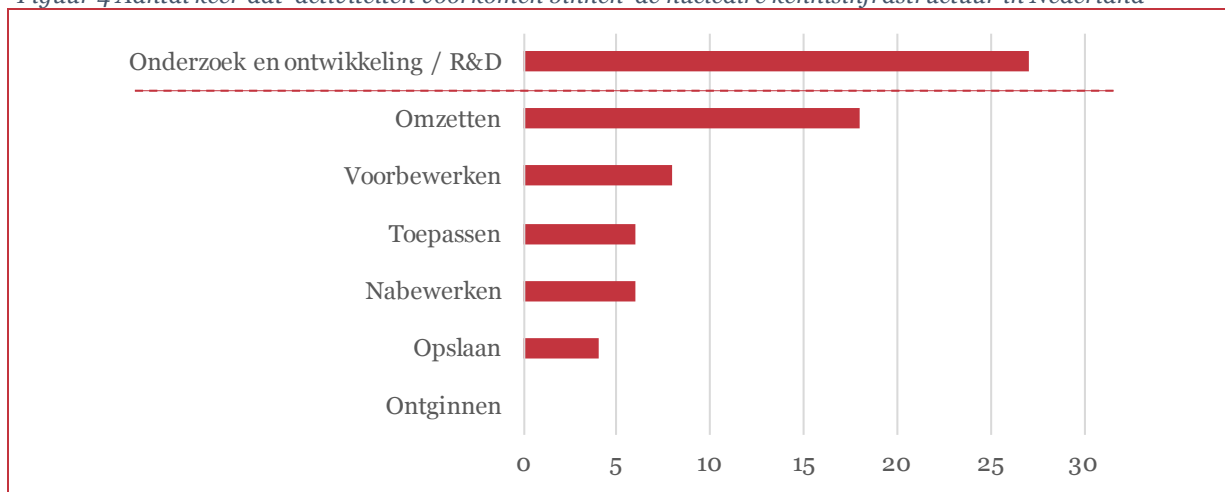
Op deze kaart staan fysieke infrastructuur en organisaties. In enkele gevallen zijn er kenniscentra opgericht rond de fysieke infrastructuur, zoals het geval is met de centra voor protontherapie en het cluster rond de HFR in Petten.

Sommige organisaties houden zich met meerdere activiteiten bezig; onderzoek en omzetten komen vaak gezamenlijk voor bij elke activiteit in de nucleaire waardeketen. Voor een groot deel van het onderzoek moet een reactor bijvoorbeeld ook materiaal omzetten. De activiteiten worden vervolgens

uitgevoerd binnen of voor een bepaald (onderzoeks)domein. Doordat nucleaire installaties vaak meerdere activiteiten uitvoeren, zijn zij niet altijd in één plek in de keten te plaatsen.

Figuur 4 geeft inzicht in welke activiteiten uit de nucleaire waardeketen het meest binnen de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur voorkomen. Dit figuur is tot stand gekomen door per organisatie binnen de nucleaire kennisinfrastructuur de activiteiten in kaart te brengen. Op de horizontale as wordt het aantal maal dat een activiteit voorkomt binnen de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland weergegeven.

Figuur 4 Aantal keer dat activiteiten voorkomen binnen de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland



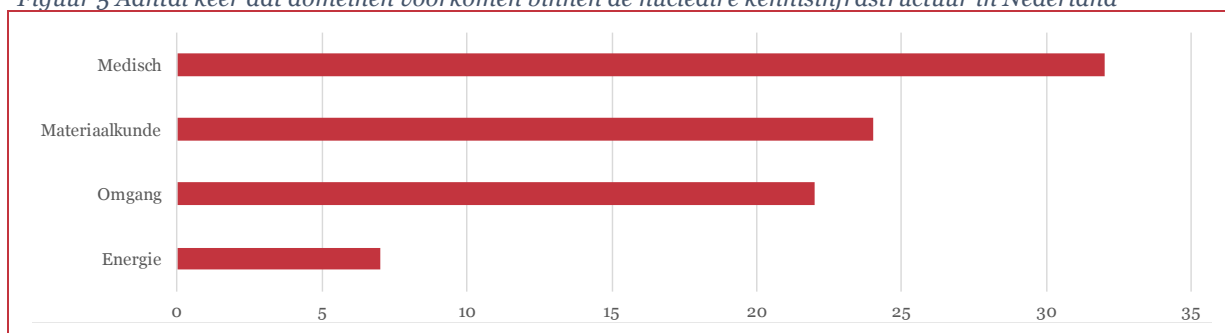
Database Technopolis Group (2016)

De figuur geeft aan dat onderzoek en ontwikkeling (R&D) het vaakst voorkomt. Dat is niet verwonderlijk aangezien veel organisaties binnen de nucleaire kennisinfrastructuur een onderzoekskarakter hebben of naast hun productie ook R&D-activiteiten hebben. Verder is een veelvoorkomende activiteit het omzetten. Dit gebeurt in reactoren en cyclotrons waarin kernreacties plaatsvinden. Cyclotrons worden voornamelijk toegepast voor de productie van medische isotopen, hoewel er ook meer geavanceerde en krachtiger cyclotrons worden toegepast in fundamenteel wetenschappelijk (materiaal)onderzoek. Nabewerken en opslaan komen het minste voor. Dat is te verklaren doordat het opslaan vaak slechts tijdelijk⁵ is en radioactief afval alleen langdurig bij het COVRA opgeslagen mag worden. Nabewerken vindt alleen plaats bij organisaties die direct werken met de ruwe producten uit een reactor, waardoor dit ook een beperkt aantal is.

Figuur 5 geeft inzicht in de grootte van de domeinen. De activiteiten van de organisaties binnen de nucleaire kennisinfrastructuur zijn geïnclassificeerd per domein en vervolgens is daarvan een grafiek gemaakt. De horizontale as geeft aan hoe vaak een domein voorkomt verspreid over de verschillende organisaties.

⁵ De tijdelijke opslag van kleine hoeveelheden radioactieve stoffen vindt bij veel organisaties plaats die met dergelijke stoffen werken, dat is hier niet bedoeld. Het gaat hier om de tijdelijke opslag van verrijkt uranium en/of splijtstoffen.

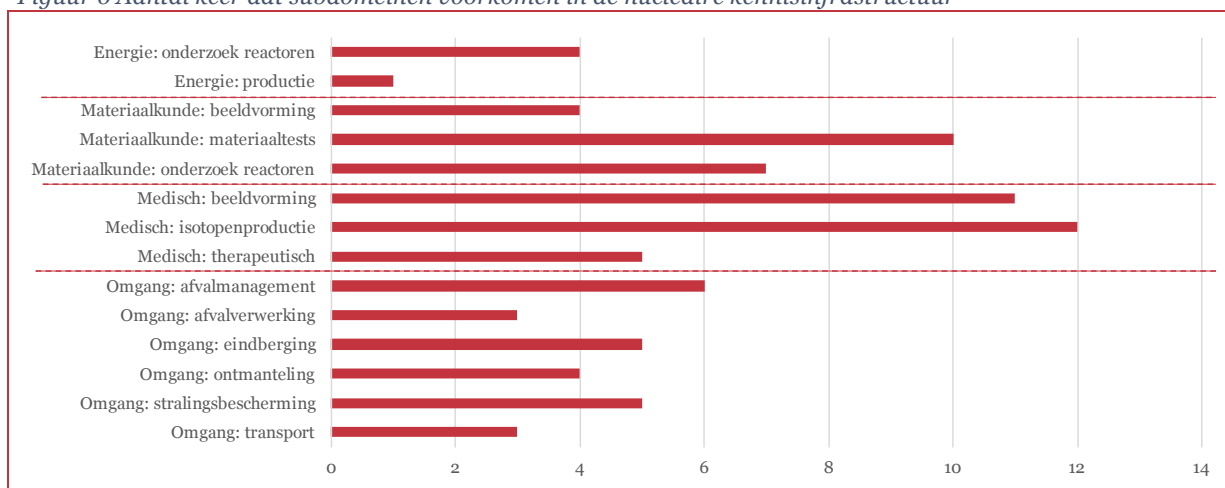
Figuur 5 Aantal keer dat domeinen voorkomen binnen de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland



Database Technopolis Group (2016)

Uit de figuur wordt duidelijk dat het medische domein binnen de gekozen afbakening verreweg het grootst is. Alle beschouwde fysieke installaties voor onderzoek (kunnen) worden ingezet voor medische doeleinden. Het domein materialen en omgang zijn vervolgens het grootst. De minste activiteiten vinden plaats op het domein energie.

Figuur 6 Aantal keer dat subdomeinen voorkomen in de nucleaire kennisinfrastructuur



Database Technopolis Group (2016)

In Figuur 6 is een nadere uitsplitsing binnen de domeinen gemaakt. In het medische domein zijn de meeste werkzaamheden op het gebied van beeldvorming en de productie van medische isotopen. Bij materiaalkunde gaat het voornamelijk om materiaaltests (onderzoeks- en meetmethoden) en onderzoek naar reactoren. Bij energie is er maar één producent (EPZ), de overige werkzaamheden vinden plaats op het gebied van verbeterde en nieuwe reactoren. Omgang betreft voornamelijk onderzoek naar eindberging, stralingsbescherming en ontmanteling.

De nucleaire keten in Nederland is nauw verweven. Er is een grote mate van samenwerking tussen de diverse spelers. De grote organisaties (Hoger Onderwijs Reactor - Technische Universiteit Delft, URENCO, Kerncentrale Borssele (EPZ), Hoge Flux Reactor, PALLAS, COVRA) zijn verenigd in Nucleair Nederland. Dit samenwerkingsverband heeft als doel de samenleving te voorzien van feitelijke informatie over nucleaire technologie, onderlinge relaties te verstevigen en kennis uit te wisselen en gemeenschappelijke belangen te behartigen (lobby).⁶ Dit uit zich onder andere in het gezamenlijk uitvoeren van (promotie)onderzoek, het bijdragen aan onderwijs, en het wederzijds beschikbaar stellen van materialen en apparatuur. Ook op andere terreinen is er samenwerking. Een

⁶ <https://nucleairnederland.nl/nucleair-nederland>

belangrijk deel van die samenwerkingsverbanden heeft betrekking op de productie van medische isotopen of de ontwikkeling van nieuwe technieken voor diagnose of therapie met isotopen. Een voorbeeld daarvan is de DIVA (Dutch Isotopes Valley), waarbinnen de TU Delft, URENCO en NRG samenwerken. COVRA werkt intensief samen met andere Nederlandse organisaties binnen het nationale OPERA-onderzoek naar eindberging, waaronder NRG en de TU Delft. Andere voorbeelden van samenwerking zijn voor de ontwikkeling en instandhouding van kennis op het gebied van veiligheid, stralingsbescherming en levensduurverlenging van installaties.

Naast samenwerking met Nederlandse organisaties binnen de nucleaire keten, werken de organisaties binnen de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur ook internationaal samen. Zo zijn de meeste onderzoeksinstellingen ook actief in consortia binnen de Europese kaderprogramma's (FP7 en H2020) en Euratom. COVRA neemt deel aan projecten op het gebied van eindberging en materiaalbehandeling voor nucleair afval. NRG en de TU Delft zijn onder andere actief in experimentele onderzoeksprogramma's met gebruikmaking van de nucleaire R&D-infrastructuur in Petten en Delft. Ook zijn een aantal organisaties betrokken bij of vertegenwoordigd in bijeenkomsten van de OECD NEA en het IAEA.

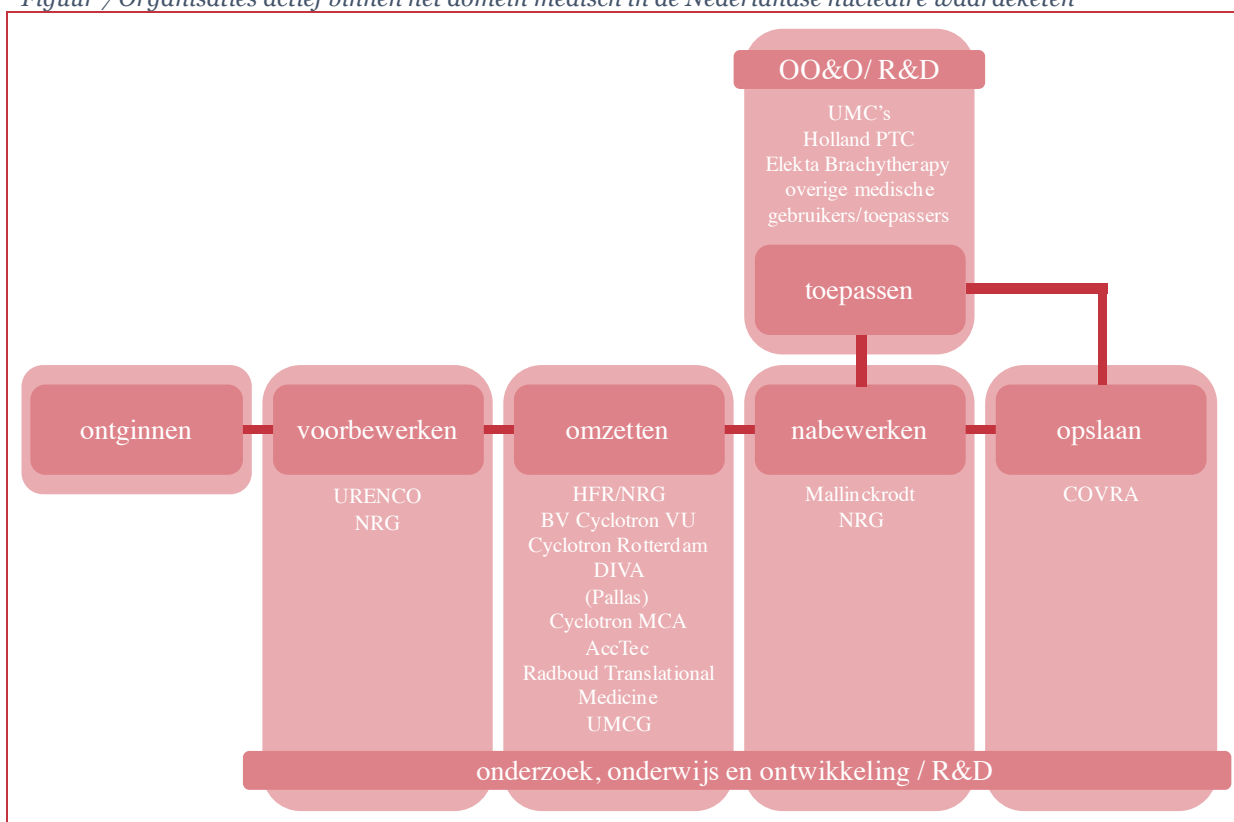
2.2 Belangrijkste domeinen

De nucleaire sector is meer dan kernenergie alleen, het omvat verschillende domeinen. Die diversiteit is ook weerspiegeld in de nucleaire kennisinfrastructuur. Binnen de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland zijn een viertal domeinen te onderscheiden, zoals in de inleiding van dit hoofdstuk is toegelicht. Daarin vindt zowel onderzoek, productie en dienstverlening plaats. Deze domeinen zijn:

- **Medisch:** werkzaamheden op het gebied van diagnostiek en therapie met behulp van medische radio-isotopen;
- **Materiaalkunde:** werkzaamheden op het gebied van nieuwe of verbeterde materialen, materiaalkarakterisering of materiaaltests voor diverse toepassingen;
- **Energie:** werkzaamheden op het gebied van kernenergie, nieuwe reactoren en reactorprocessen in kerncentrales;
- **Omgang met nucleaire materialen en faciliteiten:** onderzoek en diensten op het gebied van stralingshygiëne/-bescherming, afvalverwerking en (eind)berging.

2.2.1 Domein medisch

Figuur 7 Organisaties actief binnen het domein medisch in de Nederlandse nucleaire waardeketen



Technopolis Group (2016)

Medische radio-isotopen nemen een belangrijke plaats in binnen de medische diagnostiek en als toepassing voor therapie. Met name voor diagnostiek in de oncologie, cardiologie en neurologie vormen zijn radio-isotopen van groot belang. Naar schatting gebruiken meer dan 10.000 ziekenhuizen wereldwijd radio-isotopen.⁷ In de medische diagnostiek gaat het om kortlevende radio-isotopen die bevestigd worden aan een biologische molecuul wat resulteert in zogenaamde tracers (markers) die gezien kunnen worden als ziekte-specifieke contrastmiddelen. Met behulp van specifieke scanapparatuur kan de aanwezigheid van een tracer in het lichaam in beeld worden gebracht.

De bekendste radio-isotoop voor diagnostische doeleinden is Technetium-99m (^{99m}Tc). ^{99m}Tc wordt jaarlijks toegepast in meer dan 35 miljoen diagnostische onderzoeken wereldwijd, waarvan ongeveer 7 miljoen in Europa.⁸ Het gaat daarbij om diagnostisch onderzoek met SPECT (zie ook het kader over Technetium-99m). Kernreactoren zijn een zeer belangrijke leverancier van Molybdeen-99 (^{99}Mo), dat de moederisotoop is van het veelgebruikte ^{99m}Tc . Daarnaast produceren kernreactoren ook andere radio-isotopen die van belang zijn voor de nucleaire geneeskunde, zoals Strontium (^{90}Sr), Yttrium (^{90}Y), Jodium (^{125}I , ^{131}I), Xenon (^{133}Xe), Samarium (^{153}Sm), Holmium (^{166}Ho), Erbium (^{169}Er), Lutetium (^{177}Lu), Rений (^{186}Re , ^{188}Re) en Iridium (^{192}Ir). Deze isotopen worden in vergelijking met $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ minder geproduceerd.

Deeltjesversnellers (cyclotrons) kunnen eveneens radio-isotopen produceren, maar kunnen niet hetzelfde palet aan isotopen leveren als een reactor. (zie ook het kader in paragraaf 4.3 over

⁷ <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-medicine.aspx>

⁸ <http://world-nuclear.org/info/inf55.html>

alternatieve productiemethoden van Molybdeen-99) Vaak gaat het bij cyclotronproductie om 'neutronen-arme' radionucliden, die instabiel zijn en zogenaamde annihilatiestraling produceren die gebruikt wordt voor positronenemissietomografie (PET). Bekende isotopen die met behulp van een cyclotron geproduceerd worden zijn Zuurstof (^{15}O), Fluor (^{18}F), Jodium (^{123}I , ^{124}I), Koolstof (^{11}C), Stikstof (^{13}N), Zirconium (^{89}Zr), Gallium (^{68}Ga), en Rubidium (^{82}Rb).

Technethium-99m

Technethium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) is een metastabiele radio-isotoop met een halfwaardetijd van 6 uur. Daarbij komt gammastraling vrij die wordt gebruikt als tracer in diagnostisch onderzoek, met name bij Single-Photon Emission Computed Tomography (SPECT). Door de korte halfwaardetijd van $^{99\text{m}}\text{Tc}$, is in 24 uur nagenoeg alle gammastraling afgegeven en is $^{99\text{m}}\text{Tc}$ vervallen in de stabiele (niet-radioactieve) isotoop ^{99}Tc . $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is een vervalproduct van Molybdeen-99 (^{99}Mo), dat verreweg de meest geproduceerde medische radio-isotoop is. ^{99}Mo heeft een halfwaardetijd van 66 uur. In die tijd vervalt de helft van het ^{99}Mo in $^{99\text{m}}\text{Tc}$. ^{99}Mo wordt daarmee de precursor van $^{99\text{m}}\text{Tc}$ genoemd en is doorgaans de medische isotoop die met behulp van een kernreactie in een kernreactor geproduceerd wordt. Door de lange halfwaardetijd van ^{99}Mo hoeft er in de praktijk maar eenmaal per week aanlevering van de precursor plaats te vinden aan ziekenhuizen en kan ^{99}Mo over grote afstanden vervoerd worden.

Afspraken over levering Mo-99

De markt voor medische isotopen is internationaal. Afnemers kunnen de isotopen in principe op de wereldmarkt kopen en zijn niet gebonden aan een specifieke leverancier. Het Mo-99 van de HFR wordt onder andere verkocht aan het Institut des Radioéléments (IRE) en Mallinckrodt Medical. Die leveren de isotopen voornamelijk aan de Europese markt, maar ook aan de Verenigde Staten. Er zijn geen internationale afspraken die levering van isotopen voor bepaalde landen zekerstelt. Wel zijn er enkele landen, zoals Japan, die al hun isotopen centraal inkopen aan de hand van contracten met de radiofarmaceutische industrie. In geval van krapte hanteren de radiofarmaceuten een 'fair share'-uitgangspunt voor de verdeling van isotopen over hun klanten in de verschillende landen.

In Figuur 7 is de nucleaire waardeketen in Nederland voor dit domein weergegeven. Het domein heeft betrekking op alle activiteiten binnen de keten, met uitzondering van ontginnen. De organisaties die actief zijn bij elke activiteit staan weergegeven. Met name op het gebied van omzetten en toepassen zijn veel organisaties werkzaam. Bij het omzetten gaat het voornamelijk om reactoren (HFR en in de toekomst mogelijk Pallas), cyclotrons (doorgaans bij de UMC's, maar ook bij het ziekenhuis in Alkmaar en bij de TU Eindhoven) en samenwerkingen (DIVA). De nabewerking van de geproduceerde isotopen vanuit kernreactoren vindt plaats bij Mallinckrodt ter voorbereiding voor afname door ziekenhuizen. Vervolgens worden de medische isotopen (afkomstig uit een reactor of cyclotron) veelal in de academische centra verwerkt tot de eigenlijke tracers. Daarvoor zijn in diverse centra specifieke units voor de bewerking van radioactieve stoffen operationeel.

Voor diagnostische doeleinden worden de tracers in zeer lage (speur)doses toegediend aan patiënten. De tracer verspreidt zich in het lichaam en maakt (afhankelijk van het type tracer) biologische processen en weefsels in het lichaam zichtbaar. De nucleaire geneeskunde maakt hierbij gebruik van gammacamera's, SPECT en PET camera's. Zo kan bijvoorbeeld de doorbloeding van het hart of de aanwezigheid van tumorweefsel zichtbaar worden gemaakt.

Radiotherapie daarentegen is gebaseerd op het vernietigen van weefsel door straling. Zo kan bijvoorbeeld een schildkliertumor behandeld worden door ^{131}I , wat na toediening alleen opgenomen wordt door schildkliercellen. Vaak is niet-gerichte (systemische) toediening echter niet geëigend in verband met het risico van schade aan gezond weefsel. Een methodiek om zeer lokaal straling toe te passen is de zogenaamde brachytherapie. Bij brachytherapie worden radio-isotopen (bijvoorbeeld ^{125}I , ^{103}Pa) als zogenaamde kleine radioactieve zaadjes bijvoorbeeld in of zeer nabij een tumor aangebracht en wordt de radioactiviteit als stralingstherapie toegepast. Deze therapie wordt veel gebruikt voor de

behandeling van onder andere prostaat-, schildklier-, hoofd- en borstkanker. Op dit terrein is bijvoorbeeld het bedrijf Elekta Brachytherapy actief, dat apparatuur maakt voor brachytherapie.

Nederland is een belangrijke producent van medische radio-isotopen. Daarmee wordt een deel van de kosten voor de nucleaire kennisinfrastructuur gefinancierd: met name NRG, de HFR en in de toekomst waarschijnlijk ook Pallas.⁹ Het ⁹⁹Mo wordt in Nederland geproduceerd door NRG in de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten. De HFR is wereldwijd één van de vijf belangrijkste producenten van deze essentiële medische isotoop. Naast de HFR reactor in Petten zijn dat de NRU reactor in Canada, de BR-2 reactor in België, de SAFARI reactor in Zuid-Afrika en de OPAL reactor in Australië.¹⁰ Voor Europa levert de HFR in Petten ongeveer 70% van de vraag naar ⁹⁹Mo. Wereldwijd voorziet de HFR in 30% van de vraag naar ⁹⁹Mo. Onder de verantwoordelijkheid van Mallinckrodt Medical wordt het ⁹⁹Mo voorbereid voor afname door ziekenhuizen overal in de wereld, waar het toegepast wordt in de nucleaire geneeskunde.

Naast de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten zijn er in Nederland diverse cyclotrons aanwezig voor productie van deze medische isotopen. Een daarvan staat eveneens in Petten en is eigendom van Mallinckrodt. In Groningen staat het Kernfysisch Versneller Instituut dat initieel isotopen leverde voor het Academisch Ziekenhuis in Groningen. Sinds 1991 kan de afdeling Nucleaire Geneeskunde van het Universitair Medisch Centrum Groningen als zelfstandige eenheid werken. Het heeft de beschikking over een eigen cyclotron. Het VU Medisch Centrum is ook een centrum dat al decennia beschikt over een eigen cyclotron. Daarnaast is CyclotronBV opgericht met momenteel 3 cyclotrons ter beschikking. In Eindhoven had Philips al in 1961 een cyclotron in gebruik. Momenteel staat er in Eindhoven een cyclotron uit 2003 die ingezet wordt voor levering van medische isotopen en onderzoek. In Alkmaar (MCA) en in Nijmegen (Radboud Translational Medicine) zijn sinds respectievelijk 2013 en 2015 cyclotrons in bedrijf; in Rotterdam (Cyclotron Rotterdam) en Delft (HollandPTC) zijn cyclotrons in aanbouw.

Nederlandse onderzoekers spelen een belangrijke rol in internationaal nucleair geneeskundig onderzoek. Het onderzoek binnen de nucleaire geneeskunde richt zich met name op de ontwikkeling en validatie van nieuwe moleculaire imaging tracers en applicaties bedoeld voor diagnostische en therapeutische doeleinden. Hierbij gaat het onder andere om het ontwikkelen van radiofarmaca voor wetenschappelijke studies in dieren (preklinisch onderzoek) en in mensen (klinische studies). Voor diagnostische doeleinden betreft het vaak het in beeld brengen van specifieke kenmerken van tumoren of pathologische processen (bijvoorbeeld in geval van psychiatrische ziekten) of verschijnselen (bijvoorbeeld aderverkalking). Voor therapeutische toepassing gaat het veelal om het ontwikkelen van radiofarmaca die specifiek en selectief het tumorweefsel beschadigen (bestraling). Deze onderzoeksactiviteiten zijn heel multidisciplinair van aard en raken een scala aan medisch specialismen, zoals de oncologie, psychiatrie, neurologie, cardiologie en urologie. Het onderzoek van NRG op dit gebied richt zich met name op het optimaliseren van productieprocessen van bestaande radio-isotopen.

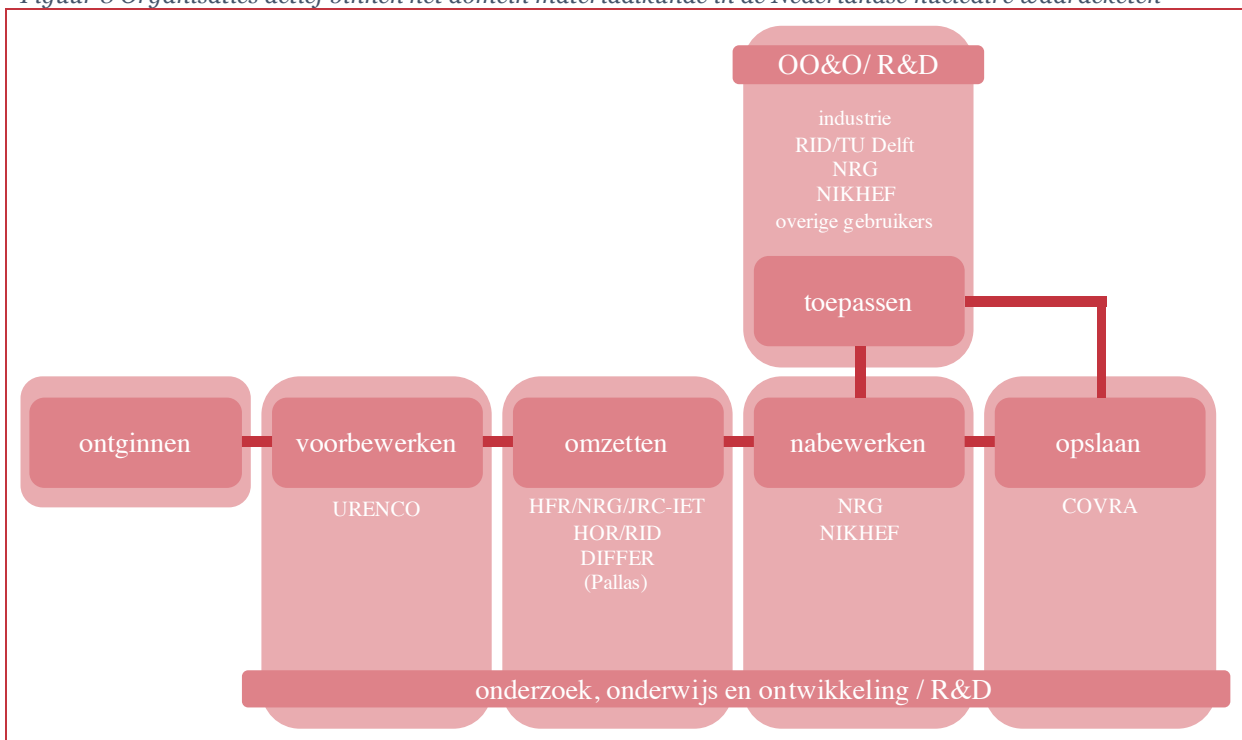
Nederland bekleedt diverse vooraanstaande posities op het gebied van de nucleaire geneeskunde. Dit wordt bijvoorbeeld geïllustreerd door het feit dat Nederlanders belangrijke posities bekleden op Europees niveau; Nederland heeft een leidende rol bij het schrijven van Europese richtlijnen voor de standaardisatie van PET imaging in Europa en is actief bij de European Organisation for Research and Treatment of Cancer (EORTC).

⁹ In internationale context ijvert Nederland voor Full Cost Recovery (FCR), waarbij de volledige kosten van de medische isotopen worden doorberekend aan de afnemers in plaats van ze te zien als "bijproduct" van een onderzoeksreactor. Volgens de OECD NEA leidt dit tot lange-termijn leveringszekerheid omdat de productie van de isotopen dan niet meer afhankelijk is van gesubsidieerde activiteiten.

¹⁰ Euratom Supply Agency 2015

2.2.2 Domein materiaalkunde

Figuur 8 Organisaties actief binnen het domein materiaalkunde in de Nederlandse nucleaire waardeketen



Technopolis Group (2016)

Het domein materiaalkunde heeft binnen de nucleaire kennisinfrastructuur betrekking op onderzoek naar en productie van (nieuwe) materialen. Nucleaire technologie wordt gebruikt om materialen te bewerken, te karakteriseren en te testen. Het gaat daarbij om het gebruik van nucleonen (kerndeeltjes, voornamelijk neutronen) en ioniserende straling. Centraal staat in dit principe de interactie tussen een materiaal en deeltjes of straling. De materialen die met nucleaire technologie onderzocht worden, zijn meestal vaste stoffen.

Ioniserende straling en andere deeltjes met een hoge energie kunnen de vaste stof beïnvloeden (interactie). Sterke interacties kunnen worden gebruikt om materiaaleigenschappen te beïnvloeden, dat gebeurt bijvoorbeeld bij doting (introduceren van een ander atoom in het kristalrooster van de vaste stof) waardoor de elektrische geleiding van het materiaal verandert. Zwakke interacties kunnen worden gebruikt om materialen te karakteriseren, bijvoorbeeld met neutronendiffractie (laag-energetische neutronen worden onder een hoek op het materiaal 'gereflecteerd') dat informatie kan geven over de magnetische eigenschappen van het materiaal.

In Figuur 8 staat de Nederlandse nucleaire waardeketen voor het domein materiaalkunde weergegeven. Nederlandse organisaties binnen de nucleaire kennisinfrastructuur zijn actief in alle activiteiten binnen de waardeketen, behalve bij ontginnen. De meeste spelers zijn actief binnen de activiteiten omzetten en toepassen. Hier voeren NRG en JRC-IET onderzoek uit binnen de HFR en de TU Delft (RID) binnen de HOR. Pallas staat hier ook weergegeven, aangezien het materiaalkundige onderzoeksactiviteiten als een toekomstige optie wordt beschouwd. Toepassingen vinden plaats in de industrie, maar ook bij het verdere toegepaste onderzoek van kennisinstellingen als NRG, RID/TU Delft en het NIKHEF. Urenco en COVRA staan genoemd, omdat zij respectievelijk een rol spelen bij het verrijken van (stabiele) isotopen voor het onderzoek (voorbewerken) en bij de verwerking van radioactief afval (opslaan). De nabewerking betreft o.a. de verdere bewerking en analyse van de materialen uit de reactoren in *hot cells*.

Een groot deel van het onderzoek binnen de nucleaire kennisinfrastructuur vindt plaats binnen het domein materiaalkunde. Het nucleaire onderzoek met materialen vindt onder meer plaats bij het Reactorinstituut Delft (RID), NRG en JRC-IET. Daarbij richt NRG zich op toegepast onderzoek en de beide andere organisaties meer op fundamenteel onderzoek. Voor het onderzoek wordt er gebruik gemaakt van de HOR en de HFR. Bij URENCO vindt er eveneens materiaalkundig R&D plaats op het gebied van isotopen; zij houden zich onder andere bezig met de verrijking van materialen, zoals stabiele isotopen. Pallas is weliswaar nog een project, maar is ook voornemens om in de geplande Pallas-reactor materiaalkundig onderzoek te doen. Dit zal hoogstwaarschijnlijk een voortzetting zijn in de lijn van het onderzoek in de HFR.

