

Bouwstenen voor de versterking van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland

Op verzoek van:
Ministerie van Klimaat en Groene Groei
Programmadirectie Kernenergie

Datum:
Utrecht, 13 december 2024

Bouwstenen voor de versterking van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland

Auteurs:
ir. ing. Reg Brennenraedts MBA
dr. Frank Bongers
Jeroen van der Teems MSc
Femke van Wijk MSc

Met dank aan:
Tom Clarijs MSc (SCK CEN)
dr. Pieter Vingerhoets (VITO)
Gaston Meskens MSc (VITO)
ir. Jasper Veldman
Ben Bresser MSc
Marenne Massop MSc
Brigitte van der Lugt MSc

Foto omslag:
Fotograaf: Maikel Rutten, TU Delft Reactor Institute
Locatie: Reactorhal van het TU Delft Reactor Institute
Afbeelding gepubliceerd met schriftelijke toestemming van het TU Delft Reactor Institute.

Managementsamenvatting

Het kabinet Rutte IV besloot tot verlenging van de bedrijfsduur van de kerncentrale in Borssele en de bouw van twee nieuwe kerncentrales. In het Hoofdlijnenakkoord van het kabinet-Schoof is deze ambitie verhoogd naar vier nieuwe kerncentrales in Nederland. Ook is er politiek aandacht voor de mogelijke toepassing van zogeheten Small Modular Reactors (SMR's). Deze ambities vergen een stevige Nederlandse kennis- en innovatiebasis. In dit kader is een verkennend missieteam Kernenergie ingesteld. Dit team heeft een Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma (MMIP) Kernenergie uitgewerkt. Dit programma heeft tot doel de nucleaire kennisinfrastructuur te waarborgen, te versterken en toekomstbestendig te maken door gericht te investeren in onderwijs, onderzoek en innovatie. In het MMIP Kernenergie zijn acht onderzoeksthema's geïdentificeerd:

1. Stralingsbescherming;
2. Systeemkennis (inpassing van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem);
3. Kennis over nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie;
4. Aan reactoren gerelateerde 'enabling' onderwerpen;
5. Hogetemperatuur waterstofproductie;
6. Materiaalonderzoek, waaronder met behulp van nucleaire/ioniserende straling;
7. Verwerking en opslag radioactief afval en geologische eindberging;
8. Perceptie, communicatie en draagvlak.

Er is een groeiende vraag om in kaart te brengen welke specifieke kennis- en innovatiebehoeften er zijn bij overheden en bedrijven, welke mogelijkheden er zijn en waar investeringen benodigd zijn om het kennisecosysteem voor kernenergie in Nederland verder uit te werken en versterken. In opdracht van de programmadirectie Kernenergie van het ministerie van Klimaat en Groene Groei (hierna: KGG) heeft Dialogic innovatie & interactie (hierna Dialogic) in samenwerking met de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO) en Belgian Nuclear Research Centre (SCK CEN) een inventarisatiestudie voor het kennis- en innovatieprogramma kernenergie uitgevoerd. Dit onderzoek liep parallel met een ander onderzoek dat werd uitgevoerd naar human-capitalvraagstukken in het nucleaire domein. Hoewel beide onderwerpen elkaar raken, gaat het in deze studie niet om human capital.

Deze inventarisatiestudie heeft een tweeledige doelstelling, namelijk:

1. Het inventariseren van de **behoefte aan kennisontwikkeling en innovaties** in het nucleaire domein (uitmondend in een **kennis- en innovatieprogramma kernenergie**).
2. Het opstellen van een **roadmap** op basis van deze inventarisatie naar de behoefte aan kennisontwikkeling en innovaties in het nucleaire domein.

De aanpak voor deze inventarisatie bestaat uit vijf sporen, namelijk (1) een documentenanalyse, (2) een interviewronde; (3) vijf werksessies met experts uit het veld met betrekking tot de kennisvragen; (4) één werksessie over de roadmap; en (5) een rapportage.

In de hoofdstukken 2 en 3 van dit rapport schetsen we eerst de recente ontwikkelingen in het overheidsbeleid voor (ontwikkeling en stimulering van) de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur en presenteren we een beschrijving van het Nederlands innovatieecosysteem. De behoefte aan kennisontwikkeling en innovaties komt in hoofdstuk 4 aan de orde. Dit valt uiteen in een groot aantal vragen die in dit hoofdstuk kunnen worden teruggevonden. In deze samenvatting zullen we alleen de hoofdvragen benoemen.

Thema	Hoofdvraag
Stralingsbescherming	1. Hoe kunnen we blootstelling aan straling effectief meten, modelleren en monitoren?
	2. Wat zijn de effecten van blootstelling van lage doses straling op menselijke gezondheid en het ecosysteem?
	3. Hoe kunnen we de principes van stralingsbescherming toepassen in de praktijk?
Systeemkennis	1. Hoe kunnen we de impact van kernenergie op het energie(eco)systeem modelleren en analyseren? (Vanuit verschillende perspectieven: elektrotechnisch, CO_2-impact, marktordening, ruimteontwikkeling, energieprijzen)
	2. In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen (exclusief de productie van waterstof)? Maak onderscheid tussen (1) derde generatie kerncentrales, (2) SMR's en (3) Hoge Temperatuur Reactortechnologie
	3. Wat zijn de financiële voorwaarden onder welke investeerders willen investeren in nucleaire technologie (zowel grote centrales als SMR's)?
	4. Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	1. Wat vraagt de omgang met nieuwe generaties kernreactoren (vierde generatie, SMR's) aan technische kennis?
	2. Welke kennis heeft de publieke sector nodig om bedrijfsduurverlenging van Borssele en bouw van derdegeneratie centrales te faciliteren?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	1. Welke juridische uitdagingen zijn er bij de realisatie van het bouwen van nieuwe kerncentrales?
	2. Welke organisatorische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?
	3. Welke technische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?
Hoge temperatuur waterstofproductie	1. In hoeverre kan warmte uit derdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?
	2. In hoeverre kan warmte uit SMR's en vierdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?
Materiaalonderzoek	1. Hoe kunnen (nieuwe) materialen en brandstoffen beter, efficiënter en duurzamer worden ingezet ten behoeve van kerncentrales?
	2. Wat is het gedrag van materialen onder extreme omstandigheden?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	1. Hoe kan radioactief afval veilig geborgen worden?
	2. Hoe kan radioactief afval zoveel mogelijk worden verminderd en hergebruikt? Hoe verschilt dit voor verschillende typen reactoren (generatie III(+), generatie IV, SMR's)
	3. Wat wordt er exact verwacht met betrekking tot afvalverwerking (door publiek, politiek, bedrijven en andere partijen)?
Perceptie, communicatie & draagvlak	1. Hoe kan een inclusieve besluitvorming over de bouw van kerncentrales en de eindberging van nucleair afval worden georganiseerd, zodat het vertrouwenwekkend is voor lokale, nationale en internationale bevolking?
	2. Hoe kan kernenergie economisch & sociaalmaatschappelijk ingepast worden in de regio?
	3. Wat is de kennis, houding en het gedrag in de maatschappij ten opzichte van kernenergie?
Overige vraagstukken	1. Hoe gaan we om met onderlinge afhankelijkheden en kruisverbanden tussen verschillende thema's?
	2. Hoe geven we het best vorm aan kennismanagement op het gebied van kernenergie?
	3. Wat is een goede beleidsmatige inbedding van de acht MMIP-thema's?
	4. Welke economische kansen biedt kernenergie voor de Nederlandse economie?

In hoofdstuk 5 van dit rapport presenteren we voor alle acht thema's een roadmap. Dit valt uiteen in de onderwerpen ambitie, stappen, partners, termijnen, internationalisering en onzekerheden. Dit hoofdstuk laat zich lastig samenvatten en voor details verwijzen we de lezer door naar het betreffende hoofdstuk.

We komen in dit onderzoek tot zes aanbevelingen die enigszins los staan van de roadmaps:

- *Versterk programma's voor onderwijs en training:* Een sterk onderwijs- en opleidingskader is essentieel voor het behoud en opschaling van een gekwalificeerde beroepsbevolking in de nucleaire sector. Er is vanuit het veld een sterke behoefte aan opschaling van de human capital gearticuleerd. Immers: zonder de benodigde mensen kan er geen invulling gegeven worden aan de uitdagingen.
- *Stimuleer (inter)nationale samenwerking:* Voor het realiseren van de Nederlandse ambities voor kernenergie is samenwerking tussen een groot aantal verschillende actoren van groot belang. Het is belangrijk dat deze partijen elkaar kunnen vinden en open staan voor samenwerking. Voor landelijke samenwerking is het verder belangrijk dat duidelijk is waar de expertises liggen van de verschillende kennis- en onderwijsinstellingen. Als Nederland internationaal wil samenwerken, dan moeten we andere landen ook iets te bieden hebben. We kunnen enkel meedoen in internationale gremia en werkgroepen als we een solide kennisbasis hebben. We zullen in Nederland een solide kennisbasis moeten opbouwen. Als Nederland een aantal specialisaties ontwikkelt worden we juist interessant voor internationale partijen.
- *Zorg voor hoogwaardige faciliteiten en adequate coördinatie:* De ontwikkelingen op het gebied van kernenergie in Nederland vereisen state-of-the-art onderzoeks- en onderwijsfaciliteiten. Nederland kent al verscheidene faciliteiten, waaronder een actinidenlab (NRG en JRC), hot cell laboratory (NRG), High Flux Reactor (NRG; gaat sluiten), gammastralingfaciliteit (NRG), medische isotopenreactor (NRG|PALLAS), onderzoeksreactor RID/TU Delft, Magnum-PSI (DIFFER), Ion Beam Facility (DIFFER) en DICE (DIFFER). Ook verwelkomde EPZ eind 2024 een eigen control room simulator voor on-site trainingen; deze simulator is een exacte kopie van de control room van de Kerncentrale Borssele en biedt operators de mogelijkheid om in een levensechte omgeving te oefenen..
- *Borg opgedane kennis zorgvuldig:* Het kennis- en innovatieprogramma gaat leiden tot de ontwikkeling van kennis. In dit kader is het belangrijk dat de kennis ook geborgd wordt. Om samenwerking en innovatie te bevorderen, zou Nederland een gecentraliseerd en toegankelijk (digitaal) kennisplatform voor nucleaire kennis kunnen opzetten. Dit platform kan dienen als een uitgebreide databank met onderzoekspublicaties, experimentele data, operationele inzichten en best practices. Toegang moet zorgvuldig worden beheerd om openheid te balanceren met beveiliging, zodat gevoelige informatie adequaat wordt beschermd.
- *Zorg voor voldoende valorisatie van kennis:* De valorisatie van kennis en innovatie is essentieel om onderzoeksresultaten om te zetten in praktische toepassingen. Kaders en stimulansen om commercialisering te bevorderen, waaronder de samenwerking tussen onderzoeksinstellingen, industrie en startups, en financiering voor pilots en demonstraties, evenals ondersteuning bij intellectueel eigendomsbeheer dragen hieraan bij.
- *Borg de continuïteit in het programma:* Tijdens de Voorjaarsbesluitvorming 2024 zijn de gereserveerde middelen voor het MMIP toegekend. Deze middelen zijn tot en met 2030 beschikbaar voor de versterking van de nucleaire kennis- en innovatiestructuur en de uitvoering van het MMIP Kernenergie (Kamerstuk 32645, nr. 128). Eventuele verdere (structurele) financiering na 2030 is aan het huidige of een volgend kabinet (Kamerstuk 32645, nr. 120). We achten het van belang om nu al aandacht te besteden aan de continuïteit van de nucleaire kennisagenda zodat deze ook na 2030 geborgd kan worden. Op deze manier kan men effectief inzetten op langjarige trajecten en biedt het stakeholders een perspectief, wat kan bijdragen aan hun commitment.

Inhoudsopgave

1 Introductie 9

1.1 Aanleiding voor de inventarisatiestudie 9

1.2 Doel- en vraagstelling van de inventarisatiestudie 10

1.3 Aanpak van de inventarisatiestudie 12

1.4 Leeswijzer 13

2 Ontwikkeling van beleid voor de nucleaire kennisinfrastructuur 14

2.1 Initiële acties 14

2.2 Oprichting en werkzaamheden van de interdepartementale werkgroep «Kennis Nucleaire Technologie en Stralingsbescherming» 14

2.3 Naar een Meerjarig Missiegedreven Innovatieprogramma voor kernenergie 16

2.4 MMIP Kernenergie 17

2.5 Internationale samenwerking 19

3 Nucleair ecosysteem Nederland: doelen en stakeholders 21

3.1 Doelstelling met betrekking tot kernenergie 21

3.2 Stakeholderanalyse 26

4 Kennisvragen 31

4.1 Introductie 31

4.2 Thema's en hoofdvragen 31

4.3 Kennisvragen 33

4.4 Relatie tussen kennisvragen en doelstellingen 42

4.5 Achtergrond bij de kennisvragen 43

5 Roadmap 65

5.1 Introductie 65

5.2 Thema 1: Stralingsbescherming 65

5.3 Thema 2: Systeemkennis 68

5.4 Thema 3: Nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie 71

5.5 Thema 4: Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen 76

5.6 Thema 5: Hoge temperatuur waterstofproductie 79

5.7 Thema 6: Materiaalonderzoek 82

5.8 Thema 7: Verwerking & opslag van radioactief afval en geologische eindberging 86

5.9 Thema 8: Perceptie, communicatie en draagvlak 88

6 Aanbevelingen 92

6.1 Versterk programma's voor onderwijs en training 92

6.2 Stimuleer samenwerking 92

6.3 Zorg voor hoogwaardige faciliteiten en adequate coördinatie 94

6.4 Borg opgedane kennis zorgvuldig 95

6.5 Valoriseren van kennis 95

6.6 Continuïteit borgen 96

Bijlage 1. Lijst met stakeholders 97
Bijlage 2. Lijst met respondenten (interviews) 101
Bijlage 3. Lijst met respondenten (workshop hogescholen) 103
Bijlage 4. Lijst met respondenten (workshop thema 1 en 6) 104
Bijlage 5. Lijst met respondenten (workshop thema 2 en 5) 105
Bijlage 6. Lijst met respondenten (workshop thema 3, 4 en SMR's). 106
Bijlage 7. Lijst met respondenten (workshop thema 7 en 8) 107
Bijlage 8. Lijst met respondenten (workshop Roadmap) 108