De onderzoeksthema's waarin genoemde spelers actief zijn binnen het domein materiaalkunde zijn:

- **Materialen onder extreme omstandigheden:** hierbij gaat het om onderzoek naar materialen die bestand moeten zijn tegen omstandigheden als zeer hoge temperaturen, extreme temperatuursveranderingen, corrosieve omgeving, neutronenstraling etc. Deze materialen kunnen onder andere toegepast worden in kern(fusie)reactoren, zoals het ITER in Frankrijk. Het onderzoek vindt bijvoorbeeld plaats aan de legering koperchroomzirconium dat men wil gebruiken voor de wanden van fusiereactoren.¹¹ In de HFR onderzoekt men de thermische eigenschappen van dit materiaal onder extreme omstandigheden.¹²
- **Diverse materiaalanalyses:** zowel in de HFR (JRC-IET) als in de HOR (RID/TU Delft) worden diverse analyses aan materialen uitgevoerd met behulp van de neutronen en de ioniserende straling die in de reactor vrijkomen. Dit gebeurt deels voor eigen onderzoek en deels voor externen. Met behulp van die analyses kunnen materialen gekarakteriseerd worden. Voorbeelden zijn^{13,14}: metingen van de *strain* in vaste stoffen, magnetisme, neutronendiffractiemetingen, activeringsanalyses en neutronenradiografie. Toepassingen vinden plaats op het gebied van lithiumbatterijen, waterstofopslag, zonnecellen, voedsel, biologische materialen (bacteriën en colloïden) en granulaire materialen.¹⁴ De HOR in Delft heeft een uitgebreid instrumentarium voor het karakteriseren van allerlei materialen op diverse eigenschappen voor fundamenteel materiaalkundig onderzoek. De onderzoeksvelden in de materiaalkunde die bediend worden met de analysefaciliteiten in de HOR zijn zeer breed: van supergeleiding en magnetisme tot kwantumcomputing en voedseltechnologie.
- **Transmutatieonderzoek van radioactieve materialen en radioactief afval:** dit onderzoek richt zich op het efficiënter gebruik maken en recyclen van (nieuwe) splijtstoffen in reactoren en het verminderen van radioactief afval door deze opnieuw te bestralen met neutronen in een reactor. Transmutatie is het transformeren van een radioactief element in een ander isotoop of element door deze bloot te stellen aan hoogenergetische deeltjes (een nucleaire reactie), zoals de neutronen in een kernreactor.¹¹ Hierdoor kunnen radioactieve elementen met een lange halfwaardetijd in splijtstoffen (zoals americium- en plutoniumisotopen) omgezet worden in radioactieve elementen met een kortere halfwaardetijd of door niet-radioactieve elementen. Daardoor neemt de hoeveelheid langlevend radioactief afval af.
- **Materialen voor reactoren:** dit toegepaste onderzoek richt zich bijvoorbeeld op het begrijpen van de degradatie van materialen onder invloed van ioniserende straling. Hierbij wordt onderzoek gedaan aan materialen die in reactoren worden toegepast, specifiek grafiet moderatoren en rvs-reactorvaten.¹¹ Het doel van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in de verouderingsmechanismen en de eigenschappen van materialen op de lange termijn. Mogelijk kan die kennis uiteindelijk bijdragen aan het verminderen van de degradatie van deze reactormaterialen, waardoor verschillende onderdelen van reactoren langer zouden kunnen meegaan (levensduurverlening).

¹¹ NRG (2015). Onderzoeksjaarverslag 2014. Petten: NRG

¹² Jonker, B.P., S. Kamer, J. Van der Laan, S. Wikman (2010). *Design challenges of the ITER first wall experiment 'POSITIFE' in the HFR, Petten*. Abstract. 26th Symposium on Fusion Technology. Porto.

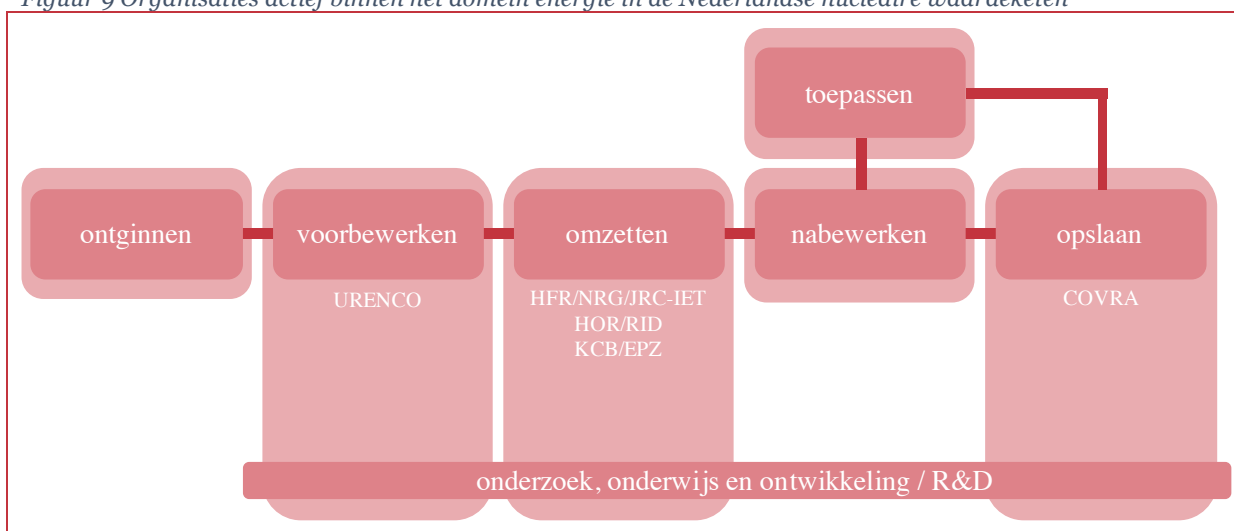
¹³ Nucleair Nederland (2016). *Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland*. Position paper.

¹⁴ <http://www.tnw.tudelft.nl/en/cooperation/facilities/reactor-instituut-delft/research/>

Buiten deze onderzoeksthema's vindt er binnen dit domein van de nucleaire kennisinfrastructuur ook beperkte productie plaats van gedoteerde halfgeleiders. In de HFR worden halfgeleiders gedoteerd via neutrontransmutatie voor onderzoek en commerciële toepassingen, bijvoorbeeld (n-type) dotering van silicium met fosfor. Hierbij ontstaat een zeer uniforme distributie van het doteringselement in de halfgeleider, wat nodig is voor speciale toepassingen, bijvoorbeeld in hoogvermogen elektronica.¹⁵

2.2.3 Domein energie

Figuur 9 Organisaties actief binnen het domein energie in de Nederlandse nucleaire waardeketen



Technopolis Group (2016)

Het domein energie heeft binnen de nucleaire kennisinfrastructuur betrekking op onderzoek naar en productie van kernenergie. Kernenergie wordt opgewekt in kerncentrales door middel van kernsplijting. Bij dit proces komt energie vrij in de vorm van warmte. Daarmee wordt stoom opgewekt die met behulp van turbines wordt omgezet in elektrische energie. Deze elektrische energie wordt direct geleverd aan het elektriciteitsnet.

In Figuur 9 staat de waardeketen weergegeven voor het domein energie. In Nederland heeft de nucleaire kennisinfrastructuur rondom energie voornamelijk betrekking op de activiteiten voorbereken, omzetten en opslaan. De centrale activiteit is echter het omzetten. Als producent is EPZ hierin actief met de Kerncentrale Borssele (KCB). Wat betreft onderzoek zijn het RID (HOR) en NRG en JRC-IET (HFR) actief binnen dit domein. Voor het opwekken van kernenergie is ook de voorberekening belangrijk: hierin is Urenco actief met het verrijken van uranium als brandstof voor kerncentrales. Wat betreft de opslag van het radioactieve afval uit kerncentrales en het afval als resultaat van onderzoek binnen dit domein, vervult het COVRA een rol als afvalverwerker.

Op het gebied van de productie van kernenergie is Nederland geen grote speler: Nederland heeft slechts één kerncentrale, in het Zeeuwse Borssele. De Kerncentrale Borssele (KCB) is in handen van Elektriciteits-Productiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ). De KCB mag – onder strenge veiligheidseisen – tot uiterlijk eind 2033 in gebruik blijven.

Het onderzoek naar kernenergie in Nederland is omvangrijker. Zowel NRG als het Reactorinstituut Delft (RID) houden zich bezig met onderzoek dat gerelateerd is aan kernenergie. Het onderzoek heeft voornamelijk betrekking op de processen binnen kerncentrales. De onderzoeksthema's waaraan zij werken binnen dit domein zijn:

¹⁵ IAEA (2012). *Neutron transmutation doping of silicon at research reactors*. Vienna: IAEA.

- **Thermohydraulica van reactoren:** dit onderzoek richt zich op de rol van water in kerncentrales, als koelmiddel, moderator en energiedrager in de vorm van stoom. Het onderzoek maakt veelal gebruik van numerieke modellen en richt zich op huidige en nieuwe typen reactoren.¹⁶
- **Generatie-IV-reactoren:** onderzoek naar de toekomstige generatie reactoren, verwacht vanaf 2030, die door het gebruik van andere splijtstoffen en procedés goedkoper, veiliger en met minder afval kernenergie kunnen produceren. Deze reactoren zouden tevens voldoen aan de non-proliferatiedoelstellingen. Onder deze generatie-IV-reactoren vallen o.a. gesmoltenzoutreactoren, thoriumreactoren, superkritische reactoren en diverse soorten snelle reactoren.^{17,18}
- **Modelleren en simuleren van reactorfysica:** binnen dit onderzoek gebruikt men computermodellen en -simulaties om de complexe fysica binnen reactoren te begrijpen, bijvoorbeeld onder bepaalde extreme omstandigheden die je niet zomaar in de praktijk kunt testen. Zowel subkritische reactorsystemen – reactorsystemen waarbij de nucleaire reactie gecontroleerd in gang wordt gehouden door toevoeging van externe neutronen¹⁹ – als hoe straling en deeltjes zich gedragen in reactoren en de materialen daaromheen worden onderzocht met modellen en simulaties.²⁰
- **Nucleaire brandstoffen:** het onderzoek naar nucleaire brandstoffen richt zich op het testen en kwalificeren van brandstoffen voor kerncentrales. Het gaat hier om toegepast onderzoek naar nieuwe, innovatieve en verbetering van bestaande brandstoffen.²¹

¹⁶ <http://www.nera.rst.tudelft.nl/en/research-fields/nuclear-reactor-thermal-hydraulics/#c132314>

¹⁷ <http://www.nera.rst.tudelft.nl/en/research-fields/innovative-reactors-and-fuel-cycles/>

¹⁸ Kloosterman, J.L. (2013). *Nuclear Energy 4.0*. Kroninglezing. VvTP: 15 mei 2013

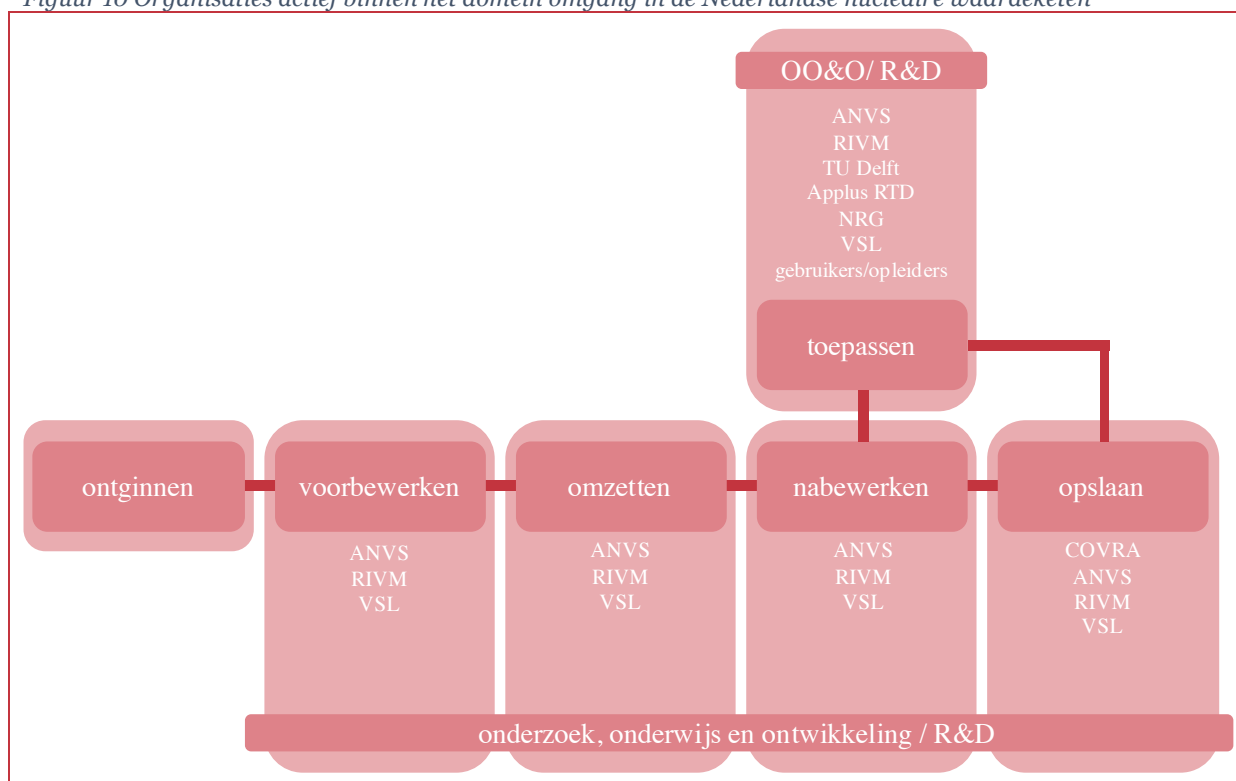
¹⁹ Een voorbeeld van een subkritische reactor is de MYRRHA-reactor die men in België wil bouwen (zie ook Bijlage C.1), hierbij worden de neutronen extern geleverd door een deeltjesversneller, waardoor de subkritische kernreactie in stand gehouden wordt en de reactor operationeel blijft.

²⁰ <http://www.nera.rst.tudelft.nl/en/research-fields/computational-methods-in-reactor-physics/#c104492>

²¹ NRG (2015). *Onderzoeksjaarsverslag 2014*. Petten: NRG

2.2.4 Domein omgang met nucleaire faciliteiten en materialen

Figuur 10 Organisaties actief binnen het domein omgang in de Nederlandse nucleaire waardeketen



Technopolis Group (2016)

De omgang met radioactieve materialen vereist, onafhankelijk van de economische sector, een reeks aan instituties (zowel organisaties als regelingen) die de veiligheid van gebruikers, bevolking en milieu waarborgen. Zoals we aangeven in het volgende hoofdstuk vloeien veel van de bestaande wet- en regelgeving en bijbehorende organisaties voort uit verplichtingen in internationale verdragen. Zelfs zonder de internationale verplichtingen zou echter een bepaalde vorm van controle en het geven van richtlijnen van algemeen belang zijn. Puur het bezitten van een nucleaire infrastructuur vereist dus 'ondersteunende' infrastructuur om een gecontroleerde en veilige omgang te waarborgen. In dit domein staan vraagstukken centraal als:

- Wat zijn, in normale situaties, de risico's van bepaalde stralingstoepassingen en hoe kunnen we die naar alle redelijkheid beperken?
- Wat is de kans dat er een incident plaatsvindt, en wat zijn daarvan de gevolgen?
- Hoe kunnen we misbruik van radioactieve / nucleaire stoffen tegengaan?
- Met welke maatregelen kunnen we ongewenste situaties het best mitigeren?
- Hoe reageert de maatschappij op de situatie en op al dan niet te nemen maatregelen?

Voor de beantwoording van deze vragen is een breed scala aan disciplines noodzakelijk, onder meer: dispersie van stoffen door water en lucht, radio-ecologie, radiobiologie, risicoschatting, stralingsbescherming, nucleaire veiligheid en 'nuclear forensics'.²²

²² Daarnaast is het van belang om te weten hoe de maatschappij de stralingsrisico's percipieert en hoe daar het best mee kan worden omgegaan. Dat vereist kennis van onderzoeksdisciplines zoals risicoperceptie, risicocommunicatie en groepsgedrag.

In Figuur 10 is de nucleaire waardeketen in Nederland weergegeven voor het domein omgang, met daarin de organisaties die per activiteit actief zijn. Aangezien omgang een relevant aspect is in de gehele waardeketen staan de organisaties dan ook bijna bij elke activiteit, met uitzondering van ontginnen. De belangrijkste organisaties binnen het domein omgang worden hieronder nader toegelicht. Bij het toepassen worden ook nog de TU Delft en Applus RTD genoemd. De TU Delft speelt een belangrijke rol bij het opleiden van mensen binnen de nucleaire kennisinfrastructuur. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om het stralingsveiligheid en stralingshygiëne. Ook een aantal andere kennisinstellingen verzorgen onderwijs op dit gebied.²³ Applus RTD is bijvoorbeeld een commerciële dienstverlener op het gebied van stralingsbescherming, radiografie en overige metingen en inspecties – een deel gebaseerd op nucleaire technologie.

Vanuit wet- en regelgevingsoogpunt is de belangrijkste organisatie in het domein omgang de **Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS)**. Volgens de Kernenergiewet heeft de ANVS taken en bevoegdheden op “het terrein van nucleaire veiligheid en stralingsbescherming, de daarmee samenhangende crisisvoorbereiding, alsmede beveiliging en waarborgen”²⁴. De taken van de ANVS zijn²⁵:

- het toezicht houden op de naleving van de Kernenergiewet en de bijbehorende regelgeving;
- het evalueren en voorbereiden van en adviseren over beleid, wet- en regelgeving op basis van haar specifieke deskundigheid;
- het geven van voorlichting op het genoemde terrein van de ANVS;
- het onderhouden van relaties met relevante internationale organisaties en het deelnemen aan activiteiten daarvan;
- het onderhouden van relaties met andere vergelijkbare buitenlandse autoriteiten en organisaties en het samenwerken daarmee;
- het met kennis ondersteunen van nationale organisaties;
- het doen van onderzoek ten behoeve van de uitvoering van haar taken.

Vanwege deze taken ziet de ANVS onder andere toe op de nucleaire veiligheid van nucleaire inrichtingen, het transport van radioactieve stoffen, de omgang met radioactief afval en het naleven van vergunningsvoorwaarden. Daarnaast controleert de ANVS ook de beveiliging van radioactieve materialen en nucleaire installaties. Op het gebied van stralingsbescherming ziet de ANVS toe op de bescherming van mens en milieu tegen mogelijk schadelijke effecten van blootstelling aan ioniserende straling en is het verantwoordelijk voor de crisisvoorbereiding bij ongevallen en radiologische noodsituaties.

Het **Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)**, divisie Milieu en Veiligheid, heeft het Centrum Veiligheid waar metingen, modelberekeningen, literatuuronderzoek naar en risicoanalyses van ioniserende straling is ondergebracht. Het instituut vertaalt onderzoeksgegevens zodanig dat deze toegepast kunnen worden voor beleidsontwikkeling, handhaving en crisisbestrijding, onder andere ter ondersteuning van de ANVS, de inspecties van het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) en de Inspectie voor de Gezondheidszorg (IGZ) en de Nationale Coördinator Terrorismebestrijding en Veiligheid (NCTV).

Het RIVM beheert een nationaal meetnet voor radioactiviteit, lokale meetnetten rond enkele nucleaire installaties, enkele radiologische meetwagens, een radionuclidenlaboratorium en

²³ Volgens de website van de NVS zijn dit: TU Delft/NCSV, AMC, PAO Heyendaal, Boerhaave/IRS, Universiteit Maastricht, NRG, NKI-AVL, VUmc, Applus RTD, Dentalbestpractice, ACTA, UM/azM, Elsevier Opleidingen, TU Eindhoven, Rijksuniversiteit Groningen, UMC Utrecht en Post Academisch Onderwijs Tandheelkunde. Het betreft hier cursussen die verschillen van niveau, doelgroep en onderwerp.

²⁴ Artikel 3, derde lid van de Kernenergiewet, zoals van kracht in juli 2016

²⁵ Memorie van toelichting op de Wijziging van de Kernenergiewet in verband met de instelling van de Autoriteit Nucleaire veiligheid en Stralingsbescherming. Kamerstuk 34 219, nr. 3, 2015

bemonsteringsinstallaties voor lucht(stof) en depositie. Daarnaast beheert en onderhoudt het RIVM een decision-support-systeem (modellen, informatiesystemen, robuuste ICT-voorzieningen etc.) dat gebruikt kan worden bij ernstige stralingsongevallen.

Aan het eind van de nucleaire waardeketen in Nederland staat de **Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA)**, de enige organisatie in Nederland die radioactief afval mag innemen. Alle bedrijven in Nederland die een vergunning op grond van de kernenergiewet hebben om met radioactieve stoffen te werken, zijn verplicht hun radioactief afval aan COVRA aan te bieden. Om de zorgtaak voor het radioactieve afval te kunnen uitvoeren heeft COVRA een opslag- en verwerkingsfaciliteit gerealiseerd in Zeeland op het haventerrein Vlissingen-Oost in de gemeente Borssele. De totale hoeveelheid radioactief afval die naar verwachting de komende honderd jaar ontstaat, kan ruimschoots worden opgeslagen op het COVRA-terrein, dat zo'n 20 hectare groot is.

De COVRA heeft als hoofdtaken:

- het inzamelen, verwerken en opslaan van alle categorieën radioactief afval;
- het reserveren en beheren van financiële middelen voor de lange termijn opslag;
- onderzoek coördineren naar eindberging;
- voorbereiden van eindberging inclusief reserveren en beheren van financiële middelen voor de uitvoering;
- kenniscentrum zijn voor overheid, bedrijfsleven en samenleving inclusief educatieve aspecten;
- actief participeren in diverse internationale verbanden op het terrein van radioactief afvalmanagement.

De **Nuclear Research and consultancy Group (NRG)** levert ondersteunende diensten op het gebied van onder meer stralingsbescherming en nucleaire veiligheid. Daarnaast voert NRG enkele wettelijke taken uit op het gebied van de stralingsbescherming, zoals de dosismetingen en dosisregistratie van radiologische werkers in Nederland.

VSL, het nationale metrologisch instituut van Nederland, speelt als beheerder van standaarden en meetmethodes een bescheiden, maar belangrijke rol in het kalibreren van meetapparatuur voor straling. Deze meetapparatuur bevindt zich in de verschillende faciliteiten, van ziekenhuizen tot de kerncentrale Borssele en de HFR te Petten. Ook beheert VSL de standaard voor dosimetrische diensten van NRG en referentieactiviteit van ampullen in de nucleaire geneeskunde.

2.3 Toegevoegde waarde van de nucleaire kennisinfrastructuur

In ons onderzoek naar de verschillende wetenschappelijke entiteiten hebben wij gepoogd inzicht te krijgen in de toegevoegde waarde van de kennisinfrastructuur in termen van werknemers (FTE's) en financiën. Deze informatie bleek slechts beperkt beschikbaar of moeilijk specifiek aan de nucleaire kennisinfrastructuur toe te wijzen. Een aantal entiteiten (o.a. het Reactorinstituut Delft en JRC-IET) valt onder grotere organisaties die zowel financiële cijfers als aantallen werknemers geconsolideerd hebben, zodat deze moeilijk per activiteit toe te kennen zijn.

Wel kunnen we een range aangeven voor het aantal FTE dat werkzaam is bij de entiteiten van de nucleaire kennisinfrastructuur zoals hierboven beschreven. Op basis van onze database komen we uit op meer dan 3100 FTE die werkzaam is binnen de nucleaire kennisinfrastructuur. Nucleair Nederland gaat uit van zo'n 1500 FTE. Ons cijfer ligt dus aanzienlijk hoger, maar dat komt hoogstwaarschijnlijk door een andere afbakening van organisaties binnen de nucleaire kennisinfrastructuur²⁶. Het lijkt aannemelijk dat er rond de 3100 FTE werkzaam is in de nucleaire kennisinfrastructuur. In dit cijfer zit

²⁶ Wanneer we het aantal FTE van de organisaties binnen Nucleair Nederland meenemen, dan komen we eveneens op een getal dat in de buurt van de 1500 FTE ligt. Binnen onze afbakening vallen er echter meer organisaties onder de nucleaire kennisinfrastructuur dan degenen die verenigd zijn in Nucleair Nederland.

niet de werkgelegenheid van de ring om de nucleaire kennisinfrastructuur heen (denk aan toeleveranciers van materialen, vervoerders, gebruikers in de industrie, medisch specialisten, etc.) en daarnaast ontbreken data van een aantal – voornamelijk kleine – organisaties.

Er is dus een zeker economisch belang gemoeid met de huidige nucleaire kennisinfrastructuur in de zin van hoogwaardige werkgelegenheid voor directbetrokkenen. De nucleaire kennisinfrastructuur brengt werkgelegenheid en daarmee economische groei naar regio's waar de werkgelegenheid beperkt is. De organisaties binnen de nucleaire kennisinfrastructuur zitten verspreid door het land met enkele hotspots buiten de Randstad (Petten, Almelo, Borssele). Het zijn bovendien allemaal organisaties die hoogopgeleiden voor de regio behouden. URENCO en ETC tezamen zorgt voor meer dan 300 FTE in Twente – een regio die de laatste jaren kampt met een relatief hoge werkloosheid.²⁷ NRG, Mallinckrodt en JRC-IET zorgen met de 'nucleaire campus' in Petten voor veel banen in de gehele regio (meer dan 700 FTE). Het vormt een van de grotere werkgevers in het noorden van Noord-Holland. Evenzo zorgen EPZ en COVRA voor aanzienlijk wat werkgelegenheid in Zeeland (meer dan 550 FTE). In hoeverre de aanwezigheid van de kennisinfrastructuur ook (indirect) de werkgelegenheid en omzet van eindgebruikers van radioactieve materialen bevordert, valt moeilijk te zeggen en vereist micro-onderzoek bij een grote groep gebruikers.

We kunnen van de financiën eveneens slechts een schatting maken. Veel van deze informatie is niet openbaar en betrokken partijen wilden die ook niet altijd in het kader van deze studie beschikbaar stellen. We hebben van een beperkt aantal organisaties binnen de nucleaire kennisinfrastructuur financiële gegevens gekregen. Op basis van de gegevens die we wel hebben, kunnen we een schatting maken van de financiële omvang van de nucleaire kennisinfrastructuur.

In deze studie hebben we zo'n 20 organisaties in kaart gebracht die actief zijn binnen de nucleaire kennisinfrastructuur. Van iets minder dan de helft (negen organisaties) hebben we financiële gegevens ontvangen. De totale inkomsten van deze organisaties tellen op tot bijna 650 miljoen euro. Het overgrote deel van deze inkomsten (89%) is afkomstig uit omzet of financiering uit de derde geldstroom. Deze negen organisaties ontvangen relatief weinig middelen uit de eerste geldstroom (8%) en tweede geldstroom (3%).

Een voorzichtige schatting is dat de totale inkomsten binnen de nucleaire kennisinfrastructuur rond de 1 miljard euro zullen liggen. We gaan uit van een minimum van 800 miljoen euro en een maximum van 1,3 miljard euro. Deze schatting is gemaakt op basis van het feit dat we de totale inkomsten van (iets minder dan de helft) van de in kaart gebrachte organisaties kunnen bepalen. Bij deze helft zit ook Urenco die veel meer inkomsten heeft dan de overige organisaties waarvan de inkomsten zijn verkregen. In het maximum is Urenco meegenomen, in het minimum niet. Van Mallinckrodt hebben we geen gegevens over de inkomsten verkregen, dit is echter een grote commerciële organisatie ('s werelds grootste speler op het gebied van medische isotopen). Het is dan ook aannemelijk dat het minimum van 800 miljoen euro te laag is.²⁸ Daarmee lijkt de schatting van inkomsten rond de 1 miljard euro realistischer.

Daarnaast hebben we nader gekeken naar de kosten en baten van de Nederlandse overheid. Opbrengsten worden verkregen door het dividend dat URENCO via houdstermaatschappij UCN uitkeert aan de Nederlandse Staat (als één van de drie aandeelhouders). Onderstaande tabel geeft de Nederlandse opbrengsten uit het dividend van URENCO weer. De staat ontvangt in theorie ook dividend van COVRA, maar van 2009 tot 2014 bedroeg het dividend €0.²⁹

²⁷ <http://www.trouw.nl/tr/nl/4492/Nederland/article/detail/3716542/2014/08/11/Wie-helpt-de-Tukkers-aan-een-baan.dhtml>

²⁸ De activiteit in de waardeketen die Mallinckrodt uitvoert omtrent medische isotopen voegt meer waarde toe dan de stap waarin NRG actief is. De inkomsten uit omzet van NRG zal dus een aantal maal kleiner zijn dan de omzet van Mallinckrodt. Daarmee is het aannemelijk dat de omzet van Mallinckrodt in Nederland in dezelfde orde van grootte is als die van Urenco.

²⁹ Jaarverslag Beheer Staatsdeelnemingen 2014, Ministerie van Financiën, Oktober 2015

Tabel 2 Hoogte uitkering dividend URENCO aan de Nederlandse staat in M€

2010	2011	2012	2013	2014
30	30	90	112	113

Bron: Ministerie van Financiën

EPZ, die de kerncentrale in Borssele uitbaat, is via aandeelhouders DELTA en Energy Resources Holding in handen van gemeenten en provincies. De eventuele opbrengsten komen deels ten goede aan de maatschappij. In 2014 werd er bijvoorbeeld 1,8 miljoen euro dividend aan de aandeelhouders uitgekeerd.

Daar staan de nodige uitgaven tegenover. Het ministerie van Economische Zaken (EZ) geeft een onderzoekssubsidie aan NRG en middelen aan JRC als bijdrage voor de exploitatie van de Hoge Flux Reactor. In onderstaande tabel zijn de uitgaven opgenomen voor de periode 2011-2015.

Tabel 3 Overzicht structurele uitgaven aan nucleaire kennisinfrastructuur door ministerie van EZ in M€³⁰

	2011	2012	2013	2014	2015
Bijdrage JRC-IET	8,22	7,25	7,25	7,25	7,25
Onderzoekssubsidie NRG	9,72	9,39	8,11	8,14	7,50

Bron: Ministerie van Economische Zaken en NRG

Daarnaast heeft het ministerie van EZ een maximale lening van 82 miljoen euro ter beschikking gesteld voor het herstelplan van ECN en NRG. Van die maximale lening is op dit moment 35 miljoen ook daadwerkelijk uitgegeven. Het ministerie van EZ heeft samen met de provincie Noord-Holland eveneens een lening ter beschikking gesteld voor de Stichting Voorbereiding PALLAS. Beide overheden hebben daarvoor ieder een maximaal bedrag van 40 miljoen euro ter beschikking gesteld.³¹ Vanuit het ministerie is tot op heden een bedrag van 25,16 miljoen euro toegekend.

Verder is de Minister van Infrastructuur en Milieu (I&M) verantwoordelijk voor de ANVS en in de Memorie van Toelichting op de wet staat dat de Minister de ANVS van 'voldoende middelen' moet voorzien. Het budget van de ANVS bedroeg in 2016 27 miljoen euro. Dit budget wordt verdeeld over het 'programma begrotingsartikel' (5 miljoen euro) en 'het apparaatartikel' (bijna 7 miljoen euro). Dit laatste betreft de inbesteding van opdrachten aan RIVM en KNMI. Voor de jaren 2017 en verder verwacht de ANVS bijna 11 miljoen euro per jaar te kunnen besteden.

Naast deze genoemde investeringen worden er via het ministerie van OCW middelen toegekend aan de universiteiten en universitair medische centra voor het doen van onderzoek. De exacte omvang van de OCW-middelen voor de nucleaire kennisinfrastructuur is niet precies te achterhalen. Het ministerie doet in aanvulling op de basisfinanciering van universiteiten een specifieke bijdrage voor de onderzoeksreactor in Delft. De lumpsum financiering van het ministerie van OCW, die binnen de TU Delft aan RID-HOR is toegekend, bedroeg over de periode 2011-2015 ruim 66 miljoen euro. In 2012 heeft het Kabinet besloten om 38 miljoen euro in het Reactor Instituut in Delft te investeren (via het programma OYSTER: *Optimized Yield - for Science, Technology & Education - of Radiation*). Deze middelen worden gebruikt om de reactor uit te rusten met een koude bron en voor de ontwikkeling van innovatieve onderzoeksinstrumenten.³²

³⁰ In deze tabel zijn alleen de structurele uitgaven van het ministerie van EZ aan de nucleaire kennisinfrastructuur opgenomen, niet-structurele uitgaven en leningen (zoals die aan PALLAS en ECN-NRG) zijn hierin niet opgenomen. Ook de structurele uitgaven van OCW aan bijvoorbeeld het RID-HOR zijn hierin niet opgenomen. Dergelijke uitgaven staan beschreven in de tekst van deze paragraaf.

³¹ Bestuursakkoord financiering nieuwe onderzoeksreactor in Petten, 2012.

³² Website TU Delft: <http://rid.tudelft.nl/oyster>

Ten slotte verwerven de diverse organisaties in de nucleaire kennisinfrastructuur Nationale en Europese subsidies (onder meer via NWO, STW en uit Horizon 2020, het Europese Kaderprogramma). Er zijn geen data beschikbaar over de precieze omvang van de Nationale en Europese subsidies richting de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur.

3 Internationale rol en verplichtingen

3.1 Overzicht internationale verdragen en daarbij horende verplichtingen

Nederland heeft zich in de loop der tijd op nucleair gebied verbonden aan heel veel verschillende internationale verdragen. De verdragen zijn onder te verdelen in verschillende thema's:

Europese samenwerking kernenergie

Een belangrijk verdrag op het terrein van kernenergie is het EURATOM-verdrag (1957). Verschillende Europese landen, waaronder Nederland, richtten de Europese Gemeenschap voor Atoomenergie op. In het EURATOM-verdrag zijn afspraken gemaakt over onder andere ontwikkeling van onderzoek, veiligheid, investeringen en de gemeenschappelijke markt op het gebied van kernenergie. Later (1961) volgde het verdrag van Petten. Dit betrof de vestiging van een gemeenschappelijk centrum voor onderzoek (Joint Research Centre) op het gebied van kernenergie. In 1967 volgde er een contract tussen EURATOM en Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN): een onderzoekscentrum gericht op de vreedzame toepassing van kernenergie.

URENCO: verrijking uranium

In 1970 werd er in Almelo een faciliteit gebouwd voor het fabriceren van verrijkt uranium tot splijtstof (via een ultracentrifugeprocédé). De faciliteit, URENCO (URanium ENrichment COmpany), was een gezamenlijk initiatief van Nederland, de Bondsrepubliek Duitsland en het Verenigd Koninkrijk. Het Verdrag van Almelo (1970) legde de basis voor deze samenwerking en regelt dat Nederland gegevens, uitrusting, basismaterialen of bijzondere splijtbare materialen niet zal gebruiken om kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen te vervaardigen of anderszins te verwerven. Later volgden nog drie verdragen voor de export van technologie naar de Verenigde Staten (Verdrag van Washington, 1994) en Frankrijk (Verdrag van Cardiff, 2005 en het Verdrag van Parijs, 2011).

Non-proliferatie & kernwapenvrije zones

Nederland heeft altijd een actief beleid gevoerd op het terrein van non-proliferatie – en doet dat nog steeds. In dat kader heeft Nederland zich aan verschillende verdragen gebonden. Het belangrijkste verdrag is het Non-proliferatieverdrag (NPT, 1968). Dit verdrag heeft als doel de verdere verspreiding van kernwapens tegen te gaan, evenals het stimuleren van nucleaire ontwapening en het regelt het recht op kernenergie voor vreedzame toepassingen. Vervolgens zijn er de nodige aanvullingen gekomen op het NPT, waar Nederland zich ook steeds aan heeft verbonden. Voorbeelden daarvan zijn onder meer de deelname aan de bijeenkomsten van Zangger Committee (ZAC of Nuclear Exporters Committee, 1971) en het lidmaatschap van de Nuclear Suppliers Group (NSG, 1974) en de uitbreiding van het Kernstopverdrag (1996). In het licht van een terroristische dreiging zijn er ook diverse verdragen afgesloten om te voorkomen dat nucleair materiaal in verkeerde handen komt (o.a. VN-resolutie 1540: General statement on non-provision of WMD and related materials to non-State actors (1996), de oprichting van de Nuclear Terrorism Convention (1996) en Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism (2006) en de EU-verordening voor dual use material (2009)).

Nucleaire veiligheid, beveiliging en bescherming

Een laatste thema ten slotte betreft nucleaire veiligheid. Nederland is betrokken bij verschillende internationale verdragen op het gebied van nucleaire veiligheid. Belangrijke verdragen in dit kader zijn onder meer het Verdrag fysieke beveiliging van kernmateriaal (1980) en het Verdrag nucleaire veiligheid (1994) en het Verdrag inzake de veiligheid van het beheer van bestraalde splijtstof en inzake de veiligheid van het beheer van radioactief afval (1997). Deze verdragen zijn gericht op het garanderen van een zo hoog mogelijke veiligheid bij het gebruik, vervoer en opslag van nucleair

materiaal en faciliteiten. Recent heeft de Europese Commissie verschillende richtlijnen opgesteld ten aanzien van nucleaire veiligheid, stralingsbescherming en radioactief afval. De richtlijnen hebben als doel de risico's op nucleaire ongevallen en het vrijkomen van grote hoeveelheden radioactieve straling te verminderen, het veilig beheer van splijtstof en radioactief afval te bevorderen en een betere bescherming tegen ioniserende straling te waarborgen.

Naast bovengenoemde verplichtende kaders wordt op vrijwillige basis zoveel mogelijk aangesloten bij internationaal geaccepteerde beginselen, aanbevelingen, praktijken en afspraken die op het gebied van veiligheid en beveiliging tot stand zijn gekomen onder de vlag van het IAEA (safety standards), de WENRA (Western European Nuclear Regulators Association), ENSREG (European Nuclear Safety Regulator Group), HERCA (Heads of European Radiation Authorities), en de ENSRA (European Nuclear Security Regulators Association).

Op het terrein van medische isotopen zijn geen internationale verdragen. Wel is er bij de OECD de *High Level Group on the Security of Medical Radioisotopes (HLG-MR)*.³³ De OECD heeft geen regelgevende macht, maar brengt ontwikkelingen in kaart en bevordert samenwerking tussen landen en harmonisatie van beleid. Eén van de aandachtspunten van de HLG-MR is het doorvoeren van het principe van full cost recovery (FCR) - de volledige doorberekening van kosten voor de productie van medische isotopen, om zo de leveringszekerheid te bevorderen en nieuwbouw van faciliteiten te stimuleren. Nederland heeft in december 2014 in OECD-verband een verklaring ondertekend ter ondersteuning van de principes van FCR.³⁴

In onderstaande tabel is een overzicht van de specifieke verplichtingen per verdrag opgenomen. In Bijlage A is een volledig overzicht van alle internationale verdragen opgenomen.

Tabel 4 Overzicht eisen en verplichtingen van verdragen en afspraken

Nr.	Verdrag (jaar/amanedement)	Eisen/verplichtingen
1	EURATOM-Verdrag Rome (1957/2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Delen van onderzoeksprogramma's inzake kernenergie • Uitvaardiging van wettelijke en bestuursrechtelijke bepalingen om basisnormen uit het verdrag betreffende veiligheid te doen naleven • Periodiek rapport over de delfstoffen, reserves en investeringen in mijnbouw • Toelaten inspecteurs
2	Verdrag van Petten (1961)	<ul style="list-style-type: none"> • Terrein ter beschikking stellen voor het onderzoekscentrum • Woonruimte voor personeel van onderzoekscentrum garanderen • Meebetalen aan kosten van onderzoekscentrum • Het onderzoekscentrum beschermen tegen storen van het functioneren
3	Contract EURATOM en ECN (1967/2003)	<ul style="list-style-type: none"> • Vertrouwelijk: over de technische bedrijfsvoering, verslaggeving, instelling commissies, overdracht kennis en octrooien, diensten, en financiële bepalingen
4	Nuclear-Weapon-Free zones/geografische regio's verdragen (1967-2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Verbod op de acquisitie, het bezit, het testen, het plaatsen en het gebruik van kernwapens in o.m. de ruimte en op de zeebodem

³³ <https://www.oecd-nea.org/med-radio/supply-series.html>

³⁴ <http://www.oecd-nea.org/med-radio/jointdeclaration.html>, samen met Australië, België, Canada, Duitsland, Frankrijk, Korea, Polen, Rusland, Spanje, het Verenigd Koninkrijk, de Verenigde Staten, en Zuid-Afrika.

Nr.	Verdrag (jaar/amandement)	Eisen/verplichtingen
5	Non-proliferatieverdrag (1968, NL:1975)	<ul style="list-style-type: none"> • Geen overdracht van kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen aanvaarden • Geen kernwapens of andere explosiemiddelen vervaardigen of verwerven, geen hulp hierbij • Basismaterialen, bijzondere splijtbare materialen en hieraan gerelateerde materialen mogen niet geleverd worden aan niet-kernwapenstaten voor vreedzame doeleinden, tenzij voldaan wordt aan bepaalde waarborgen
6	Verdrag van Almelo (1975)	<ul style="list-style-type: none"> • Gegevens, uitrusting, basismaterialen of bijzondere splijtbare materialen in bezit als gevolg van samenwerking mogen niet gebruikt worden voor kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen • Andere niet-kernwapenstaten mogen hier ook niet mee worden geholpen of aangemoedigd voor kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen • Toepassing van procedures voor veiligheidscontrole die verenigbaar zijn met internationale verplichtingen
7	Zangger Committee (ZAC)/Nuclear Exporters Committee (1971)	<ul style="list-style-type: none"> • Geen verplichtingen, afspraken over veiligheidsmaatregelen bij de export van materialen die in <i>triggerlist</i> staan
8	Nuclear Suppliers Group (1974-)	<ul style="list-style-type: none"> • Het houden aan richtlijnen op het gebied van export en verplaatsing van materialen die kunnen worden toegepast bij de ontwikkeling van kernwapens, bestaande uit nucleaire materialen en dual use materialen
9	Verdrag fysieke beveiliging kernmateriaal (2005; en nucleaire faciliteiten) Wenen/New York (1980/2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Verbod op (laten) uitvoeren, doorvoeren of invoeren van kernmateriaal tenzij het wordt beveiligd volgens bepaalde niveaus. • Staten dienen elkaar zoveel mogelijk assistentie te verlenen bij bijvoorbeeld diefstal • Er moeten straffen worden gesteld op overtreding van bepaalde strafbare feiten gerelateerd aan kernmateriaal en nucleaire faciliteiten • Verschillende plichten op het gebied van uitlevering en vervolging
10	Verdrag van Washington (1992)	<ul style="list-style-type: none"> • Bescherming en beveiliging van (de overdracht van) gerubriceerde gegevens
11	Verdrag nucleaire veiligheid Wenen (1994)	<ul style="list-style-type: none"> • Toetsing van de veiligheid van de bestaande kerninstallaties bij inwerkingtreding van het verdrag en eventueel verbeteringen aanbrengen • Schepping en handhaving van een regelgevend kader betreffende de veiligheid van kerninstallaties, en er wordt een regulerend lichaam opgericht of aangewezen ter uitvoering hiervan. • De hoofdverantwoordelijkheid voor de veiligheid van een kerninstallatie ligt bij de vergunninghouder • Alle organisaties die activiteiten verrichten die rechtstreeks verband houden met kerninstallaties zetten beleidslijnen uit met betrekking tot nucleaire veiligheid • Er dienen voldoende financiële middelen beschikbaar te zijn voor de veiligheid van kerninstallaties gedurende de levensduur. Daarnaast moet personeel voldoende gekwalificeerd zijn • Er dienen programma's voor kwaliteitsborging te worden opgezet en uitgevoerd • Uitvoerige en stelselmatige beoordelingen van veiligheid kerninstallaties • Maatregelen tegen blootstelling aan ioniserende straling • Rampenbestrijdingsplannen voor kerninstallaties, ook kerninstallaties in nabijheid van grondgebied • Veiligheidsmaatregelen voor de vestiging, ontwerp & bouw en bedrijfsvoering van kerninstallaties
12	Comprehensive Nuclear Test-ban Treaty/ Kernstopverdrag	<ul style="list-style-type: none"> • Verbod op uitvoeren van kernwapentestexplosies of andere nucleaire explosies • Verbieden en voorkomen van dergelijke explosies op haar grondgebied

Nr.	Verdrag (jaar/amanedement)	Eisen/verplichtingen
	(1996, nog niet in werking getreden)	<ul style="list-style-type: none"> • Onthouding van het veroorzaken, aanmoedigen of deelnemen aan het uitvoeren van kernwapentestexplosies of andere nucleaire explosies • Meebetalen aan organisatie • Toewijzen van Nationale Autoriteit
13	Verdrag veiligheid beheer van bestraalde splijstof en radioactief afval Wenen (1997)	<ul style="list-style-type: none"> • In alle fasen van het beheer van bestraalde splijstof en radioactief afval moeten individuen, de maatschappij en de omgeving voldoende worden beschermd tegen radioactieve straling • Faciliteiten voor bestraalde splijstof en radioactief afval moeten aan bepaalde veiligheidsstandaarden voldoen • Voor de vestiging, ontwerp, bouw en bedrijfsvoering van (nieuwe) faciliteiten voor bestraalde splijstof en radioactief afval moeten bepaalde (veiligheids)procedures worden opgevolgd • Na sluiting van faciliteiten voor radioactief afval moeten bepaalde procedures worden opgevolgd • Om aan bovenstaande eisen te kunnen voldoen moeten er hiertoe wetgevende, regelgevende en administratieve maatregelen worden genomen. Hiervoor wordt een onafhankelijk wetgevend orgaan opgericht of aangewezen • De hoofdverantwoordelijkheid voor de veiligheid van het beheer van bestraalde splijstof en radioactief afval ligt bij de vergunninghouder • Personeel van faciliteiten moet voldoende gekwalificeerd zijn • Er dienen voldoende financiële middelen voor faciliteiten te zijn, ook na sluiting • Tijdens de bedrijfsvoering van faciliteiten voor bestraalde splijstof of radioactief afval dienen er maatregelen te worden genomen voor bescherming tegen radioactieve straling • Voor en tijdens de bedrijfsvoering van faciliteiten voor bestraalde splijstof of radioactief afval moeten er plannen zijn voor noodsituaties • Ook na de ontmanteling van faciliteiten dienen er voldoende financiële middelen en gekwalificeerd personeel beschikbaar te zijn • Bij verplaatsing tussen landen dienen bepaalde (veiligheids)maatregelen te worden genomen
14	VN Resolutie 1540/ General statement on non-provision of WMD and related materials to non-State actors (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • Verbod op steun aan niet-staten die nucleaire, chemische of biologische wapens en hun overbrengingsmiddelen produceren, verwerven, bezitten, ontwikkelen, transporteren of overdragen • Er dienen maatregelen te worden genomen om niet-staten te verbieden om nucleaire, chemische of biologische wapens en hun overbrengingsmiddelen te produceren, acquireren, bezitten, ontwikkelen, transporteren of over te dragen • Er dienen maatregelen te worden genomen voor binnenlands toezicht om proliferatie van nucleaire, chemische of biologische wapens en hun overbrengingsmiddelen te voorkomen
15	Verdrag van Cardiff (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Bescherming en beveiliging van (de overdracht van) gerubriceerde gegevens • Aanwijzen Nationale Instantie verantwoordelijk voor uitvoering van de beveiliging van gerubriceerde gegevens
16	Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Bepaalde activiteiten met betrekking tot radioactief materiaal als criminele activiteiten bestempelen en strafbaar maken, hiervoor indien nodig nationale wetten wijzigen • Verplichtingen rondom informatie-uitwisseling, arrestatie, uitzetting, etc. • Criminele activiteiten voorkomen; moeten maatregelen genomen worden om radioactief materiaal te beschermen • Bepaalde stappen bij inbeslagname van radioactief materiaal, apparaten of faciliteiten
17	Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism (GICNT) (2006)	<p>Niet-juridisch bindende beginselverklaring:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkelen en verbeteren van de boekhouding, controle en fysieke beveiligingssystemen voor radioactieve materialen en stoffen; • Verhogen van de beveiliging van civiele nucleaire installaties;

Nr.	Verdrag (jaar/amanedement)	Eisen/verplichtingen
		<ul style="list-style-type: none"> • Verbeteren van de mogelijkheid om radioactieve materialen en stoffen op te sporen, om de illegale handel in dergelijke materialen en stoffen te voorkomen, om samenwerking in onderzoek en de ontwikkeling van de nationale detectiemogelijkheden te bevorderen; • Verbeteren van de mogelijkheden van de deelnemers om te zoeken naar, in beslag te nemen, en veilige controle over onrechtmatig vastgehouden radioactieve stoffen of hulp daartoe; • Voorkomen van veilige havens voor terroristen, de verwerving van financiële of economische middelen door terroristen, dan wel het gebruik van radioactieve materialen en stoffen; • Zorg voor voldoende nationale wet- en regelgeving om uitvoering van passende strafrechtelijke aanpak en, indien van toepassing, burgerlijke aansprakelijkheid van terroristen en degenen die hulp daartoe verlenen; • Verbeteren van de mogelijkheden voor respons, mitigatie, en onderzoek, in het geval van terreuraanslagen met gebruik van radioactieve materialen en stoffen, waaronder de ontwikkeling van technische middelen om radioactieve stoffen te identificeren; • Bevorderen van het delen van informatie met betrekking tot de bestrijding nucleair terrorisme en de facilitering daarvan, en passende maatregelen te nemen in overeenstemming met nationale wetgeving en internationale verplichtingen ten aanzien van de vertrouwelijkheid van de informatie die zij uitwisselen.
18	Richtlijn radioactieve afvalstoffen en bestraalde splijtstof (2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Verplichtingen met betrekking tot aanvragen van intracommunautaire en extracommunautaire overbrengingen • Verbod op bepaalde overbrengingen • Gebruik van een uniform document • Periodiek verslag over uitvoering van de richtlijn
19	Dual use verordening (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • Eisen en verplichtingen rondom de uitvoer en doorvoer van (een bijgevoegde lijst met) producten voor dual use • Verplichtingen rondom uitvoervergunningen, vergunningen voor tussenhandeldiensten, douaneprocedures, administratieve samenwerking en controlemaatregelen
20	Verdrag van Parijs (2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Bescherming en beveiliging van (de overdracht van) gerubriceerde gegevens
21	Richtlijn nucleaire veiligheid (2009/2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Instelling en instandhouding van een nationaal wettelijk, regelgevend en organisatorisch kader voor de veiligheid van kerninstallaties, waarbinnen verantwoordelijkheden worden vastgesteld voor onder andere nucleaire veiligheidsvoorschriften, een stelsel van vergunningen en verboden, een stelsel van toezicht op nucleaire veiligheid, en handhavingsmaatregelen • Instelling en instandhouding van een bevoegde regelgevende autoriteit op het gebied van veiligheid en kerninstallaties • Hoofdverantwoordelijke voor de nucleaire veiligheid van een kerninstallatie is de vergunninghouder • Regeling voor opleiding en training van personeelsleden die verantwoordelijk zijn voor de nucleaire veiligheid van kerninstallaties • Informatie met betrekking tot de nucleaire veiligheid van kerninstallaties en de regulering ervan dient beschikbaar te worden gesteld voor werkers en het publiek Belangrijkste toevoeging 2014: • Overeenkomstig het nationale kader voor nucleaire veiligheid wordt geëist dat bij het ontwerp, de keuze van de vestigingsplaats, de bouw, de inbedrijfstelling, de bedrijfsvoering en de buitenbedrijfstelling van kerninstallaties de doelstelling voor ogen wordt gehouden dat ongevallen worden voorkomen, of, indien een ongeval zich voordoet, de gevolgen worden beperkt • Periodieke zelfevaluaties
22	Richtlijn veilig beheer (2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Opstelling en instandhouding van een passend nationaal wettelijk, regelgevend en organisatorisch kader voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval waarmee verantwoordelijkheden worden toegewezen en wordt voorzien in coördinatie tussen betrokken bevoegde instanties. Dit omvat o.a. programma's, regelingen, een

Nr.	Verdrag (jaar/amanedement)	Eisen/verplichtingen
		vergunningstelsel en handhavingsmaatregelen <ul style="list-style-type: none"> • Instelling en instandhouding van een regelgevende autoriteit op het gebied van veiligheid van het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval • Hoofdverantwoordelijkheid voor de veiligheid van faciliteiten en activiteiten inzake het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval berust bij de vergunninghouder • Verplichte regeling voor opleiding en training van personeel, alsmede voor onderzoek en ontwikkeling van activiteiten om te voldoen aan het nationale programma voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval • Uitvoering van nationaal programma voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval • Verslag over uitvoering van richtlijn
23	Richtlijn ioniserende straling (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Systeem van stralingsbescherming: o.a. algemene beginselen, dosisbeperkingen, dosislimieten, referentieniveaus • Voorschriften voor vorming, opleiding en voorlichting met betrekking tot stralingsbescherming • Rechtvaardiging en controle van handelingen • Verantwoordelijkheden voor beroepsmatige blootstelling • Verplichtingen rondom medische blootstelling en blootstelling van de bevolking • Algemene verantwoordelijkheden en overige voorschriften voor officiële controle
24	Verklaring nucleaire veiligheid Wenen (2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Nieuwe kerncentrales moeten ontworpen en gebouwd worden overeenkomstig het doel ongevallen te voorkomen en gevolgen te beperken • Periodieke veiligheidscontroles in bestaande installaties

Technopolis Group (2016)

Het bovenstaande overzicht laat zien dat de verdragen heel verschillende verplichtingen bevatten. Het gaat om wetgeving, toezien op non-proliferatie, afspraken over gegevensuitwisseling, en naleven van bepaalde procedures. Deze vallen voornamelijk in het domein omgang. Specifiek voor de nucleaire kennisinfrastructuur is er een aantal verplichtingen zoals:

- Meefinancieren van (internationale) onderzoekscentra en organisaties.
- Waarborgen voldoende financiële middelen voor veilig beheer faciliteiten (ook na sluiting).
- Naleven van afspraken over overdracht van kennis en octrooien en databeheer.
- Bescherming van bepaalde kennis/technologie en de overdracht daarvan.
- Scheppen van een handhavend en regelgevend kader voor veiligheid faciliteiten.
- Programma's voor kwaliteitsborging, uitvoeren stelselmatige controles.
- Het toewijzen en operationeel houden van nationale autoriteit, lichaam voor toezicht op naleving regels en beveiliging data.
- Waarborgen van voldoende gekwalificeerd personeel (voor waarborgen en controleren veiligheid).
- Verplichte regeling voor opleiding en training personeel voor bepaalde faciliteiten.

In de internationale verdragen zelf is veelal niet nauwkeurig beschreven hoe deze verplichtingen moeten worden ingevuld: de omvang van de inspanningen of het niveau waarop die moeten worden uitgevoerd – en daarmee ook het budget dat er mee is gemoeid – wordt vaak aan de lidstaten overgelaten. Op het gebied van veiligheid en beveiliging zijn de IAEA safety standards voor verschillende typen faciliteiten wel richtinggevend over hoe de verdragen moeten of kunnen worden ingevuld.

3.1.1 Rol en opzegbaarheid van de verdragen

Zoals het overzicht laat zien heeft Nederland zich verbonden aan heel veel internationale verdragen. Voor een deel zijn die verdragen gerelateerd aan de faciliteiten die we in Nederland hebben, zoals ECN, het Joint Research Centre, URENCO en de kerncentrales. De internationale verdragen geven (al dan niet specifieke) richtlijnen voor het beheer van dergelijke faciliteiten. De verdragen die Nederland heeft ondertekend vloeien voor een ander deel voort uit het beleid dat Nederland voert voor internationale samenwerking en betrokkenheid. Zo was en is Nederland een actief pleitbezorger van non-proliferatie en is de ondertekening van allerlei verdragen een logisch uitvloeisel van dit beleid.

In principe zijn heel veel verdragen opzegbaar. Volgens de geïnterviewden zou dit echter wel gepaard gaan met een enorme reputatieschade. Een deel van de verdragen is niet opzegbaar: Nederland heeft bijvoorbeeld als lid van de EU communautaire verplichtingen, ook ten aanzien van het naleven van de verplichtingen van EU-verdragen. Op een meer praktisch niveau is het ondenkbaar dat Nederland bepaalde faciliteiten kan blijven beheren als de bestaande verdragen worden opgezegd, denk bijvoorbeeld aan URENCO en de verdragen die daarvoor zijn gesloten.

3.2 Internationale vergelijking

In het kader van deze studie hebben we gekeken naar de nucleaire kennisinfrastructuur in drie omliggende landen: België, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk. Deze vergelijking stelt ons in staat om Nederlandse ontwikkelingen in context te plaatsen: zo hebben België en Duitsland gekozen voor een uitstap uit nucleaire energie (maar niet uit nucleair onderzoek en medische toepassingen), terwijl het Verenigd Koninkrijk juist haar belangen in nucleaire energie vergroot en cyclotrons als leverancier van medische isotopen wil inzetten. In onderstaande tabel zijn de belangrijkste kenmerken van de kennisinfrastructuur in die landen weergegeven. Bijlage B bevat een uitgebreidere beschrijving van de drie landen.

Tabel 5 Overzicht belangrijkste kenmerken nucleaire infrastructuur benchmarklanden³⁵

	België	Duitsland	Verenigd Koninkrijk
Kerncentrales	7 (2 locaties)	8	15
Aandeel kernenergie (2015)	37,5% ³⁶ (↓)	14,1% (↓)	18,9% (↑)
Onderzoeksreactoren	2	7	1
Productie medische isotopen	Ja (↑)	Beoogd vanaf 2017 (↑)	Nee (-)
Aandeel wereldproductie ⁹⁹Mo/^{99m}Tc	16%	0%	0%
Cyclotrons	6	26	16
Andere belangrijke faciliteiten	Geen	<ul style="list-style-type: none">• Verrijkingsfabriek van URENCO in Gronau	<ul style="list-style-type: none">• Tails management facility in Capenhurst voor de verwerking van verarmd uranium (URENCO)

³⁵ De pijltjes geven de te verwachten trend aan voor de lange termijn volgens met name de beschreven beleidsontwikkelingen in de laatste rij van de tabel: ↑ = stijging, ↓ = daling, - = stabiel/onbekend.

³⁶ Dit percentage is laag en atypisch voor België doordat een aantal kerncentrales in Tihange en Doel in 2015 langdurig hebben stilgelegen. In de afgelopen 5 jaar schommelde het aandeel kernenergie in België rond de 50% volgens het Power Reactor Information System van de IAEA.

	België	Duitsland	Verenigd Koninkrijk
Belangrijke (onderzoeks)-centra	<ul style="list-style-type: none"> • Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN) in Mol • JRC-IRMM (Instituut voor Referentie-Materialen en Metingen) in Geel 	<ul style="list-style-type: none"> • Jülich Forschungszentrum • Forschungszentrum Karlsruhe & JRC-ITU • Heinz Maier-Leibnitz Zentrum München • Max Planck Instituut in Greifswald (kernfusie) 	<ul style="list-style-type: none"> • Neptune/Radioactive Components Facility van Rolls Royce in Derby • Birmingham Centre for Nuclear Education and Research • Dalton Nuclear Institute Manchester • NUCLEAR (Nuclear Universities Consortium for Learning, Engagement and Research) GROUP • National Nuclear Laboratory (NNL)
Beleidsontwikkeling	<ul style="list-style-type: none"> • Wet op de kernuitstap voorziet in een gefaseerde afbouw van de nucleaire infrastructuur voor energie met als eindpunt 2025. • Bezigt met het voorbereiden van Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA): installatie ontwikkeld voor onderzoek en productie van medische radio-isotopen en gedoteerd silicium (naar verwachting in 2025 operationeel) 	<ul style="list-style-type: none"> • Besluit tot 'Energiewende': sluiting van gehele arsenaal kernenergie in 2022. In 2011 werden 8 kernreactoren gesloten en rest moet uiterlijk in 2022 gesloten zijn. • Daarnaast doel gesteld om van fossiele brandstoffen over te gaan naar hernieuwbare energiebronnen en sterke CO₂-reductie te bewerkstelligen met expliciete doelstellingen tot en met 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • In 2008 werd echter de <i>Energy Act</i> aangenomen die prioriteit geeft aan het terugbrengen van de CO₂-uitstoot. Daarbij ook focus op kernenergie: steun bouw nieuwe centrales en vervanging oude centrales. In 2025 moet de helft van de huidige nucleaire installaties uitgefaseerd zijn en de nieuwe operationeel. • In 2015 groot 5-jarig onderzoeksprogramma van start (budget ± €377mln) zou gaan opzetten gericht op ontwikkeling small modular reactors (SMRs) • 2015 kondigde de regering ook aan om samen met China het Joint Research and Innovation Centre (JRIC) op te zetten voor nucleair onderzoek

Technopolis Group (2016), zie bijlage C

Van de drie landen zijn er twee, België en Duitsland, die hebben besloten de infrastructuur voor kernenergie af te bouwen. In België voorziet de *Wet op de kernuitstap* in een gefaseerde afbouw van de nucleaire infrastructuur met als eindpunt 2025. In Duitsland heeft de regering in 2011 besloten om alle kernenergiereactoren te sluiten in uiterlijk 2022. Beide landen staan daarbij wel voor de opgave om het aandeel kernenergie in de totale energiemix te vervangen. In België komt in 2015 zo'n 38% van de energie van kerncentrales, in Duitsland is dat zo'n 14%.³⁷ Duitsland heeft zich bovendien ten doel gesteld kernenergie te vervangen door hernieuwbare bronnen en een sterke reductie van CO₂ te bewerkstelligen. Hier ligt nog een flinke opgave en er bestaat dan ook een zekere scepsis over de haalbaarheid van deze doelstellingen. In het Verenigd Koninkrijk is sinds 2008 het beleid juist gericht op de bouw van nieuwe kerncentrales en het vervangen van oude centrales. De inzet op nucleaire energie wordt ingegeven door de beleidsdoelstelling om de CO₂-uitstoot significant terug te dringen, onder meer door de afbouw van het aandeel kolencentrales.

Hoewel er besloten is tot een afbouw, speelt de nucleaire infrastructuur in België en Duitsland op dit moment nog een belangrijke rol. In beide landen werken er veel mensen in de centrales, maar ook in

³⁷ <https://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics>

de nucleaire-technologie industrie. Hierbij gaat het onder meer om leveranciers van uranium, bedrijven die gespecialiseerd zijn in uraniumverrijking, bedrijven die (onderdelen van) nucleaire installaties maken, transportbedrijven voor nucleair afval, bedrijven betrokken bij de ontmanteling van installaties en hergebruik van onderdelen, gerelateerde dienstverlenende bedrijven etc. Het economisch belang van de nucleaire kennisinfrastructuur in het Verenigd Koninkrijk is daarentegen nog altijd beperkt, omdat er pas sinds 2008 weer noemenswaardig wordt geïnvesteerd.

Het belang van de nucleaire infrastructuur in België en Duitsland komt ook tot uiting in de onderzoeksinfrastructuur. Het nucleair onderzoek in België wordt hoofdzakelijk uitgevoerd door het Belgisch Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN) in Mol. Een ander belangrijk instituut is het IRMM (Instituut voor ReferentieMaterialen en Metingen) in Geel. Duitsland kent meerdere nationale nucleaire onderzoekscentra. De belangrijkste staan in München, Karlsruhe en Jülich. Duitsland heeft daarnaast diverse onderzoeksreactoren. In het Verenigd Koninkrijk wordt sinds 2008 weer geïnvesteerd in nucleaire onderzoek. De universiteiten van Birmingham en Manchester hebben allebei een eigen onderzoeksinstituut opgezet en verder is er een samenwerkingsverband tussen vijf universiteiten ontstaan (NUCLEAR GROUP). Vanuit de overheid zijn er ook substantiële investeringen gedaan. In 2015 is er zo'n 377 miljoen euro vrijgemaakt voor een vijfjarig programma naar small modular reactors (SMRs) en daarnaast is er samen met China geld gestoken in het Joint Research and Innovation Centre (JRIC) voor nucleair onderzoek (14 miljoen euro per jaar). Ondanks al deze investeringen worden in een overheidsrapport uit 2013 zorgen uitgesproken over het niveau en de versnippering van het nucleaire wetenschappelijk onderzoek in het VK.

Op het terrein van de productie van medische radio-isotopen speelt België een voorname rol. België is verantwoordelijk voor zo'n 16% van de totale wereldproductie. In Mol wordt momenteel een nieuwe faciliteit voorbereid: de Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA). Deze geavanceerde reactor, waarvan de constructie in 2017 moet beginnen, is een samenwerking tussen België, de Europese Unie, de Europese InvesteringsBank (EIB) en diverse andere partijen en zal volgens de huidige planning in 2025 volledig operationeel zijn. Duitsland heeft wel faciliteiten voor de productie van radio-isotopen, maar doet dit momenteel alleen op heel kleine schaal (o.a. voor onderzoek- en trainingsdoeleinden). Er zijn wel plannen om de productie van medische radio-isotopen in de FRM-II in München na 2017 op te schroeven. Het Verenigd Koninkrijk heeft geen faciliteit voor de productie van medische radio-isotopen. In alle drie de landen zijn wel diverse cyclotrons die op lokaal niveau radio-isotopen produceren.

3.3 Wetenschappelijke positie van Nederland in internationaal perspectief

3.3.1 Nederlandse publicatiepatronen

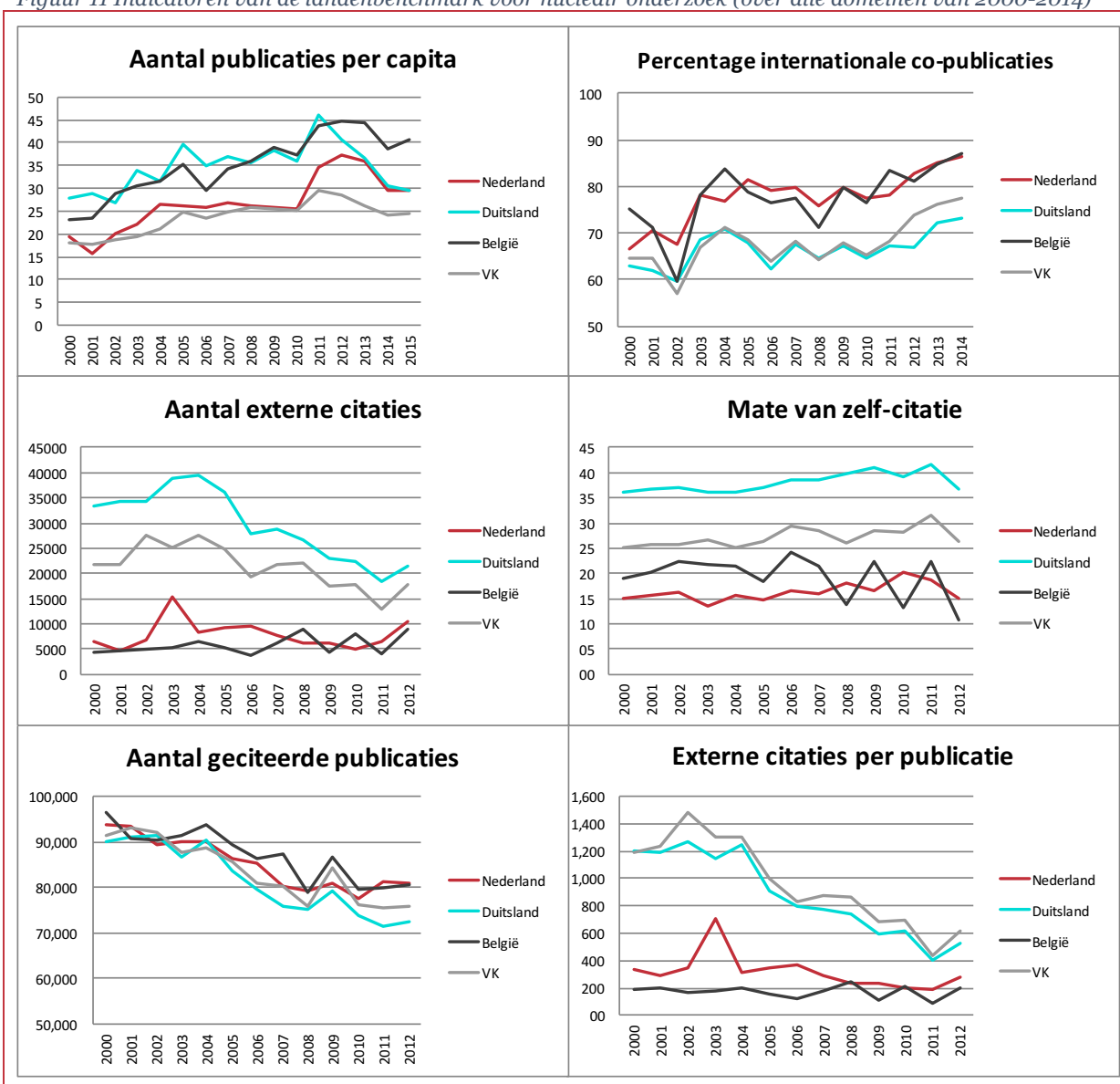
In meerdere interviews werd gesteld dat Nederland internationaal een goede positie heeft, die niet bezwaard is door grote industriële belangen (met name in de reactorbouw). In dit onderzoek hebben we de internationale rol proberen te toetsen aan de hand van bibliometrisch onderzoek in vergelijking met bovenstaande referentielanden. Dit onderzoek vond plaats over de volle breedte van het nucleaire kennisveld en is niet specifiek per domein uitgesplitst.³⁸

Gedurende de laatste 15 jaar bevond Nederland zich tussen de top 20 producenten van wetenschappelijke literatuur (naar aantallen publicaties). Deze kopgroep is redelijk stabiel en Nederland bevond zich steeds tussen posities 15-20, vergelijkbaar met België. Duitsland en het Verenigd Koninkrijk stonden beduidend hoger, onder de Verenigde Staten en China. De hoge positie van de laatstgenoemde landen is natuurlijk gerelateerd aan het aantal wetenschappers dat in de landen actief is. Voor een genuanceerder beeld kijken we naar de indicatoren die in Figuur 11 zijn opgenomen.

³⁸ Wij hebben onze metingen gebaseerd op publicaties in bibliometrische database Scopus, waarbij we die journals hebben meegenomen die onder de categorie "nuclear physics" vallen, waarbij we alle journals gericht op plasmafysica en fusie hebben weggelaten. Deze journals vallen deels ook onder de categorieën energie, wiskunde, materiaalkunde, toegepaste wetenschappen, en geneeskunde.