1 Introductie

1.1 Aanleiding voor de inventarisatiestudie

Het kabinet Rutte IV besloot tot verlenging van de bedrijfsduur van de kerncentrale in Borssele en de bouw van twee nieuwe kerncentrales (Coalitieakkoord Rutte IV). Deze twee nieuwe centrales zullen volgens het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) in 2035 en 2037 operationeel zijn. In het Hoofdlijnenakkoord van het kabinet-Schoof is deze ambitie verhoogd naar vier nieuwe kerncentrales in Nederland. Dit sluit aan bij een lopend onderzoek naar de impact van vier kerncentrales vanaf 2040 (Kamerstuk 32645, nr. 127). Ook is er politiek aandacht voor de mogelijke toepassing van zogeheten Small Modular Reactors (SMR's).[1]

Deze ambities vergen een stevige (Nederlandse) kennis- en innovatiebasis wat betreft kernenergie en aanpalende systeemelementen (zoals de omgang met radioactief materiaal). In dit kader is in 2023 door de toenmalige minister voor Klimaat en Energie een verkennend missieteam Kernenergie ingesteld met vertegenwoordigers uit het bedrijfsleven, kennisinstellingen en de overheid. Dit team adviseert de overheid en heeft geïnventariseerd op welke thema's binnen het onderwerp kernenergie kennisontwikkeling en innovatie essentieel zijn. Op basis van deze inventarisatie heeft het missieteam het Meerjarige Missiegedreven Innovatieprogramma (MMIP) Kernenergie uitgewerkt als onderdeel van het Missiegedreven Topsectoren- en Innovatiebeleid. Het MMIP Kernenergie heeft tot doel de nucleaire kennisinfrastructuur te waarborgen, te versterken en toekomstbestendig te maken door gericht te investeren in onderwijs, onderzoek en innovatie. Het gaat daarbij naast kennisontwikkeling rondom de huidige nucleaire technologieën om het versterken van de kennisbasis met betrekking tot nieuwe reactortypen die in 2050 mogelijk onderdeel zijn van een stabiele, CO_2-vrije energievoorziening (Kamerstuk 32645, nr. 120). In het MMIP Kernenergie zijn acht onderzoeksthema's geïdentificeerd:

1. Stralingsbescherming;
2. Systeemkennis (inpassing van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem);
3. Kennis over nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie (het gaat hierbij om Generatie III en IV-reactoren en Small Modular Reactors (SMRs));
4. Aan reactoren gerelateerde 'enabling' onderwerpen ('plant integrity', onderhoud onder extreme omstandigheden, enz.);
5. Hogetemperatuur waterstofproductie;
6. Materiaalonderzoek, waaronder met behulp van nucleaire/ioniserende straling;
7. Verwerking en opslag radioactief afval en geologische eindberging;
8. Perceptie, communicatie en draagvlak.

[1] SMR's zijn innovatieve ontwerpen van kerncentrales die mogelijk in de toekomst een belangrijke rol kunnen spelen in de CO_2-vrije energiemix. Er bestaat niet één type SMR. Een SMR kan klein zijn (een omvang van een zeecontainer) tot relatief groot (een omvang van reguliere kerncentrale Borssele). Een SMR heeft vaak een kleiner elektrisch vermogen dan de reguliere, conventionele kerncentrales die al gebouwd zijn in de wereld. SMR's worden modulair gebouwd; dat betekent dat deze kerncentrales meer fabrieksmatig worden gebouwd. Een SMR wordt samengesteld op basis van afzonderlijk gebouwde onderdelen die in een fabriek in serie worden geproduceerd. Dit zorgt er voor dat SMR's mogelijk goedkoper zijn om te bouwen dan conventionele kerncentrales en doorlooptijden korter zijn. Bron: Kleine modulaire reactoren (Small Modular Reactors (SMR's)) | Kernenergie in Nederland.

Deze thema's vormen een rode draad in deze inventarisatie. Daarnaast is er binnen de acht thema's aandacht voor specifieke aandachtspunten die raken aan de ontwikkeling en realisatie van SMR's. Zie paragraaf 2.4 voor een verdere toelichting op het MMIP Kernenergie.

Om de (nieuwe) ambities op het vlak van kernenergie te verwezenlijken, is een goed ontwikkelde nucleaire kennisinfrastructuur essentieel. In de decennia waarin het uitbreiden van kerncentrales zowel politiek als maatschappelijk geen optie leek, was deze kennisinfrastructuur krimpende en daardoor beperkt onderhouden. Eén van de gevolgen hiervan is dat er een tekort is aan gekwalificeerde professionals en kennisinstituten. Investeringen in nieuwe kerncentrales gaan dan ook gepaard met investeringen in het (her)opbouwen van een gespecialiseerde beroepsbevolking en het realiseren van een goed functionerend kennis- en innovatie-ecosysteem. Naast het hoofddoel van kernenergie om bij te dragen aan het – in het kader van de klimaatambities – reduceren van CO2-emissies, kunnen investeringen in kernenergie niet los worden gezien van andere (geopolitieke) ontwikkelingen. Denk aan de ambitie van de EU en Nederland voor meer strategische autonomie en om voor energie minder afhankelijk te willen zijn van landen buiten de EU. Het maatschappelijke draagvlak voor kernenergie is ook in beweging. Hoewel het brede publiek zich nog steeds bewust is van de keerzijden van kernenergie (gevoed door incidenten in het verleden, straling, kernafval), lijkt er een kanteling te zijn waarbij kernenergie weer een bredere maatschappelijke acceptatie krijgt.

Vanuit deze ontwikkelingen groeit de vraag om in kaart te brengen welke specifieke kennis- en innovatiebehoeften er zijn bij overheden en bedrijven, welke mogelijkheden er zijn en waar investeringen benodigd zijn, om het kennisecosysteem voor kernenergie in Nederland verder uit te werken en versterken.

In opdracht van de programmadirectie Kernenergie van het ministerie van Klimaat en Groene Groei (hierna: KGG) heeft Dialogic innovatie & interactie (hierna: Dialogic) in samenwerking met de Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (hierna: VITO) en Belgian Nuclear Research Centre (hierna: SCK CEN) een inventarisatiestudie voor het kennis- en innovatieprogramma kernenergie uitgevoerd. Dit onderzoek liep parallel met een onderzoek dat werd uitgevoerd naar human-capitalvraagstukken in het nucleaire domein. Hoewel beide onderwerpen elkaar raken, gaat het in deze studie niet om human capital.

1.2 Doel- en vraagstelling van de inventarisatiestudie

De inventarisatiestudie heeft een tweeledige doelstelling, namelijk:

3. Het inventariseren van de **behoefte aan kennisontwikkeling en innovaties** in het nucleaire domein (uitmondend in een **kennis- en innovatieprogramma kernenergie**).
4. Het opstellen van een **roadmap** op basis van deze inventarisatie naar de behoefte aan kennisontwikkeling en innovaties in het nucleaire domein.

De roadmap zet de stappen uiteen die kunnen worden gezet om doelstellingen en mijlpalen van het programma te bereiken. Hiermee spreken stakeholders (overheid, bedrijven en kennisinstellingen) af wie op welk van de acht thema's en het thema SMR aan zet is, welke investeringen daarvoor worden gedaan (en door wie), waar kennisvragen worden belegd (en dat zowel binnen het MMIP als daarbuiten) en welke resultaten dat moet opleveren. Daarbij kan nog een onderscheid worden gemaakt tussen de korte termijn (2024-2035) en de langere termijn (2035-2050).

Uit deze tweeledige doelstelling volgen **drie hoofdvragen**, namelijk:

A. Welke **kennisleemtes en innovatiebehoeftes zijn er** bij kennisinstellingen, overheden en bedrijven, om de nucleaire ambities van Nederland nu en in de toekomst te realiseren?
B. Welke **inspanningen** door kennisinstellingen, overheden en bedrijven, nu en in de toekomst, zijn er nodig om kennisleemtes op te vullen en innovatieopgaves te realiseren?
C. Welke **andere inspanningen** zijn nodig om een concrete invulling te geven aan de kennis- en innovatieparagraaf van het MMIP-kernenergie?

Deze hoofdvragen werken we uit in de volgende deelvragen:

Hoofdvraag A: kennisleemtes en innovatiebehoeftes bij kennisinstellingen

1. Hoe ziet het innovatie-ecosysteem voor kernenergie eruit? Wie zijn de stakeholders en welke rol hebben ze?
2. Wat is exact het doel dat we in Nederland nastreven ten aanzien van kernenergie? Binnen welke bandbreedtes beweegt dit zich?
3. Welke kennisvragen zijn er in het ecosysteem?
4. Welke kennis kan er binnen en buiten het ecosysteem verworven worden?
5. Welke acties moeten er worden ondernomen om de gezochte kennis te verwerven?

Hoofdvraag B: inspanningen door kennisinstellingen, overheden en bedrijven

6. Welke logische scenario's zijn mogelijk?
7. Wat zijn de te nemen kennisontwikkelings- en innovatiestappen in de tijd (2024-2035), voor de acht thema's en het thema SMR's, indien mogelijk gespecificeerd in ontwikkeling in TRL-niveaus?
8. Wat zijn de te nemen kennisontwikkelings- en innovatiestappen in de tijd (2035-2050) voor de acht thema's en het thema SMR's, indien mogelijk gespecificeerd in ontwikkeling in TRL-niveaus?
9. Welke partijen in het ecosysteem moeten in de periode 2024-2035 welke activiteiten moeten ontplooien?
10. Welke partijen in het ecosysteem moeten in de periode 2035-2050 welke activiteiten moeten ontplooien?
11. Welke kennisontwikkelingen en innovaties kunnen het meest efficiënt met buitenlandse partners worden doorlopen?
12. Hoe onzeker/haalbaar zijn de bovengenoemde scenario's en investeringen en welke potentiële mitigerende acties zijn er mogelijk?

Hoofdvraag C: Kennis- en innovatieparagraaf van het MMIP-kernenergie

13. Hoe kunnen de bovenstaande stappen worden belegd in programma's binnen het MMIP?
14. Welke synergievoordelen en andere relaties zijn er (op welk moment) tussen de negen thema's?
15. Welke andere onzekerheden, potentiële knelpunten andere relevante haalbaarheidsaspecten zijn er?

We redeneren bij het beantwoorden van deze vragen vanuit het perspectief van een **onderzoeks- en innovatie-ecosysteem**[2] (O&I-ecosysteem), in plaats van een perspectief van

[2] Zie Vankan et al. (2020). *Onderzoeks- en innovatie-ecosystemen in Nederland.* Achtergrondstudie bij de kabinetsstrategie: 'Versterken van onderzoeks- en innovatie-ecosystemen'. (Kamerstuk 33009, nr. 96) [open.overheid.nl]

partijen met sec een kennis- en innovatievraag en partijen die kennis kunnen leveren. Redeneren vanuit partijen met een vraag en aanbod van kennis komt niet meer overeen met de manier waarop innovatie vorm krijgt. Er is geen sprake meer van een lineair proces van kennisontwikkelaars (zoals universiteiten en Philips Natlab) naar kennisvragers (zoals de overheid en allerlei bedrijven). Een O&I-ecosysteem omvat een dynamische set van samenhangende actoren, activiteiten, faciliteiten en regels die van belang zijn voor het onderzoeks- en innovatievermogen van individuele actoren en groepen van actoren en, hierdoor, voor het creëren van waarde. Dat betekent concreet dat we partijen in de sector niet zullen beschouwen als vragers of aanbieders van kennis, maar veel meer bewust zijn van de ambiguïteit hierin. Daarnaast leggen we veel meer focus op de onderlinge relaties tussen partijen. Tot slot is het essentieel om de ontwikkeling van kennis vanuit een breder perspectief te zien. We kijken nadrukkelijk ook naar benodigde onderzoeksfaciliteiten, toegang tot schaarse materialen, kennisoverdracht in de keten, et cetera.

1.3 Aanpak van de inventarisatiestudie

De aanpak voor deze inventarisatie bestaat uit vijf sporen, namelijk:

1. In een **documentenanalyse** hebben we zo veel mogelijk informatie verzameld over de stand van zaken over de Nederlandse kennis- en innovatiepositie (inclusief beleid) op het gebied van kernenergie. Dit heeft – naast interviews – geholpen om het innovatie-ecosysteem in kaart te brengen (spelers, vraagstukken en leemtes), behoeften aan kennis en innovatie te inventariseren en om bouwstenen te leveren voor de roadmap. Documentenanalyse wordt ook gebruikt om interviews en werksessies voor te bereiden.
2. In een **interviewronde** van 42 interviews met 57 stakeholders hebben we informatie verzameld om de werking en samenstelling van het innovatie-ecosysteem te beschrijven en om voor de acht thema's en SMR's een beeld te krijgen van de kennisvragen. Voorts hebben we de interviews gebruikt om beelden bij en suggesties voor de roadmap te verzamelen. In Bijlage 2 staat een overzicht van de gesproken organisaties en personen. Bij de selectie van gesprekspartners (zowel in interviews als werksessies) is gelet op een spreiding over het innovatie-ecosysteem kernenergie waarbij soms gesproken is met vertegenwoordigers van een groep betrokkenen (en niet met individueel betrokkenen). De nadruk op het innovatie-ecosysteem kernenenergie betekent dat sommige partijen minder gesproken zijn, bijvoorbeeld maatschappelijke organisaties, regionale en lokale overheden en burgers. Dit zou een substantiële uitbreiding van het onderzoek zijn. Wel zijn websites bezocht en adviezen geraadpleegd over bredere maatschappelijke betrokkenheid (o.a. van Rathenau Instituut). Verder kan KGG met dit rapport in de hand een bredere dialoog starten over de kennisvragen (en de beantwoording daarvan en wie daarbij welke rol kan vervullen).
3. In vijf **werksessies** hebben we onze bevindingen getoetst en bouwstenen verzameld voor het samenstellen van een roadmap (met per sessie tien tot vijftien deelnemers uit het innovatie-ecosysteem kernenergie). We hebben ervoor gekozen om in deze werksessies de acht thema's en SMR's te clusteren rondom vier onderwerpen. In Bijlagen 4 t/m 7 staat een overzicht van de sessies en de deelnemers (organisatie en naam). De verslagen van deze werksessies zijn gebruikt als input voor het eindrapport.
4. In een aparte **bijeenkomst** (met 19 stakeholders) zijn de gebundelde resultaten van de voorgaande sporen in de vorm van een conceptroadmap besproken en gevalideerd. In Bijlage 8 staat een overzicht van de deelnemers aan deze bijeenkomst (organisatie en naam). Het verslag van deze bijeenkomst is gebruikt als input voor het eindrapport.

5. In dit **eindrapport** zijn de resultaten van alle voorgaande sporen door ons geanalyseerd en gebundeld. Dit eindrapport bestaat uit drie delen, namelijk een beschrijvend deel van het innovatie-ecosysteem kernenergie, een inventariserend deel van kennisleemtes en innovatiebehoeften en een ontwerpend deel met de roadmap voor de thema's, inclusief SMR's. In dat laatste deel is er ook aandacht voor de koppeling aan het MMIP.

1.4 Leeswijzer

In de hoofdstukken 2 en 3 van dit rapport schetsen we eerst de recente ontwikkelingen in het overheidsbeleid voor (ontwikkeling en stimulering van) de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur en presenteren we een beschrijving van het Nederlands innovatie-ecosysteem (o.a. de belangrijkste spelers). In hoofdstuk 4 presenteren we per thema en SMR's de belangrijkste kennisleemtes en -behoeftes die er zijn bij kennisinstellingen, overheden en bedrijven. Hiermee beantwoorden we hoofdvraag A van deze studie. In hoofdstuk 5 presenteren we roadmaps voor de acht thema's (waarbij SMR's geïntegreerd is in de bestaande acht thema's). In dit deel leggen we ook een koppeling met het MMIP. Dit beantwoordt zowel hoofdvraag B als C van deze studie. In het laatste deel van dit rapport (hoofdstuk 6) doen we aanbevelingen voor een vervolg.

2 Ontwikkeling van beleid voor de nucleaire kennisinfrastructuur

2.1 Initiële acties

De departementen EZK (thans KGG), VWS, IenW, OCW, SZW en de zbo ANVS werken samen om de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland te bevorderen (Kamerstuk 32645, nr. 98; nr. 116). In het najaar van 2016 is de Hoogambtelijke Werkgroep Nucleair Landschap (HAW) ingesteld met als doel om het nucleaire landschap in Nederland in kaart te brengen, de financiële risico's voor de overheid te inventariseren en beleidsopties voor de toekomst van het nucleair landschap in Nederland in beeld te brengen (Kamerstuk 25422, nr. 203).

EZK heeft in 2020 overleg gevoerd met NRG, PALLAS[3] en de TU Delft over de versterking van de kennisinfrastructuur. Ook werd in 2020 door het lid Dijkhoff c.s. een motie ingediend over het uitvoeren van een marktconsultatie onder welke voorwaarden marktpartijen bereid zijn te investeren in kerncentrales in Nederland, te onderzoeken welke publieke ondersteuning daarvoor nodig is en te verkennen in welke regio's er belangstelling is voor de realisering van een kerncentrale (Kamerstuk 35570, nr. 11). Deze marktconsultatie is door KPMG uitgevoerd (Kamerstuk 32645, nr. 96). In 2024 is er opnieuw een marktconsultatie uitgevoerd door EY en BNP Paribas (Kamerstuk 32645, nr. 132).

2.2 Oprichting en werkzaamheden van de interdepartementale werkgroep «Kennis Nucleaire Technologie en Stralingsbescherming»

In 2020 bracht de Commissie Van der Zande, in opdracht van de ANVS, het rapport «Naar een Agenda en Platform Nucleaire Technologie en Straling» uit (bijlage bij Kamerstuk 25422, nr. 266). Het rapport bevatte aanbevelingen gericht op een structurele borging en versterking van de kennisbasis voor zowel nucleaire technologie als stralingsbescherming. Naar aanleiding van dit rapport richtte de HAW een interdepartementale werkgroep (werkgroep Kennisbasis Nucleaire Technologie en Stralingsbescherming) op om de coördinatie tussen departementen rondom nucleair en straling te versterken, de vraagstukken verder te verkennen en om zich te buigen over de verdere uitwerking van het adviesrapport (Kamerstuk 32645, nr. 118). Ook moest de werkgroep adviseren over het op peil brengen van een adequaat kennisniveau in Nederland van zowel het nucleaire domein als dat van stralingsbescherming (Kamerstuk 32645, nr. 98).

De werkgroep startte met een verdiepende verkenning van de zorgen over dreigende schaarste aan nucleaire experts (Kamerstuk 25422, nr. 284). In opdracht van de werkgroep maakte Berenschot, op basis van gesprekken met de partijen die in de nucleaire sector actief zijn, in 2022 een eerste inschatting van de toenmalige en toekomstige behoefte aan nucleaire kenniswerkers. Dit rapport werd halverwege 2022 opgeleverd (bijlage bij Kamerstuk 25422, nr. 284). Duidelijk werd dat het beperkte aantal nucleaire experts dat de Nederlandse onderwijsinstellingen afleverde niet overeenkwam met de behoefte aan nucleair experts van de Nederlandse nucleaire sector. Verder liet het rapport zien welke kwetsbaarheden partijen verwachtten en hoe ze daarmee om zouden gaan.

[3] PALLAS is een medische isotopenreactor die de Hoge Flux Reactor in Petten gaat vervangen. PALLAS kan daarmee een belangrijke bijdrage leveren aan de versterking van de bredere nucleaire kennis- en onderzoeksinfrastructuur binnen Nederland (Kamerstuk 32645, nr. 118).

In september 2022 heeft een ronde-tafelbijeenkomst plaatsgevonden met de nucleaire sector, waar NRG, PALLAS, TU Delft, Urenco, Topsector Energie, ANVS, EZK en leden van de interdepartementale werkgroep aan deelnamen. De leden van Nucleair Nederland hebben tijdens de ronde-tafelbijeenkomst een voorstel gepresenteerd, wat op de korte termijn zou moeten zorgen voor extra versterking van de nucleaire kennisbasis- en infrastructuur (Kamerstuk 32645, nr. 101). Daarnaast concludeerden zij dat het effectief versterken van de kennisinfrastructuur vraagt om structurele middelen.[4] Het voorstel zette in op drie pijlers, te weten onderwijs, onderzoek en bewustwording:

- Wat betreft **onderwijs** stelde de sector voor een leerstoel Stralingsbescherming in te stellen aan de TU Delft en een Nuclear Academy op te richten. De Nuclear Academy zou zich inzetten op de versterking van nucleaire kennis en vaardigheden binnen Nederland door een curriculum voor beroeps- en praktijkopleidingen binnen het mbo en hbo en trainingsmodules te ontwikkelen.
- Op het gebied van **onderzoek** stelde de sector naast het instellen van een leerstoel Stralingsbescherming voor om twee promovendi aan de TU Delft aan te stellen op het gebied van reactortechnologie en stralingsbiofysica. Daarnaast stelde de sector voor om drie lectoren in samenspraak met hogescholen aan te stellen, die praktijkgericht onderzoek zouden moeten doen en daarbij aansluiting zoeken bij toegepaste onderzoekswerkzaamheden van andere spelers binnen de Nederlandse nucleaire sector. Ook stelde de sector voor verouderde laboratoriumfaciliteiten te vervangen en uit te breiden bij NRG en de TU Delft.
- **Bewustwording** werd belangrijk geacht voor de aantrekkingskracht van het kennisveld voor jong talent, maar ook om in de samenleving bij te dragen aan een beter begrip van de toepassingen van nucleaire technologie. De sector stelde daarom voor om in de provincie Zeeland een publiekscentrum te realiseren om betere bewustwording te creëren rondom de toepassingen van nucleaire technologie.

De werkgroep heeft vervolgens een analyse gemaakt van de verschillende oplossingsrichtingen (Kamerstuk 32645, nr. 101). In 2023 werd het rapport «Oplossingsrichtingen ter versterking van de kennisbasis voor nucleaire technologie en stralingsbescherming» afgerond (bijlage bij Kamerstuk 32645, nr. 118). Het rapport adviseerde om een integraal kennis- en onderzoeksprogramma rondom nucleaire technologie, veiligheid en stralingsbescherming op te zetten. Het rapport gaf hier concrete oplossingsrichtingen voor: zo zou er moeten worden geïnvesteerd in nucleair onderwijs en onderzoek op alle niveaus, de nucleaire sector en overheden om zo het tekort aan opgeleide mensen op te kunnen lossen. De interdepartementale werkgroep pleitte verder voor een integrale aanpak voor de hele nucleaire sector. Vooruitlopend op het rapport van de interdepartementale werkgroep had EZK al initiatieven ondernomen om een kennis- en innovatieprogramma op te zetten. Het gaat hierbij om het:

- Uitvoeren van een haalbaarheidsstudie naar een publiekscentrum voor kernenergie;
- Oprichten van een Nuclear Academy;
- Instellen van een leerstoel Stralingsdosimetrie en biofysica aan de TU Delft (inclusief aanstelling van twee promovendi en financiering laboratoriumapparatuur);
- Subsidiëren van drie lectoren op het gebied van nucleaire technologie.

[4] In eerste instantie werd het voorstel gefinancierd met het amendement-Erkens/Dassen (Kamerstuk 35925 XIII, nr. 14), wat de regering verzocht om eenmalig vijf miljoen euro beschikbaar te maken voor het opzetten van een kennis- en innovatieprogramma om de innovatie- en kennisinfrastructuur op het gebied van nucleaire technologie te versterken.

2.3 Naar een Meerjarig Missiegedreven Innovatieprogramma voor kernenergie

Ter voorbereiding van de nieuwbouw van twee nieuwe kerncentrales zette EZK rond 2022 in op het verzamelen van kennis en ervaringen uit een aantal Europese landen (waaronder Frankrijk, Verenigd Koninkrijk, Finland, Polen en Tsjechië) die ook met de ontwikkeling van nieuwe kerncentrales bezig waren. Dit deed het departement door middel van onderzoeken, werkbezoeken en gesprekken met relevante partijen uit deze landen (Kamerstuk 32645, nr. 98). Er werd daarbij onder andere gekeken naar keuzes die zijn gemaakt ten aanzien van de inzet van kernenergie in het energiesysteem, de rol van de overheid en de risico's/veiligheid en opslag van radioactief afval. Daarbij werd ook expliciet gevraagd naar de lessen die geleerd zijn en de mogelijke relevantie daarvan voor de Nederlandse context. De inzet was om de Nederlandse aanpak zoveel mogelijk af te stemmen met de genoemde Europese landen, aangezien een bepaalde mate van standaardisatie in Europa kan bijdragen aan het verkorten van de realisatietermijn en beperken van de kosten. Expliciete plannen op het gebied van nucleaire veiligheid en stralingsbescherming werden door IenW gepresenteerd in het beleidsprogramma voor 2022 (Kamerstuk 35 925 XII, nr. 106).

Ook werden in 2022 verscheidene studies in opdracht van EZK afgerond, waaronder een scenariostudie van Witteveen+Bos, eRisk en HCSS (Kamerstuk 32645, nr. 99), een studie naar financieringsmodellen van Baringa (Kamerstuk 32645, nr. 99), een markconsultatie van KPMG (Kamerstuk 32645, nr. 96), een advies van de Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli)[5] en een planningsanalyse van Boston Consulting Group (Kamerstuk 32645, nr. 116). In het Coalitieakkoord van de VVD, D66, CDA en ChristenUnie (bijlage bij Kamerstuk 35788, nr. 77) en met inzichten vanuit de resultaten van de voorgenoemde studies besloot het toenmalige kabinet in te zetten op bedrijfsduurverlenging van de kerncentrale Borssele en de voorbereiding van de bouw van twee nieuwe kerncentrales, waarbij de locatie Borssele de voorkeur zou krijgen (Kamerstuk 32645, nr. 116). Aangezien kerncentrales forse investeringen vereisen en een lange ontwikkelperiode kennen zonder inkomsten, is stabiel en consistent beleid ten aanzien van kernenergie een belangrijke randvoorwaarde voor private financiers. Dit bleek eerder uit de bovengenoemde marktconsultatie van KPMG. Uit een recente consultatie door EY en BNP Paribas blijkt dat er inmiddels wel overwegingen worden gemaakt, maar vooralsnog beperkte interesse is vanuit de markt voor de financiering van kerncentrales (Kamerstuk 32645, nr. 132). Uit de marktconsultatie van KPMG bleek verder dat het behoud van specifieke nucleaire kennis en ervaring van essentieel belang is om in de toekomst meer kernenergie aan de energiemix toe te kunnen voegen. Een deel van deze kennis is reeds aanwezig vanwege de kerncentrale in Borssele (KCB). Dit onderschrijft de toegevoegde waarde van bedrijfsduurverlenging van de KCB. Daarnaast werd de stabiele bijdrage van de KCB aan de leveringszekerheid welkom geacht in het licht van de recente geopolitieke ontwikkelingen.

De Topsector Energie (TSE) heeft destijds in opdracht van EZK een korte verkenning uitgevoerd over de rol die de TSE zou kunnen spelen in het bevorderen van innovaties rondom kernenergie (Kamerstuk 32645, nr. 101) en op welke thema's binnen het onderwerp kernenergie kennisontwikkeling en innovatie nodig zou zijn in Nederland (Kamerstuk 32645, nr. 118). Eind 2022 dienden de leden Erkens en Dassen een motie in om kernenergie toe te

[5] Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (2022). *Splijtstof? Besluiten over kernenergie vanuit waarden*.

voegen aan de Topsector Energie (Kamerstuk 32645, nr. 104).[6] In 2023 werden de bevindingen van de TSE gepubliceerd (Kamerstuk 32645, nr. 118). Vervolgens is in de zomer van 2023 een verkennend missieteam ingesteld met vertegenwoordigers uit het bedrijfsleven, overheid en kennisinstellingen. Dit missieteam werkte de inventarisatie van de TSE nader uit tot het Meerjarig Missiegedreven Innovatieprogramma (MMIP) Kernenergie, wat onderdeel uitmaakt van het missiegedreven Topsectoren- en innovatiebeleid (Kamerstuk 32645, nr. 118). Met de uitwerking van het MMIP werd gehoor gegeven aan het advies van de interdepartementale werkgroep kennisbasis om een breed integraal onderzoeksprogramma op te zetten.