Voor een beter vergelijk kijken we naar de publicatiecijfers per capita - het is immers te verwachten dat landen met meer inwoners ook verhoudingsgewijs meer wetenschappers in een bepaald vakgebied hebben. Hoewel in absolute getallen Nederland en België een lagere output hebben dan Duitsland en het Verenigd Koninkrijk, blijkt uit een per capita vergelijk dat België en Duitsland meer wetenschappelijke productie hebben dan Nederland, dat Nederland tot enkele jaren geleden optrok met het Verenigd Koninkrijk, en dat in 2015 Nederland vergelijkbaar was met Duitsland. In termen van internationale co-publicaties scoren Nederland en België beduidend beter (86-87%) dan de 73-77% van Duitsland en het VK. Enerzijds zijn kleinere landen altijd geneigd tot samenwerking vanwege het beperkte aantal interne samenwerkingspartners. Anderzijds is de kwaliteit van het onderzoek ook een verklarende factor. Bovendien blijkt dat de wetenschappelijke zichtbaarheid en impact van internationale co-publicaties vaak groter is. In termen van groei van internationale samenwerkingen vertoont Nederland een jaarlijkse groei van 1,9%, beduidend hoger dan de 1,3% voor het VK en de 1,1% van Duitsland en België.

Figuur 11 Indicatoren van de landenbenchmark voor nucleair onderzoek (over alle domeinen van 2000-2014)



Data: Scopus en Scimago (2016). Berekeningen: Technopolis Group (2016)

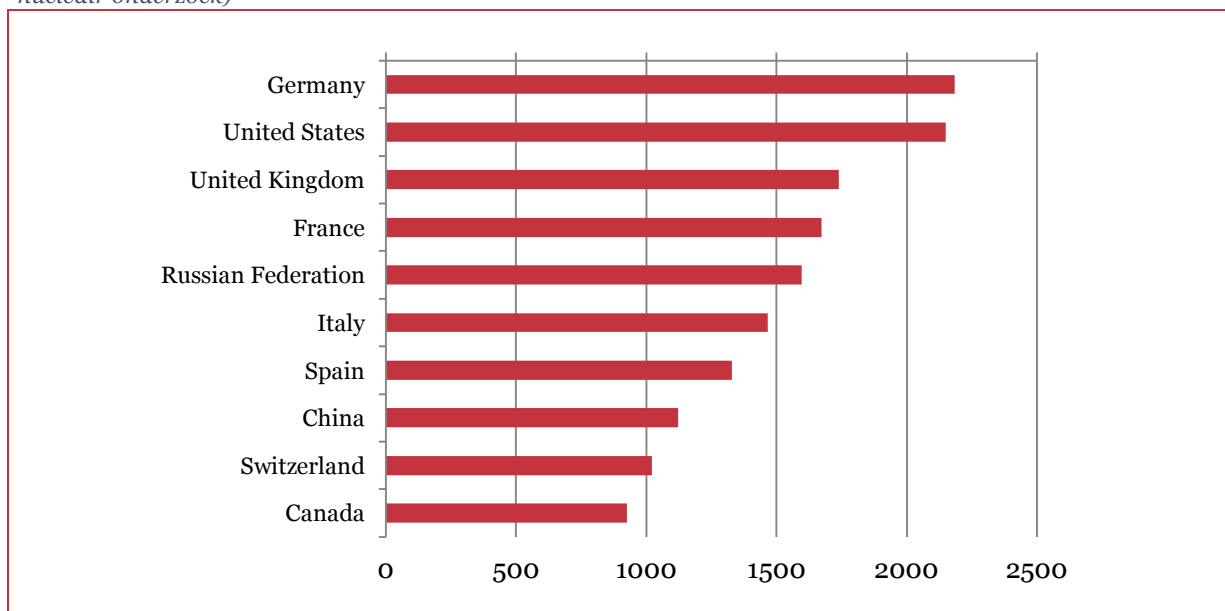
Als we kijken naar geciteerde publicaties – zowel extern als zelfcitaties – zien we dat Nederland relatief goed scoort, hetgeen een indicatie van de kwaliteit van het onderzoek is. Het aantal citaties daalt wel in alle vier de landen. Dit is te verwachten gezien het groeiende aanbod van publicaties en de beperkte mogelijkheid van wetenschappers om deze kennis tot zich te nemen (het relatieve aandeel daalt voor iedereen). Terwijl de citaties van Nederlandse publicaties daalde met 1,2%, daalde dit aantal veel sneller in de andere landen: België en VK met 1,5%, Duitsland met 1,8%.

Al met al kan gesteld worden dat Nederland iets meer publicaties heeft dan België, maar dat laatstgenoemde sneller groeit en ook per capita een hogere output heeft. Vergeleken met Duitsland en het VK heeft Nederland meer internationale co-publicaties en daarmee een grotere internationale zichtbaarheid, hetgeen in het aantal externe citaties wordt teruggevonden. Omgekeerd verwijzen de kleinere landen ook vaker naar niet-nationale publicaties. Uit deze bibliometrische analyse blijkt dat Nederland een wetenschappelijke positie heeft die vergelijkbaar is met de benchmarklanden.

3.3.2 Internationale onderzoekssamenwerking

In de vorige paragraaf hebben we geconstateerd dat Nederland relatief hoog scoort wat betreft co-publicaties. Onderstaand figuur geeft de belangrijkste landen weer waarmee Nederland samenwerkt.

Figuur 12 Belangrijkste landen voor wetenschappelijke samenwerking met Nederland (aantal co-publicaties in nucleair onderzoek)



Data: Scopus (2016). Berekeningen Technopolis Group (2016)

De meeste co-publicaties vinden plaats met Duitse organisaties, gevolgd door Amerikaanse, Franse en VK-organisaties. Dat deze landen in de Nederlandse samenwerkingsverbanden naar voren komen, is niet verwonderlijk, omdat ze internationaal ook tot de grootste producenten van nucleair wetenschappelijk onderzoek behoren. Duitsland speelt voor Nederlandse onderzoekers een iets prominentere rol dan we op grond van de aantallen publicaties van het land mogen verwachten.

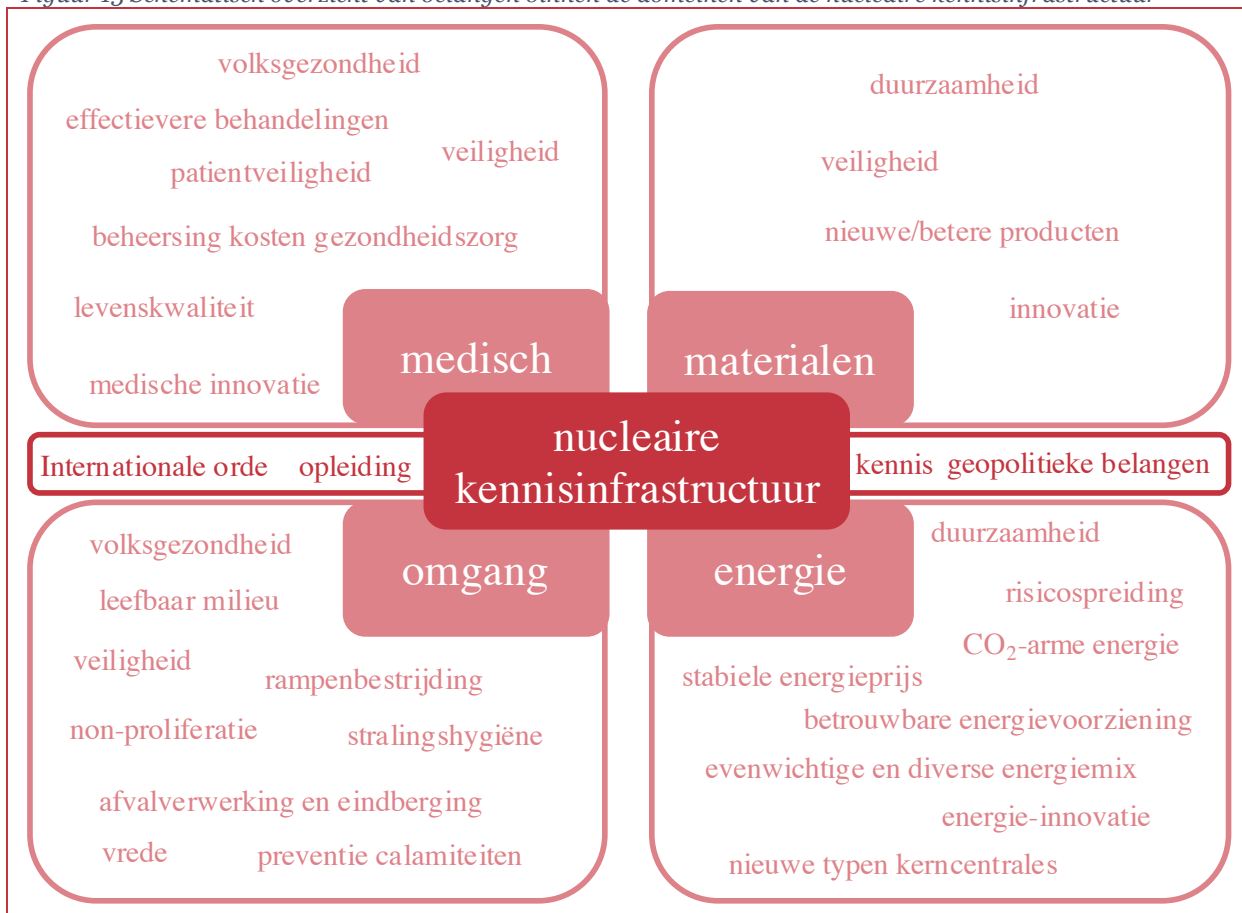
4 De relatie tussen de kennisinfrastructuur en publieke belangen

In dit hoofdstuk geven wij de publieke belangen weer die met de kennisinfrastructuur gemoeid zijn. Bij het beschrijven van het belang beperken wij ons niet tot de huidige situatie, maar geven ook enkele inzichten in mogelijk toekomstige belangen.

Voordat we dieper ingaan op de publieke belangen is het belangrijk om aan te geven wat we onder een publiek belang verstaan. De SER heeft in 2010 een veelgebruikte definitie opgesteld voor publieke belangen. Deze definitie luidt: “Publieke belangen zijn belangen waarvan de behartiging voor de samenleving als geheel wenselijk is en die de politiek zich om deze reden aantrekt”³⁹. We zien publieke belangen dan ook als maatschappelijke belangen waarop de politiek wenst in te grijpen en waarin de overheid dus een rol speelt. In onze weergave van de publieke belangen in dit hoofdstuk geven we de maatschappelijke belangen gelaagd weer, waarbij in de hoogste laag de politiek en de overheid een rol heeft opgepakt. Dit kan beschouwd worden als het overkoepelende publieke belang. De daaronder liggende maatschappelijk belangen zijn soms eveneens publieke belangen, maar gezien de politieke aard is daarover discussie mogelijk.

Een overzicht van de publieke belangen die we voor de nucleaire kennisinfrastructuur hebben geïdentificeerd staat in Figuur 13. Hier zijn de belangen per domein weergegeven. In het centrale deel staan ook enkele niet-domeinspecifieke belangen. De genoemde belangen worden in de rest van dit hoofdstuk nader toegelicht.

Figuur 13 Schematisch overzicht van belangen binnen de domeinen van de nucleaire kennisinfrastructuur



Technopolis Group (2016)

³⁹ SER (2010). Overheid en markt: Het resultaat telt!. Den Haag: Sociaal-Economische Raad. p. 35

4.1 Gedeelde publieke belangen

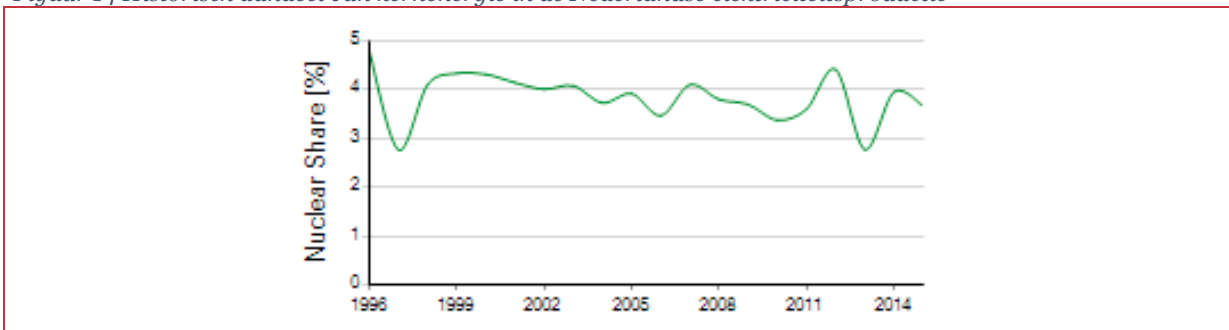
De kennisinfrastructuur creëert een vraag naar en geeft ruimte voor **opleiding** en **kennisontwikkeling** op verschillende niveaus binnen Nederland. Een goed opgeleide werknemerspool stelt de industrie en de kennisinstellingen in staat om (inter)nationaal dienstverlening en onderzoek te leveren conform de laatste stand der techniek en wetenschap. Het zélf opleiden van personeel voorkomt afhankelijkheid van het buitenland en vergroot de mogelijkheid om in te spelen op Nederlandse maatschappelijke uitdagingen.

Een ander algemeen publiek belang betreft **geopolitieke belangen**. Nederland heeft er belang bij om op het terrein van nucleaire faciliteiten, kennis en materialen niet (te) afhankelijk te worden van andere landen. Een zekere mate van autonomie op het terrein van de nucleaire kennisinfrastructuur dient een algemeen publiek belang. Daarbij komt dat een hoogwaardige kennisinfrastructuur Nederland ook internationaal goed positioneert, bijvoorbeeld voor deelname en functies in allerhande internationale gremia en bestuursorganen. Nederland kan op die manier (meer)invloed uitoefenen op de internationale beleidsontwikkeling en politiek. Een specifiek punt is non-proliferatie van nucleaire kennis en materialen. Die zouden gebruikt kunnen worden voor de productie van nucleaire wapens. Non-proliferatie is dus van belang om de **internationale orde en veiligheid** te waarborgen.

4.2 Domein energie

Kernenergie heeft tot op heden nooit een hele grote rol gespeeld in de Nederlandse elektriciteitsproductie. Op dit moment is 3,7% van de elektriciteit die in Nederland wordt geproduceerd afkomstig uit kernenergie. Die energie is afkomstig van de KCB die in 2015 in totaal 3.861,630 GWh aan elektriciteit leverde.⁴⁰ De afgelopen 10 jaar heeft dit percentage altijd rond de rond de 4% geschommeld (zie Figuur 13). Dat is weinig in vergelijking met het percentage van de energiemix dat nucleaire energie bij onze buurlanden inneemt: Duitsland 14,1%, het Verenigd Koninkrijk 18,9% en België 37,5%.⁴¹

Figuur 14 Historisch aandeel van kernenergie in de Nederlandse elektriciteitsproductie



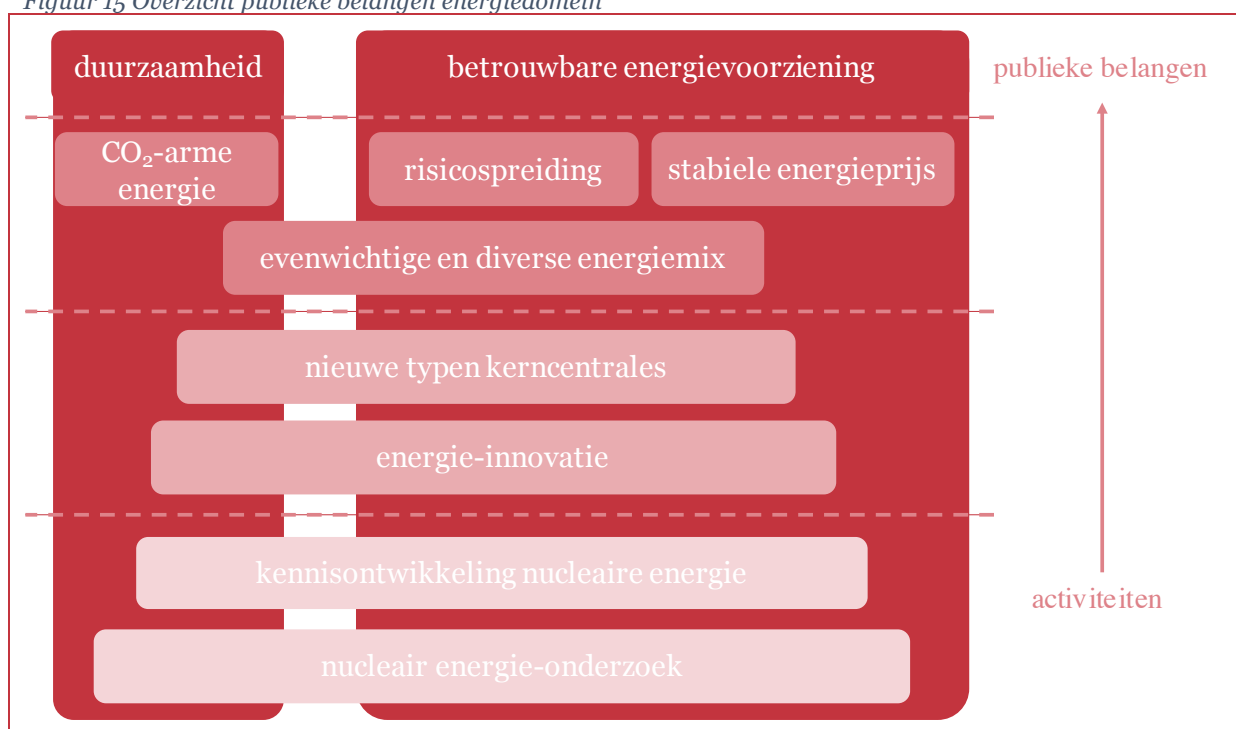
IAEA (2015): Power Reactor Information System

Hoewel het aandeel kernenergie relatief beperkt is, dient kernenergie wel degelijk Nederlandse publieke belangen, nu en in de toekomst. Het publieke belang is energievoorziening: kernenergie zorgt voor een deel van onze energievoorziening. Meer specifiek draagt kernenergie bij aan de betrouwbaarheid van onze energievoorziening en daarnaast draagt het bij aan duurzaamheid (CO₂-arm). In Figuur 15 zijn de belangen van het energiedomein schematisch en gelaagd weergegeven. Het diagram is opgebouwd vanaf de activiteiten kennisontwikkeling en onderzoek in de nucleaire kennisinfrastructuur en neemt vanaf daar steeds verder toe – via uitkomsten en effecten – naar de publieke belangen die bovenin het diagram staan.

⁴⁰ <https://www.iaea.org/pris/Home.aspx>

⁴¹ <https://www.iaea.org/pris/Home.aspx>

Figuur 15 Overzicht publieke belangen energiedomein



Technopolis Group (2016)

Kernenergie draagt bij aan de betrouwbaarheid van onze energievoorziening. Kernenergie stelt ons in staat om een **evenwichtige en diverse energiemix** in Nederland te bereiken. Hoewel het aandeel hernieuwbare energie in onze energiemix al jaren toeneemt, is het overgrote deel van de Nederlandse energie nog steeds afkomstig uit fossiele brandstoffen.⁴² Kernenergie is weliswaar niet hernieuwbaar, maar vindt zijn oorsprong niet in fossiele brandstoffen als olie, gas en kolen. Het is daarmee in staat om meer diversiteit in de energiemix aan te brengen en het aandeel fossiele energie te verminderen. Tevens zijn (nieuwe) kernreactoren steeds beter in staat om pieken en dalen in de opwekking van hernieuwbare energie op te vangen en draagt daarmee bij aan een stabiele energielevering.

Door meer diversiteit in de energiemix ontstaat er ook meer **risicospreiding in onze energievoorziening**. Uranium en alle andere niet-duurzame bronnen voor energieopwekking worden uit het buitenland geïmporteerd. Aardgas is hier tot nog toe een uitzondering op. Zowel de toegang tot deze materialen als de prijs ervan brengt risico's met zich mee met betrekking tot stabiele en betaalbare energievoorziening. Duurzame energiebronnen als wind- en zonne-energie dragen hier ook aan bij, maar hebben een minder continue energieproductie dan kernenergie door afwisselende zonintensiteit (dag- en nachtritme) en windsnelheid.

Kernenergie kan ook bijdragen aan een **stabielere energieprijs** voor consumenten en bedrijven in Nederland. De kosten van kernenergie zijn procentueel veel minder afhankelijk van de prijs van brandstof dan bijvoorbeeld energie op basis van olie, kolen en gas. De prijs van uranium is net als olie, gas en kolen aan sterke fluctuaties onderhevig. Het verschil is echter dat het aandeel van de grondstof in de kostprijs voor het produceren van kernenergie veel lager ligt dan bij andere vormen van energieopwekking. De kostprijs van kernenergie is daardoor stabielere.

⁴² ECN (2015). *Nationale Energieverkenning 2015*. Petten: ECN, PBL, CBS en RVO.

Open standpunt Kabinet ten aanzien van kernenergie

De Rijksoverheid wil dat in Nederland in 2020 14% van de energie duurzaam wordt opgewekt en dat Nederland in 2050 een volledig duurzame energievoorziening heeft. In 2011 stelde het Kabinet dat kernenergie nodig is als “een noodzakelijke stap op weg naar een CO₂-arme economie” en “een belangrijke overbrugging [...] naar een duurzame energiehuishouding”.⁴³ Onder strikte voorwaarden wilde het toenmalige Kabinet ruimte bieden aan de bouw van nieuwe kerncentrales in Nederland.

In februari 2011 is het standpunt van het Kabinet ten aanzien van kernenergie in een brief aan de Tweede Kamer vastgelegd.⁴⁴ In de brief staat dat partijen die aan de in de brief genoemde voorwaarden voldoen, vergunning voor een kerncentrale kunnen krijgen. Hoewel het Nationaal Energieakkoord uit 2013 niet ingaat op kernenergie⁴⁵, is het beleid dat in de brief van 11 februari 2011 is neergelegd nog altijd van kracht. Wel zijn de marktomstandigheden voor een nieuwe kerncentrale momenteel aanzienlijk minder goed dan vijf jaar geleden. In het recent verschenen Energierapport van het ministerie van Economische Zaken wordt echter gesteld dat er weliswaar nu geen business case is voor kernenergie, maar “marktpartijen die aan alle voorwaarden voldoen [...], kunnen een vergunning voor de bouw van een kerncentrale krijgen”.⁴⁶

Het huidige Energierapport houdt kernenergie voor de energiemix van 2050 als optie open. In de scenario's die worden beschreven, speelt kernenergie ook een rol. Het ministerie van Economische Zaken gaat uit van een maximale potentiële jaarlijkse bijdrage van kernenergie aan de Nederlandse energievoorziening van 200 petajoule. Dat getal is gebaseerd op maximaal vier grote nieuwe kerncentrales in Nederland. De Energy Roadmap 2050 van de Europese Commissie⁴⁷ gaat in alle zes scenario's ervan uit dat het aandeel van kernenergie in de Europese energiemix in 2050 gelijk blijft of afneemt.

Een ander publiek belang van kernenergie is de **duurzaamheid**. Bij kernenergie komt er ten opzichte van het gebruik van fossiele brandstoffen relatief weinig CO₂ vrij, het is een CO₂-arme manier om energie op te wekken.⁴⁸ Dat draagt voor wat betreft emissies bij aan het publieke belang duurzaamheid. Een lagere CO₂-uitstoot is een publiek belang dat bijdraagt aan het verminderen van de omvang of de effecten van de klimaatverandering en het behalen van klimaatdoelstellingen.⁴⁹ Het beleid is erop gericht om de CO₂-uitstoot te verminderen door de inzet van hernieuwbare energie. Die omslag zal naar verwachting nog geruime tijd in beslag nemen en tot die tijd levert kernenergie dus een bijdrage aan CO₂-arme energie.

4.3 Domein medisch

In het medische domein draagt de nucleaire kennisinfrastructuur bij aan de publieke belangen volksgezondheid en veiligheid. Daaronder vallen enkele meer concrete belangen te identificeren die voortkomen uit de activiteiten binnen de nucleaire kennisinfrastructuur op dit domein. In Figuur 16 is schematische de gelaagdheid van de publieke belangen in het medische domein weergegeven. Het diagram is opgebouwd vanaf de activiteiten kennisontwikkeling en onderzoek in de nucleaire kennisinfrastructuur en neemt vanaf daar steeds verder toe – via uitkomsten en effecten – naar de publieke belangen die bovenin het diagram staan.

⁴³ Ministerie van EL&I (2011). *Energierapport 2011*. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie

⁴⁴ Tweede Kamer, Kamerstuk 32645 nr. 1, Vergaderjaar 2010-2011, 11 februari 2011

⁴⁵ SER (2013). *Energieakkoord voor duurzame groei*. Den Haag: Sociaal-Economische Raad

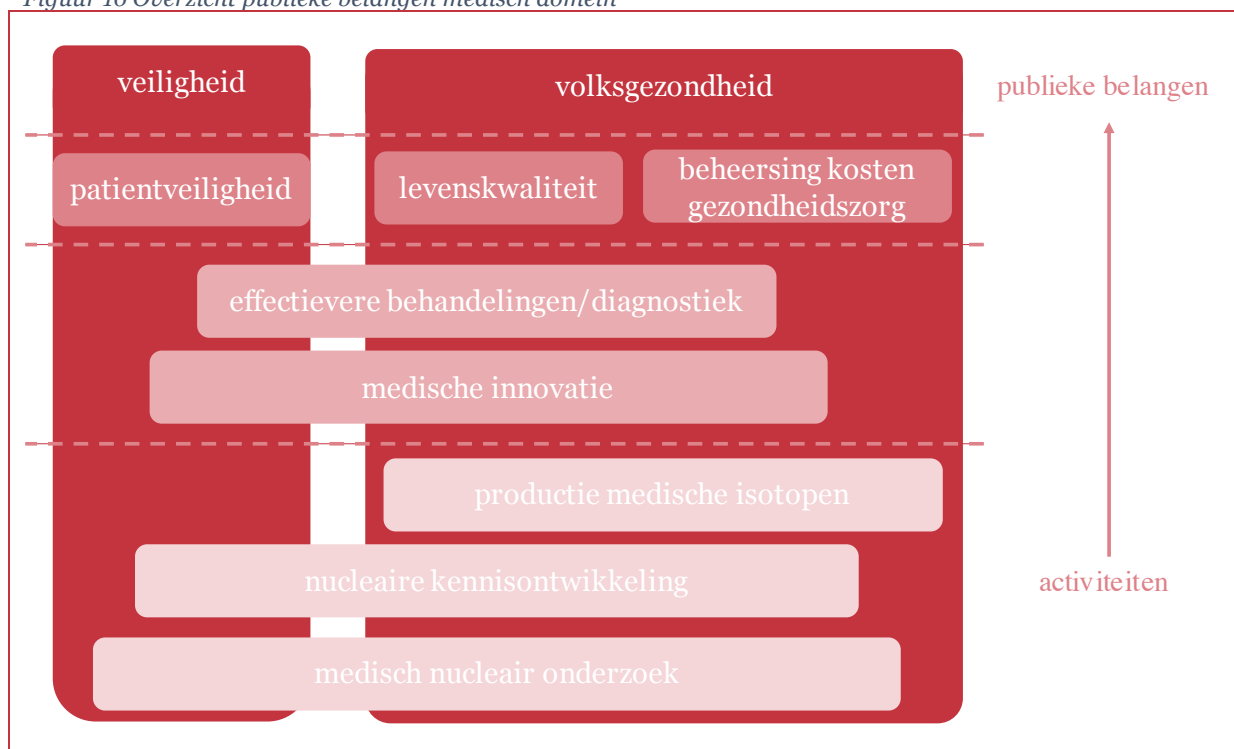
⁴⁶ Ministerie van EZ (2016). *Energierapport. Transitie naar duurzaam*. Den Haag: Ministerie van Economische Zaken.

⁴⁷ Europese Commissie (2012). *Energy Roadmap 2050*. Luxemburg: Publications Office of the European Union

⁴⁸ De feitelijk productie van kernenergie is CO₂-vrij, maar in de gehele keten komen wel degelijk continue CO₂ en broeikasgassen vrij: ze vereisen aanhoudende uraniumwinning en verrijking.

⁴⁹ http://www.changemagazine.nl/klimaatkennis/onderzoek/kernenergie_in_tijden_van_klimaatverandering

Figuur 16 Overzicht publieke belangen medisch domein



Technopolis Group (2016)

Nucleaire geneeskunde is een belangrijk onderdeel van de gezondheidszorg en daarmee van de volksgezondheid. De nucleaire geneeskunde levert een essentiële belangrijke bijdrage aan de **diagnostiek en therapie van ziekten**, met name voor oncologie, cardiologie en neurologie. De nucleaire geneeskunde wordt met name gebruikt voor **diagnostische doeleinden** (zo'n 90%) en voor een klein deel voor **radiotherapie** (10%).

Het belang van nucleaire geneeskunde in de gezondheidszorg is substantieel. Volgens de OECD NEA⁵⁰ worden er momenteel meer dan 40 miljoen nucleaire geneeskundige verrichtingen op jaarbasis gedaan en het is de verwachting dat dit ieder jaar met ten minste 5% zal toenemen. Vanzelfsprekend draagt de toenemende vergrijzing en de daaraan gekoppelde toename van ouderdomsziekten hieraan bij.

De nucleaire geneeskunde is in Nederland van een hoog niveau en het onderzoek draagt bij aan het **ontwikkelen van kennis** en als gevolg daarvan aan **medische innovaties**. De medische innovaties dragen op hun beurt weer bij aan effectievere behandeling en betere diagnostiek. Zo heeft de nucleaire geneeskunde een grote invloed gehad op de effectiviteit van kankerbehandelingen, bijvoorbeeld door betere voorspellingen over de kans en het stadium van uitzaaiingen. Betere diagnostiek en behandeling zijn van essentiële waarde voor de volksgezondheid.

Een belangrijke ontwikkeling in de geneeskunde is behandelingen zo veel mogelijk op maat in te zetten zodat iedere patiënt op basis van specifieke kenmerken de juiste behandeling kan ondergaan (zogenaamde *personalised medicine*). De nucleaire geneeskunde kan hieraan een heel specifieke bijdrage leveren. Bestaande methodieken dragen al bij aan identificatie van specifieke behandelingen voor bepaalde groepen patiënten. Onderzoek moet leiden tot een verdere uitbreiding en optimalisatie van het pallet aan beschikbare toepassingen, zodat beter kan worden bepaald welke behandelingen wel en niet aanslaan bij bepaalde groepen patiënten (*appropriate use*). Dit resulteert in een effectiever behandelplan waarbij eventuele onnodige schade (bijvoorbeeld als gevolg van bijwerkingen van medicatie of blootstelling aan straling) kan worden voorkomen. Op deze manier wordt zowel de

⁵⁰ <https://www.oecd-neo.org/med-radio/jointdeclaration.html>

patiëntveiligheid als de **levenskwaliteit van de patiënten** verhoogd. Daarnaast is er eveneens een positief effect op de **beheersing van kosten in de gezondheidszorg**, als er geen/minder onnodige (niet-effectieve) behandelingen plaatsvinden. Een betere gezondheidszorg heeft uiteindelijk ook als resultaat dat er minder mensen uitvallen in het arbeidsproces en draagt op die manier bij aan de **arbeidsparticipatie** van de bevolking.

Voldoende productie en een stabiele levering van medische isotopen zijn essentieel om aan de huidige eisen van de medische zorg te voldoen evenals aan de verwachte zorgvraag in de toekomst. Het feit dat Nederland een van de belangrijke producenten is van medische isotopen in de wereld is een belang van internationale omvang en legt als zodanig een grote verantwoordelijkheid bij de Nederlandse overheid voor de volksgezondheid in Nederland en daarbuiten.

Alternatieven voor de productie van Molybdeen

Wereldwijd wordt er onderzoek gedaan naar alternatieve manieren voor de productie van ^{99m}Tc . De redenen daarvoor zijn dat de productie van medische isotopen bij maar een paar spelers op de wereldmarkt ligt, de hiervoor gebruikte kernreactoren oud zijn en het civiel en politieke klimaat steeds kritischer wordt met betrekking tot de risico's van kernreactoren en de nucleaire afvalproductie. Een alternatieve productieroute is mogelijk door gebruik te maken van cyclotrons. Daarbij kan direct ^{99m}Tc geproduceerd worden zonder dat er een kernreactor nodig is. Hiervoor is geen verrijkt uranium nodig, maar verrijkt Molybdeen-100 (^{100}Mo). Alleen cyclotrons met een grote versnellerspanning (>16 MeV) kunnen ^{99m}Tc direct produceren. Het voordeel van de productie van medische isotopen via een cyclotron is dat de productie lokaal, bij het ziekenhuis kan plaatsvinden. Daarnaast kunnen een aantal stappen uit de waardeketen vermeden worden met een goedkopere infrastructuur. Het nadeel is echter dat ^{100}Mo duur is en alleen in Rusland wordt geproduceerd. Daarnaast is het geproduceerde ^{99m}Tc inherent voorzien van onzuiverheden en zijn er veel cyclotrons nodig om in een significant deel van de vraag te kunnen voorzien. De cyclotrons die tegenwoordig bij ziekenhuizen staan, zijn doorgaans niet geschikt voor de productie van ^{99m}Tc . Deze zouden omgebouwd moeten worden om aan de specificaties voor ^{99m}Tc -productie te kunnen voldoen. In Nederland is er momenteel geen cyclotron die specifiek ^{99m}Tc produceert.

Naast cyclotrons wordt er ook studie gedaan naar andere alternatieven zoals Accelerator Driven System (ADS) of via foton-neutronreacties en fotongeïnduceerde splijting. Met behulp van ADS zouden neutronfluxen bereikt kunnen worden die in dezelfde orde van grootte liggen als bij hoge flux kernreactoren. De fotonen-splijtingsreactie lijkt een alternatief voor de productie van uitsluitend ^{99}Mo . Of cyclotrons, specifieke vormen van lineaire versnellers of op fotonen gebaseerde technieken daadwerkelijk alternatieven zijn voor de productie van medische isotopen in kernreactoren staat nog steeds ter discussie. Dat is ook de reden dat Pallas in haar business case uitgebreid aandacht besteedt aan deze technologieën die mogelijk concurreren met de Pallas-reactor.

4.4 Domein materialen

Het publieke belang van het domein materialen is dat het bijdraagt aan nieuwe en betere producten die – via toepassing in de publieke sector – uiteindelijk bijdragen aan de economie en positieve maatschappelijke effecten hebben.

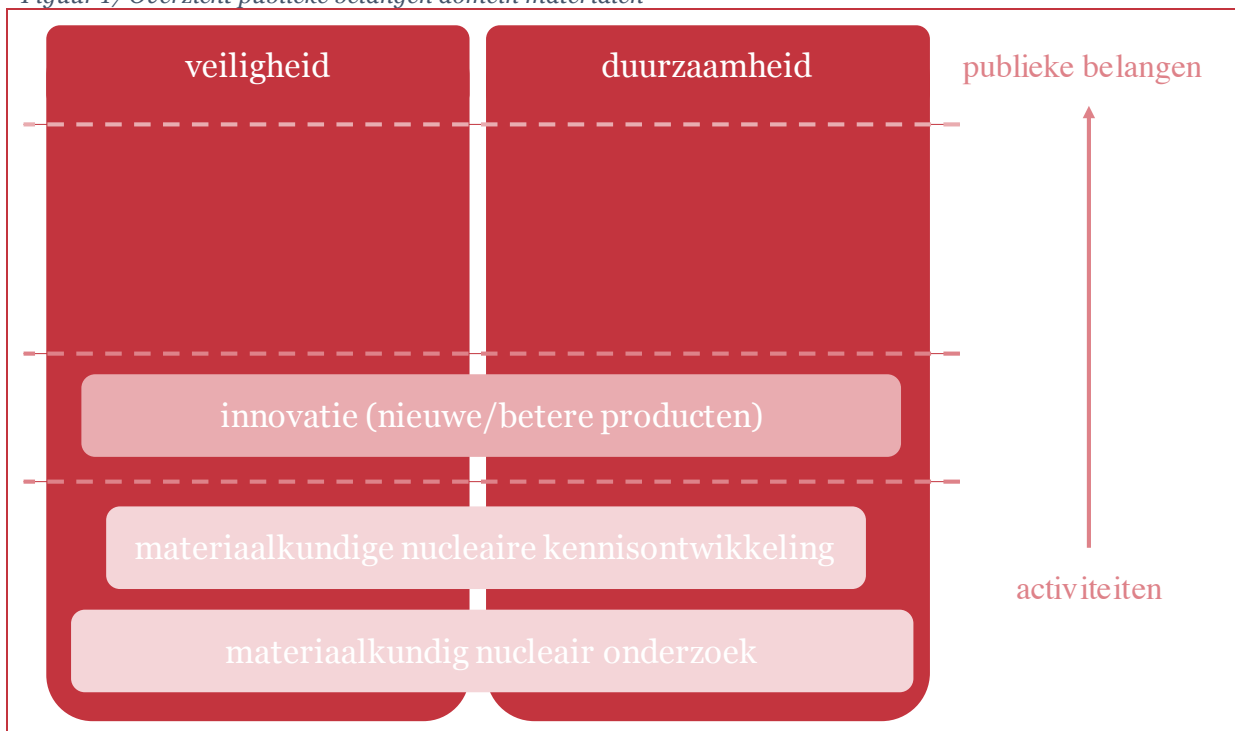
Het domein materialen richt zich grotendeels op onderzoek. Dit onderzoek naar materialen kan via innovatie leiden tot **nieuwe of verbeterde producten**. Gezien de breedte van het materiaalkundig onderzoek binnen dit domein, gaat het om heel verschillende producten in diverse sectoren, denk bijvoorbeeld aan de energiesector (reactoren, zonnecellen), de auto-industrie (batterijen, waterstofopslag) of de voedingsindustrie (voedsel, bacteriën).

Naast onderzoek vindt er ook bewerking van materialen plaats, onder meer door middel van dotering. De HFR is een kleine speler op het gebied van dotering; Belgische reactoren zijn actiever in het doteren van halfgeleiders voor de industrie. Dit leidt tot **hoogwaardige materialen** (gedoteerde halfgeleiders) die in verschillende sectoren gebruikt worden. Voorbeelden hiervan zijn onder meer (hoogvermogen) elektronica, halfgeleiderindustrie en energie (windturbines, hybride voertuigen etc.).

De nieuwe of betere producten en/of de bewerkte materialen kunnen positieve maatschappelijke effecten voortbrengen. Die maatschappelijke effecten zijn heel divers. Zo worden de verrijkte isotopen die URENCO produceert onder andere afgenomen door het in Nederland gevestigde Elekta (Veenendaal), dat ze gebruikt in haar apparatuur voor brachytherapie (inwendige bestraling). Het onderzoek naar materialen kan ook leiden tot **veiligere kernreactoren**. Meer kennis over de degradatie van materialen en het voorkomen daarvan is belangrijk voor het ontwikkelen van veiligere (kritieke) onderdelen voor kernreactoren. Daarnaast kunnen nieuwe materialen ook bijdragen tot het verlengen van de levensduur van kerncentrales, waardoor die op een veilige en verantwoorde wijze langer open kunnen worden gehouden. Materiaalonderzoek heeft tevens een bijdrage geleverd aan de levensduur van batterijen en de ontwikkeling van nieuwe types baterijen. Daarbij levert het een **bijdrage aan duurzaamheid**. De realisatie van de maatschappelijke effecten verloopt voor een deel via bedrijven die innovatieve producten in de markt zetten.

De belangen die gemeoid zijn met het domein materialen zijn weergegeven in Figuur 17. Het diagram is opgebouwd vanaf de activiteiten kennisontwikkeling en onderzoek in de nucleaire kennisinfrastructuur en neemt vanaf daar steeds verder toe – via uitkomsten en effecten – naar de publieke belangen die bovenin het diagram staan.

Figuur 17 Overzicht publieke belangen domein materialen



Technopolis Group (2016)

4.5 Domein omgang

Het feit dat Nederland een nucleaire infrastructuur en de daarbij behorende materialenstromen heeft, brengt met zich mee dat de **veiligheid** daarvan gewaarborgd moet worden. Veiligheid is een van de overkoepelende publieke belangen dat bij het domein omgang hoort. De veiligheid van de infrastructuur en het veilige gebruik ervan is van belang om mens en milieu te beschermen. Veiligheid kan in een aantal specifieke aspecten worden onderverdeeld; de gezondheid van de mens en de leefbaarheid van het milieu kan immers op verschillende manieren worden aangetast. Figuur 18 geeft die aspecten weer.

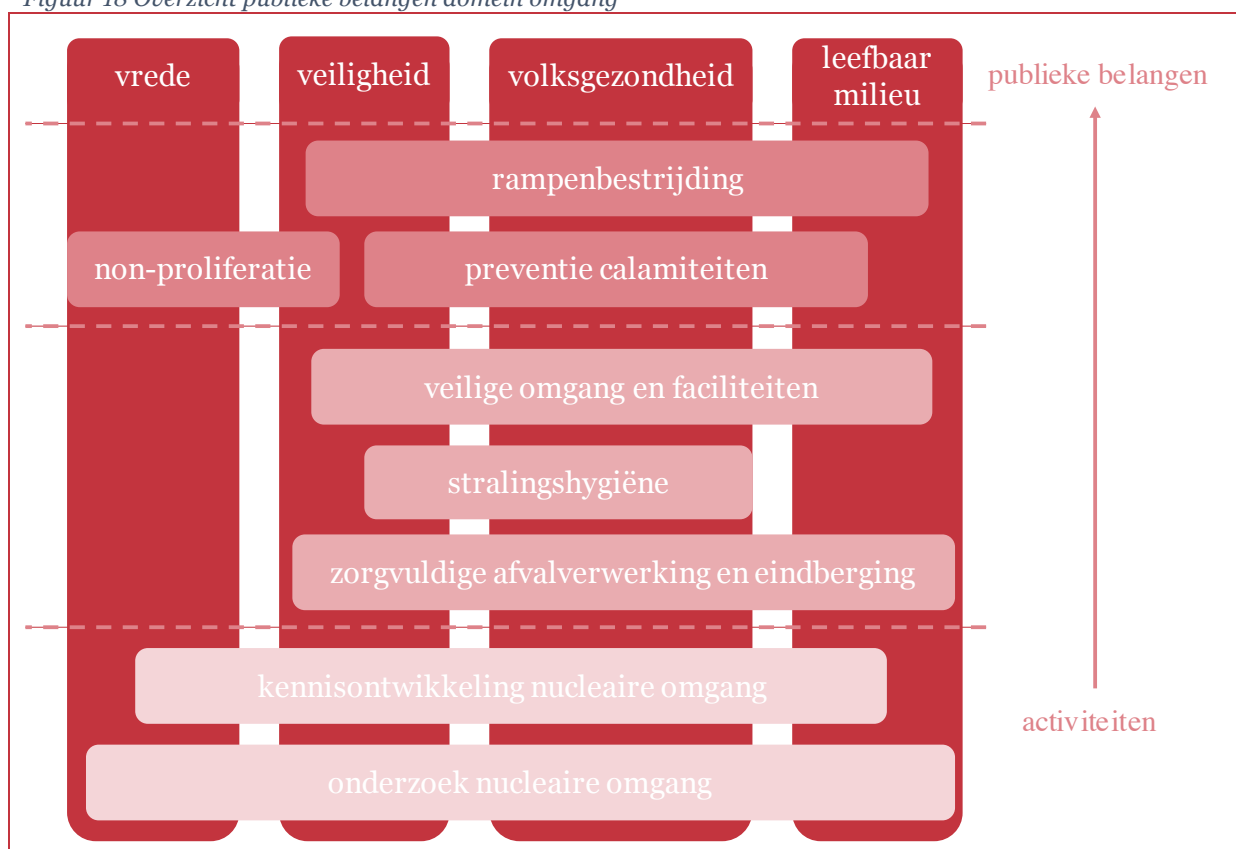
In de figuur zijn de overkoepelende publieke belangen vrede, veiligheid, volksgezondheid en leefbaar milieu voor het domein omgang weergegeven. Het diagram is opgebouwd vanaf de activiteiten

kennisontwikkeling en onderzoek in de nucleaire kennisinfrastructuur en neemt vanaf daar steeds verder toe – via uitkomsten en effecten – naar de publieke belangen die bovenin het diagram staan.

Het eerste deelaspect van veiligheid betreft de **veiligheid van de nucleaire faciliteiten en installaties**. De fysieke nucleaire kennisinfrastructuur moet veilig zijn. Voorkomen moet worden dat er calamiteiten plaatsvinden of –erger nog – dat er rampen plaatsvinden. Om dit te waarborgen is er strenge regelgeving, en zijn er hoge eisen ten aanzien van veiligheid, inspecties, et cetera.

Een ander deelaspect is **stralingshygiëne**: het **verantwoord werken** (door medewerkers) en een veilige omgang met bronnen van ioniserende straling en het zo veel mogelijk tegengaan van het vrijkomen van straling, omdat dit gevaar kan opleveren voor milieu en volksgezondheid. Ook hier geldt strenge regelgeving en is er een verplichting de stralingsbelasting te monitoren bij gebruik van stralingsbronnen. Het vrijkomen van straling kan enerzijds het gevolg zijn van nalatigheid of het falen van (technische) systemen, maar ook het gevolg van doelbewust handelen.

Figuur 18 Overzicht publieke belangen domein omgang



Technopolis Group (2016)

Een (vanuit de kennisinfrastructuur geredeneerd) afgeleid belang is **non-proliferatie**. Nederland voert al vele jaren een actief beleid op het terrein van non-proliferatie. Het doel van dit beleid is een adequate controle op de nucleaire technologie: voorkomen moet worden dat die in verkeerde handen valt of op oneigenlijke manieren wordt gebruikt. Hiertoe heeft ons land verschillende internationale verdragen ondertekend (zie het hoofdstuk over de internationale positie). Die internationale samenwerking is belangrijk aangezien dit een grensoverschrijdend issue betreft. De deelname van Nederland aan internationale organisaties en fora zorgt ervoor dat Nederland invloed heeft op het vormgeven van internationale afspraken en regelgeving en de naleving daarvan.

Het gebruik van radioactieve materialen leidt tot radioactief afval, dat **zorgvuldige verwerking en (eind)berging** vereist. Dat doet het COVRA: daar verwerkt men het afval in speciale containers en

slaat men het afval op in speciale faciliteiten. Daarnaast coördineert het COVRA een onderzoeksprogramma naar verantwoorde eindberging voor de lange termijn. In het verlengde hiervan is voor zorgvuldige verwerking en (eind)berging van radioactief afval kennis over en richtlijnen voor ontmanteling van kernreactoren eveneens van belang.

Tot slot is het van belang dat de kennis ten behoeve van de omgang met nucleaire infrastructuur adequaat is en in stand wordt gehouden. Nederland heeft zich hiertoe op veel fronten ook verplicht door middel van het ondertekenen van diverse internationale verdragen. De benodigde kennis zal ook lange tijd op peil moeten worden gehouden. Zelfs in het theoretische geval dat alle faciliteiten gesloten zouden worden, is er kennis nodig om opslag en ontmanteling goed te laten verlopen.

5 Sterkten, zwakten en uitdagingen

Op basis van de achtergrondstudies, interviews en survey komen de volgende sterkten, zwakten, kansen en bedreigingen voor de huidige nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland naar voren.

5.1 Sterkten

Een van de duidelijke sterktes van de Nederlandse kennisinfrastructuur is dat zij kan bouwen op nagenoeg de gehele keten van onderzoek en ontwikkeling, voorbereiden, omzetten, toepassen en nabewerken tot opslaan. Voor alle domeinen tezamen geldt dat de volledige breedte van de keten gedekt wordt met uitzondering van de activiteit ontginnen. Voor het domein energie is de keten echter onderbroken, omdat hier de activiteit nabewerken niet binnen de Nederlandse kennisinfrastructuur wordt uitgevoerd. Bovendien kent de Nederlandse kennisinfrastructuur spelers die internationaal een zeer prominente rol spelen, zoals de Hoge Flux Reactor in Petten en URENCO in Almelo (beide belangrijke producenten).

De diverse organisaties in de keten kennen elkaar goed, werken in verschillende projecten samen, en denken bij nieuwe projecten na over de consequenties voor de gehele activiteitenketen. De belangrijkste organisaties hebben zich verenigd in Nucleair Nederland, dat onder meer tot doel heeft de onderlinge relaties te verstevigen en kennis uit te wisselen. Daarnaast vindt er ook uitwisseling plaats via de verschillende professionele verenigingen zoals de Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS). Een ander voorbeeld van een dergelijke samenwerking tussen organisaties met verschillende activiteiten in de nucleaire waardeketen is het Dutch Isotopes Valley (DIVA). In DIVA werken NRG, de TU Delft en URENCO samen op het terrein van medische isotopen. NRG levert tevens een bijdrage aan het onderwijs van de TU Delft en werkt met COVRA samen in het nationale OPERA-programma (een onderzoeksprogramma op het terrein van eindberging). De samenwerking en synergie is het sterkst tussen de delen van de keten die dicht bij elkaar liggen. Dit komt voor een deel omdat er afhankelijkheidsrelaties bestaan tussen organisaties. Zo zijn stabiele isotopen van URENCO nodig voor wetenschappelijk onderzoek, onder meer in het Reactor Instituut in Delft. URENCO zelf is weer voortgekomen uit de onderzoeksactiviteiten in Petten. Ook werkt men samen omdat er gedeelde belangen zijn, bijvoorbeeld ten aanzien van onderwijs en de kennis en expertise over stralingshygiëne.

Uit deze studie komt het medisch domein duidelijk naar voren als een gebied waar Nederland sterk in is. De HFR is een belangrijke internationale bron van medische isotopen (zowel Europees als mondiaal is de HFR verantwoordelijk voor een belangrijk deel van de productie). De HFR wordt tevens ondersteund door een goed ontwikkeld en toegankelijk logistiek netwerk. De nucleaire geneeskunde staat in Nederland volgens onze respondenten ook op een hoog niveau; Nederland heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van medische innovaties op het gebied van klinische toepassingen van radiotherapie.

Meer in het algemeen wordt de wetenschappelijke kwaliteit van het nucleair onderzoek in Nederland als hoog gekwalificeerd. Nederland heeft vooraanstaande onderzoekers en tevens een state-of-the-art onderzoeksinfrastructuur, onder meer met de reactor van de TU Delft. Daarbij is er een adequaat aanbod aan (academische) opleidingen.

De Nederlandse organisaties van de nucleaire kennisinfrastructuur zijn ook goed ingebed in internationale organisaties. Men heeft veel internationale contacten, bijvoorbeeld binnen de OECD, het IAEA, Euratom en in consortia van Europese kaderprogramma's voor onderzoek en innovatie. Een ander voorbeeld is LIRICS, een samenwerkingsverband van RIVM, LUMC en Erasmus MC dat namens Nederland lid is van MELODI, een Europees platform dat zich richt op het ontwikkelen en updaten van de Europese strategische onderzoeksagenda voor (lage dosis) stralingsonderzoek. Het feit dat Nederland een groot deel van de keten bestrijkt en enkele vooraanstaande organisaties/faciliteiten heeft, zorgt dat het als relatief klein land serieus wordt genomen. De nauwe samenwerking tussen meerdere delen van de keten helpt soms ook bij de internationale positionering.

Ten slotte wordt ook het huidige afvalbeleid en de centrale positie van het COVRA als een sterke gezien. Nederland gaat op een verantwoorde wijze om met het radioactieve afval van de nucleaire kennisinfrastructuur. Er is een gecoördineerde aanpak waarbij producenten betalen voor het geleverde radioactieve afval en zo meebetalen aan een veilige opslag en aan onderzoek dat nodig is voor een veilige eindberging. Daarnaast zijn de randvoorwaarden voor ontmanteling goed geregeld. Zo is er bijvoorbeeld een verplichting tot het indienen van een vijfjaarlijks geactualiseerd ontmantelingsplan en financiële zekerheidstelling, beide ter goedkeuring van de overheid. Dankzij deze financiële zekerheidsstelling kan er niet alleen direct na de sluiting van de kerncentrale Borssele worden begonnen aan de ontmanteling, maar kan dit ook op een kwalitatief goede manier gebeuren.

5.2 Zwakten

Tegenover de breedte van de nucleaire waardeketen staat dat deze wel dun is: sommige activiteiten in de keten bestaan uit enkele organisaties, die bovendien maar een deel van die keten bestrijken. Denk bijvoorbeeld aan de activiteit voorbereiden: hoewel URENCO een grote organisatie is, is het de enige speler op dit terrein en houdt het zich in feite alleen bezig met verrijking. Het maken van splijtstofstaven gebeurt niet in Nederland, evenmin als het opwerken van splijtstofstaven (deels nabewerking). Met name het aantal organisaties verspreid over de keten in het domein energie is vrij dun. Daar bestaan de activiteiten uit slechts enkele organisaties, terwijl die bij andere domeinen meer organisaties beslaan. De keten in het medische domein omvat de meeste organisaties per activiteit. Het feit dat er op diverse plekken maar enkele spelers zijn, maakt de nucleaire kennisinfrastructuur kwetsbaar. Als er één organisatie wegvalt, kan dat niet of moeilijk worden opgevangen door anderen. Een voorbeeld hiervan is de positie van NRG. Als NRG als Technical Support Organisation (TSO) in de (nabije) toekomst wegvalt, wordt ons land afhankelijker van buitenlandse TSO's. De dunne keten leidt ook tot fragmentatie van kennisgebieden. De complexiteit van het systeem wordt slechts door weinigen doorgrond: er zijn weinig mensen in het veld die echt brede nucleaire kennis hebben.

Ondanks het feit dat in Nederland de gehele keten aanwezig is en de verschillende spelers goed met elkaar samenwerken, ontbreekt het aan een helder toekomstbeeld in de nucleaire sector. Een dergelijk toekomstbeeld zou de overheid kunnen ondersteunen in het formuleren van een heldere beleidsvisie ten aanzien van onderdelen van de nucleaire kennisinfrastructuur. Andersom geeft het open standpunt ten aanzien van kernenergie weinig houvast voor een handelingsperspectief van de betrokken organisaties. Hierdoor leeft het beeld dat het belang van de nucleaire kennisinfrastructuur niet voldoende (h)erkend wordt en daardoor ook niet voldoende op de politieke agenda staat. Het veld heeft behoefte aan een heldere visie en sturing vanuit de overheid ten aanzien van de toekomst van de nucleaire kennisinfrastructuur.

5.3 Kansen

Er worden duidelijke kansen gezien voor het medische domein. Zoals hierboven al gesteld, heeft Nederland met de HFR en sterke onderzoeksgroepen in de nucleaire geneeskunde een goede uitgangspositie op dit gebied. Nederland kan voortbouwen op deze sterke positie. Met een eventuele definitieve vestiging van PALLAS in Petten zou de huidige positie die HFR/NRG heeft opgebouwd op het gebied van medische isotopen gecontinueerd kunnen worden. Daarmee blijft Nederland, conform het ministeriële standpunt⁵¹, een bijdrage leveren aan de (stabiele) levering van medische isotopen in Europa en op mondiale schaal.⁵² Die positie kan worden gebruikt voor het ontwikkelen van nieuwe productieroutes voor isotopen (zoals eerder is gedaan voor Molybdeen en Lutetium).

Vanuit het oogpunt van volksgezondheid kan Nederland zijn sterke positie op nucleaire geneeskunde gebruiken voor het verder ontwikkelen van innovaties op het terrein van radiochemie en farmacochemie. Het verder doorzetten van *'personalised medicine'* zal naar verwachting een sterke stimulans vormen voor nieuwe ontwikkelingen in de nucleaire geneeskunde. Nederland kan op

⁵¹ Tweede Kamer, Kamerstuk 32645 nr. 1, Vergaderjaar 2010-2011, 11 februari 2011

⁵² De capaciteit van concurrerende reactoren is waarschijnlijk niet toereikend voor het zekerstellen van medische isotopen binnen Europa.

onderdelen een heel belangrijke bijdrage leveren, bijvoorbeeld onderzoek naar de inzet van alfa-emitters voor diagnostiek. De samenwerking van diverse partijen binnen DIVA en tussen NRG en het Erasmus MC bij de ontwikkeling van Lutetium zijn erop gericht om dit ook verder te faciliteren.

Kennis van nucleaire ontmanteling wordt eveneens als kans voor de Nederlandse nucleaire sector gezien, zij het in de vorm van een niche. De leeftijd van reactoren in Europa en de vervroegde ontmanteling van reactoren die Duitsland te wachten staat, zorgen voor een groeiende behoefte naar ervaring, kennis en expertise op het gebied van ontmanteling en recycling van radioactief besmette materialen. Nederland (o.a. COVRA en URENCO) doet hiermee ervaring op bij de ontmantelingen van de URENCO-fabrieken, de LFR in Petten en de kerncentrale in Dodewaard. De niche waarin Nederland een rol kan spelen is niet zozeer het grootschalige ontmantelingswerk, maar het hanteren, karakteriseren, bewerken en recyclen van radioactief besmette materialen uit voormalige nucleaire installaties. Slechts een dunne laag van deze materialen is doorgaans radioactief verontreinigd (90% is 'schoon'), het verwijderen van slechts deze laag zorgt voor een reductie van radioactief afval (volume) en voor hergebruik van hoogwaardige materialen. URENCO heeft bijvoorbeeld een lasertechnologie ontwikkeld waarmee de dunne radioactief besmette laag van metalen (enkele tientallen microns) verwijderd kan worden. Urenco, NRG en COVRA zien voor hun organisaties kansen in deze ontmantelingsniche.

Nieuwe (niche) energieconcepten zoals de generatie-IV-reactoren – kleine modulaire reactoren en Thorium/gesmoltenzoutreactoren – worden als kans gezien om leveringszekerheid van elektriciteit te koppelen aan een lage CO₂-uitstoot en een verbeterde veiligheid ten opzichte van oudere reactortypen. De TU Delft werkt in internationaal verband aan de ontwikkeling van de gesmoltenzoutreactor waarmee men ook kernafval van bestaande reactoren kan vernietigen. Deze reactor, die over enkele decennia operationeel zou kunnen zijn, is – net als verbeterde bestaande reactoren – in staat om flexibeler in te spelen op veranderingen in de elektriciteitsbehoefte. De gesmoltenzoutreactoren zouden een relatief veilige en schone aanvulling, met relatief weinig ruimtelijk beslag, kunnen zijn op de hernieuwbare energievoorziening in de toekomst.

Ten slotte worden er kansen gezien in de verdere uitbouw van de sterke positie op het gebied van stabiele isotopen. URENCO produceert stabiele isotopen die onder meer worden gebruikt voor de halfgeleiderindustrie. Deze industrie zal naar verwachting de komende jaren nog verder groeien en Nederland kan hiervan profiteren.

5.4 Bedreigingen

Voor de nucleaire kennisinfrastructuur is er een aantal bedreigingen. In de eerste plaats bestaat er de mogelijkheid dat cruciale onderdelen van de kennisinfrastructuur verdwijnen. De toekomst van NRG is onzeker en als de HFR niet door PALLAS zal worden vervangen, sluit de reactor in 2025. Andersom heeft PALLAS geen solide business case als de HFR vroegtijdig zou sluiten. Dit zal uiteraard een negatieve impact hebben op de positie van Nederland op het terrein van de productie van medische isotopen en de daarbij horende verwerking en logistiek (denk bijvoorbeeld aan de positie van Mallinckrodt). Hoewel de medische sector ook isotopen kan betrekken uit het buitenland, verwacht men dat het stopzetten van de productie van isotopen negatief zal uitwerken op de nucleaire geneeskunde, onder meer omdat bestaande samenwerkingsverbanden zullen worden stopgezet.

Een andere bedreiging voor het medische domein is de schijnbare concurrentie tussen de HFR (c.q. PALLAS) en cyclotrons. Als er geen goede coördinatie is tussen de behoeften en de productie van medische isotopen via verschillende bronnen, kan dit leiden tot overbodige investeringen en inefficiëntie in het systeem. Door een deel van de respondenten werd de behoefte aan een meer gecoördineerde visie voor de toekomst op dit terrein als wens geuit.

Een bedreiging ten aanzien van kennis is de vergrijzing van het werknemersbestand aan de ene kant en geringe academische instroom aan de andere kant.⁵³ Hierdoor kan er uiteindelijk een tekort aan

⁵³ In het academische onderwijs is de TU Delft de enige aanbieder op het gebied van Nuclear Science and Engineering.

adequaat geschoold personeel ontstaan. In dit kader wordt nu reeds de sterk afgenomen aandacht voor stralingsbeschermingsonderzoek en -opleiding genoemd; er is versnippering en afbouw van wetenschappelijk onderzoek en expertise op dit gebied. Sommige onderwerpen zijn geheel verdwenen (e.g. radio-ecologie) of gedecimeerd (radiobiologie). Hierdoor verzwakt de kennis van toepassingsrisico's en wordt deze kennis steeds minder overgedragen. De afbrokkelende kennis kan op termijn een bedreiging vormen voor de veilige operatie van nucleaire infrastructuur. In het verlengde daarvan kan in de toekomst – met het perspectief van de sluiting van de centrale in Borssele in 2033 – ook de kennis en kunde omtrent nucleaire energievoorziening en kerncentrales in Nederland grotendeels verdwijnen. Dit kan een bedreiging zijn als Nederland uiteindelijk toch een aandeel kernenergie wil handhaven met het oog op de klimaatdoelstellingen.

Een ander bedreiging is dat er weinig transparantie is over de marktwerking c.q. doorrekening van alle kosten in verschillende domeinen. De mate van subsidiering van bijvoorbeeld vormen van energieopwekking is sterk politiek gedreven (vroeger keuze voor investeringen o.a. in kernenergie en de laatste jaren veel in wind en zonne-energie). Het gevaar bestaat dat marktwerking (of integrale kostenberekening) voor een toekomstig energiebeleid niet op een evenwichtig manier wordt meegenomen. In het medisch domein ontbreekt een *full cost recovery* van de productie van medische isotopen hetgeen in de toekomst mogelijk de continuïteit van de productie in gevaar kan brengen.

Een laatste risico ten slotte is dat Nederland op nucleair gebied sterk afhankelijk wordt van buitenlandse technologie en leveranciers. Als dit landen betreft die de levering inzet maken van (geo)politieke overwegingen, kan dit publieke belangen (zie het vorige hoofdstuk) in gevaar brengen. Illustratief is de situatie in Hongarije, waarbij het land voor zowel de technische installaties, de levering van adequaat opgeleid personeel, als de nucleaire brandstof van Rusland afhankelijk is.

Tabel 6 SWOT nucleaire kennisinfrastructuur Nederland

<p>Sterktes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nagenoeg de hele keten is aanwezig in Nederland met verschillende organisaties die (internationaal) een vooraanstaande positie hebben • Goede samenwerking tussen organisaties in de keten • Hoge kwaliteit wetenschappelijk onderzoek en state-of-the-art onderzoeksfaciliteiten • Sterke positie op terrein van medische isotopen en nucleaire geneeskunde • Goede inbedding in internationale organisaties en samenwerkingsverbanden • Verantwoord afvalbeleid en een ontmantelingsfonds 	<p>Zwaktes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dunne keten met enkele spelers; kwetsbaarheid van de keten (met name energie, minder in medisch) • Fragmentatie van kennisgebieden, overzicht over geheel ontbreekt • Onduidelijk toekomstig overheidsbeleid t.a.v. cruciale elementen van de nucleaire kennisinfrastructuur
<p>Kansen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Continuëren sterke positie in medische domein en ontwikkelen nieuwe toepassingen • Ontwikkeling nieuwe reactortechnologieën (bijvoorbeeld gesmoltenzoutreactoren) als bron voor duurzame energievoorziening • Niche in ontmantelingsindustrie: bewerken en recyclen van radioactief besmette materialen uit voormalige nucleaire installaties • Groeiende markt van stabiele isotopen voor de halfgeleiderindustrie 	<p>Bedreigingen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gebrek aan coördinatie op het medische domein: overbodige investeringen en inefficiëntie in het systeem • Vergrijzing werknemers, verdwijnen kennis • Verdwijnen kennis stralingsbescherming • Weinig transparantie over kosten en gebrek aan marktwerking: leidt mogelijk tot inefficiëntie en discontinuïteit productie medische isotopen • Afhankelijkheid van buitenlandse kennis, technologie en leveranciers

Technopolis Group (2016)

5.5 Toekomstige uitdagingen

De onderhavige studie is een van de bouwstenen voor het debat over de toekomst van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland. Er lijkt een duidelijke behoefte aan een heldere visie van de sector

en de overheid op dit gebied en ten aanzien van sommige onderdelen in het bijzonder (denk bijvoorbeeld aan het besluit over de rol van kernenergie in de toekomstige energiemix). Een dergelijke visie zou bovendien op niet al te lange termijn moeten komen, zodat de diverse organisaties dan weer een duidelijk handelingsperspectief hebben. Bij het debat over de nucleaire kennisinfrastructuur zou niet alleen aandacht moeten komen voor de rol die Nederland zelf wil spelen, maar ook in het bredere Europese perspectief. Zo is het waarborgen van de stabiele levering van voldoende medische isotopen niet een exclusief Nederlands, maar een internationaal vraagstuk.

Op basis van deze studie kunnen we enkele punten definiëren die in het debat over de toekomst van de nucleaire kennisinfrastructuur in ieder geval op de agenda moeten komen. Het gaat – niet limitatief – om de volgende punten:

- De optie om kernenergie als bron te houden in het licht van de klimaatdoelstellingen en in het verlengde daarvan investeringen in nieuwe reactortechnologieën.
- De businesscase van PALLAS: de toekomstige behoefte aan medische isotopen en de noodzaak van productie van die isotopen via PALLAS alsmede de doorberekening van de kosten daarvan (Full Cost Recovery).
- Internationale afstemming over de productie en levering van voldoende medische isotopen in de toekomst en de rol daarbij van Nederland.
- De interactie tussen de productiefaciliteiten van medische isotopen en de verdere ontwikkeling van nucleaire geneeskunde in Nederland.
- Het waarborgen van voldoende kennis (waaronder onderwijs) en kunde voor het goed functioneren van de nucleaire kennisinfrastructuur op korte termijn, met name op het terrein van 'safety and security'.
- Het waarborgen van kennis (waaronder onderwijs) en kunde voor de lange termijn, bijvoorbeeld voor ontmanteling en veilige eindopslag dan wel voor de ontwikkeling van nieuwe nucleaire technologieën.
- De relatie tussen de nucleaire kennisinfrastructuur en de economische belangen van Nederland, bijvoorbeeld op het terrein van materiaalkunde of stabiele isotopen voor de halfgeleiderindustrie.
- De gevolgen van een eventuele afbouw van de nucleaire kennisinfrastructuur voor onze internationale positie en het veiligstellen van grensoverschrijdende belangen op het terrein van vrede en veiligheid.

Bijlage A Overzicht internationale verdragen

A.1.1 Chronologie

In deze paragraaf worden de belangrijkste internationale verdragen rondom de nucleaire kennisinfrastructuur in hun context beschreven.

EURATOM: Europese samenwerking

Voor Nederland was een van de eerste belangrijke internationale verdragen rondom de nucleaire kennisinfrastructuur was het *EURATOM-verdrag* in Rome, in 1957.⁵⁴ Dit verdrag werd gesloten om de onafhankelijkheid van Duitsland, België, Frankrijk, Italië, Luxemburg en Nederland op energiegebied te vergroten met behulp van kernenergie. Deze landen richtten de Europese Gemeenschap voor Atoomenergie op om de voorwaarden te scheppen voor de ontwikkeling van een sterke industrie op dit vlak, met name als bron van energie maar ook voor de modernisering van technologie. Daarnaast werden er met dit verdrag ook verschillende veiligheidsvoorwaarden opgesteld. Er zijn in het verdrag afspraken gemaakt over onder andere ontwikkeling van onderzoek, verspreiding van kennis, bescherming van de gezondheid, investeringen, gemeenschappelijke ondernemingen, veiligheidscontrole, eigendomsrecht en de gemeenschappelijke markt op het gebied van kernenergie.

De taken van EURATOM zijn⁵⁵:

- Het onderzoek ontwikkelen en zorgen voor de verspreiding van technische kennis;
- Vaststelling en toepassing van uniforme veiligheidsnormen voor de bescherming van de gezondheid van de bevolking en de werknemers;
- Toeziens op een regelmatige en billijke erts- en splijtstofvoorziening aan alle gebruikers in de EU;
- Waarborgen dat de kernmaterialen niet voor andere doeleinden (met name militaire) worden aangewend dan waarvoor zij bestemd zijn;
- Uitoefenen van het eigendomsrecht voor bijzondere splijtstoffen;
- Met andere landen en internationale organisaties de vooruitgang in het vreedzame gebruik van kernenergie bevorderen;
- Gemeenschappelijke ondernemingen oprichten.

Lidstaten van de toenmalige EEG en de huidige EU zijn lid van EURATOM, evenals Zwitserland. EURATOM gebruikt voor beslissingen het Europees parlement, de Europese Raad en de Europese Commissie, maar is wel een zelfstandige organisatie. EURATOM is alleen bevoegd voor civiel en vreedzaam gebruik van kernenergie. Het eerste verdrag is vooralsnog niet herzien.