2.4 MMIP Kernenergie

Eind 2023 werd het MMIP Kernenergie gelanceerd om de hernieuwde ambities op het gebied van kernenergie in Nederland te kunnen realiseren en de daarvoor essentiële kennisinfrastructuur te organiseren. Met het MMIP is gekozen voor een programmatische aanpak van essentiële investeringen in kennis en innovatie in het nucleaire domein, waarvoor € 65 miljoen is vrijgemaakt uit het Klimaatfonds (Kamerstuk 32645, nr. 120).[7]

Het MMIP heeft tot doel de nucleaire kennisinfrastructuur te waarborgen, versterken en toekomstbestendig te maken door gericht te investeren in onderwijs, onderzoek en innovatie. Het gaat daarbij naast kennisontwikkeling rondom de huidige nucleaire technologieën om het versterken van de kennisbasis met betrekking tot nieuwe reactortypen die in 2050 mogelijk onderdeel zijn van een stabiele, CO_2-vrije energievoorziening. Ook is de kennisontwikkeling inzake de veilige verwerking en opslag van radioactief afval van belang. De productie van afval is immers het gevolg van de keuze voor kernenergie.

De versterking van de nucleaire kennisbasis vraagt om een meerjarige aanpak, waarbij het noodzakelijk is dat er voldoende mensen beschikbaar zijn voor het geven van onderwijs en het doen van onderzoek. Binnen het MMIP wordt gewerkt met acht onderzoeksthema's. In het MMIP is een nadere prioritering van de thema's aangebracht (zie Tabel 1). Deze prioritering heeft geen betrekking op de importantie of relevantie van de thema's, maar zegt iets over de urgentie en fasering van de verschillende thema's. Kennis- en innovatieprogramma's die in de periode 2025-2026 worden opengesteld, zullen zich richten op prioriteit 1-thema's. Voor de prioriteit 2-thema's wordt gericht op het openstellen van programma's in de periode 2027-2028.

[6] Daarnaast werd een motie ingediend door de leden Erkens en Bontenbal om binnen het Nationaal Programma RES verkenningen toe te staan binnen de RES-regio's over de rol van (kleine) kerncentrales in de regionale energiesystemen van na 2030 en het proactief delen van relevante kennis en ervaring op het gebied van kernenergie (Kamerstuk 32645, nr. 105).

[7] Tijdens de Voorjaarsbesluitvorming 2024 zijn de gereserveerde middelen vanuit het Klimaatfonds in zijn geheel toegekend. Deze middelen zijn tot en met 2030 beschikbaar voor de versterking van de nucleaire kennis- en innovatiestructuur en de uitvoering van het MMIP Kernenergie (Kamerstuk 32645, nr. 128). Eventuele verdere (structurele) financiering na 2030 is aan een volgend kabinet.

Tabel 1. De innovatiethema's van het MMIP Kernenergie en de prioritering van deze thema's.

Thema		Prioriteit
1	Stralingsbescherming	2
2	Systeemkennis (inpassing van kernenergie in het Nederlandse energie-systeem)	1
3	Kennis over nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie	1
4	Aan reactoren gerelateerde 'enabling' onderwerpen ('plant integrity', onderhoud onder extreme omstandigheden, enz.)	2
5	Hogetemperatuur waterstofproductie	1
6	Materiaalonderzoek, waaronder met behulp van nucleaire/ioniserende straling	2
7	Verwerking en opslag radioactief afval en geologische eindberging.	2
8	Perceptie, communicatie en draagvlak.	1

2.4.1 Deelprogramma's en al genomen stappen

Het MMIP kent twee deelprogramma's: de ontwikkeling van de *Human Capital Agenda* (HCA) en het programma *Kennisontwikkeling en Innovatie*. Daarbij is gekeken naar versnelde inzet op thema's waar de urgentie op dit moment het hoogste is. Hieronder volgt een beknopte beschrijving van al genomen stappen in deze deelprogramma's.[8]

Deelprogramma Kennisontwikkeling en Innovatie

Het deelprogramma *Kennisontwikkeling en Innovatie* heeft als doel het versterken van het Nederlandse nucleaire kennis- en innovatie-ecosysteem. Om de kennisleemte en innovatiebehoefte bij overheden, bedrijven en kennisinstellingen beter in kaart te brengen, wordt de onderhavige inventarisatiestudie uitgevoerd. Met de uitkomsten van deze inventarisatiestudie wordt concreter invulling gegeven aan het kennis- en innovatieprogramma, inclusief het onderwerp SMR's.

In samenwerking met de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) is in maart 2024 een workshop georganiseerd over verschillende thema's binnen het MMIP. Deelnemers vanuit verschillende onderzoeks- en kennisinstellingen, universiteiten en hogescholen, werden gevraagd welke (met name) wetenschappelijke vragen er binnen deze thema's spelen en welke thema's zich lenen voor toegepast en/of academisch onderzoek in Nederland. De inrichting van het Wetenschappelijk Onderzoeksprogramma wordt samen met NWO verder verkend, waarbij ook de uitkomsten van deze inventarisatiestudie worden meegenomen. Met de inzichten uit de inventarisatiestudie wordt in samenwerking met de RVO het Technologie Ontwikkelingsprogramma verder ingericht.

Deelprogramma HCA

Het deelprogramma *HCA* heeft als doel de nucleaire kennisbasis en -infrastructuur in zowel het onderwijs als het onderzoek te versterken. Hierbij wordt aandacht besteed aan onderwijs op verschillende niveaus (mbo, hbo en wo). Hierbij wordt tevens gekeken naar de mogelijkheden op het gebied van practoraten (mbo); een praktijkgericht onderzoeksprogramma

[8] Voor een uitgebreidere uiteenzetting van de genomen stappen, zie Kamerstuk 32645, nr. 128.

inclusief lectoraten in samenwerking met Regieorgaan SIA (hbo); en het financieren van drie leerstoelen en zes PhD-posities aan de TU Delft (wo).[9]

Via de eerder opgerichte Nuclear Academy wordt gewerkt aan de ontwikkeling van nucleair-technologische opleidingen en training, met name op mbo- en hbo-niveau. De Nuclear Academy is onder andere samen met de hogeschool Zeeland bezig met de ontwikkeling van een nucleaire minor. De Nuclear Academy organiseert verder diverse andere activiteiten, waaronder informatiebijeenkomsten. Ten slotte wordt aandacht besteed aan het informeren en te enthousiasmeren van middelbare scholieren over de rol van nucleaire technologie in de energietransitie.

Recent is een inventarisatiestudie uitgevoerd door Technopolis om beter zicht te krijgen op de toekomstige vraag naar gekwalificeerd personeel bij bedrijven, overheden en kennisinstellingen, gegeven de nucleaire ambities in Nederland. De studie van Technopolis werd los van deze studie uitgevoerd.[10]

2.5 Internationale samenwerking

De nucleaire sector in Nederland werkt reeds decennia intensief samen in verschillende verbanden, met het Euratom verdrag als de belangrijkste pijler. De High Flux Reactor in Petten wordt gezien als een van de belangrijkste troeven in de internationale nucleaire gemeenschap.

Nederland zet expliciet in op samenwerking met gelijkgezinde landen, in zowel bi- en multilateraal als Europees verband, om de internationale context en ervaringen mee te kunnen nemen.[11] Om de technische samenwerking op kernenergie en uitwisseling van kennis en expertise te stimuleren, worden samenwerkingsverbanden (Memoranda of Understanding) afgesloten (Kamerstuk 32645, nr. 120; nr. 128).[12] De invulling van de samenwerking is afhankelijk per land. Relevante thema's hierbij zijn onder meer kennisontwikkeling, vaardigheden, research & development, veiligheid, nucleaire afvalverwerking en publieke perceptie en draagvlak.

---

[9] Met deze leerstoelen en PhD-posities kan de TU Delft een essentiële bijdrage leveren aan de versterking van de kennisbasis op het gebied van *nuclear energy technology*, *materials science for nuclear reactors* en *nuclear reactor physics*.

[10] Tijdens de uitvoering van de twee studies heeft er geen afstemming plaatsgevonden. Het is aan te bevelen dat de twee studies in samenhang worden meegenomen in de vervolgstappen, gezien de onderlinge relevantie tussen human capital en kennis en innovatie. Wij raden het Missieteam en KGG aan om deze samenhang te realiseren.

[11] In het kader van internationale samenwerking werd tijdens het Tweeminutendebat Kernenergie op 20 december 2022 een motie (Kamerstuk 32645, nr. 113) door de leden Dassen en Bontenbal ingediend over het inzetten voor een Europees Kenniscentrum voor kernenergie – gericht op kennisdeling met betrekking tot de bouw van nieuwe kerncentrales – ontraden en aangehouden. Reden hiervoor was dat de minister op dat moment bezig was met verschillende internationale organisaties (waaronder de OECD en de IAEA) om te verkennen hoe nucleaire kennis op internationaal niveau kan worden ingezet en gedeeld. Een apart Europees kenniscentrum zou in die zin weinig meerwaarde hebben.

[12] De eerste samenwerkingsovereenkomst ('Memorandum of Understanding', MoU) op het gebied van kernenergie werd eind 2023 gesloten met Zuid-Korea. In deze overeenkomst worden afspraken gemaakt over verdere samenwerking op het gebied van kennisontwikkeling, onderzoek, innovatie, nucleaire waardeketen en radioactief afval. Dat draagt bij aan de ontwikkeling van kernenergie in Nederland en biedt kansen voor bedrijven en kennisinstellingen die actief zijn op dit gebied. [rijksoverheid.nl] Eind 2024 zijn ook MoU's getekend met Frankrijk en de Verenigde Staten.

Tijdens de COP28 (2024) werden twee verklaringen op het gebied van kernenergie gesteund door Nederland: een verklaring van de IAEA dat kernenergie onlosmakelijk onderdeel uitmaakt van een net-zero strategie[13] en de zogenoemde Triple Nuclear Power-verklaring, geïnitieerd door de Verenigde Staten, Frankrijk, Zweden en Zuid-Korea (Kamerstuk 31793, nr. 256). Laatstgenoemde verklaring riep daarbij op tot het versterken van de internationale samenwerking om mondiaal een verdrievoudiging van de nucleaire energievoorziening te bereiken. Ook is Nederland tijdens de COP28 lid geworden van het *Accelerating SMRs for Net-Zero Initiative* van de OECD-NEA. Via het initiatief heeft Nederland toegang tot een netwerk met relevante en actuele kennis op het gebied van SMR's (Kamerstuk 31793, nr. 256).

Op 4 maart 2024 werd de *Declaration of the EU Nucleair Alliance* ondertekend (Kamerstuk 21501-33, nr. 1060). Nederland werkt via de alliantie in Europa samen met gelijkgezinde lidstaten. De Nucleaire Alliantie streeft naar de versterking en opbouw van kennis, onderzoek en de Europese waardeketen voor kernenergie. Ook is Nederland toegetreden tot het Nuclear Education, Skills and Technology (NEST) Framework van de OECD-NEA. Doelstelling van deze organisatie is om belangrijke lacunes op te vullen wat betreft capaciteitsopbouw in de nucleaire sector, het dissemineren van kennis en stimuleren van technische innovaties in een internationale context.

Op 21 maart 2024 vond de eerste Nucleaire Energietop met staatshoofden en regeringsleiders van landen met nucleaire ambities plaats in Brussel. De top stond in het teken van de rol van nucleaire energie in het verminderen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen, het versterken van de energiezekerheid en het bevorderen van economische groei. Tijdens de top werd een gezamenlijke verklaring aangenomen waarin meer dan 30 landen het belang van kernenergie onderschrijven.[14] De toenmalig Minister-President nam namens Nederland deel aan de Nucleaire Energietop.

Op 10 april 2024 vond ook de tweede editie van het Belgisch-Nederlands Nucleair Congres plaats in Brussel. Dit congres had tot doel de samenwerking tussen België en Nederland op het gebied van nucleaire technologie en stralingsbescherming te versterken. Het congres bracht vertegenwoordigers vanuit overheden, kennisinstellingen en het bedrijfsleven samen om uitdagingen op thema's als innovatie, onderzoek, radioactief afval en gekwalificeerde arbeidskrachten en opleidingen op het gebied van stralingsbescherming te bespreken. Vooral de groeiende vraag naar gekwalificeerd personeel in de nucleaire sector werd door zowel Nederland als België als uitdaging ervaren. Gezien het succes zal dit congres nu jaarlijks georganiseerd worden. Op 27 november 2024 heeft dit een vervolg gekregen met een congres in het Beneluxhuis in Brussel met als onderwerp minimalisatie van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen.

Daarnaast nemen Nederlandse onderzoeksinstellingen deel aan het Europese kaderprogramma *Horizon Euratom Research & Training Programme* en wordt er samengewerkt door diverse organisaties binnen de OECD-NEA en het Internationale Atoom Energie Agentschap.

[13] IAEA Statement on Nuclear Power at COP28, 1 december 2023, via [iaea.org].

[14] Declaration on Nuclear Energy, 21 maart 2024, via [nes2024.org].

3 Nucleair ecosysteem Nederland: doelen en stakeholders

3.1 Doelstelling met betrekking tot kernenergie

Aangezien de kennisvragen en de daarvoor benodigde kennisinfrastructuur in sterke mate samenhangen met de doelstelling die Nederland op het gebied van kernenergie nastreeft, brengen we in kaart wat de exacte doelstelling behelst voor het realiseren van (meer) kernenergie in Nederland en wat de (rand)voorwaarden zijn die daarbij worden gesteld.

3.1.1 Kabinetsdoelstelling

De inventarisatiestudie neemt de huidig gangbare doelstelling met betrekking kernenergie als uitgangspunt. Dit betreft het inzetten op het verlengen van de bedrijfsduur van de kerncentrale in Borssele[15] en de realisatie van vier nieuwe kerncentrales, met mogelijk ruimte voor SMR's. Bovendien zou de inzet van kernenergie voor het versterken van de strategische autonomie van Nederland moeten zorgen. Tevens is in het Coalitieakkoord toegevoegd dat er gezorgd zou moeten worden voor permanent beheer van radioactief materiaal.

Van kabinet Rutte IV naar kabinet Schoof: verhoogde ambities kernenergie

Deze inventarisatiestudie is gestart tijdens de kabinetswisseling van Rutte IV naar Schoof. Kernenergie werd door kabinet-Rutte IV gezien als een aanvulling in de energiemix – en in de toekomst ook voor de productie van waterstof (bijlage bij Kamerstuk 35788, nr. 77).

In het Hoofdlijnenakkoord (Kamerstuk 36471, nr. 37) van de PVV, VVD, NSC en BBB en het Regeerprogramma van Kabinet Schoof (Kamerstuk 36471, nr. 96) werden de eerdere ambities op het gebied van kernenergie benoemd. Daarnaast werd de ambitie verhoogd door te streven naar de nieuwbouw van twee additionele nieuwe kerncentrales (vier in totaal). Het Nationaal Programma Energiesysteem houdt voor na 2035 rekening met meer dan twee grote kerncentrales, met een mogelijke doorgroei tot 7 GW[16] in 2050 (Kamerstuk 32645, nr. 127).