In 1961 werd het *Verdrag van Petten* gesloten.⁵⁶ Dit betreft een overeenkomst tussen Nederland en EURATOM over de vestiging van een gemeenschappelijk centrum voor onderzoek op het gebied van kernenergie (als doel beschreven in het EURATOM-verdrag) in Petten, waarmee Nederland een belangrijkere rol kreeg. Het verdrag beschrijft de precieze installaties van het centrum en de regelgeving. De verplichtingen die hierbij aan Nederland werden gesteld, waren het ter beschikking stellen van het terrein, zich ertoe verbinden meer terrein ter beschikking te stellen indien nodig, woonruimte voor personeelsleden garanderen, meebetalen aan de kosten van het centrum, en alle nodige maatregelen nemen om het centrum te beschermen tegen verstoringen in het functioneren. De overeenkomst is nog steeds geldig.

⁵⁴ Bron: <http://wetten.overheid.nl/BWBV0004033/2013-07-01>

⁵⁵ Bron: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/NL/TXT/HTML/?uri=URISERV:xy0024&from=EN>

⁵⁶ Bron: <http://wetten.overheid.nl/BWBV0004458/1962-10-30>

In 1967 volgde er een contract tussen EURATOM en Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). ECN was destijds gericht op de vreedzame toepassing van kernenergie en heette nog Reactorcentrum Nederland (RCN). Het *contract tussen EURATOM en RCN* voor onbepaalde tijd bevat *vertrouwelijke* afspraken over bedrijfsvoering van de hoge flux reactor in Petten door RCN onder leiding van EURATOM en betaald door de toenmalige EEG.

Non-proliferatie & kernwapenvrije zones

In 1963 tekenden De VS en de toenmalige Sovjet-Unie in de context van de wapenwedloop in de Koude Oorlog de Limited Test Ban Treaty die nucleaire bovengrondse wapentests verbodt.⁵⁷ Met dit verdrag vertraagde de wapenwedloop. De toenmalige leiders van deze landen hoopten dat er in deze context meer uitgebreide verdragen konden worden afgesloten. In 1968 volgde dan ook het *Non-proliferatieverdrag (NPT)*, waar inmiddels 189 landen bij betrokken zijn.⁵⁸ Dit verdrag heeft als doel dat verdere verspreiding van kernwapens wordt gestopt, dat er nucleaire ontwapening plaatsvindt en het regelt het recht op kernenergie voor vreedzame toepassingen, zoals het verrijken van uranium tot splijtstof. Er is geen verplichting om het verdrag te ondertekenen en landen hebben in principe het recht om het op te zeggen.

Nederland, als niet-kernwapenstaat, mag geen overdracht van kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen direct of indirect aanvaarden, mag geen kernwapens of andere explosiemiddelen vervaardigen of anderszins verwerven en mag niet trachten hulp te verkrijgen of te aanvaarden. De ondertekenaars van dit verdrag verplichten zich ertoe basismaterialen of bijzondere splijtbare materialen, of uitrusting of materialen die in het bijzonder zijn ontworpen of gemaakt voor de verwerking, het gebruik of de vervaardiging van bijzondere splijtbare materialen niet te leveren aan niet-kernwapenstaten voor vreedzame doeleinden, tenzij de basismaterialen of bijzondere splijtbare materialen onderworpen zijn aan de op grond van de vereiste waarborgen in het verdrag.

Het toezicht wordt gehouden door het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA). Daar het toezicht op EEG-landen al werd gehouden door EURATOM, duurde het tot 1975/1976 tot deze landen, waaronder Nederland, het verdrag tekenden en ook inspecties van het IAEA toelieten.⁵⁹ In 1996 kwam er een vervolg op de Limited Test Ban Treaty in de vorm van het *Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (Kernstopverdrag)*.⁶⁰ Dit verdrag verbiedt alle kernwapenexplosies, zowel voor militaire als civiele doeleinden. Het is ondertekend door 183 landen (waaronder Nederland). Het verdrag is echter nog niet in werking getreden, omdat verschillende landen het nog niet hebben geratificeerd. Als het verdrag in werking treedt, zijn de belangrijkste verplichtingen voor Nederland:

- Het niet uitvoeren van kernwapentestexplosies of andere nucleaire explosies en het verbieden voorkomen van dergelijke explosies op haar grondgebied;
- Onthouding van het veroorzaken, aanmoedigen of deelnemen aan het uitvoeren van kernwapentestexplosies of andere nucleaire explosies.

Met de ondertekening van het verdrag werd de Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty Organization opgericht om bovengenoemde doelen te bereiken. De kosten van de organisatie worden verdeeld onder de lidstaten. Er werd daarnaast een Conference of the States Parties, Executive Council en Technical Secretariat opgericht. Om aan haar verplichtingen te voldoen, moest Nederland hiertoe een Nationale Autoriteit aanwijzen die de organisatie informeert. Staten mogen in principe uit het verdrag stappen, zes maanden nadat zij dit hebben aangeven.

⁵⁷ Bron: <https://history.state.gov/milestones/1961-1968/npt>

⁵⁸ Bron: <https://www.iaea.org/publications/documents/treaties/npt>

⁵⁹ Bron: <https://nucleairnederland.nl/historie/non-proliferatie-verdrag>

⁶⁰ Bron: https://www.ctbto.org/fileadmin/content/treaty/treaty_text.pdf

In 1971 werd naar aanleiding van het non-proliferatieverdrag het *Zangger Committee (ZAC of Nuclear Exporters Committee)* opgericht, onder het voorzitterschap van Claude Zangger (Zwitserland). Tussen 1971 en 1974 hielden 15 landen die nucleaire materialen exporteren informele meetings met als doel een gemeenschappelijke consensus te bereiken op het gebied van:

- *The definition of what constituted equipment or material especially designed or prepared for the processing, use or production of special fissionable material;*
- *The conditions and procedures that would govern exports of such equipment or material in order to meet the obligations of article III, paragraph 2 of the NPT, on a basis of fair commercial competition.*⁶¹

De groep houdt sindsdien een lijst bij van materialen die alleen mogen worden geëxporteerd als bepaalde veiligheidsmaatregelen getroffen worden (*trigger list*) In het Non-proliferatieverdrag was namelijk geen definitie gegeven van genoemde uitrusting of materiaal. Daarnaast staat de ZAC leden toe een coördinerende rol te vervullen op het vlak van nucleaire export. De groep telt op dit moment 39 leden. De ZAC is informeel van aard en niet juridisch bindend voor haar lidstaten.⁶² Hierdoor kunnen sommige zaken met betrekking tot non-proliferatie makkelijker worden opgelost dan met de Nuclear Suppliers Group (verderop beschreven).

Vanaf 1967 zijn er in het kader van de VN verschillende verdragen gesloten voor het inrichten van kernwapenvrije gebieden.⁶³ Er zijn vijf verdragen in het kader van 'Nuclear Weapon Free Zones': het *Verdrag van Tlatelolco* (1967): verbod voor kernwapens in Latijns Amerika en de Caraïben; het *Verdrag van Rarotonga* (1985): kernwapenvrije zone in het zuidelijke Pacifische Oceaan gebied; het *Verdrag van Bangkok* (1995): kernwapenvrije zone in Zuidoost Azië; het *Verdrag van Pelindaba* (1996): kernwapenvrije zone in Afrika; en het *Central Asian Nuclear-Weapon-Free Zone Treaty* (2006): kernwapenvrije zone in centraal Azië. In kernwapenvrije zones is er een verbod op de acquisitie, het bezit, het testen, het plaatsen en het gebruik van kernwapens. Mongolië heeft als land vanaf 1992 een kernwapenvrije status. Verder zijn er drie verdragen rondom 'Nuclear-weapon-free geographical regions' die het plaatsen van kernwapens op respectievelijk Antarctica, in de ruimte en op de zeebodem verbieden: the *Antartic treaty* (1959), the *Outer Space Treaty* (1967) en the *Sea-bed Treaty* (1971). Voor Nederland zijn met name de laatste twee van praktische betekenis.

Nadat India in 1974 een nucleaire bom testte, werd in reactie hierop in datzelfde jaar de Nuclear Suppliers Group (NSG) opgericht. De test liet namelijk zien dat niet-wapen-specifieke technologie ook eenvoudig kon worden gebruikt voor wapens. De NSG hanteert een aantal richtlijnen voor nucleaire materialen en 'dual use materialen'. De NSG stelt hiertoe richtlijnen op. De groep begon met zeven landen, waaronder Nederland, en heeft inmiddels 50 leden. Leden dienen de richtlijnen te respecteren, dinen betreokken te zijn bij het NPT en moedigen non-proliferatie aan.

In de context van een toegenomen dreiging van terrorisme en het gevaar van het in de verkeerde handen raken van nucleaire materialen sinds het uiteenvallen van de Sovjet-Unie werd in 2004 Resolutie 1540: *General statement on non-provision of WMD and related materials to non-State actors* unaniem door de VN-Veiligheidsraad aangenomen.⁶⁴ Alle lidstaten van de VN zijn verplicht om maatregelen te nemen tegen de proliferatie van chemische, biologische, radiologische en nucleaire wapens onder niet-landen. Hiervoor moet – indien nodig - nationale wetgeving worden aangepast.

De belangrijkste verplichtingen zijn:

⁶¹ Bron: <http://www.foi.se/en/Customer--Partners/Projects/zc/zangger/history/>

⁶² Bron: <http://www.foi.se/en/Customer--Partners/Projects/zc/zangger/>

⁶³ Bron: <http://www.un.org/disarmament/WMD/Nuclear/NWFZ.shtml>

⁶⁴ Bron: <http://www.un.org/en/sc/1540/>

- Artikel 1: “...all States shall refrain from providing any form of support to non-State actors that attempt to develop, acquire, manufacture, possess, transport, transfer or use nuclear, chemical or biological weapons and their means of delivery.”;
- Artikel 2: “...all States, in accordance with their national procedures, shall adopt and enforce appropriate effective laws which prohibit any non-State actor to manufacture, acquire, possess, develop, transport, transfer or use nuclear, chemical or biological weapons and their means of delivery, in particular for terrorist purposes.”;
- Artikel 3: “...all States shall take and enforce effective measures to establish domestic controls to prevent the proliferation of nuclear, chemical, or biological weapons and their means of delivery.”.⁶⁵

Vernieuwend aan deze resolutie is het verplichtende karakter en de universele omvang, waarmee veel kleinere, niet verplichte afspraken vervallen.

Aan de hand van VN Resolutie 51/210: *Measures to eliminate international terrorism*, werd er in 1996 een comité opgericht om het *International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism*, kortweg de *Nuclear Terrorism Convention*, te initiëren.⁶⁶ In 2005 werd het verdrag bij de VN in New York gesloten. Dit verdrag is bedoeld om nucleair terrorisme te criminaliseren en om samenwerking met politie en justitie te versterken om nucleair terrorisme te voorkomen, te onderzoeken en te bestraffen. Landen die hebben getekend worden gestimuleerd om samen te werken in het voorkomen van nucleair terrorisme door informatie te delen en elkaar te helpen bij onderzoek naar criminelen en uitzettingsprocedures. Het verdrag verplicht bepaalde activiteiten met betrekking tot radioactief materiaal als criminele feiten te bestempelen en strafbaar te maken. 103 landen, waaronder Nederland, hebben het verdrag getekend. Eventuele opzegging gaat na een jaar na aankondiging in.

In 2006 werd, op initiatief van de toenmalige president George W. Bush en president Vladimir Poetin, het *Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism (GICNT)*, een niet-juridisch bindende partnership, opgericht.⁶⁷ Het partnership is bedoeld om de (inter)nationale capaciteit voor de preventie van en -reactie op - nucleair terrorisme te verbeteren. De partners onderschrijven het *Statement of Principles*, een aantal doelen op het gebied van nucleaire veiligheid. Er zijn 86 aangesloten landen, waaronder Nederland, en 5 internationale organisaties (IAEA, UNICRI, UNODC, INTERPOL, EU) in de vorm van waarnemers.

In 2009 stelde de Europese Raad de *dual use verordening* op.⁶⁸ Dit is een verordening tot instelling van een communautaire regeling voor controle op de uitvoer, overbrenging, tussenhandel en doorvoer van producten voor tweërlei gebruik (producten die zowel een civiele als militaire bestemming kunnen hebben). De verordening bevat met name verplichtingen rondom de uitvoer en doorvoer van die producten. Deze verordening is onder andere opgesteld op basis van Resolutie 1540 (2004) van de Veiligheidsraad van de Verenigde Naties. Verordeningen hebben een rechtstreekse werking voor alle lidstaten.

URENCO: verrijking uranium

Het *Verdrag van Almelo* in 1970 tussen Nederland, de Bondsrepubliek Duitsland en het Verenigd Koninkrijk legde de basis voor URENCO (Uranium ENrichment Company).⁶⁹ In dit verdrag zijn er

⁶⁵ Bron: http://www.un.org/en/ga/search/view_doc.asp?symbol=S/RES/1540%282004%29

⁶⁶ Bron: <https://treaties.un.org/doc/db/Terrorism/english-18-15.pdf>

⁶⁷ Bron: <http://www.gicnt.org/index.html>

⁶⁸ Bron: Verordening (EG) Nr. 428/2009 van de Raad

⁶⁹ Bron: Ministerie van Economische Zaken

afspraken gemaakt inzake samenwerking tussen de betreffende landen op het gebied van het gas-ultracentrifugeprocédé voor de verrijking van uranium tot splijtstof en de hiervoor benodigde fabricage. In Almelo werden productiefaciliteiten geïnstalleerd waar vanaf 1973 uranium werd verrijkt. Er werd een commissie ingesteld voor het toezicht op de samenwerking.

Bij deze samenwerking moet Nederland zich verzekeren dat gegevens, uitrusting, basismaterialen of bijzondere splijtbare materialen, die in haar bezit zijn als gevolg van deze samenwerking, niet zullen worden gebruikt om kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen te vervaardigen of anderszins te verwerven. Ook mag een andere niet-kernwapenstaat er niet mee worden geholpen of aangemoedigd om kernwapens of andere explosiemiddelen te vervaardigen of te verkrijgen. Daarnaast mag er geen uranium met de vereiste verrijkingsgraad voor de vervaardiging van kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen worden geproduceerd. Verder dienen er procedures voor veiligheidscontrole te worden toegepast die verenigbaar zijn met internationale verplichtingen.

Er volgden later nog drie verdragen voor de export van technologie. Het *Verdrag van Washington* (1992) was een overeenkomst tussen Nederland, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten voor de vestiging, bouw en exploitatie van een installatie voor de verrijking van uranium middels het gas-ultracentrifugeprocédé in de Verenigde Staten.⁷⁰ Voor de 3 oorspronkelijke staten, waaronder Nederland, zijn er verplichtingen op het gebied van bescherming en beveiliging van (de overdracht van) gerubriceerde gegevens.

In 2005 volgde het *Verdrag van Cardiff*, een overeenkomst tussen Nederland, Duitsland, het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk om de technologie ook naar Frankrijk te exporteren.⁷¹ Bij dit verdrag gelden ook verplichtingen met betrekking tot de bescherming en beveiliging van gerubriceerde gegevens. Daarnaast staat eveneens beschreven dat elke betrokken regering een Nationale Instantie aanwijst die verantwoordelijk is voor het waarborgen van een doeltreffende uitvoering op haar grondgebied van de beveiliging van gerubriceerde gegevens. In 2011 volgde het meest recente verdrag, het *Verdrag van Parijs*, eveneens een overeenkomst voor de vestiging, bouw en exploitatie van de technologie in de Verenigde Staten, getekend door Nederland, Duitsland, Frankrijk, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten.⁷² Bij dit verdrag gelden eveneens verplichtingen met betrekking tot de bescherming en beveiliging van gerubriceerde gegevens.

Op dit moment is URENCO het eigendom van Nederland, het Verenigd Koninkrijk en de twee Duitse bedrijven E On en RWE. URENCO heeft faciliteiten voor de verrijking van uranium in Gronau, Capenhurst en Almelo. In 2013 werd bekend dat de Nederlandse staat haar minderheidsaandeel in URENCO wil verkopen na het besluit van het Verenigd Koninkrijk om haar deel te gaan privatiseren. Een andere nog openstaande mogelijkheid is dat Nederland juist een meerderheidsbelang probeert te krijgen om publieke en strategische belangen te waarborgen.⁷³ Het Verdrag van Almelo schrijft overigens voor dat er consensus nodig is tussen Nederland, Groot Brittannië en de Duitse energiebedrijven om URENCO te kunnen verkopen.

Nucleaire veiligheid

Nederland is betrokken bij verschillende wereldwijde verdragen op het gebied van nucleaire veiligheid naast het eerdergenoemde non-proliferatieverdrag. Nederland wordt door het IAEA gecontroleerd. In 1980 werd het *Verdrag fysieke beveiliging van kernmateriaal* getekend vanwege de gevaren die kunnen ontstaan bij het onrechtmatig verkrijgen en gebruiken van kernmateriaal.⁷⁴ Het verdrag zorgt

⁷⁰ Bron: <http://wetten.overheid.nl/BWBV0001092/1995-02-01>

⁷¹ Bron: <http://wetten.overheid.nl/BWBV0001810/2006-07-01>

⁷² Bron: <http://wetten.overheid.nl/BWBV0005279/2012-01-31>

⁷³ Bron: <http://www.kernenergieinnederland.nl/files/20130523-URENCO.pdf>

⁷⁴ Bron: <http://wetten.overheid.nl/BWBV0003800/2016-05-08>

voor een goede beveiliging van kernmateriaal tijdens gebruik, opslag en vervoer ervan. Tot op heden zijn 153 landen en EURATOM betrokken bij het verdrag.

Nederland mag als verdragsluitende staat geen kernmateriaal (laten) uitvoeren, doorvoeren of invoeren tenzij het wordt beveiligd volgens bepaalde niveaus, en andere staten moeten hiervan op de hoogte worden gebracht. Staten dienen elkaar daarnaast zoveel mogelijk te assisteren, bijvoorbeeld in het geval van diefstal. Ook moeten staten straffen opleggen op bepaalde strafbare feiten gerelateerd aan kernmateriaal. In 2005 volgde er, mede door toegenomen risico's op het gebied van terrorisme, een amendement dat ook toezag op fysieke beveiliging van nucleaire faciliteiten. Opzegging van het verdrag wordt van kracht na 180 dagen.

In 1994 werd in Wenen het *Verdrag nucleaire veiligheid* gesloten. Dit verdrag had drie doelstellingen:

- Het bereiken en handhaven van een hoog niveau van nucleaire veiligheid over de gehele wereld door middel van verbetering van nationale maatregelen en internationale samenwerking, waaronder, indien van toepassing, technische samenwerking met betrekking tot veiligheid;
- Het instellen en in stand houden van doeltreffende bescherming tegen mogelijke stralingsrisico's in kerninstallaties, teneinde personen, de samenleving en het milieu te behoeden voor de schadelijke gevolgen van ioniserende straling uit die installaties;
- Het voorkomen van ongevallen met stralingsgevolgen en het beperken van de gevolgen, als dergelijke ongevallen zich toch voordoen.⁷⁵

78 landen en EURATOM zijn tot op heden betrokken bij het verdrag. De deelnemende landen zijn verplicht om de afspraken na te komen, binnen het raamwerk van de nationale wetgeving. Nederland heeft als verdragsluitende partij een aantal verplichtingen op het gebied van veiligheid van kerninstallaties. In 2015 is, mede naar aanleiding van het Fukushima-Daiichi ongeluk in Japan, de Verklaring nucleaire veiligheid in Wenen (*Vienna Declaration on Nuclear Safety*) aangenomen na een verzoek van Zwitserland om het Verdrag nucleaire veiligheid aan te passen op het gebied van kerninstallaties. In de verklaring staan beginselen die landen verder helpen in de implementatie van het Verdrag nucleaire veiligheid.

In 1997 werd het *Verdrag inzake de veiligheid van het beheer van bestraalde splijtstof en inzake de veiligheid van het beheer van radioactief afval* gesloten. Doelstellingen van dit verdrag zijn:

- Het bereiken en handhaven van een hoog niveau van veiligheid over de gehele wereld op het gebied van het beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval door middel van de verbetering van de nationale maatregelen en de internationale samenwerking, waaronder, indien van toepassing, technische samenwerking met betrekking tot veiligheid;
- Het verzekeren dat tijdens alle stadia van het beheer van gebruikte splijtstof en radioactief afval doeltreffende bescherming bestaat tegen mogelijke risico's teneinde personen, de samenleving en het milieu te behoeden voor de schadelijke gevolgen van ioniserende straling, nu en in de toekomst, op zodanige wijze dat wordt voldaan aan de behoeften en aspiraties van de huidige generatie zonder dat de mogelijkheid van de komende generaties om aan hun behoeften en aspiraties te voldoen in gevaar wordt gebracht;
- Het voorkomen van ongevallen waarbij radioactieve stoffen vrijkomen en het beperken van de gevolgen, mochten dergelijke ongevallen zich voordoen tijdens enig stadium van het beheer van bestraalde splijtstof of radioactief afval.⁷⁶

⁷⁵ Bron: <http://wetten.overheid.nl/BWBV0001256/1997-01-13>

⁷⁶ Bron: <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/trb-2001-111.html>

Op dit moment zijn 73 landen en EURATOM betrokken bij het verdrag. Nederland heeft hierbij verplichtingen op het gebied van de veiligheid van bestraalde splijtstof, de veiligheid van radioactief afval en algemene veiligheidsmaatregelen. Eventuele opzegging van het verdrag treedt normaliter na een jaar in werking.

In de Europese Unie zijn recent verschillende maatregelen genomen op het terrein van nucleaire veiligheid. De Europese Raad stelde in 2006 de *Richtlijn betreffende toezicht en controle op overbrenging van radioactieve afvalstoffen en bestraalde splijtstof* op.⁷⁷ Richtlijnen (Directives) bevatten doelstellingen waaraan lidstaten moeten voldoen, waarbij het beoogde resultaat vaststaat maar de precieze uitwerking niet. Met deze richtlijn wordt controle op intracommunautaire en extracommunautaire overbrengingen geregeld.

De richtlijn *nucleaire veiligheid* uit 2009⁷⁸ (wijziging 2014⁷⁹) heeft als doel om het risico van nucleaire ongevallen en het vrijkomen van grote hoeveelheden radioactieve straling te verminderen. Lidstaten dienen onder andere een nationaal wettelijk, regelgevend en organisatorisch kader voor de veiligheid van kerninstallaties in te stellen en in stand te houden, een bevoegde regelgevende autoriteit op het gebied van veiligheid en kerninstallaties in te stellen en in stand te houden en een regeling voor opleiding en training van personeelsleden die verantwoordelijk zijn voor de nucleaire veiligheid kerninstallaties in te stellen.

De *Richtlijn tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval* uit 2011 verplicht onder andere een wettelijk, regelgevend en organisatorisch kader voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval. Onder andere programma's, regelingen en een vergunningstelsel worden geregeld.⁸⁰ Er is in 2013 een *richtlijn* op het gebied van *ioniserende straling* opgesteld die in 2014 in werking is getreden.⁸¹ In deze richtlijn zijn basisnormen voor de bescherming tegen gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling opgesteld. Indien er geïnvesteerd wordt in (nieuwe) installaties moet hiermee rekening worden gehouden.

A.1.2 Overzicht verdragen

In onderstaande tabel is een chronologisch overzicht weergegeven van de voor Nederland belangrijkste internationale verdragen en afspraken op het gebied van de nucleaire kennisinfrastructuur.

Tabel 7 Overzicht internationale verdragen en afspraken

Nr.	Verdrag	Onderwerp	Jaar (am.)	Betrokken (tot op heden)
1	EURATOM-Verdrag Rome	Oprichting van de Europese Gemeenschap voor Atoomenergie	1957 (2007)	22 EU landen
2	Verdrag van Petten	Inrichting gemeenschappelijk centrum voor onderzoek kernenergie te Petten	1961	NL, EURATOM
3	Contract EURATOM en ECN	Bedrijfsvoering van reactor Petten	1967 (2003)	ECN, EURATOM
4	Nuclear-Weapon-Free zones/geografische regio's	Kernwapenvrije zones/regio's	1967-2006	Verschillend

⁷⁷ Bron: Richtlijn 2006/117/EURATOM van de Raad

⁷⁸ Bronnen: Richtlijn 2009/71/EURATOM van de Raad & Richtlijn 2014/87/EURATOM van de Raad

⁷⁹ Bron: Richtlijn 2014/87/EURATOM van de Raad

⁸⁰ Bron: Richtlijn 2011/70/EURATOM van de Raad

⁸¹ Bron: Richtlijn 2013/59/EURATOM van de Raad

Nr.	Verdrag	Onderwerp	Jaar (am.)	Betrokken (tot op heden)
	verdragen			
5	Non-proliferatieverdrag	Verspreiding kernwapens, nucleaire ontwapening, recht op verrijking uranium tot splijtstof	1968 NL: 1975	189 landen
6	Verdrag van Almelo	Samenwerking bij ontwikkeling en exploitatie gas-ultracentrifugeprocédé voor verrijkt uranium (oprichting URENCO)	1970	NL, BRD, VK
7	Zangger Committee (ZAC)/Nuclear Exporters Committee	Nucleaire export/non-proliferatie	1971	39 landen
8	Nuclear Suppliers Group	Organisatie dat non-proliferatie bevordert	1974-heden	50 landen
9	Verdrag fysieke beveiliging kernmateriaal (2005: en nucleaire faciliteiten) Wenen/New York	Fysieke beveiliging kernmateriaal tijdens het gebruik, opslag en vervoer ervan op nationaal grondgebied	1980 (2005)	153 landen
10	Verdrag van Washington	Vestiging, bouw, exploitatie van een installatie voor verrijking Uranium VS	1992	NL, D, VK, VS
11	Verdrag nucleaire veiligheid Wenen	Hoog niveau van nucleaire veiligheid wereldwijd, bescherming tegen stralingsrisico's, voorkomen ongevallen en beperken gevolgen	1994	78 landen
12	Comprehensive Nuclear Test-ban Treaty/Kernstopverdrag	Verbod op alle kernwapenexplosies, zowel voor militaire als civiele doelen	1996	183 landen
13	Verdrag veiligheid beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval Wenen	Hoog niveau van veiligheid wereldwijd betreft nucleair afval en bestraalde splijtstof, bescherming tijdens beheer, voorkomen ongevallen en beperken gevolgen	1997	73 landen
14	VN Resolutie 1540/ General statement on non-provision of WMD and related materials to non-State actors	Non-proliferatie van massavernietigingswapens onder niet-landen	2004	VN Veiligheidsraad
15	Verdrag van Cardiff	Samenwerking bij ultracentrifuge technologie	2005	NL, D, FR, VK
16	Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism	Voorkomen en bestrijden van nucleair terrorisme	2005	103 landen
17	Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism (GICNT)	Voorkomen en bestrijden van nucleair terrorisme	2006	86 landen
18	Richtlijn radioactieve afvalstoffen en bestraalde splijtstof	Toezicht en controle op overbrenging van radioactieve afvalstoffen en bestraalde splijtstof	2006	EU lidstaten
19	Dual use verordening	Controle op uitvoer, overbrenging, tussenhandel en doorvoer producten voor tweërlei gebruik	2009	EU lidstaten
20	Verdrag van Parijs	Vestiging, bouw, exploitatie van installaties voor verrijking Uranium met gas-ultracentrifuge technologie VS	2011	NL, D, FR, VK, VS
21	Richtlijn nucleaire veiligheid	Hoog niveau van veiligheid, voorkomen ongevallen	2009 (2014)	EU lidstaten

Nr.	Verdrag	Onderwerp	Jaar (am.)	Betrokken (tot op heden)
22	Richtlijn veilig beheer	Veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval	2011	EU lidstaten
23	Richtlijn ioniserende straling	Bescherming tegen ioniserende straling	2013	EU lidstaten
24	Verklaring nucleaire veiligheid Wenen	Beginselen voor de implementatie van het doel van het Verdrag nucleaire veiligheid om ongevallen te voorkomen en gevolgen te beperken	2015	Landen die Verdrag nucleaire veiligheid hebben getekend

Technopolis Group (2016)

A.1.3 Overzicht internationale verdragen en daarbij horende verplichtingen

Nederland is als deelnemer aan verscheidene internationale verdragen verplicht tot het voldoen aan een reeks van verplichtingen. Deze staan beschreven in onderstaande tabel.

Nr.	Verdrag	Eisen/verplichtingen
1	EURATOM-Verdrag Rome	Delen van onderzoeksprogramma's inzake kernenergie Uitvaardiging van wettelijke en bestuursrechtelijke bepalingen om basisnormen uit het verdrag betreffende veiligheid te doen naleven Periodiek rapport over de delfstoffen, reserves en investeringen in mijnbouw Toelaten inspecteurs
2	Verdrag van Petten	Terrein ter beschikking stellen voor het onderzoekscentrum Woonruimte voor personeel van onderzoekscentrum garanderen Meebetalen aan kosten van onderzoekscentrum Het onderzoekscentrum beschermen tegen storen van het functioneren
3	Contract EURATOM en ECN	Vertrouwelijk: over de technische bedrijfsvoering, verslaggeving, instelling commissies, overdracht kennis en octrooien, diensten, en financiële bepalingen
4	Nuclear-Weapon-Free zones/geografische regio's verdragen	Verbod op de acquisitie, het bezit, het testen, het plaatsen en het gebruik van kernwapens in o.m. de ruimte en op de zeebodem
5	Non-proliferatieverdrag	Geen overdracht van kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen aanvaarden Geen kernwapens of andere explosiemiddelen vervaardigen of verwerven, geen hulp hierbij Basismaterialen, bijzondere splijtbare materialen en hieraan gerelateerde materialen mogen niet geleverd worden aan niet-kernwapenstaten voor vreedzame doeleinden, tenzij voldaan wordt aan bepaalde waarborgen
6	Verdrag van Almelo	Gegevens, uitrusting, basismaterialen of bijzondere splijtbare materialen in bezit als gevolg van samenwerking mogen niet gebruikt worden voor kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen Andere niet-kernwapenstaten mogen hier ook niet mee worden geholpen of aangemoedigd voor kernwapens of andere nucleaire explosiemiddelen Toepassing van procedures voor veiligheidscontrole die verenigbaar zijn met internationale verplichtingen
7	Zanger Committee (ZAC)/Nuclear Exporters Committee	Geen verplichtingen, afspraken over veiligheidsmaatregelen bij de export van materialen die in <i>trigger list</i> staan
8	Nuclear Suppliers Group	Het houden aan richtlijnen op het gebied van export en verplaatsing van materialen die kunnen worden toegepast bij de ontwikkeling van kernwapens, bestaande uit nucleaire materialen en dual use materialen

Nr.	Verdrag	Eisen/verplichtingen
9	Verdrag fysieke beveiliging kernmateriaal (2005: en nucleaire faciliteiten) Wenen/New York	<p>Verbod op (laten) uitvoeren, doorvoeren of invoeren van kernmateriaal tenzij het wordt beveiligd volgens bepaalde niveaus.</p> <p>Staten dienen elkaar zoveel mogelijk assistentie te verlenen bij bijvoorbeeld diefstal</p> <p>Er moeten straffen worden gesteld op bepaalde strafbare feiten gerelateerd aan kernmateriaal en nucleaire faciliteiten</p> <p>Verschillende verplichten op het gebied van uitlevering en vervolging</p>
10	Verdrag van Washington	Bescherming en beveiliging van (de overdracht van) gerubriceerde gegevens
11	Verdrag nucleaire veiligheid Wenen	<p>Toetsing van de veiligheid van de bestaande kerninstallaties bij inwerkingtreding van het verdrag en eventueel verbeteringen aanbrengen</p> <p>Schepping en handhaving van een regelgevend kader betreffende de veiligheid van kerninstallaties, en er wordt een regulerend lichaam opgericht of aangewezen ter uitvoering hiervan.</p> <p>De hoofdverantwoordelijkheid voor de veiligheid van een kerninstallatie ligt bij de vergunninghouder</p> <p>Alle organisaties die activiteiten verrichten die rechtstreeks verband houden met kerninstallaties zetten beleidslijnen uit met betrekking tot nucleaire veiligheid</p> <p>Er dienen voldoende financiële middelen beschikbaar te zijn voor de veiligheid van kerninstallaties gedurende de levensduur. Daarnaast moet personeel voldoende gekwalificeerd zijn</p> <p>Er dienen programma's voor kwaliteitsborging te worden opgezet en uitgevoerd</p> <p>Uitvoerige en stelselmatige beoordelingen van veiligheid kerninstallaties</p> <p>Maatregelen tegen blootstelling aan ioniserende straling</p> <p>Rampenbestrijdingsplannen voor kerninstallaties, ook kerninstallaties in nabijheid van grondgebied</p> <p>Veiligheidsmaatregelen voor de vestiging, ontwerp & bouw en bedrijfsvoering van kerninstallaties</p>
12	Comprehensive Nuclear Test-ban Treaty/Kernstopverdrag	<p>(Nog niet in werking getreden)</p> <p>Verbod op uitvoeren van kernwapentestexplosies of andere nucleaire explosies</p> <p>Verbieden en voorkomen van dergelijke explosies op haar grondgebied</p> <p>Onthouding van het veroorzaken, aanmoedigen of deelnemen aan het uitvoeren van kernwapentestexplosies of andere nucleaire explosies</p> <p>Meebetalen aan organisatie</p> <p>Toewijzen van Nationale Autoriteit</p>
13	Verdrag veiligheid beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval Wenen	<p>In alle fasen van het beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval moeten individuen, de maatschappij en de omgeving voldoende worden beschermd tegen radioactieve straling</p> <p>Faciliteiten voor bestraalde splijtstof en radioactief afval moeten aan bepaalde veiligheidsstandaarden voldoen</p> <p>Voor de vestiging, ontwerp & bouw en bedrijfsvoering van (nieuwe) faciliteiten voor bestraalde splijtstof en radioactief afval moeten bepaalde (veiligheids)procedures worden opgevolgd</p> <p>Na sluiting van faciliteiten voor radioactief afval moeten bepaalde procedures worden opgevolgd</p> <p>Om aan bovenstaande eisen te kunnen voldoen moeten er hiertoe wetgevende, regelgevende en administratieve maatregelen worden genomen. Hiervoor wordt een onafhankelijk wetgevend orgaan opgericht of aangewezen</p> <p>De hoofdverantwoordelijkheid voor de veiligheid van het beheer van bestraalde splijtstof en radioactief afval ligt bij de vergunninghouder</p> <p>Personeel van faciliteiten moet voldoende gekwalificeerd zijn</p> <p>Er dienen voldoende financiële middelen voor faciliteiten te zijn, ook na sluiting</p> <p>Tijdens de bedrijfsvoering van faciliteiten voor bestraalde splijtstof of radioactief afval</p>

Nr.	Verdrag	Eisen/verplichtingen
		<p>dienen er maatregelen te worden genomen voor bescherming tegen radioactieve straling</p> <p>Voor en tijdens de bedrijfsvoering van faciliteiten voor bestraalde splijtstof of radioactief afval moeten er plannen zijn voor noodsituaties</p> <p>Ook na de ontmanteling van faciliteiten dienen er voldoende financiële middelen en gekwalificeerd personeel beschikbaar te zijn</p> <p>Bij verplaatsing tussen landen dienen bepaalde (veiligheids)maatregelen te worden genomen</p>
14	VN Resolutie 1540/ General statement on non-provision of WMD and related materials to non-State actors	<p>Verbod op steun aan niet-staten die nucleaire, chemische of biologische wapens en hun overbrengingsmiddelen produceren, verwerven, bezitten, ontwikkelen, transporteren of over te dragen</p> <p>Er dienen maatregelen te worden genomen om niet-staten te verbieden om nucleaire, chemische of biologische wapens en hun overbrengingsmiddelen te produceren, acquire, bezitten, ontwikkelen, transporteren of over te dragen</p> <p>Er dienen maatregelen te worden genomen voor binnenlands toezicht om proliferatie van nucleaire, chemische of biologische wapens en hun overbrengingsmiddelen te voorkomen</p>
15	Verdrag van Cardiff	<p>Bescherming en beveiliging van (de overdracht van) gerubriceerde gegevens</p> <p>Aanwijzen Nationale Instantie verantwoordelijk voor uitvoering van de beveiliging van gerubriceerde gegevens</p>
16	Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism	<p>Bepaalde activiteiten met betrekking tot radioactief materiaal als criminele activiteiten bestempelen en strafbaar maken, hiervoor indien nodig nationale wetten wijzigen</p> <p>Verplichtingen rondom informatie-uitwisseling, arrestatie, uitzetting, etc.</p> <p>Criminele activiteiten voorkomen moeten maatregelen genomen worden om radioactief materiaal te beschermen</p> <p>Bepaalde stappen bij inbeslagname van radioactief materiaal, apparaten of faciliteiten</p>
17	Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism (GICNT)	<p>Niet-juridisch bindende beginselverklaring:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ontwikkelen en verbeteren van de boekhouding, controle en fysieke beveiligingssystemen voor nucleaire en andere radioactieve materialen en stoffen; • Verhogen van de beveiliging van civiele nucleaire installaties; • Verbeteren van de mogelijkheid om nucleaire en andere radioactieve materialen en stoffen op te sporen, om de illegale handel in dergelijke materialen en stoffen te voorkomen, om samenwerking in onderzoek en de ontwikkeling van de nationale detectiemogelijkheden te bevorderen; • Verbeteren van de mogelijkheden van de deelnemers om te zoeken naar, in beslag te nemen, en veilige controle over onrechtmatig vastgehouden nucleaire en andere radioactieve stoffen en stoffen of apparaten met behulp van hen. • Voorkomen van veilige havens voor terroristen, de verwerving van financiële of economische middelen door terroristen, dan wel het gebruik van nucleaire en andere radioactieve materialen en stoffen; • Zorg voor voldoende nationale wet- en regelgeving om te voorzien in de uitvoering van passende strafrechtelijke en, indien van toepassing, burgerlijke aansprakelijkheid van terroristen en degenen die daden van nucleair terrorisme vergemakkelijken; • Verbeteren van de mogelijkheden voor respons, mitigatie, en onderzoek, in het geval van terreuraanslagen met gebruik van nucleaire en andere radioactieve materialen en stoffen, waaronder de ontwikkeling van technische middelen om nucleaire en andere radioactieve stoffen te identificeren; en • Bevorderen van het delen van informatie met betrekking tot de bestrijding nucleair terrorisme en de facilitering daarvan, en passende maatregelen te nemen in overeenstemming met nationale wetgeving en internationale verplichtingen ten aanzien van de betrouwbaarheid van de informatie die zij uitwisselen.
18	Richtlijn radioactieve afvalstoffen en bestraalde splijtstof	<p>Verplichtingen met betrekking tot aanvragen van intracommunautaire en extracommunautaire overbrengingen</p> <p>Verbod op bepaalde overbrengingen</p> <p>Gebruik van een uniform document</p> <p>Periodiek verslag over uitvoering van de richtlijn</p>

Nr.	Verdrag	Eisen/verplichtingen
19	Dual use verordening	Eisen en verplichtingen rondom de uitvoer en doorvoer van (een bijgevoegde lijst met) producten van tweërlei gebruik Verplichtingen rondom uitvoervergunningen, vergunningen voor tussenhandeldiensten, douaneprocedures, administratieve samenwerking en controlemaatregelen
20	Verdrag van Parijs	Bescherming en beveiliging van (de overdracht van) gerubriceerde gegevens
21	Richtlijn nucleaire veiligheid	Instelling en instandhouding van een nationaal wettelijk, regelgevend en organisatorisch kader voor de veiligheid van kerninstallaties, waarbinnen verantwoordelijkheden worden vastgesteld voor onder andere nucleaire veiligheidsvoorschriften, een stelsel van vergunningen en verboden, een stelsel van toezicht op nucleaire veiligheid, en handhavingsmaatregelen Instelling en instandhouding van een bevoegde regelgevende autoriteit op het gebied van veiligheid en kerninstallaties Hoofdverantwoordelijke voor de nucleaire veiligheid van een kerninstallatie is de vergunninghouder Regeling voor opleiding en training van personeelsleden die verantwoordelijk zijn voor de nucleaire veiligheid van kerninstallaties Informatie met betrekking tot de nucleaire veiligheid van kerninstallaties en de regulering ervan dient beschikbaar te worden gesteld voor werkers en het publiek Belangrijkste toevoeging 2014: Overeenkomstig het nationale kader voor nucleaire veiligheid wordt geëist dat bij het ontwerp, de keuze van de vestigingsplaats, de bouw, de inbedrijfstelling, de bedrijfsvoering en de buitenbedrijfstelling van kerninstallaties de doelstelling voor ogen wordt gehouden dat ongevallen worden voorkomen, of, indien een ongeval zich voordoet, de gevolgen worden beperkt Periodieke zelfevaluaties
22	Richtlijn veilig beheer	Opstelling en instandhouding van een passend nationaal wettelijk, regelgevend en organisatorisch kader voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval waarmee verantwoordelijkheden worden toegewezen en wordt voorzien in coördinatie tussen betrokken bevoegde instanties. Dit omvat o.a. programma's, regelingen, een vergunningstelsel en handhavingsmaatregelen Instelling en instandhouding van een regelgevende autoriteit op het gebied van veiligheid van het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval Hoofdverantwoordelijkheid voor de veiligheid van faciliteiten en activiteiten inzake het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval berust bij de vergunninghouder Verplichte regeling voor opleiding en training van personeel, alsmede voor onderzoek en ontwikkeling van activiteiten om te voldoen aan het nationale programma voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval Uitvoering van nationaal programma voor het beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval Verslag over uitvoering van richtlijn
23	Richtlijn ioniserende straling	Systeem van stralingsbescherming: o.a. algemene beginselen, dosisbeperkingen, dosislimieten, referentieniveaus Voorschriften voor vorming, opleiding en voorlichting met betrekking tot stralingsbescherming Rechtvaardiging en controle van handelingen Verantwoordelijkheden voor beroepsmatige blootstelling Verplichtingen rondom medische blootstelling en blootstelling van de bevolking Algemene verantwoordelijkheden en overige voorschriften voor officiële controle
24	Verklaring nucleaire veiligheid Wenen	Nieuwe kerncentrales moeten ontworpen en gebouwd worden overeenkomstig het doel ongevallen te voorkomen en gevolgen te beperken Periodieke veiligheidscontroles in bestaande installaties

Technopolis Group (2016)

B.1 Benchmark België

B.1.1 Introductie

In België werden de eerste nucleaire proefopstellingen in de jaren '60 gebouwd. De eerste kernenergiecentrales werden vervolgens in 1974 in bedrijf genomen in Doel (Vlaanderen) en Tihange (Wallonië). Inmiddels speelt kernenergie een zeer belangrijke rol in de Belgische energievoorziening: het land telt 7 kernreactoren die gezamenlijk ongeveer de helft van alle gebruikte energie leveren.

In 2000 bracht de AMPERE commissie een rapport uit aan de Belgische regering waarin werd aanbevolen kernenergie verder te ontwikkelen. Echter, ingegeven door politieke en maatschappelijke ontwikkelingen, werd op 31 januari 2003 de *Wet op de kernuitstap* aangenomen waarin werd afgesproken af te zien van de bouw van nieuwe kernenergiecentrales. Eveneens werd besloten de bedrijfsduur van bestaande kernreactoren tot 40 jaar te beperken. Hierdoor zouden de reactoren gefaseerd worden gesloten, met de eerste drie in 2015, en de laatste twee in 2025. Echter, na diverse wetswijzigingen en periodes van uitstel werd de bedrijfsduur voor enkele reactoren met maximaal 10 jaar verlengd om zo de Belgische energiebevoorrading te kunnen garanderen. In ruil voor de verlenging van de bedrijfsduur van de kernreactoren Doel 1 en 2 en Tihange 1 betaalt de uitbater, Electrabel, de regering een jaarlijkse nucleaire rente van enkele honderden miljoenen euro's. De verlenging betekende ook dat de in begin 2015 op grond van de wettelijke afspraken al stil gelegde Doel 1 reactor later dat jaar opnieuw werd opgestart.

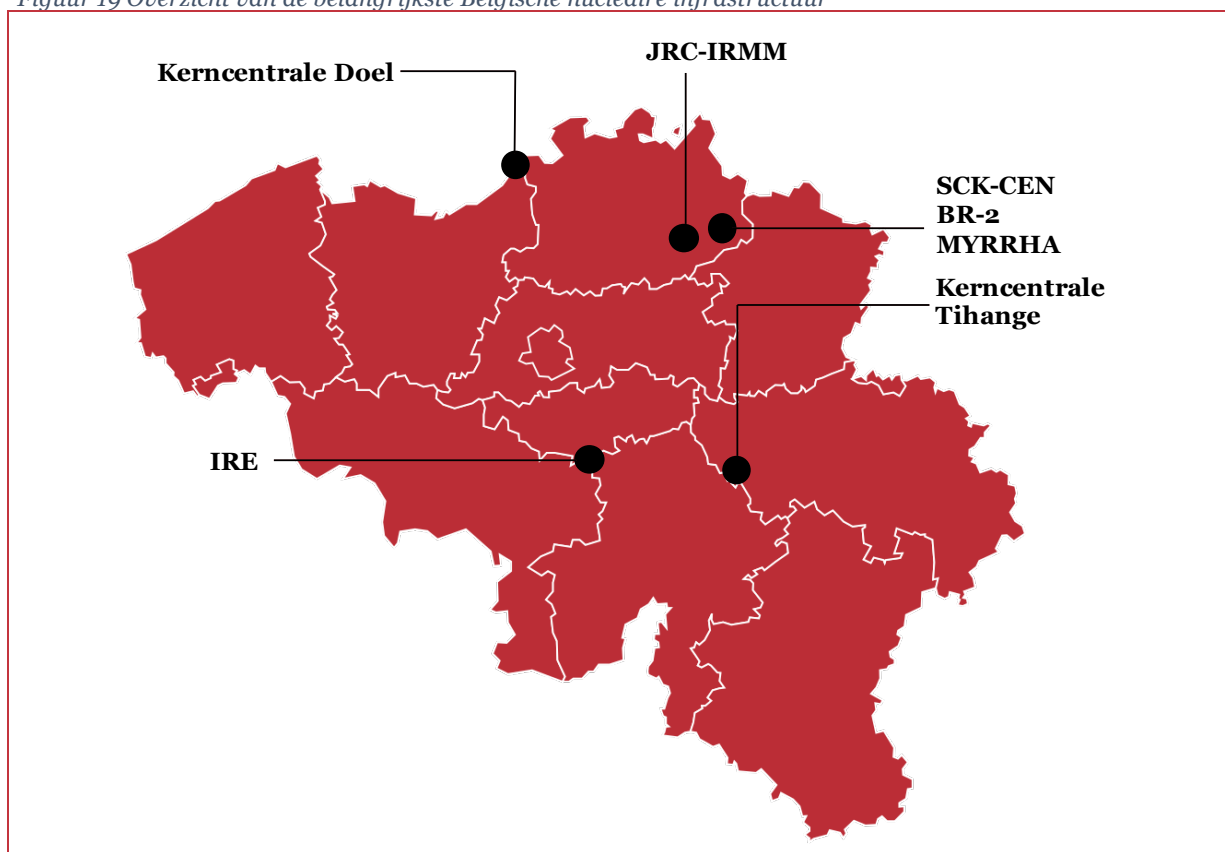
De Belgische nucleaire infrastructuur is echter niet uitsluitend gecentreerd rond kernenergie. Dankzij de aanwezigheid van diverse productiefaciliteiten voor medische isotopen en onderzoeksreactoren, speelt het land ook in de medisch en materiaalkundige domeinen een belangrijke rol binnen de mondiale nucleaire kennisinfrastructuur.⁸²

B.1.2 Overzicht infrastructuur

België telt in totaal 7 kernenergiereactoren, verdeeld over de 2 kerncentrales in Doel en Tihange (zie Figuur 19). Alle kerncentrales worden uitgbaat door Electrabel, een dochteronderneming van Engie (voorheen GDF Suez). Electrabel is gedeeld eigenaar van alle faciliteiten (50% van Tihange 1, 90% van Tihange 2 en 3, 100% van Doel 1 en 2, en 90% van Doel 3 en 4). De overige gedeelten behoren toe aan de Société coopérative de Production d'Electricité (SPE) (Tihange 2 en 3, Doel 3 en 4) en aan het Franse EDF (Tihange 1). EDF heeft sinds 2009 een meerderheidsbelang van 51% in SPE.

⁸² https://www.nucleairforum.be/sites/default/files/pdf/nl/FN_brochure.pdf

Figuur 19 Overzicht van de belangrijkste Belgische nucleaire infrastructuur



Technopolis Group (2016)

Daarnaast bevindt zich bij het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN) in Mol de BR2 high-flux reactor (100 MWt), evenals twee kleinere opstellingen.⁸³ De BR2 reactor produceert ongeveer 16% van de wereldvoorraad aan $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. De oudere BR1 reactor, operationeel sinds 1956, wordt nog steeds gebruikt als onderzoeks- en testreactor. De BR3 prototype reactor is al in 1987 buiten gebruik gesteld en zal naar verwachting in 2020 volledig ontmanteld zijn. Momenteel wordt in Mol de Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications (MYRRHA) installatie ontwikkeld voor onderzoek en productie van medische radioisotopen en gedoteerd silicium. Deze geavanceerde reactor is een samenwerking tussen België, de Europese Unie, de Europese InvesteringsBank and diverse andere partijen. België draagt 40% van de financiering bij. De reactor zal naar verwachting in 2023 volledig operationeel zijn en zal op termijn de BR2 reactor vervangen.

Het Instituut voor Radio-Elementen (IRE) in Fleurus is de tweede grootste producent ter wereld van radio-elementen voor medische beeldvorming. Bij IRE worden de isotopen ^{99}Mo , ^{131}I en ^{90}Y verwerkt. Daarnaast worden bij het in 2010 opgerichte filiaal IRE-ELiT diverse radiofarmaceutische derivaten geproduceerd. Er is echter geen eigen kernreactor aanwezig bij de faciliteiten in Fleurus.

Ook in België worden medische isotopen in toenemende geproduceerd in cyclotrons.⁸⁴ Dergelijke installaties bevinden zich in de universitaire ziekenhuizen van Brussel, Leuven, Gent en Antwerpen. Ook de universiteiten van Louvain-la-Neuve en Luik beschikken over eigen cyclotrons. Deze zijn zowel voor isotoopproductie als voor onderzoek inzetbaar.

⁸³ http://www.sckcen.be//media/Files/Public/Publications/Company_brochure/SCKCEN_brochure_2012_NL_web.pdf?la=nl

⁸⁴ <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/inrichtingen-van-%C2%AB-klasse-ii-a-%C2%BB/1299.aspx>

B.1.3 Economisch belang

Ongeveer 37,5% van de in België gebruikte elektriciteit is afkomstig uit kernenergie. De centrale in Doel heeft 4 kernreactoren, met een totaal vermogen van 2.911 megawatt (MW). Tihange heeft 3 reactoren met een totaal vermogen van 3.016 MW. Daarnaast hebben Electrabel en het Duitse E-On een overeenkomst waarbij de twee partijen naar behoefte capaciteit bij elkaar kunnen afnemen (tot 770 MWe voor E-On en tot 700 MWe voor Electrabel). De overige elektriciteitsproductie is hoofdzakelijk gebaseerd op fossiele brandstoffen, waarvoor België sterk afhankelijk is van de import van olie, gas en kolen. Waterkracht en andere vormen van hernieuwbare energie spelen op dit moment slechts een zeer beperkte rol (ca. 12 %).

De laatste jaren daalt de productiecapaciteit in België gestaag, onder meer als gevolg van langdurige stillegging van reactoren.⁸⁵ Tegelijkertijd neemt hierdoor de import van elektriciteit toe. In 2014 bedroeg de netto elektriciteitsproductie zo'n 67,6 TWh, naast een netto import van 17,6 TWh (ca. 22% van het totale verbruik). Met name de buurlanden Duitsland, Frankrijk en Nederland zijn belangrijke toeleveranciers van elektriciteit. Op het vlak van energieonafhankelijkheid speelt kernenergie in België momenteel onmiskenbaar een zeer grote rol. De geplande kernuitstap in 2025 zal dan ook gepaard moeten gaan met een sterke toename in het gebruik van hernieuwbare energiebronnen om een mate van onafhankelijkheid te kunnen waarborgen.

De Belgische nucleaire kennisinfrastructuur speelt niet alleen in de energievoorziening een grote rol, maar is ook een significante economische aanjager. Op basis van een in 2012 door adviesbureau PWC uitgevoerde studie wordt geschat dat de nucleaire sector ongeveer 8.000 FTE aan directe arbeidsplaatsen op levert.⁸⁶ De electronucleaire sector vormt de grootste werkgever, met 3.446 FTE in directe werkgelegenheid. Hiernaast zijn ook activiteiten gelieerd aan de medische sector (2.586 FTE) en onderzoek en onderwijs (732 FTE) van groot belang. Ook transversale activiteiten, onder meer op het gebied van nucleair transport en veiligheid, dragen verder bij aan de werkgelegenheid.

B.1.4 Wetenschappelijk belang

Nucleair onderzoek wordt in België hoofdzakelijk uitgevoerd door het in 1952 opgerichte Belgisch Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN) in Mol. Binnen het centrum zijn 3 wetenschappelijke instituten actief: het Instituut voor Nucleaire Materiaalwetenschappen; het Instituut voor Geavanceerde Nucleaire Systemen; en het Instituut voor Milieu, Gezondheid en Veiligheid. Binnen deze instituten wordt zowel fundamenteel als toegepast onderzoek uitgevoerd.

De in Mol aanwezige BR2 reactor is één van de krachtigste en meest flexibele reactoren ter wereld.⁸⁷ De reactor wordt onder meer gebruikt voor materiaalkundig onderzoek, en voor de productie van radio-isotopen en gedoteerd silicium. Dit laatste wordt gebruikt in de productie van halfgeleiders voor hoogwaardige toepassingen. Het SCK-CEN is een vooraanstaand onderzoekscentrum dat onderdeel uitmaakt van diverse nationale en Europese kennisnetwerken.^{88,89} Aan het centrum verbonden onderzoekers publiceren regelmatig in wetenschappelijke vaktijdschriften.

Het IRMM (Instituut voor ReferentieMaterialen en Metingen) in Geel is een van de 7 onderzoeksinstituten van het Joint Research Centre van de Europese Commissie. Hier bevinden zich een 150 MeV lineaire versneller (GELINA) en een 7 MV Van der Graaff versneller.⁹⁰

⁸⁵ <https://www.febeg.be/statistiek-elektriciteit>

⁸⁶ *Studie naar de werkgelegenheid gecreëerd door de nucleaire sector in België* (Mei 2012), PWC. In opdracht van het Nucleair Forum.

⁸⁷ <https://www.sckcen.be/en/Research/Infrastructure/BR2>

⁸⁸ SCK-CEN maakt onder meer deel uit van het European Network on education and training in Radiological Protection (ENETRAP), het European Nuclear Education Network (ENEN) en het Belgian Nuclear higher Education Network (BNEN)

⁸⁹ https://www.sckcen.be/en/Research/Research_partners

⁹⁰ <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/instituut-voor-referentie-materialen-en-metingen/1750.aspx>

B.1.5 Beleidsontwikkelingen

Zoals eerder aangegeven voorziet de *Wet op de kernuitstap* in een gefaseerde afbouw van de nucleaire infrastructuur, met het doel om in 2025 alle kernenergiereactoren definitief te sluiten. Het besluit hiertoe is destijds onder meer ingegeven door maatschappelijke zorgen rond de gezondheids- en veiligheidsrisico's van kerntechnologie. Alhoewel de wet al in 2003 door de toenmalige regering Verhofstadt I werd aangenomen, is de uitvoering hiervan door opeenvolgende regeringen meermaals vertraagd doordat werd gevreesd voor ernstige energietekorten als gevolg van het uitblijven van voldoende alternatieven. Deze vrees werd in 2014 verder gevoed door acute capaciteitsproblemen als gevolg van de langdurige stillegging van 3 van de 7 reactoren.⁹¹

Ondanks de vertragingen in de uitvoering van de wet is definitieve sluiting van alle kernreactoren nog altijd voorzien voor eind 2025. Ook de huidige regering Michel heeft zich hieraan gecommitteerd. Alhoewel het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) goedkeuring heeft gegeven aan de verlenging van de bedrijfsduur van de oudere centrales, staat dit besluit recentelijk weer volop ter discussie. Voornaamste aanleiding hiervoor is het feit dat sinds 2012 bij de reactoren in zowel Doel als in Tihange herhaaldelijk technische mankementen zijn geconstateerd waardoor tijdelijke stillegging van de installaties noodzakelijk was. De voortdurende problemen hebben geleid tot zorgen over de veiligheid van de centrales, niet alleen bij de Belgische bevolking maar ook in Nederland en Duitsland aangezien beide centrales zich bevinden in de grensstreek. Daarnaast neemt ook de angst toe dat de centrales het doelwit zouden kunnen worden van terroristische aanslagen.

De voorgenomen kernuitstap zal naar verwachting geen directe gevolgen hebben voor de medische of wetenschappelijke toepassingen en zal de reactoren bij het SCK-CEN ongemoeid laten. Dankzij de bouw van de MYRRHA reactor mag zelfs worden verwacht dat België zijn positie op deze terreinen zal kunnen versterken.

B.2 Benchmark Duitsland

B.2.1 Introductie

Duitsland heeft een lange en turbulente geschiedenis op nucleair gebied. In 1957 werd de eerste nucleaire onderzoeksreactor (FRM) in München in gebruik genomen, het zogenaamde 'Atomic Egg'. De Duitse atoomenergiewet werd in 1960 geëffectueerd met als doel kernenergie te promoten. Kort daarna werd de eerste kernenergiereactor in gebruik genomen. Sinds 1962 zijn er in totaal 37 kernenergiereactoren gebouwd en in operatie genomen. Duitsland heeft decennialang intensief gebruikt gemaakt van kernenergie voor haar energievoorziening. In 2000 leverden 19 reactoren 29,5 % van de totale energieproductie voor Duitsland¹. Echter, al sinds 1975 is er sprake van grote tegenstand vanuit de maatschappij tegen nucleaire activiteiten en investeringen in Duitsland. In 2011 heeft de overheid het radicale besluit genomen om alle kernenergiereactoren de komende jaren te sluiten met totale uitfasering in 2022.

Naast kernenergiereactoren zijn er in Duitsland goede faciliteiten voor het uitvoeren van nucleair onderzoek, voor het produceren van medische isotopen en voor industriële dienstverlening.

B.2.2 Overzicht infrastructuur

Van de 37 kernenergiereactoren die Duitsland heeft gehad zijn op dit moment nog maar 8 reactoren operationeel. In de periode 1962-1980 werden 24 reactoren in gebruik genomen, waarbij in dezelfde periode ook weer 5 reactoren werden gesloten. Van 1981-2000 werden er 13 nucleaire installaties in gebruik genomen en ook 13 reactoren gesloten.⁹² Naar aanleiding van de kernramp in Fukushima in 2011 werd door de Duitse regering besloten per direct 8 reactoren te sluiten en de operatie van de resterende installaties te limiteren tot 2022. De huidige 8 operationele kernenergiereactoren zijn

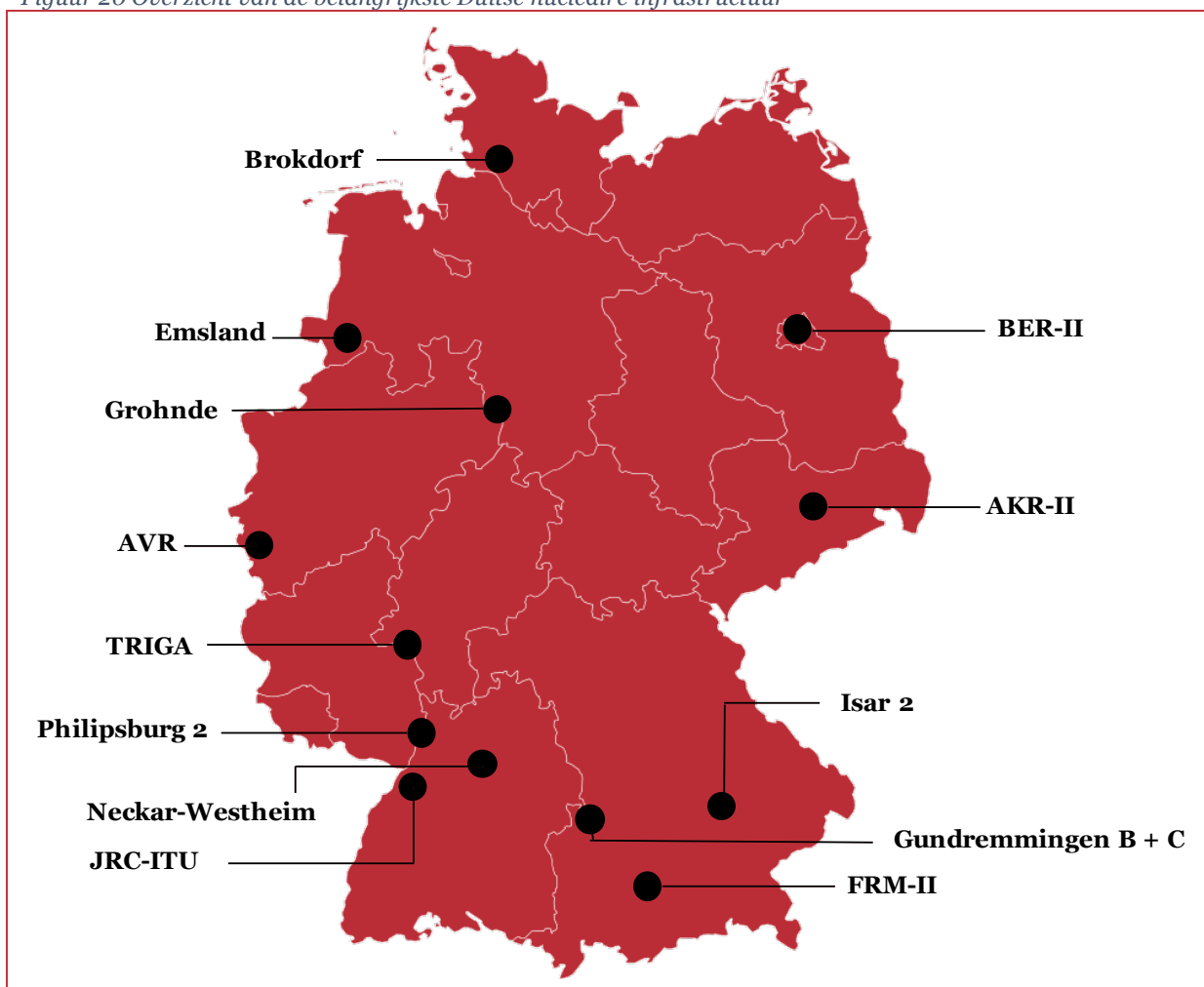
⁹¹ De reactoren Doel 3 en Tihange 2 lagen destijds stil vanwege scheurtjes in de reactorwanden. Bij de de Doel 4 reactor was mogelijk sabotage gepleegd in het niet-nucleaire gedeelte.

⁹² <http://www.bmwi.de/EN/Topics/Energy/Conventional-energy-sources/uranium-and-nuclear-energy.html>

Gundremmingen B, Gundremmingen C, Grohnde, Philippsburg 2, Brokdorf, Isar 2, Emsland en Neckarwestheim 2. Zij leveren in totaal 10,728 megawatt aan energie. Twee zijn zogenaamde kokendwaterreactors, 6 zijn drukwaterreactoren. De reactoren worden beheerd door verschillende bedrijven, RWE (3), E.ON (3) en EnBW (2). De eerstvolgende sluiting van een kernreactor zal eind 2017 plaatsvinden, gevolgd door 1 sluiting in 2019, 3 sluitingen in 2021 en 3 in 2022.⁹³

Er zijn sinds de oprichting van de eerste faciliteit voor nucleair onderzoek in 1957 meerdere nationale nucleaire onderzoekscentra opgericht, die in belangrijke mate hebben bijgedragen aan de nucleaire kennisinfrastructuur. Het onderzoekscentrum Karlsruhe en het onderzoekscentrum Jülich bijvoorbeeld bestonden beide 50 jaar in 2006. Veel kleine onderzoeksreactoren en demonstratie-faciliteiten zijn ondertussen gesloten.

Figuur 20 Overzicht van de belangrijkste Duitse nucleaire infrastructuur



Technopolis Group (2016)

Momenteel zijn er 7 onderzoeksreactoren in gebruik in Duitsland. Het gaat om de FRM II onderzoeksreactor (opvolger van FRM) van de technische universiteit in München, die in 2005 in gebruik werd genomen. Onder de naam Heinz Maier-Leibnitz Zentrum wordt hier door Duitse en internationale wetenschappers gewerkt op een breed spectrum van nucleaire onderzoeksterreinen. De FRM-II wordt tevens ($\pm 30\%$) gebruikt voor dienstverlening, zoals industriële toepassingen, medische

⁹³ <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>

isotopen productie en tumor bestralingen.⁹⁴ Verder is er de onderzoeksreactor BER II in Berlijn, die ook alleen in gebruik voor onderzoeksdoeleinden.

In Mainz staat een zogenaamde TRIGA-reactor (acroniem voor *Training, Research, Isotopes, General Atomics*), bedoeld voor onderwijs, onderzoek en om isotopen aan te maken voor medische en technische toepassingen. Verder zijn er nog 4 kleine trainingsreactoren, de AKR-2 van de technische universiteit in Dresden en 3 Siemens trainingsreactoren in Stuttgart, Furtwangen en Ulm.⁹⁵

Er zijn 26 cyclotrons operationeel verspreid over heel Duitsland in onderzoekscentra en ziekenhuizen voor de productie van kortlevende radionucliden.⁹⁶

B.2.3 Economisch belang

De nucleaire sector heeft momenteel nog een aandeel van 14% in de energievoorziening en is dus van een groot economisch belang voor Duitsland. De uitfasering van kernenergie zou volgens een studie van de KfW Bankengruppe (2011) Duitsland €25 miljard per jaar kosten. Dit geld is nodig om de energievoorziening via andere kanalen in stand te houden. Een totale investering van €239-262 miljard tot 2020 wordt door de studie voorzien, met o.a. €10 miljard voor fossiele brandstoffen, €144 miljard voor hernieuwbare energiebronnen en €29 miljard voor 3600 km hoogspanningslijnen.⁹⁷

Aan de sluiting en ontmanteling van de bestaande kernenergiereactoren zijn eveneens hoge kosten verbonden. Daarbij geldt volgens internationale wetgeving dat gebruikers deze kosten dragen. In 2015 is er een rapport van het Duitse ministerie van Economische Zaken en Energie gepubliceerd waarin resultaten van een stress-test aangeven dat de energiebedrijven inderdaad reserves hebben aangelegd om de ontmanteling van reactoren en afvoer van nucleair afval te kunnen betalen.⁷ Echter dezelfde bedrijven hebben zware financiële claims ingediend, omdat ze zich benadeeld voelen door de abrupte afbouw van het nucleair arsenaal. Zo hebben bijvoorbeeld E.ON en RWE de Duitse overheid aangeklaagd voor ruim €600 miljoen voor derving van inkomsten door het plotseling sluiten van 8 nucleaire energiereactoren na de ramp in Fukushima. Ook hebben E.ON, RWE en Vattenfall een claim van meer dan €15 miljard ingediend bij het Duitse hooggerechtshof voor de sluiting van de 8 reactoren en beperkingen voor andere reactoren. Daarnaast zijn er diverse gerelateerde zaken en claims waarover momenteel veel discussie plaatsvindt.⁹⁸

Nucleaire technologie wordt naast kernenergie gebruikt voor een breed pallet aan medische procedures, zowel voor onderzoeks- als commerciële doeleinden. In 2013 stonden ± 1000 specialisten in de nucleaire geneeskunde geregistreerd in Duitsland.⁹⁹

Er zijn een groot aantal ondernemingen in Duitsland die onderdeel zijn van de nucleaire-technologie industrie. Hierbij gaat het om leveranciers van uranium, bedrijven die gespecialiseerd zijn in uraniumverrijking, bedrijven die (onderdelen van) nucleaire installaties maken, transportbedrijven voor nucleair afval, bedrijven betrokken bij de ontmanteling van installaties en hergebruik van onderdelen, gerelateerde dienstverlenende bedrijven etc. Een bekende speler op het gebied van internationale nucleaire installatiebouw was bijvoorbeeld het Duitse technologieconcern Siemens. In 2011 liet Siemens echter weten zich terug te trekken uit nucleaire energie om aan te sluiten bij het Duitse overheidsbeleid. Siemens blijft wel onderdelen leveren voor kerncentrales, zoals stoomturbines, die ook gebruikt worden bij conventionele krachtcentrales.