In de routekaart voor kernenergie (Kamerstuk 32645, nr. 116) werd uitgegaan van een seriematige bouw van twee centrales. Op het moment van schrijven worden twee aparte trajecten gehanteerd: de voorbereiding van de bouw van de eerste twee kerncentrales en de voorbereiding op de bouw van de twee additionele kerncentrales.

[15] Voor de bedrijfsduurverlenging moet artikel 15a van de Kernenergiewet gewijzigd worden. Hiervoor is in maart 2024 de eerste stap gezet door een milieueffectrapport (MER) voor te bereiden. Deze wordt naar verwachting in de zomer van 2024, tegelijkertijd met het wetsvoorstel, ter inzage voorgelegd (Kamerstuk 32645, nr. 124). In 2022 is al een intentieverklaring getekend met EPZ en haar aandeelhouders (ZEH en RWE) om constructief in overleg te treden om bedrijfsduurverlenging na 2033 mogelijk te maken (Kamerstuk 32645, nr. 116). In juni 2024 liet de Minister voor Klimaat en Energie weten verkennende gesprekken te gaan voeren over een mogelijke aandelenoverdracht van de EPZ aan de Nederlandse Staat (Kamerstuk 32645, nr. 129).

[16] Met een typisch vermogen van 1-1,65 GW per kernreactor komt men uit op het bouwen van vier of meer nieuwe reactoren om een dergelijk vermogen (4-6,6 GW, excl. de KCB) te kunnen realiseren.

3.1.2 Routekaart richting 2035 en daarna

KGG streeft ernaar om de bouw van de nu geplande twee kerncentrales zo snel mogelijk na 2035 af te ronden; hiervoor zijn de afgelopen jaren bestuurlijke overleggen gevoerd met betrokken provincies en gemeenten (Kamerstuk 32645, nr. 127). Voor de keuze welk type ontwerp kerncentrale technisch mogelijk is en fysiek ingepast kan worden in Nederland, worden technische haalbaarheidsstudies uitgevoerd door de bedrijven KHNP (uit Zuid-Korea), Westinghouse (uit de Verenigde Staten) en EDF (uit Frankrijk). In deze studies wordt onderzocht in hoeverre de ontwerpen voldoen aan de Nederlandse wet- en regelgeving; of ze op een terrein binnen de voorkeurslocatie Borssele passen; wat de benodigde bouwtijd is; en wat de kosten zijn. Ook moeten de studies zorgen voor meer duidelijkheid over het tijdpad richting 2035.[17] Het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) houdt voor na 2035 al rekening met meer kernenergie dan twee grote kerncentrales (tot 7 GW in 2050), maar laat in het midden op welke manier de aanvullende kernenergie wordt opgewekt – bijvoorbeeld met behulp van grote kerncentrales of met Small Modular Reactors (SMR's). Een motie van het Kamerlid Erkens (Kamerstuk 32814, nr. 1358) verzocht de regering in februari 2024 om alvast scenario's uit te werken waarbij rekening wordt gehouden met een groter aandeel kernenergie en om te beginnen met het herzien van het vestigings- en waarborgbeleid. Uit een reactie op deze motie blijkt dat Nederland in eerste instantie inzet op een zo snel mogelijke realisatie van twee nieuwe kerncentrales na 2035 (Kamerstuk 32645, nr. 127). Hier wordt bewust voor gekozen om de leereffecten en de human capital uit het eerste traject vast te behouden. KGG hoopt de besluitvorming af te ronden in 2025 en dan direct te starten met de selectie van de technologieleverancier.

3.1.3 Richtinggevende keuzes voor de bouw van nieuwe grootschalige kerncentrales

Aanpalend bij het opstellen van de routekaart[18] zijn richtinggevende keuzes gemaakt ten behoeve van de bouw van nieuwe grootschalige kerncentrales. Deze keuzes zijn gemaakt om in relatief korte tijd voldoende voortgang te kunnen boeken en gelden voor alle vier beoogde centrales (Kamerstuk 32645, nr. 132). In deze sectie lichten we de voor deze studie relevant gemaakte keuzes beknopt toe.

1. Er wordt gekozen voor generatie III+-reactoren

Aan deze keuze liggen drie uitgangspunten aan de grondslag, die richting geven aan de selectie van specifieke technieken. Deze uitgangspunten zijn:

a) **Een groot vermogen.** Hoe meer vermogen een centrale heeft, des te groter de bijdrage aan een stabiel en divers energiesysteem. Meer vermogen uit kernenergie levert een grotere bijdrage aan de doelstelling van het Coalitieakkoord om minder afhankelijk van import te worden. Daarbij is de regelbaarheid van het vermogen ook belangrijk vanuit systeemperspectief. Hoe beter regelbaar het vermogen is, hoe stabieler het energiesysteem zal zijn. Om wel de mogelijkheid te hebben om de kerncentrales op of af te kunnen regelen – mocht hier vanuit de balans in het elektriciteitssysteem behoefte aan zijn – wordt dit als voorwaarde meegenomen bij de techniekkeuze voor de nieuwe centrales.
b) **De techniek is haalbaar.** Voor reactoren die zich niet meer in een ontwikkelings- of experimenteerfase bevinden, is het aannemelijk dat ze gerealiseerd kunnen worden zonder grote afwijkingen in tijds- en kostenplanning. Dit soort technieken zijn al ontworpen, gebouwd en in gebruik genomen voor de productie

[17] Naar verwachting zullen de eerste resultaten in het najaar van 2024 bekend worden.

[18] Zie Kamerstuk 32645, nr. 116 (inclusief bijlage III) voor een volledige toelichting.

van elektriciteit. Dit betekent ook dat voor het gekozen reactorontwerp een toepasselijk regulerend kader bestaat. De eerste generatie III(+) reactoren zijn inmiddels in bedrijf genomen, waardoor realistische planningen en kosteninschattingen kunnen worden gemaakt en gehaald.

c) **De techniek is veilig.** Reactoren moeten voldoen aan de technische eisen die gelden op grond van Europese en Nederlandse regelgeving. Voor het vaststellen van de technische randvoorwaarden geldt dat de laatste inzichten zullen worden gehanteerd.

Ontwerpen van kernreactoren worden gecategoriseerd per 'generatie': I, II, III, III+ en IV. Op basis van de uitgangspunten worden Generatie I- en II-reactoren uitgesloten. Reactoren van de eerste generatie betroffen prototypen uit de jaren vijftig en zestig. Generatie II-reactoren waren de eerste commerciële reactoren, maar voldoen niet in alle gevallen aan de extra veiligheidseisen die heden ten dage worden gesteld ter voorkoming van grootschalige incidenten.[19] Generatie III- en III+-reactoren zijn een technische doorontwikkeling van Generatie II-reactoren. Deze reactoren hebben bijvoorbeeld een langere levensduur, betere brandstoftechnologie, hogere thermische efficiëntie en een gestandaardiseerd ontwerp. Generatie III+-reactoren bevatten daarnaast aanvullende veiligheidsmaatregelen. Generatie III- en III+-reactoren voldoen aan de uitgangspunten en zijn commercieel operationeel. Tenslotte zijn er reactoren met innovatieve ontwerpen en technieken in ontwikkeling, de zogeheten Generatie IV-reactoren. Dit betreft onder andere reactoren met andere koeltechnieken (zoals gesmolten zout) of andere energiebronnen (zoals thorium). Deze generatie belooft significant verbeterde veiligheid en mogelijk minder radioactieve reststromen. Generatie IV-reactoren zijn echter nog niet commercieel operationeel en worden daarom ook uitgesloten. SMR's zijn kleine kerncentrales, waarvan verschillende ontwerpen gebruik maken van verscheidene technieken. Momenteel zijn er wereldwijd slechts enkele SMR's operationeel.[20] Het realiseren van SMR's wordt door KGG haalbaar geacht, echter wordt de bouw van grote conventionele kerncentrales als de snelste route geacht richting net-zero in 2050. De ontwikkelingen rondom SMR's worden derhalve meegenomen met het oog op de toekomst.[21] KGG wil bovendien met betrekking tot first-of-a-kind (FOAK)-reactoren (waaronder SMR's) eerst lessen kunnen trekken op basis van ervaringen in het buitenland (Kamerstuk 32645, nr. 123).

Op basis van de voorgenoemde techniekkeuzes is de verwachting (met betrekking tot nieuwe generatie III+-reactoren) dat iedere reactor een vermogen zal hebben in de bandbreedte van 1.000 tot 1.650 MW; met een capaciteitsfactor van 90% wordt daarmee een elektriciteitsproductie van rond de 24 TWh per jaar beoogd (middels de eerste twee beoogde centrales). Voor de bouw van kerncentrales in Nederland worden technische haalbaarheidsstudies uitgevoerd door de bedrijven KHNP (uit Zuid-Korea), Westinghouse (uit de Verenigde Staten) en EDF (uit Frankrijk). Alle drie de bedrijven hebben ervaring met het bouwen van generatie III(+)-reactoren met een minimaal vermogen van 1.000 MW. In de ruimtelijke verkenning[22] die KGG startte in februari 2024 wordt uitgegaan van drie type kerncentrales, te weten AP1000 van Westinghouse (met een vermogen van 1100 MW), APR-1400 van KHNP (1400 MW) en EPR van EDF (1650 MW).

---

[19] De kerncentrale in Borssele is een Generatie II-reactor en voldoet hier wel aan. Dat komt door de regelmatige veiligheidsupdates van de reactor (2EVA en 10EVA).

[20] NEA (2024), The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition, OECD Publishing, Paris

[21] Om in te kunnen spelen op de ontwikkelingen rondom SMR's is een separate programma-aanpak opgezet, die in maart 2024 werd gelanceerd (Kamerstuk 32645, nr. 123).

[22] EZK (2024). Voornemen en voorstel voor Participatie (VenP) van de nieuwbouw kerncentrales. [rvo.nl]

2. De locatie Borssele is de voorkeurslocatie voor de nieuwe kerncentrales

Bij het bepalen van een voorkeurslocatie van nieuwe kerncentrales zijn verschillende factoren van belang. Nederland heeft een waarborgbeleid voor kernenergie, waarbij vestigingsplaatsen voor het gebruik van kernenergie zijn vastgelegd. De waarborglocaties betroffen tot recent de vestigingsplaatsen Eemshaven, Maasvlakte I, en Borssele. Dit waarborgbeleid is onderdeel van het Besluit kwaliteit leefomgeving (en de Omgevingsregeling).

Tijdens een Wetgevingsoverleg op 4 maart 2021 is een motie van Tweede Kamerlid Beckerman aangenomen, die uitspreekt dat Eemshaven niet moet worden overwogen voor de twee nieuw te bouwen kerncentrales (Kamerstuk 35603, nr. 51). Daarnaast is een motie van de leden Sienot en Mulder aangenomen die oproept om geen kerncentrale te bouwen in de provincie Groningen (Kamerstuk 35603, nr. 59). In het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) wordt de vestigingsplaats Eemshaven daarom niet overwogen; daarnaast heeft het vorig kabinet aangegeven voornemens te zijn deze locatie te schrappen uit het waarborgbeleid (Kamerstuk 31239, nr. 388).

Ook de Maasvlakte I is gestuit op bezwaren. Zo bleek uit de marktconsultatie van KPMG dat de gemeente Rotterdam voorkeur geeft aan het benutten van de schaarse ruimte voor het realiseren van projecten uit het Rotterdams Klimaatakkoord 2019. Dit betreft voornamelijk ambities op het gebied van waterstof. Uit een analyse bleek dat de omgeving echter wel redelijk geschikt is. Maasvlakte I werd daarom wel meegenomen in de ruimtelijke verkenning ter voorbereiding van de bouw van twee nieuwe kerncentrales.

In 2024 is met de kennis van nu opnieuw gekeken naar de afwegingen die in het verleden zijn gemaakt om te komen tot het actualiseren van de waarborgingslocaties voor kerncentrales.[23] Naar aanleiding van dit onderzoek zijn twee aanvullende gebieden naar voren gekomen als mogelijk geschikte locaties, namelijk Maasvlakte II en de gemeente Terneuzen: "Maasvlakte II is bij de meest recente herziening van het waarborgingsbeleid in 2008 niet beschouwd, omdat er destijds geen aanleiding was extra gebieden aan te wijzen. Het grondgebied van de gemeente Terneuzen komt in beeld door de geplande ontwikkeling van nieuwe hoogspanningsinfrastructuur naar Zeeuws-Vlaanderen." (Kamerstuk 32645, nr. 131).

De locatie Borssele lijkt goed te scoren op de vestigingsfactoren. Daarnaast biedt deze locatie vanwege de al aanwezige nucleaire infrastructuur (zoals de kerncentrale van EPZ en de opslagplaats voor radioactief afval bij COVRA) kansen voor optimale inrichting en bedrijfsvoering van twee nieuwe centrales. Ook lijkt er fysieke ruimte beschikbaar te zijn waar de kerncentrales ingepast kunnen worden. Deze combinatie van elementen maakt dat Borssele de voorkeurslocatie is voor de bouw van nieuwe centrales.

De planning voor het locatiebesluit voor twee grote kerncentrales op basis van het Coalitieakkoord van Rutte IV is in het tweede kwartaal van 2025 een ontwerp voorkeursbeslissing vast te stellen (Kamerstuk 32645, nr. 127). In 2024 wordt gestart met de actualisatie van het Programma Energiehoofdstructuur (PEH). Binnen het PEH II is het mogelijk om één of meer scenario's met meer kerncentrales op verschillende locaties[24] in een veranderend energiesysteem door te rekenen op netimpact en ruimtelijke effecten. Door dit voortijdig en op systeemniveau te analyseren, wordt de kans op onoverkomelijke knelpunten in de uitvoeringsfase beperkt. Bij het kiezen van mogelijke locaties is het daarnaast belangrijk dat het

[23] Antea Groep (2024). Actualisatierapport waarborgingsbeleid kernenergie. [rijksoverheid.nl]

[24] In een aangenomen motie van het lid Erkens (d.d. februari 2024) wordt de regering verzocht om te beginnen met het herzien van het vestigings- en waarborgbeleid voor het eventueel realiseren van een grotere ambitie van (meer dan twee nieuwe) grote kerncentrales (Kamerstuk 32813, nr. 1358).

kabinet zorgvuldige participatie organiseert en dat er lokaal draagvlak is voor de komst van nieuwe kerncentrales. Na vaststelling van het ontwerp van het PEH II in 2028 kunnen eventuele projectprocedures starten met een stevige basis. De juridische borging gebeurt vervolgens in 2029/2030 in het Besluit Kwaliteit Leefomgeving.