Een concrete inschatting van financieel belang direct te relateren aan de nucleaire technologie is moeilijk te maken gezien de diversiteit aan ontwikkelingen gaande op dit vlak in Duitsland. Qua

⁹⁴ <http://www.frm2.tum.de>

⁹⁵ http://www.bfs.de/EN/topics/ns/ni-germany/research-reactors/research-reactors_node.html

⁹⁶ <https://www.hzdr.de>

⁹⁷ <http://www.bmwi.de>

⁹⁸ The history behind Germany's nuclear phase-out. 2016; Clean Energy Wire

⁹⁹ Nuclear medicine training and practice in Germany. Eur J Nucl Med Mol Imaging 41:187-190 (2014)

werkgelegenheid biedt zowel de lopende operatie van bestaande kernenergiereactoren als ook de huidige en toekomstige ontmantelingen van kernenergiereactoren en de veiligstelling van materialen werkgelegenheid. In 2004 werd de werkgelegenheid in de nucleaire energiesector nog op 38.000 banen geschat.¹⁰⁰ De overgang naar alternatieve energiebronnen wordt echter gezien als een impuls voor de werkgelegenheid. Naar schatting waren er al 370.000 banen gecreëerd in de hernieuwbare energiebronnensector in 2013.¹⁰¹

B.2.4 Wetenschappelijk belang

De Helmholtz Gesellschaft is met 38.000 wetenschappers de grootste wetenschappelijke organisatie in Duitsland. Nucleair onderzoek in de breedste zin vindt plaats in alle 6 onderzoeksprogramma's van de organisatie (Energie, Aarde en milieu, Gezondheid, Luchtvaart/ruimte en transport, Materialen en Belangrijke technologieën). Instituten verbonden aan de Helmholtz Gesellschaft participeren op grote schaal in Europese projecten, o.a. onder het 'Euratom' Programma. Ook heeft de organisatie nauwe banden met Canadese onderzoeksinstellingen op het gebied van Gezondheid, Energie en Milieu.

In 2015 werd bekend gemaakt dat de nucleaire expertise van het Jülich onderzoeksinstituut en het experimentele reactorconsortium (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor, AVR) wordt gebundeld onder de paraplu van EnergieWerke Nord GmbH (EWN). De nieuwe organisatie heeft als focus nucleaire energie, zodat expertise en ervaring geleverd kan worden voor een veilige exit uit kernenergie.¹⁰²

Het internationaal Heinz Maier-Leibnitz Zentrum georganiseerd rondom de FRM II wordt gezien als een vooraanstaand centrum op het gebied van neutron- en positron onderzoek. Het Helmholtz Zentrum Berlin waar de BER II onderzoeksreactor staat is met name gefocuseerd op materialen- en technologieën-onderzoek. Het Karlsruhe Technologie Instituut is bekend door haar expertise op het gebied van nucleaire zaken en veiligheid.

Binnen de diverse afdelingen Nucleaire Geneeskunde en Moleculaire Imaging van grote Duitse ziekenhuizen vindt onderzoek plaats naar en met (nieuwe toepassingen van) isotopen.

B.2.5 Beleidsontwikkelingen

Zoals eerder aangegeven heeft Duitsland een cruciale beslissing genomen door haar hele kernenergie arsenaal te sluiten in 2022 en te ontmantelen. Het Duitse energiebeleid staat bekend als de 'Energiewende', met z'n oorsprong in het Energieconcept 2010, met het besluit uit kernenergie te stappen in 2011.

Een politieke omslag op nucleair gebied begon zichtbaar te worden in 1998, waarbij de regering bestaande uit Sociaal Democraten (SPD) en Grünen een 'nucleaire consensus' bereikten. Dit hield in dat de levensduur van nucleaire energiereactoren beperkt werd tot 32 jaar en dat er geen nieuwe reactoren werden gebouwd. De totale uitfasering van nucleaire energie zou in 2022 moeten zijn voltrokken. Echter in 2009 onder de regering van de Christen Democraten (CDU) in coalitie met de Vrije Democraten (FDP) was er sprake van 'Ausstieg aus dem Ausstieg', 7 reactoren konden 8 jaar langer openblijven en de resterende reactoren kregen 14 jaar extra tijd. De kernramp in Fukushima deed de regering Merkel in 2011 echter besluiten per direct 8 reactoren te sluiten en de operatie van de resterende installaties te limiteren tot 2022. Dit besluit werd politiek breed gedragen, 80% van de parlementariërs stemde voor het besluit. De Grünen stemden tegen, omdat zij het plan niet ambitieus genoeg vonden.

Vanzelfsprekend heeft de uitfasering van kernenergie grote consequenties voor de energievoorziening in Duitsland. Op dit moment leveren de 8 operationele reactoren nog 16% van de energievoorziening,

¹⁰⁰ German ministry of environment and nature; Timeforchange.org

¹⁰¹ <http://energytransion.de>

¹⁰² <http://EWN-GmbH.de>

waarbij het merendeel van de benodigde energie (ongeveer 50%) momenteel uit kolen wordt gewonnen.¹ Naast de uitdaging om de nucleaire afbouw goed te doen slagen heeft Duitsland zich tevens als doel gesteld om van fossiele brandstoffen over te gaan naar hernieuwbare energiebronnen en sterke CO₂-reductie te bewerkstelligen met expliciete doelstellingen tot en met 2050.

Over de vraag of Duitsland de beoogde CO₂-doelstellingen gaat halen gegeven de uitfasering van de kernenergiereactoren bestaat scepsis. Mocht Duitsland gedwongen zijn qua energiebehoefte om meer op buurlanden te gaan steunen, zoals bijvoorbeeld Italië doet, dan zou het heel goed kunnen dat de energie die ze dan betrekken alsnog van nucleaire oorsprong zal zijn.

B.3 Benchmark Verenigd Koninkrijk

B.3.1 Introductie

Het Verenigd Koninkrijk (VK) heeft faciliteiten die de hele nucleaire keten bedekken. Op dit moment heeft het VK 15 kernenergiereactoren op zeven locaties. Gezamenlijk leveren deze ongeveer 19% van de elektriciteitsproductie. Dat aandeel was in de jaren '90 nog 25%.

Tussen 1995 en 2006 was het Britse beleid niet gericht op de bouw van nieuwe nucleaire installaties, maar richtte zich primair op het verlengen van de levensduur van bestaande installaties.¹⁰³ Er waren ook weinig alternatieven, want sinds het begin van de jaren '80 werd er nog maar weinig geïnvesteerd in civiel nucleair onderzoek.¹⁰⁴ In 2008 werd echter de *Energy Act* aangenomen die prioriteit geeft aan het terugbrengen van de CO₂-uitstoot.¹⁰⁵ In November 2015 werden de in 2008 gestelde doelen verder geoperationaliseerd. Speerpunten hiervan zijn de uitfasering van kolencentrales in 2025, de bouw van nieuwe stoom- en gascentrales en een veel sterkere focus op kernenergie. Sindsdien steunt het Britse beleid de bouw van nieuwe nucleaire installaties, mits privaat gefinancierd en mits de kosten voor ontmanteling geïnternaliseerd zijn volgens internationale normen. Naast de bouw van nieuwe installaties ligt sinds 2006 ook sterk de nadruk op het vervangen van de oudere reactoren.

B.3.2 Overzicht infrastructuur

Op dit moment heeft het VK 15 reactoren op zeven locaties voor de opwekking van kernenergie. Veertien hiervan zijn zogenaamde *advanced gas-cooled reactors*. Er is een enkele hogedrukreactor (Sizewell B). Acht van de installaties zijn allen eigendom van EDF Energy, een volledige dochter van het Franse EDF dat in 2009 British Energy overnam. Het werd daarmee eigenaar van Britse reactoren en verplichtte zich een aantal daarvan te sluiten wegens ouderdom en een aantal andere te verkopen. In februari 2016 kondigde EDF Energy aan vier installaties open te houden. EDF Energy is een van de grootste energieproducenten in het VK en de grootste netwerkbeheerder. Zoals reeds aangegeven is het huidige beleid erop gericht de capaciteit voor kernenergie uit te breiden door bouw van nieuwe installaties door private ondernemingen. Horizon Nuclear Power, nu eigendom van Hitachi, is in 2009 opgezet als een joint venture van RWE power en E.ON UK en is voornemens nieuwe kerncentrales te bouwen op locaties in Oldbury en Wylfa.

Eind 2001 kondigde de Britse overheid aan de Nuclear Decommissioning Authority (NDA) op te zetten om de ontmanteling van bestaande installaties soepel te laten verlopen. NDA werd hiermee niet alleen producent van energie, maar ook eigenaar van de te ontmantelen reactoren. De NDA is een overheidsorganisatie die rapporteert aan de Department of Energy and Climate Change (DECC). De NDA is van groot belang in de komende jaren omdat zij de sites in eigendom heeft waarop nieuwe installaties moeten worden gebouwd. NDA is tevens eigenaar van de Sellafield faciliteit voor opslag en verwerking van nucleair afval. URENCO bouwt momenteel aan een zogenaamde 'tails management

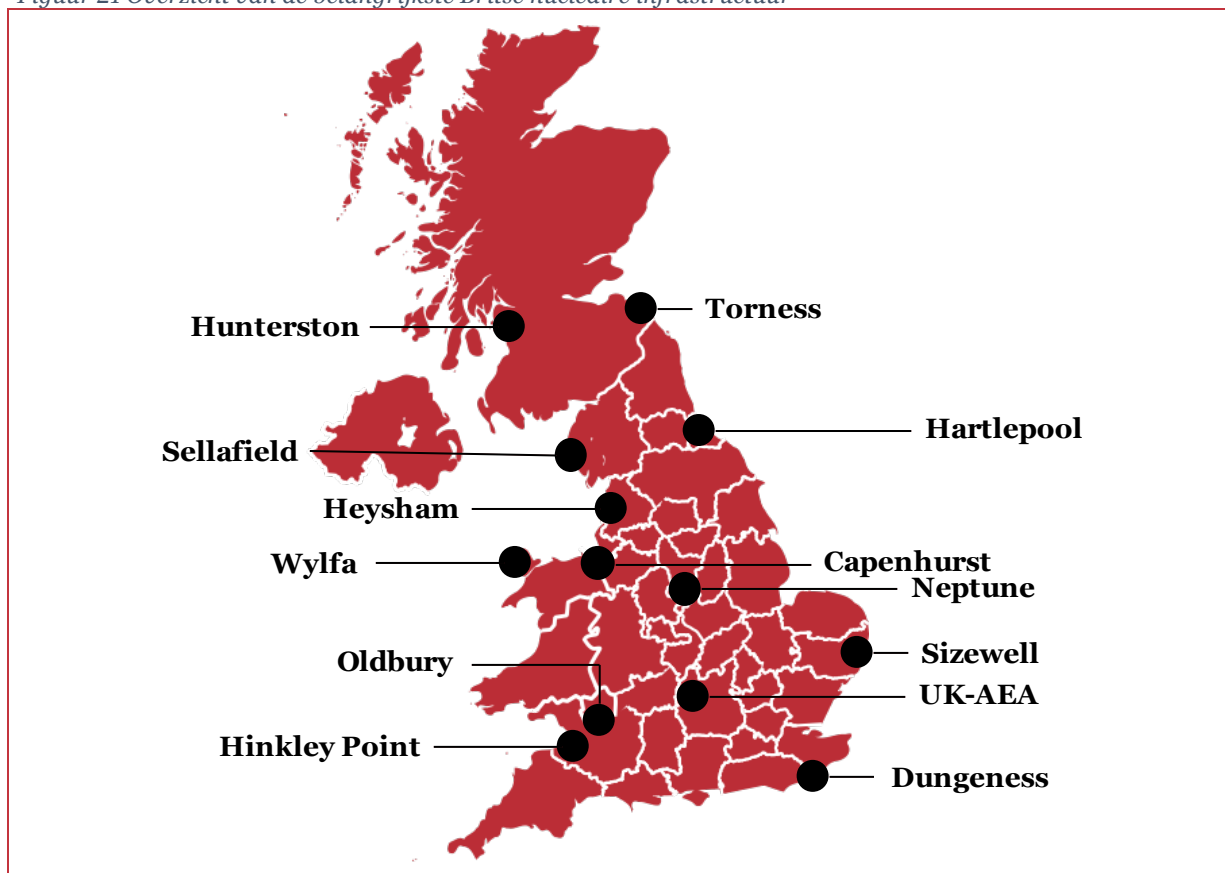
¹⁰³ Dungeness B 1&2; Hartlepool 1&2; Hartlepool I 1&2; Hartlepool II 1&2; Heysham II 1&2; Hinkley Point B 1&2; Hunterston B 1&2; Torness 1&2; and Sizewell B.

¹⁰⁴ The Engineer (2013). *Power struggle: developing the UK's nuclear manufacturing capacity*

¹⁰⁵ <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/contents>

facility' op zijn site in Capenhurst voor de verwerking van verarmd uranium uit Gronau (D), Almelo, en Capenhurst.¹⁰⁶

Figuur 21 Overzicht van de belangrijkste Britse nucleaire infrastructuur



Technopolis Group (2016)

Het VK produceert zelf niet op centraal niveau radio-isotopen voor medisch gebruik. De Britse reactoren zijn hier door hun hoge leeftijd economisch minder voor geschikt. Voor haar voorraad ^{99m}Mo is het VK volledig afhankelijk van zes sites in Frankrijk, Nederland, België, Zuid-Afrika, Australië en Canada. Chalk River in Canada levert 40% van de Britse import, maar zal in 2016 sluiten.¹⁰⁷ Op nationaal niveau is productie van radioisotopen voor medisch gebruik sterk gedecentraliseerd in cyclotrons in individuele ziekenhuizen. In 2014 waren er 16 cyclotrons in het VK (8 bij bedrijven en 8 bij universiteiten en NHS faciliteiten).¹⁰⁸ De leden van de beroepsvereniging van nucleair geneeskundigen, de British Nuclear Medicine Society (BNMS), beheren *de facto* de cyclotron infrastructuur in het VK.

B.3.3 Economische belang

Gezamenlijk hebben de 15 operationele kernreactoren een productiecapaciteit van ongeveer 95 GWe en genereren bijna een vijfde van de totale nationale elektriciteitsproductie (335 TWh).¹⁰⁹ Fossiele

¹⁰⁶ URENCO (2016). *Annual report and accounts 2015*

¹⁰⁷ The Independent (2013). *Reactor closure puts medical scans at risk as shortage of radioactive material could jeopardise patients' health*

¹⁰⁸ BNMS (2014). *Future Supply of Medical Radioisotopes for the UK Report 2014*

¹⁰⁹ <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>

brandstoffen vormen de voornaamste bron voor elektriciteitsopwekking (30% gas, 36% kolen).¹¹⁰ Hernieuwbare bronnen (windenergie, waterkracht, en zonne-energie) gezamenlijk vormen 13%. Alhoewel het VK een groot deel van de benodigde elektriciteit zelf genereert, is het desondanks een netto importeur van elektriciteit. Jaarlijks betreft het VK rond 16 TWh aan elektriciteit uit, onder meer, Frankrijk en Nederland.

Het economisch belang van de de samengestelde civiele nucleaire kennisinfrastructuur in het VK is beperkt. Pas sinds 2008 wordt er noemenswaardig geïnvesteerd in nucleair onderzoek. Via de universiteiten wordt jaarlijks gemiddeld €56mln geïnvesteerd en via de National Laboratories wordt jaarlijks €137mln geïnvesteerd.¹¹¹ Nog steeds zijn de publieke uitgaven aan nucleair onderzoek beperkt vergeleken met die in Frankrijk (ca. €850mln), de VS (ca. €1.100mln) en Japan (ca. €4.000mln).¹¹² Het economisch belang van het onderzoek wordt verder beperkt door de focus van het onderzoek. In tegenstelling tot veel andere landen richt het Britse onderzoek zich traditioneel op ontmantelingsstechniek, nucleaire veiligheid en kernfusie. Criticasters, maar ook de Britse regering merken op dat dit gaat over respectievelijk het verleden (ontmantelingsstechniek), het heden (veiligheid), en de verre toekomst (kernfusie).¹¹³ Zij merken op dat onderzoek dat in de nabije toekomst bruikbaar is, onder meer voor de bouw van nieuwe kerncentrales, in het VK grotendeels afwezig is.

Twee derde van de werkgelegenheid voor onderzoekspersoneel is gealloceerd bij het National Nuclear Laboratory (NNL) en bij de UK Atomic Energy Authority (UK-AEA) Culham (het nationale laboratorium voor kernfusie onderzoek). In totaal werken hier 1.200 FTE.¹¹⁴ In de nucleaire geneeskunde in het VK werken 2.500 mensen.¹¹⁵

B.3.4 Wetenschappelijk belang

Het VK was een pionier op het gebied van nucleair onderzoek: de Magnox kerncentrales (operationeel sinds 1956) en de daarop gebaseerde advanced gas-cooled reactors (operationeel sinds 1976) zijn in het VK ontworpen.¹¹⁶ Vanaf de jaren '80 werd er echter nog maar weinig nucleair onderzoek gedaan. Van de 36 onderzoeksreactoren die het VK in de loop der decennia gebouwd heeft, is er nog slechts één operationeel (Neptune van Rolls Royce, opgezet ten behoeve van het Trident programma)¹¹⁷. Nucleair onderzoek staat pas sinds 2006 weer hoger op de wetenschappelijke agenda, maar is nog steeds erg gefragmenteerd.¹¹⁸

In 2013 werd de National Nuclear User Facility (NNUF) opgezet.¹¹⁹ Dit is een administratief samenwerkingsverband tussen de onderzoeksfaciliteiten van het NNL, de UK-AEA, de University of Manchester en de University of Lancaster. In November 2015 kondigde DECC aan dat het een groot 5-jarig onderzoeksprogramma van ongeveer €377mln zou gaan opzetten. Dit programma zal zich vooral richten op small modular reactors (SMRs) en zal moeten leiden tot de eerste SMR in het VK in de jaren 2020.¹²⁰ In 2015 kondigde de regering ook aan om samen met China het Joint Research and Innovation Centre (JRIC) op te zetten voor nucleair onderzoek. Dit zal worden geleid door het NNL.

¹¹⁰ <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>

¹¹¹ HM Government (2013). *A Review of the Civil Nuclear R&D Landscape in the UK*

¹¹² HM Government (2013). *A Review of the Civil Nuclear R&D Landscape in the UK*

¹¹³ HM Government (2013). *A Review of the Civil Nuclear R&D Landscape in the UK*

¹¹⁴ HM Government (2013). *A Review of the Civil Nuclear R&D Landscape in the UK*

¹¹⁵ BNMS (2014). *Future Supply of Medical Radioisotopes for the UK Report 2014*

¹¹⁶ Jensen, SE, E Nonbol (1999). *Description of the Magnox Type of Gas Cooled Reactor (MAGNOX)*

¹¹⁷ ONR (2002). *A review by the Health and Safety Executive's Nuclear Installations Inspectorate of the strategy of Rolls-Royce Marine Power Operations ltd for the decommissioning of its nuclear sites.*

¹¹⁸ HM Government (2013). *Nuclear Energy Research and Development Roadmap: Future Pathways*

¹¹⁹ <http://www.nnl.co.uk/science-technology/national-nuclear-user-facility/>

¹²⁰ WNN (2015). *UK sets aside funds for 'ambitious' nuclear research and development program*

China en het VK steunen het JRIC met elk €7m per jaar voor de komende vijf jaar. Het moet worden gezien in het kader van grotere Chinese investeringen in Britse productiecapaciteit (Hinkley Point).¹²¹

Ook individuele universiteiten investeren sinds 2008 meer in nucleair onderzoek. Zo heeft de University of Birmingham het Birmingham Centre for Nuclear Education and Research¹²² opgezet en heeft de University of Manchester het Dalton Nuclear Institute¹²³ verder uitgebouwd. Daarnaast hebben vijf universiteiten (Imperial College, Manchester, Strathclyde, Oxford, Birmingham), samen met het NNL, de NUCLEAR (Nuclear Universities Consortium for Learning, Engagement and Research) GROUP opgezet.¹²⁴ Deze groep is door de Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) aangewezen als coördinator van de nucleaire kennisinfrastructuur voor onderzoek. De vijf deelnemende universiteiten afficheren zich als de *'nuclear universities'*. De voornaamste onderzoeksgebieden van de groep zijn materiaalkunde (Imperial College, Oxford University), milieuchemie (Manchester University, Dalton Nuclear Institute), energie en milieuwetenschappen (Strathclyde), en milieuwetenschappen (University of Birmingham).

Ondanks de recente groei worden in een overheidsrapport uit 2013 zorgen uitgesproken over het niveau van het nucleaire wetenschappelijk onderzoek in het VK.¹²⁵ Uitgaven aan nucleair onderzoek zijn laag in vergelijking met die in vergelijkbare landen en de coördinatie schiet tekort. Onderzoekers zijn vergrijsd en de verwachting is dat ook de komende tien jaren nog veel Brits talent naar het buitenland zal trekken omdat de mogelijkheden in het VK niet uitdagend genoeg zijn. Niettemin wordt geconcludeerd dat de internationale contacten van de Britse nucleaire R&D-onderzoekers redelijk zijn.¹²⁶ In een klein aantal onderzoeksgebieden zoals kernfusie of eindopslag-onderzoek zijn de internationale links goed. Niettemin ontbreekt er volgens de regering nog een georkestreerde R&D-internationaliseringsstrategie.

B.3.5 Beleidsontwikkelingen

Sinds 2006 is het beleid in het VK sterk gericht op het volledig vervangen van de huidige kernenergie productiecapaciteit. In 2025 moet de helft van de huidige nucleaire installaties uitgefaseerd zijn. Tegen die tijd moeten de eerste nieuwe nucleaire installaties operationeel zijn. Idealiter zitten hier ook SMRs bij. In 2030 moet de nieuwe capaciteit volledig operationeel zijn.

Vanuit een medisch perspectief benadrukt de British Nuclear Medicine Society dat de huidige cyclotroncapaciteit te kort schiet en dat meer centrale, grote opwekkingsfaciliteiten nodig zijn om het VK minder afhankelijk te maken van andere landen voor de toevoer van ^{99m}Mo.

De constatering in de eerste helft van het huidige decennium dat de huidige kennisinfrastructuur volstrekt onvoldoende is om de huidige productiecapaciteit te vervangen en dat men hiervoor afhankelijk is van Japan, China en Frankrijk, was een hard gelag voor het land dat er trots op is dat het als eerste land ter wereld kernenergie produceerde voor vreedzame toepassingen. Het VK lijkt aan het begin te staan van een langzaam op gang komende golf van investeringen in een nucleaire kennisinfrastructuur. De Britse regering benoemde in 2014 haar zes Grand Challenges voor toekomstig onderzoek.¹²⁷ Nucleair onderzoek is daar één van. Investeringen zullen vooral gericht zijn op een nieuwe energiemix. Daarnaast wordt sterk ingezet op Human Capital, waar een groot probleem wordt gezien. Het onderzoek zal projectgestuurd zijn en zal voornamelijk in internationaal verband plaatsvinden.

¹²¹ <http://www.nnl.co.uk/news-media-centre/news-archive/uk-china-joint-research-and-innovation-centre/>

¹²² <http://www.birmingham.ac.uk/research/activity/nuclear/index.aspx>

¹²³ <http://www.dalton.manchester.ac.uk>

¹²⁴ <http://www.nuclearuniversities.ac.uk>

¹²⁵ HM Government (2013). *A Review of the Civil Nuclear R&D Landscape in the UK*

¹²⁶ HM Government (2013). *A Review of the Civil Nuclear R&D Landscape in the UK*

¹²⁷ HM Treasury, BIS (2014). *Our plan for growth: science and innovation*

Bijlage C Survey

Uit de enquête onder deelnemers uit (academische) ziekenhuizen (6), wetenschap (2), olie en gas (4), dienstverlening/inspectie (7), en industrie (4) blijkt dat met name de instandhouding van de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur van belang gevonden wordt voor de gezondheidszorg en de veiligheid in Nederland. Op het gebied van medische isotopen stellen veel gebruikers dat Nederland dan ook een toppositie heeft. Een kleinere groep geeft aan die toppositie ook te zien op het gebied van materiaalkundig onderzoek. Of Nederland met haar nucleaire kennisinfrastructuur een rol van betekenis speelt in Europa wordt door de deelnemende gebruikers betwist.

Een grote meerderheid van de gebruikers meent dat een uitbreiding van de nucleaire kennisinfrastructuur goed is voor de Nederlandse economie. Net iets meer gebruikers vindt dat de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland van onvoldoende omvang is voor de Nederlandse industrie dan degenen die het van voldoende omvang vindt. Duidelijk is wel dat een overgrote meerderheid stelt dat inkrimping van de nucleaire kennisinfrastructuur gevolgen heeft voor de Nederlandse industrie.

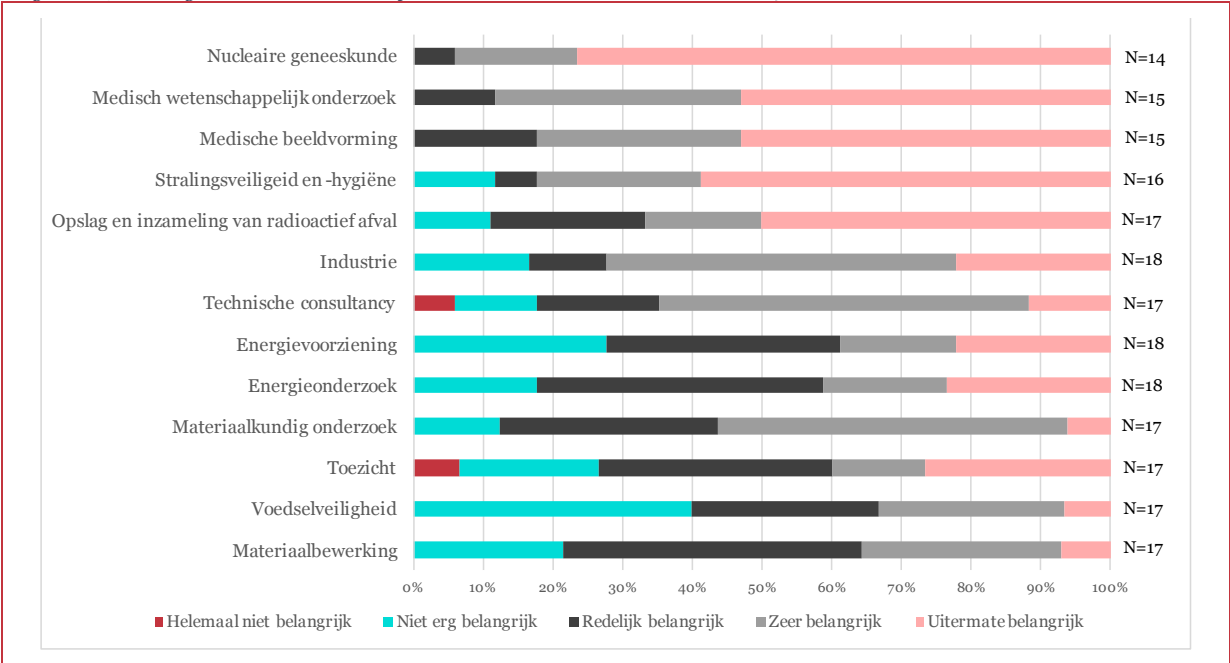
Het belang van de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur voor hoogopgeleid personeel met kennis van nucleaire technologie of de toepassing daarvan wordt door een groot deel van de benaderde gebruikers erkend. Echter is ook een aanmerkelijk deel het niet eens met de stelling dat de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland leidt tot voldoende hoogopgeleid personeel met genoemde kennis. Bij de vragen over knelpunten in de nucleaire kennisinfrastructuur wordt aangegeven dat het nucleair (universitair) onderwijs verslechtert en continuïteit van kennisbehoud wordt gevreesd, mede door vergrijzing en te weinig nieuwe academische instroom.

Figuur 22 Stellingen rol en meerwaarde publieke belangen (N = 19)



Technopolis Group (2016)

Figuur 23 Belang nucleaire kennisinfrastructuur voor domeinen (N = 19)



Technopolis Group (2016)

Bijlage D Nucleaire toepassingen en gebruik buiten de nucleaire kennisinfrastructuur

De studie die beschreven is in dit rapport diende zich te beperken tot de nucleaire kennisinfrastructuur¹²⁸. Zoals beschreven in de afbakening van deze studie is de nucleaire kennisinfrastructuur een subgroep van de nucleaire sector. Dat betekent dat veel bedrijven en organisaties die gebruik maken van nucleaire technologie en toepassingen niet zijn benoemd. Zij vallen buiten de nucleaire kennisinfrastructuur, maar zouden wel degelijk tot de nucleaire sector gerekend kunnen worden.

In deze bijlage willen we graag een beeld schetsen van de bredere nucleaire sector en aanverwante sectoren: de gebruikers en toepassers van de kennis, technologie en producten van de nucleaire kennisinfrastructuur. Dit overzicht is niet uitputtend, maar toont ons inziens aan dat de nucleaire sector meer behelst dan de beschreven kennisinfrastructuur.

We willen ook benadrukken dat de nucleaire sector baat heeft bij de nucleaire kennisinfrastructuur. Onderzoek, onderwijs en ontwikkeling leidt immers doorgaans tot nieuwe kennis, nieuwe inzichten en nieuwe innovaties die de gehele sector ten goede komt. Het exacte belang voor de sector kunnen we echter beperkt onderbouwen, omdat er weinig data beschikbaar is. We hebben de verdere belanghebbenden bij of de gebruikers van de nucleaire kennisinfrastructuur geraadpleegd middels een enquête in deze studie. Dat is uiteindelijk gelukt onder een beperkte groep omdat verschillende organisaties binnen de nucleaire kennisinfrastructuur ons geen uitgebreide lijst van concrete gebruikers konden geven.

D.1.1 Overzicht overige nucleaire toepassingen

Hieronder volgt een overzicht van overige nucleaire toepassingen buiten de door ons gehanteerde definitie van de nucleaire kennisinfrastructuur.¹²⁹ Het feit dat er diverse overige toepassingen zijn van nucleaire kennis en technologie – die slechts deels benoemd zijn in dit rapport – betekent ook dat diverse bedrijven en organisaties niet aan de orde gekomen zijn.

- Radio-isotopen worden in de industrie (bijvoorbeeld in de olie- en gasector) veelvuldig gebruikt als tracers voor de inspectie van leidingen en systemen: transport in leidingen, kwaliteit van filtersystemen, detectie van lekken en corrosie.
- Ioniserende straling wordt gebruikt voor kwaliteitscontrole en niet-destructief onderzoek: gammadiagnostiek van staal voor het bepalen van de kwaliteit van lasnaden en detectie van scheuren en controle van de dikte en dichtheid van materialen.
- Ioniserende straling om materialen te bewerken en materiaaleigenschappen aan te passen: gammastraling wordt bijvoorbeeld gebruikt bij monomeren om polymeerformatie te stimuleren, om de thermische en elektrische isolatie van materialen te verbeteren en om isolatiematerialen (polyvinylchloride) beter bestand te maken tegen thermische en chemische invloeden.
- Gedoteerde halfgeleiders middels neutrontransmutatie in reactoren worden door de halfgeleiderindustrie toegepast in high-performance elektronica, zoals hoogvermogenelektronica voor elektrische en hybride voertuigen (auto's en hogesnelheidstreinen) en in windturbines en zonne-energie-installaties.

¹²⁸ Nijkamp, Bovenberg en Soete (2000) definiëren het begrip kennisinfrastructuur als “het geheel aan (semi-)publieke, structurele voorzieningen en arrangementen op het terrein van (wetenschappelijk) onderwijs en onderzoek, fundamenteel speurwerk en inzichtontwikkeling, waar mogelijk leidend tot [...] binnen afzienbare tijd toegepaste inzichten en vindingen in zowel de publieke als private sector, waardoor de efficiëntie (inclusief de sociaal-culturele betekenis) van de inzet van productiefactoren wordt vergroot c.q. bevorderd”. Zie: Nijkamp, P., Bovenberg, A.L. en Soete, L. (2000). *Kennis is kracht: het belang van goede kennisinfrastructuur in Nederland*. Den Haag: Ministerie van OCW.

¹²⁹ Dit overzicht is grotendeels gebaseerd op: Knebel, J. (2014). *Application of Nuclear Technologies: An Overview*. Presentatie tijdens de AES Combined Meeting 2014 in Warschau, 4-8 juni 2014.

- Neutronen worden gebruikt voor diverse analysemethoden: Neutron Activation Analysis (NAA) en Prompt Gamma Neutron Activation Analysis (PGAA) worden gebruikt om met een hoge gevoeligheid een lage concentratie van een specifiek element in een materiaal te bepalen. Dit wordt bijvoorbeeld gebruikt bij onderzoeksinstellingen, zoals universiteiten.
- Röntgenstraling is een van de bekendste toepassingen van ioniserende straling in de medische sector – de röntgenfoto – en wordt diagnostisch gebruikt voor de afbeelding van botten, tanden en kraakbeen en therapeutisch gebruikt voor het bestralen van kwaadaardige gezwellen.
- Röntgenbestraling vormt ook de basis voor computertomografie (CT-scans) waarbij gedetailleerder aangedaan weefsel in kaart gebracht kan worden, maar de stralingsbelasting veel groter is dan bij de klassieke röntgenfoto.
- Röntgenstraling wordt ook gebruikt in de techniek voor het controleren van lasnaden (radiografie) en in de beveiliging voor het doorlichten van bijvoorbeeld koffers.
- Röntgenstraling wordt in de wetenschap veelvuldig gebruikt voor diverse analysemethoden voor materialen, de bekendste is röntgendiffractie waarmee de structuur van vaste stoffen kan worden bepaald.
- Ioniserende straling wordt in de voedselindustrie gebruikt voor het steriliseren van voedingsproducten, een voorbeeld waar dit veelvuldig wordt gebruikt is nootmuskaat. Hierdoor worden bacteriën, insecten en parasieten gedood.
- Ioniserende straling wordt ook gebruikt in de industrie voor cosmetische en medische producten voor de sterilisatie van bijvoorbeeld verbandmiddelen, anti-allergene haarproducten en vloeistoffen voor contactlenzen.
- Ioniserende straling in de landbouw wordt gebruikt voor insectenbestrijding.
- Stabiele en radioactieve isotopen kunnen in de landbouwkundig onderzoek worden gebruikt als tracer om de absorptie van voedingsstoffen en bestrijdingsmiddelen in planten te onderzoeken.
- Ioniserende straling wordt in de land- en akkerbouw gebruikt om mutaties van gewassen te realiseren waardoor er nieuwe soorten met gunstigere eigenschappen kunnen worden gekweekt.
- Radiometrische datering wordt gebruikt om de ouderdom van materialen te bepalen (bijvoorbeeld gesteenten) door het meten van het radioactief verval van natuurlijke isotopen.
- Ioniserende straling en radio-isotopen worden ook toegepast in consumentenproducten, zoals rookmelders, en bij de productie daarvan, zoals bij antiaanbaklagen in pannen.
- Nucleaire technologie wordt ook gebruikt voor de aandrijving van onderzeeërs (reactoren) en onbemande ruimteschepen (Radioisotope Thermoelectric Generators en Advanced Stirling Radioisotope Generators).

technopolis |group| The Netherlands
Spuistraat 283
1012 VR Amsterdam
The Netherlands
T +31 20 535 2244
F +31 20 428 9656
E info.nl@technopolis-group.com
www.technopolis-group.com