De overheid gaat gesprekken organiseren met omwonenden om te onderzoeken wat zij belangrijk vinden en of er draagvlak is voor de plannen.[25] In 2023 werden de Borselse Voorwaarden gepresenteerd, een voorwaardenpakket die de behoeften en verwachtingen van de inwoners van de gemeente Borsele weerspiegelt ten aanzien van de eventuele komst van negen (energie)projecten, waaronder twee nieuwe kerncentrales.[26] Deze voorwaarden werden opgesteld door de Borselse Voorwaarden Groep, die bestaat uit een groep van 100 gelote inwoners en een vertegenwoordiging van dorpsraden. Ook vanuit de provincie Zeeland zijn er in 2023 voorwaarden opgesteld die voortkomen uit consultaties met maatschappelijke organisaties, werkgeversorganisaties, het Zeeuwse bedrijfsleven, de gemeenten en Waterschappen, de inwoners en de jongeren via Jouw Zeeland.[27] Om invulling te geven aan de gestelde voorwaardenpakketten (in het zogeheten Rijk-Regiopakket) worden gesprekken gevoerd tussen het Rijk, de provincie Zeeland en de gemeente Borsele; naar verwachting wordt een passend pakket medio 2025 gepresenteerd (Kamerstuk 32645, nr. 126). De participatie over nieuwe potentiële waarborglocaties in het PEH start begin 2026. Om lokaal draagvlak te borgen is een participatieplan[28] opgesteld, waarin het kabinet beschrijft op welke wijze de samenleving wordt betrokken. Draagvlak wordt breed benaderd (in overeenstemming met de Verdragen van Espoo en Aarhus). De ervaringen bij de bedrijfsduurverlenging van de kerncentrales Doel I en II in België leren dat er van de internationale mogelijkheden tot inspraak veel gebruik wordt gemaakt.

3.1.4 Scenario's

Er zijn verschillende scenario's mogelijk voor de toekomstige ontwikkeling en invoering van kernenergie in Nederland. Om consistentie te waarborgen formuleren we in dit onderzoek geen nieuwe scenario's, maar maken we expliciet gebruik van al bestaande scenario's. Deze zijn door Technopolis gebruikt in het kader van de inventarisatiestudie die zich richtte op het human capital vraagstuk. De scenario's zijn weergegeven in Figuur 1.

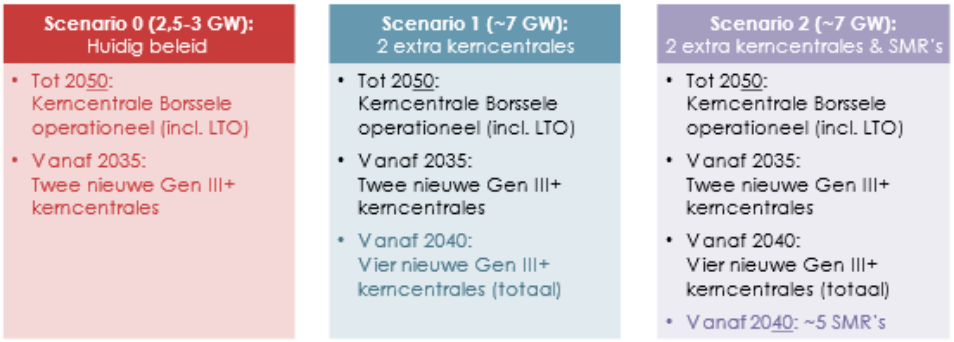
---

[25] De Nederlandse bevolking is in de periode 2020-2023 positiever gaan denken over het gebruik van kernenergie. In 2023 was landelijk 36% van de volwassenen voorstander van meer kernenergie dan enkel de centrale in Borsele, een stijging ten opzichte van 25% in 2020. Met name in de provincie Zeeland is de steun het grootst. Zie CBS (2023). Meer Nederlanders voorstander van kernenergie. In een peiling in 2018 onder ruim 18.000 leden van het EenVandaag Opiniepanel was 54% vóór het gebruik van kernenergie in Nederland. Zie EenVandaag (2018). Onderzoek: Kernenergie in Nederland.

[26] Borselse Voorwaarden Groep (2023). Borselse Voorwaarden.

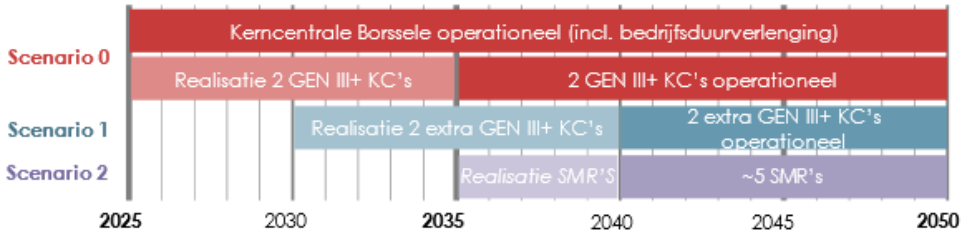
[27] Provincie Zeeland (2023). Provinciale voorwaarden kernenergie.

[28] Participatie- en communicatieplan kernenergie deel I (Strategische aanpak) [platformparticipatie.nl] en deel II (Bedrijfsduurverlenging Kerncentrale Borssele) [platformparticipatie.nl]



Figuur 1. Overeengekomen scenario's voor deze studie. Bron: Technopolis.

Om deze scenario's in perspectief te plaatsen, is de indicatieve tijdlijn van de scenario's weergegeven in Figuur 2. De verschillende scenario's hebben geen grote invloed op deze studie. Voor alle scenario's geldt namelijk dat er een gedeelde behoefte is aan versterking van de huidige nucleaire kennisinfrastructuur. De scenario's beïnvloeden echter wel het type benodigde kennis. Zo wordt de Generatie IV-reactortechnologie bijvoorbeeld niet expliciet genoemd in de bovenstaande scenario's, hoewel deze in de komende decennia mogelijk een rol kan spelen en expliciet wordt meegenomen in deze studie (zie hoofdstuk 4).



Figuur 2. Indicatieve tijdlijn voor de scenario's. Bron: Technopolis.

3.1.5 Definitieve formulering doelstelling

De doelstelling waar deze inventarisatiestudie mee werkt is de verlengde bedrijfsduur van de centrale in Borssele en de nieuwbouw van twee kerncentrales. Op termijn beoogt het kabinet nog twee additionele nieuwe kerncentrales te realiseren. In het verlengde hiervan moet er ook een oplossing komen voor de veilige opslag van radioactief afval. De nieuwe kerncentrales zullen Generatie III+ reactoren betreffen met een al elders gedemonstreerde techniek, met ieder een verwacht vermogen van minimaal 1.000 MW. De voorkeurslocatie betreft Borssele. Momenteel worden haalbaarheidsstudies uitgevoerd door ontwikkelaars KHNP (Zuid-Korea), Westinghouse (Verenigde Staten) en EDF (Frankrijk) en worden samenwerkingsovereenkomsten ondertekend met de betreffende landen. Het begin van de bouwfase is momenteel gepland voor 2028; de ingebruikname van de eerste kerncentrale zo snel mogelijk na 2035. De ontwikkelingen rondom SMR's worden meegenomen met het oog op de toekomst, richting de periode 2040-2050. Het MMIP Kernenergie heeft verder tot doel de nucleaire kennisinfrastructuur te versterken.

3.2 Stakeholderanalyse

Om een goed beeld te vormen over welke stakeholders onderdeel uitmaken van het nucleaire ecosysteem in Nederland en welke rollen deze partijen spelen, hebben we een stakeholderanalyse uitgevoerd. Hierbij bouwen we nadrukkelijk voort op al uitgevoerde studies en analyses en vullen dit waar nodig aan met behulp van een eigen inventarisatie. Groepen stakeholders zijn eerder (deels) geïnventariseerd via eerder verschenen rapporten en

documenten. Op basis van deze informatie hebben we stakeholders in kaart gebracht die in meer of mindere mate relevant zijn voor het nucleair ecosysteem in Nederland. In Tabel 2 beschrijven we beknopt de verschillende (categorieën) stakeholders en hun rollen. Het moge duidelijk zijn dat dit een momentopname is en dat de lijst niet volledig uitputtend en aan verandering onderhevig is. Het is daarnaast goed om te vermelden dat ongeveer 4.000 organisaties in Nederland werken met radioactieve materialen of ioniserende staling, en daarvoor een vergunning hebben onder de Kernenergiewet.[29]

Stakeholders in het nucleaire ecosysteem van Nederland zijn onderling verbonden met elkaar. De verschillende stadia van de nucleaire brandstofkringloop (van winning tot verrijking en van toepassing in de reactor tot afvalverwerking) zijn van elkaar afhankelijk en nucleaire faciliteiten hebben een lange levenscyclus (van bouw tot exploitatie tot ontmanteling), wat relaties en vertrouwen op de lange termijn vereist. Daarnaast omvat het ecosysteem meer dan enkel en alleen kernenergie als energiebron; het omvat ook materiaalkunde, veiligheid en aanpalende onderwerpen zoals medische isotopen. Daarom is breed gezocht naar (potentieel) relevante stakeholders die onderdeel uitmaken van de gehele nucleaire sector.

Tabel 2. Overzicht van de verschillende stakeholders in het nucleaire ecosysteem en hun rollen.

Categorie	Beschrijving van de rol
Overheid	Verschillende departementen hebben verschillende verantwoordelijkheden. Het Ministerie van KGG houdt zich bezig met de wet- en regelgeving en het beleid over kernenergieproductie en (de realisatie) van kerncentrales in Nederland. Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) draagt verantwoordelijkheid voor het beheer van radioactief materiaal en de nucleaire veiligheid, waaronder stralingsveiligheid. Dit laatste is tevens deels belegd bij het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS), die zich ook bezighoudt met medische isotopen. Het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) houdt zich ook bezig met stralingsbescherming, maar vanuit het perspectief van werknemers. De ANVS verleent vergunning onder de Kernenergiewet, zowel waar het nucleaire toepassingen als toepassingen met radioactieve materialen betreft. Daarnaast zijn de provincies en gemeenten het bevoegd gezag met betrekking tot bestemmingsplannen en bouwvergunningen, en spelen zij een rol in de ruimtelijke inpassing van nieuwe kerncentrales. Vergunningen op het gebied van onder andere de inname en lozing van koelwater wordt door Rijkswaterstaat en de Waterschappen gereguleerd. De ANVS en andere inspectiediensten houden er toezicht op dat de toepasselijke regels en de voorschriften van de Kernenergiewet-vergunningen worden nageleefd.
Onderwijsinstellingen	Onderwijsinstellingen zorgen voor de ontwikkeling en het aanbod van kennis en vaardigheden, in de breedste zin van het woord. Voor het functioneren van het nucleair ecosysteem is behoefte aan gekwalificeerde professionals en een sterke kennisinfrastructuur. Dit heeft betrekking op alle opleidingsniveaus (mbo, hbo, wo). Bij onderwijsinstellingen wordt ook onderzoek gedaan op relatief lage TRL-niveaus.[30]

[29] Kernenergiewet (BWBR0002402) [wetten.overheid.nl]

[30] TRL verwijst naar Technology Readiness Level. Een TRL-niveau geeft de mate van ontwikkeling van een technologie aan, waarbij TRL 1 staat voor technologie aan het begin van het ontwikkeltraject en TRL 9 voor technologie die technisch en commercieel gereed is. Globaal zijn de 9 TRL-niveaus onder te verdelen in vier fasen: verkennen (TRL 1-3), ontwikkelen (TRL 4-6), demonstreren (TRL 7 en 8) en opschalen en vermarkten (TRL 9). Zie [rvo.nl] voor meer informatie.

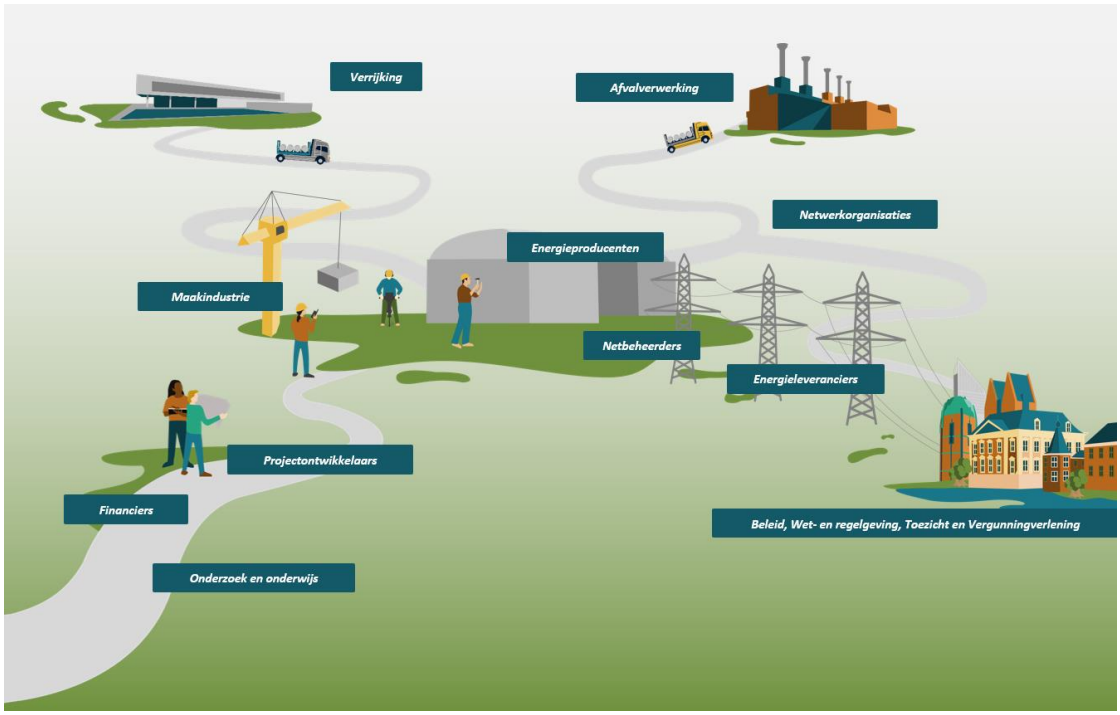
Categorie	Beschrijving van de rol
Onderzoeks-instellingen	Onderzoeksinstellingen doen onderzoek, bijvoorbeeld naar nieuwe technologieën en innovatieve materialen. Ook dragen deze instellingen bij aan wetenschappelijk onderzoek. Dit heeft betrekking op alle TRL-niveaus.
Ontwikkelaars	Met ontwikkelaars verwijzen we naar stakeholders die bijdragen aan de ontwikkeling van kernreactoren.[31] Ontwikkelaars van SMR's worden eveneens meegenomen.
Maakindustrie/ toeleveranciers	Bedrijven en organisaties die bijdragen aan de ontwikkeling en levering van (tussen)producten en diensten, zoals nucleaire technologieën en ontwerp van nucleaire faciliteiten. Maar ook voor niet-nucleaire onderdelen, zoals voor de bouw, het onderhoud en het beheer van reactoren op het gebied van betonnen constructies, lastechnologie, procestechnologie, onderhoudssystemen onder extreme omstandigheden, en licenties.
Energie-producenten	Uitbaten van kerncentrales om elektriciteit op te wekken. In Nederland is dit EPZ in Borssele.
Afvalverwerkers	Vervoeren, isoleren, beheersen, controleren en bergen van radioactief afval; zorgen voor de lang termijn veiligheid van radioactief afval. In Nederland is de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) hiervoor verantwoordelijk.
Verrijkingfabrikanten	Verrijking van chemische elementen (zoals uranium) als brandstof voor kerncentrales. In Nederland betreft dit Urenco.
Netwerkorganisaties	Netwerkorganisaties die betrokken zijn bij het nucleair ecosysteem, bijvoorbeeld in het kader van het vergroten van de belangstelling en het draagvlak voor kerntechnologie en al haar toepassingen, en het bevorderen van de uitwisseling van kennis en ervaring bevorderen. Koepelorganisaties worden hier ook onder geschaard.
Maatschappelijke organisaties	Maatschappelijke organisaties streven een politiek of maatschappelijk doel na met betrekking tot kernenergie, bijvoorbeeld op het vlak van politieke besluitvorming over kernenergie in het algemeen of veiligheid, milieu en locatie in het bijzonder.
Medisch(-nucleaire) actoren[32]	Nederland speelt een grote rol in de productie van medische isotopen, waarvan de meeste geproduceerd worden in kernreactoren. Medische isotopen worden ingezet ten behoeve van de diagnose en behandeling van patiënten. Ook wordt er onderzoek gedaan naar innovatieve medicijnen en draagt de gezondheidszorg bij aan de kennisinfrastructuur in Nederland.
Elektriciteits-bedrijven	Leveren elektriciteit aan eindgebruikers, voorbeelden zijn Greenchoice, Oxxio en Budget Energie.
Netbeheerders	Kernenergie integreren in de energie-infrastructuur; zorgen voor een betrouwbare en betaalbare energie-infrastructuur.

Het nucleaire ecosysteem in Nederland hebben we gevisualiseerd als levenscyclus-overzicht (in Figuur 3) en als ecosysteem (in Figuur 4). Deze visuele overzichten zijn nadrukkelijk niet uitputtend, met name op het vlak van actoren in de (maak)industrie en toeleveranciers. Het doel van deze ecosysteem-inventarisatie was om een indicatief en illustratief beeld te bieden van de verschillende partijen die (kunnen) deelnemen. De volledige lijst geïnventariseerde

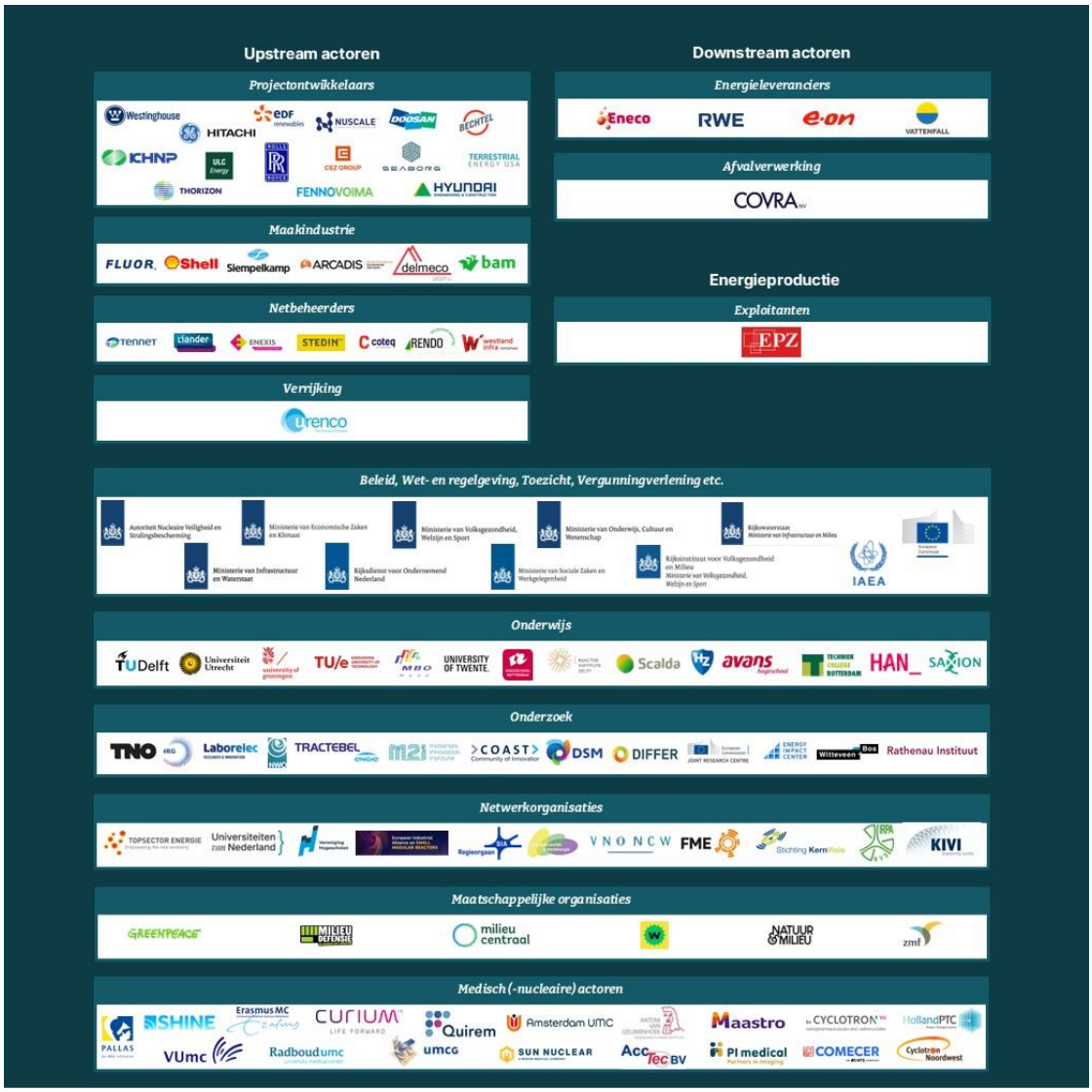
[31] In deze stakeholderanalyse is de selectie van ontwikkelaars beperkt tot partijen die relevant worden geacht in de Nederlandse context; dit is echter een momentopname de selectie is niet systematisch uitgevoerd (en daarmee beperkend).

[32] Voor een recente analyse van het Nederlandse ecosysteem van nucleaire geneeskunde (medische isotopen), zie FAST (maart 2024) *The Dutch innovation ecosystem for nuclear medicine*,

stakeholders is opgenomen in Bijlage 1. Zes partijen hiervan werken samen in de vereniging Nucleair Nederland, te weten NRG|PALLAS, RID, COVRA, EPZ, Urenco en SHINE.



Figuur 3. Indicatief en illustratief levenscyclusoverzicht.



Figuur 4. Illustratief overzicht van verscheidene betrokkenen in het nucleair ecosysteem in Nederland.

4 Kennisvragen

4.1 Introductie

In dit hoofdstuk presenteren we de kennisvragen die uit deze inventarisatiestudie naar voren komen. Deze vragen spelen een centrale rol in dit onderzoek. Het maakt duidelijk welke vragen moeten worden beantwoord om aan de gestelde doelstellingen te voldoen en het nucleaire ecosysteem te versterken. De formulering en selectie van de kennisvragen zijn het gevolg van een uitvoerig proces. Allereerst hebben we op basis van literatuuronderzoek een eerste beeld van kennisvragen gekregen. Daarna hebben we in 42 interviews met 57 personen (zie Bijlage 2) besproken welke kennisvragen wel of niet relevant zijn. Met vijf betrokken hogescholen is een interactieve workshop georganiseerd om gezamenlijk inzichten op te halen en te bespreken (zie Bijlage 3). Alle informatie is vervolgens geclusterd rondom acht inhoudelijke MMIP-thema's. In vier workshops van ongeveer 4 uur zijn met 10 à 15 personen per workshop (zie Bijlage 4, Bijlage 5, Bijlage 6 en 8) alle kennisvragen uitvoerig besproken. Hierbij lag de focus primair op het nader aanscherpen van de kennisvragen. Dat betekende veelal betere formuleringen en nieuwe vragen. Incidenteel zijn ook vragen verwijderd, maar alleen als alle aanwezigen het hier mee eens waren. Daarnaast is gepoogd om vragen te prioriteren, maar dit bleek niet bij alle thema's een geschikte aanpak. Tot slot zijn uitkomsten van deze workshops door de onderzoekers inclusief experts van SCK CEN en VITO (1) geclusterd rondom thema's, (2) gerelateerd aan de onderdelen van de doelstelling en (3) gerelateerd aan verschillende fases.

4.2 Thema's en hoofdvragen

De onderstaande tabel toont de negen thema's waaronder de kennisvragen vallen. In het MMIP zijn acht thema's geïdentificeerd. Op basis van dit onderzoek hebben we ervoor gekozen om een negende thema toe te voegen met hierin vraagstukken die niet goed in de eerdere acht thema's zijn te vatten. De negen thema's opgesplitst in hoofdvragen. Deze hoofdvragen zijn het gevolg van een clustering van de verschillende kennisvragen die uit dit onderzoek naar voren zijn gekomen.

Tabel 3. Thema's en hoofdvragen

ID	Thema	Hoofdvraag
1	Stralingsbescherming	1. Hoe kunnen we blootstelling aan straling effectief meten, modelleren en monitoren?
		2. Wat zijn de effecten van blootstelling van lage doses straling op menselijke gezondheid en het ecosysteem?
		3. Hoe kunnen we de principes van stralingsbescherming toepassen in de praktijk?
2	Systeemkennis	1. Hoe kunnen we de impact van kernenergie op het energie(eco)systeem modelleren en analyseren? (Vanuit verschillende perspectieven: elektrotechnisch, CO_2-impact, marktordening, ruimteontwikkeling, energieprijzen)
		2. In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen (exclusief de productie van waterstof)? Maak onderscheid tussen (1) derde generatie kerncentrales, (2) SMR's en (3) Hoge Temperatuur Reactortechnologie

ID	Thema	Hoofdvraag
		3. Wat zijn de financiële voorwaarden onder welke investeerders willen investeren in nucleaire technologie (zowel grote centrales als SMR's)?
		4. Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?
3	Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	1. Wat vraagt de omgang met nieuwe generaties kernreactoren (vierde generatie, SMR's) aan technische kennis?
		2. Welke kennis heeft de publieke sector nodig om bedrijfsduurverlenging van Borssele en bouw van derdegeneratie centrales te faciliteren?
4	Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	1. Welke juridische uitdagingen zijn er bij de realisatie van het bouwen van nieuwe kerncentrales?
		2. Welke organisatorische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?
		3. Welke technische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?
5	Hoge temperatuur waterstofproductie	1. In hoeverre kan warmte uit derdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?
		2. In hoeverre kan warmte uit SMR's en vierdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?
6	Materiaalonderzoek	1. Hoe kunnen (nieuwe) materialen en brandstoffen beter, efficiënter en duurzamer worden ingezet ten behoeve van kerncentrales?
		2. Wat is het gedrag van materialen onder extreme omstandigheden?
7	Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	1. Hoe kan radioactief afval veilig geborgen worden?
		2. Hoe kan radioactief afval zoveel mogelijk worden verminderd en hergebruikt? Hoe verschilt dit voor verschillende typen reactoren (generatie III(+), generatie IV, SMR's)
		3. Wat wordt er exact verwacht met betrekking tot afvalverwerking (door publiek, politiek, bedrijven en andere partijen)?
8	Perceptie, communicatie & draagvlak	1. Hoe kan een inclusieve besluitvorming over de bouw van kerncentrales en de eindberging van nucleair afval worden georganiseerd, zodat het vertrouwenwekkend is voor lokale, nationale en internationale bevolking?
		2. Hoe kan kernenergie economisch & sociaalmaatschappelijk ingepast worden in de regio?
		3. Wat is de kennis, houding en het gedrag in de maatschappij ten opzichte van kernenergie?
9	Overige vraagstukken	1. Hoe gaan we om met onderlinge afhankelijkheden en kruisverbanden tussen verschillende thema's?
		2. Hoe geven we het best vorm aan kennismanagement op het gebied van kernenergie?
		3. Wat is een goede beleidsmatige inbedding van de acht MMIP-thema's?
		4. Welke economische kansen biedt kernenergie voor de Nederlandse economie?

4.3 Kennisvragen

De tabel op de volgende pagina's toont de kennisvragen die uit dit onderzoek naar voren zijn gekomen. Ze zijn geclusterd rondom de negen thema's en de hoofdvragen. Verder heeft elke kennisvraag een uniek ID gekregen gebaseerd op het thema (1-9), de hoofdvraag binnen het thema (1-4) en de willekeurige volgorde van de kennisvragen hierin (1-9).

Tabel 4. De kennisvragen, geclusterd naar thema en hoofdvragen.

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
Stralingsbescherming	Wat zijn de effecten van blootstelling van straling op menselijke gezondheid en het ecosysteem?	1-1-1	Wat is het effect van de toename van een naar meer kerncentrales op het ecosysteem?
Stralingsbescherming	Wat zijn de effecten van blootstelling van straling op menselijke gezondheid en het ecosysteem?	1-1-2	Wat is nodig voor emergency preparedness en effectief handelen bij een incident wanneer Nederland van een naar vijf reactoren gaat?
Stralingsbescherming	Wat zijn de effecten van blootstelling van straling op menselijke gezondheid en het ecosysteem?	1-1-3	Welke sociale, ethische en juridische kwesties spelen een rol in risicobeoordeling en paraatheid in scenario's die voortkomen uit dreiging?
Stralingsbescherming	Wat zijn de effecten van blootstelling van straling op menselijke gezondheid en het ecosysteem?	1-1-4	Wat doen lage dosissen van straling met levende organismen op celniveau?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we blootstelling aan straling effectief meten, modelleren en monitoren?	1-2-1	Wat is het verschil in benodigde stralingsbescherming tussen de verschillende generaties reactoren?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we blootstelling aan straling effectief meten, modelleren en monitoren?	1-2-2	Hoe kan de kennis voor milieurapportering uitgebreid en biologisch relevanter gemaakt worden voor de ecosystemen waar nieuwe kerncentrales worden overwogen?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we blootstelling aan straling effectief meten, modelleren en monitoren?	1-2-3	Hoe kan straling op een efficiënte en betrouwbare manier gemonitord worden?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we blootstelling aan straling effectief meten, modelleren en monitoren?	1-2-4	Welke technieken en methoden kunnen gebruikt worden, anders dan het gebruik maken van effectieve dosis, in geval van inwendige blootstelling na een nucleaire of radiologische noodsituatie?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we de principes van stralingsbescherming toepassen in de praktijk?	1-3-1	Welke kennis vanuit andere domeinen in stalingsbescherming is overdraagbaar naar kernenergie, en vice-versa?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we de principes van stralingsbescherming toepassen in de praktijk?	1-3-2	Hoe kan stralingsbescherming in de bedrijfscultuur van nucleaire installaties geïmplementeerd worden?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we de principes van stralingsbescherming toepassen in de praktijk?	1-3-3	Hoe borgen we de toepassing van de principes in stralingsbescherming bij SMRs, rekening houdende met de betrokkenheid van alle relevante stakeholders?
Stralingsbescherming	Hoe kunnen we de principes van stralingsbescherming toepassen in de praktijk?	1-3-4	Hoe zorgen we voor state of the art kennis van aanbevelingen in stralingsbescherming en de vertaling hiervan naar de Nederlandse situatie?
Systeemkennis	Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?	2-1-1	Wat zijn de randvoorwaarden voor de locatiekeuze?
Systeemkennis	Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?	2-1-2	Hoe kunnen centrales ingepast worden in deze randvoorwaarden?
Systeemkennis	Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?	2-1-3	Welke invloed heeft het verspreiden van kerncentrales over diverse locaties?
Systeemkennis	Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?	2-1-4	Wat is een optimale plaatsing voor de kerncentrale in relatie tot de Nederlandse energie-infrastructuur?

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
Systeemkennis	Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?	2-1-5	Hoe verhoudt kernenergie zich tot de Nederlandse hoogspanningsinfrastructuur?
Systeemkennis	Welke locaties zijn het meest geschikt voor SMR's en grote centrales?	2-1-6	Welke bedrijven hebben interesse in directe afname van nucleaire elektriciteit, hetzij via power purchase agreements, hetzij via een on-site SMR?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-1	In hoeverre kan kernenergie voorzien in de vraag naar regelbaar vermogen? Hoe verhoudt kernenergie zich tot zon- en windenergie in termen van flexibiliteit? Wat is het effect van dynamisch gedrag op kerncentrales?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-2	Hoe kunnen de verschillende toepassingen van kernenergie (waterstof, warmte, elektriciteit) zo goed mogelijk gecombineerd worden als functie van de industriële vraag?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-3	In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen? (in thema 5 gaan we hier in detail op in)
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-4	Wat is de potentie van kernenergie voor de maritieme sector?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-5	Wat is de potentie van kernenergie voor de industrie?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-6	Hoe gaat het industriële landschap zich in Nederland de komende decennia ontwikkelen in Nederland? In hoeverre kunnen energie-intensieve industriële processen op andere plekken in de wereld efficiënter (productie en transport) worden uitgevoerd?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-7	Welke rol kan kernenergie spelen in de groeiende vraag naar energie in het Europese energiesysteem?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-8	Wat zijn de use cases voor SMR's en grotere kerncentrales?
Systeemkennis	Wat is de visie voor het toekomstige energiesysteem en welke rol kan kernenergie hierin spelen?	2-2-9	Wat is de visie op de langetermijn-bevoorrading van brandstof? Verschillende typen reactoren kunnen verschillende brandstofvereisten hebben.
Systeemkennis	In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen (exclusief de productie van waterstof)? Maak onderscheid tussen (1) derde generatie kerncentrales, (2) SMR's en (3) Hoge Temperatuur Reactortechnologie	2-3-1	Wat is de interface tussen warmteproductie in reactoren enerzijds, en toepassing van deze warmte voor industriële processen anderzijds?
Systeemkennis	In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen (exclusief de productie van waterstof)? Maak onderscheid tussen (1) derde generatie kerncentrales, (2) SMR's en (3) Hoge Temperatuur Reactortechnologie	2-3-2	Welke veiligheidsvraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Systeemkennis	In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen (exclusief de productie van waterstof)? Maak onderscheid tussen (1) derde generatie	2-3-3	Welke juridische vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
	kerncentrales, (2) SMR's en (3) Hoge Temperatuur Reactor-technologie		
Systeemkennis	In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen (exclusief de productie van waterstof)? Maak onderscheid tussen (1) derde generatie kerncentrales, (2) SMR's en (3) Hoge Temperatuur Reactortechnologie	2-3-4	Welke economische vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Systeemkennis	In hoeverre kan warmte uit kerncentrales flexibel worden ingezet voor industriële processen (exclusief de productie van waterstof)? Maak onderscheid tussen (1) derde generatie kerncentrales, (2) SMR's en (3) Hoge Temperatuur Reactortechnologie	2-3-5	Welke technische (met in het bijzonder: materiaalkundige) vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Systeemkennis	Hoe kunnen we de impact van kernenergie op het energie(eco)systeem modelleren en analyseren? (Vanuit verschillende perspectieven: elektrotechnisch, CO2-impact, marktordening, ruimteontwikkeling, energieprijzen)	2-4-1	Hoe gaat de elektriciteitsvraag zich ontwikkelen in de komende jaren? Denk hierbij ook aan het stimuleren van andere sectoren, zoals energie-intensieve AI?
Systeemkennis	Hoe kunnen we de impact van kernenergie op het energie(eco)systeem modelleren en analyseren? (Vanuit verschillende perspectieven: elektrotechnisch, CO2-impact, marktordening, ruimteontwikkeling, energieprijzen)	2-4-2	Hoe gaat de energievraag zich ontwikkelen in de komende jaren?
Systeemkennis	Hoe kunnen we de impact van kernenergie op het energie(eco)systeem modelleren en analyseren? (Vanuit verschillende perspectieven: elektrotechnisch, CO2-impact, marktordening, ruimteontwikkeling, energieprijzen)	2-4-3	Wat is de impact van (inpassing) van kernenergie op de elektriciteitsprijs en zitten hierbij nog verschillen nog tussen grootverbruikers en kleinverbruikers?
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Welke kennis heeft de publieke sector nodig om bedrijfsduurverlenging van Borssele en bouw van derdegeneratie centrales te faciliteren?	3-1-1	Wat hebben we nodig om in Nederland regulerende & toezichthoudende instanties optimaal in staat te stellen om de bedrijfsduurverlenging van Borssele en de bouw van nieuwe centrales te faciliteren?
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Welke kennis heeft de publieke sector nodig om bedrijfsduurverlenging van Borssele en bouw van derdegeneratie centrales te faciliteren?	3-1-2	Wat hebben we nodig om in Nederland kundig opdrachtgever te zijn om de bouw van nieuwe centrales kunnen faciliteren?
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Welke kennis heeft de publieke sector nodig om bedrijfsduurverlenging van Borssele en bouw van derdegeneratie centrales te faciliteren?	3-1-3	Welke duurzaamheidscriteria zouden moeten worden gehanteerd voor (Nederlandse) kerncentrales?
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Wat vraagt de omgang met nieuwe generaties kernreactoren (vierde generatie, SMR's) aan technische kennis?	3-2-1	Hoe kunnen prototypen van generatie IV-reactoren en SMR's worden ingezet om te experimenteren? Welke soorten prototypen kunnen gebruik worden?
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Wat vraagt de omgang met nieuwe generaties kernreactoren (vierde generatie, SMR's) aan technische kennis?	3-2-2	Wat is nodig om de ontwikkeling en implementatie van SMR's in Nederland te realiseren?

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Wat vraagt de omgang met nieuwe generaties kernreactoren (vierde generatie, SMR's) aan technische kennis?	3-2-3	Hoe kan op Europees vlak (technische) harmonisatie worden vormgegeven? Bijvoorbeeld op het vlak van brandstofcyclus en het ontwerp van centrales.
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Wat vraagt de omgang met nieuwe generaties kernreactoren (vierde generatie, SMR's) aan technische kennis?	3-2-4	Hoe kan de brandstofcyclus zo efficiënt mogelijk worden ingezet bij de nieuw te bouwen reactoren?
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	Wat vraagt de omgang met nieuwe generaties kernreactoren (vierde generatie, SMR's) aan technische kennis?	3-2-5	Hoe kan de veiligheid en beveiliging verbeterd worden?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke juridische uitdagingen zijn er bij de realisatie van het bouwen van nieuwe kerncentrales?	4-1-1	Wat is de impact van het betrekken van Nederlandse bedrijven (onderhoud, besturing, veiligheid, monitoring) in deze sector, bijvoorbeeld op het gebied van certificering?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke juridische uitdagingen zijn er bij de realisatie van het bouwen van nieuwe kerncentrales?	4-1-2	In welke mate vormen de huidige juridische kaders een beperking voor het gebruik van kernenergie in de komende jaren?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke organisatorische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?	4-2-1	Welke financieringsconstructies zijn mogelijk voor de (gevolgen van) de bouw, exploitatie en ontmanteling van centrales?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke organisatorische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?	4-2-2	Onder welke voorwaarden hebben investeerders vertrouwen om te investeren in kernenergie?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke organisatorische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?	4-2-3	Hoe kan de governance bij de aanschaf en bouw van een kerncentrale ingericht het best worden vormgegeven?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke organisatorische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?	4-2-4	Hoe kan projectmanagement in de aanschaf en bouw van een kerncentrale het best worden vormgegeven? Wat kunnen we hierin leren van de PALLAS reactor en de ervaringen in bijvoorbeeld Finland en het Verenigd Koninkrijk? Waardoor loopt de bouw uit en welke mitigerende maatregelen kunnen we nemen om dat te voorkomen?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke technische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?	4-3-1	Wat is de beschikbaarheid van kritische materialen voor kerncentrales, en hoe kan deze beschikbaarheid gewaarborgd worden?
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	Welke technische uitdagingen zijn er bij de realisatie van de doelstellingen?	4-3-2	Hoe kunnen state-of-the-art technieken (human factors, organisatorische factors, AI) worden ingezet bij enabling onderwerpen, zoals onderhoud, besturing en veiligheid?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit derdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-1-1	Wat is de interface tussen warmteproductie in reactoren enerzijds, en toepassing van deze warmte voor de productie van waterstof anderzijds? Wat zijn specifiek de voor- en nadelen van de integratie van solid oxide elektrolysers in een nucleair systeem?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit derdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-1-2	Welke veiligheidsvraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit derdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-1-3	Welke juridische vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit derdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-1-4	Welke economische vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit derdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-1-5	Welke technische (met in het bijzonder: materiaalkundige) vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit SMR's en vierdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-2-1	Wat is de interface tussen warmteproductie in reactoren enerzijds, en toepassing van deze warmte voor de productie van waterstof anderzijds? Wat zijn specifiek de voor- en nadelen van de integratie van solid oxide elektrolysers in een nucleair systeem?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit SMR's en vierdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-2-2	Welke veiligheidsvraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit SMR's en vierdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-2-3	Welke juridische vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit SMR's en vierdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-2-4	Welke economische vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Hoge temperatuur waterstofproductie	In hoeverre kan warmte uit SMR's en vierdegeneratie kerncentrales flexibel worden ingezet voor de productie van waterstof?	5-2-5	Welke technische (met in het bijzonder: materiaalkundige) vraagstukken zijn er bij het gebruik van warmte uit kerncentrales?
Materiaalonderzoek	Wat is het gedrag van materialen onder extreme omstandigheden?	6-1-1	Hoe kunnen de materialen in de centrale voor langere termijn gebruikt worden, zodat een veilige bedrijfsduurverlenging kan worden goedgekeurd?
Materiaalonderzoek	Wat is het gedrag van materialen onder extreme omstandigheden?	6-1-2	Wat zijn de eigenschapen van gesmolten zout als vorm van brandstof, en hoe ontwikkelen deze eigenschappen zich bij toepassing in de reactorkern?
Materiaalonderzoek	Hoe kunnen (nieuwe) materialen en brandstoffen beter, efficienter en duurzamer worden ingezet ten behoeve van kerncentrales?	6-2-1	Hoe kunnen bestaande structurele materialen doorontwikkeld en gemonitord worden, ook voor langere exploitatie van kerncentrales?
Materiaalonderzoek	Hoe kunnen (nieuwe) materialen en brandstoffen beter, efficienter en duurzamer worden ingezet ten behoeve van kerncentrales?	6-2-2	In welke mate kunnen structurele materialen circulair worden ingezet? Met in het bijzonder: Hoe kunnen opgewerkte vormen van beton ingezet worden voor de bouw van nieuwe kerncentrales?
Materiaalonderzoek	Hoe kunnen (nieuwe) materialen en brandstoffen beter, efficienter en duurzamer worden ingezet ten behoeve van kerncentrales?	6-2-3	Welke gevolgen hebben (nieuwe) civieltechnische materiaalkeuzes op beschadigingsprocessen, kosten en efficiëntie?
Materiaalonderzoek	Hoe kunnen (nieuwe) materialen en brandstoffen beter, efficienter en duurzamer worden ingezet ten behoeve van kerncentrales?	6-2-4	Welke brandstof en structurele materialen kunnen worden ingezet, opgewerkt en ontwikkeld bij Gen IV en SMR? Houd hierbij rekening met: productie- en assemblageprocessen, modellering, degradatie, activatie, evaluatie, validatie, standaardisatie, monitoring
Verwerking en opslag van radioactief afval en	Wat wordt er exact verwacht met betrekking tot afvalverwerking (door publiek, politiek, bedrijven en andere partijen)?	7-1-1	Wat zijn de implicaties van de verwachtingen met betrekking tot afvalverwerking op het ontwerp, bouw, exploitatie en ontmanteling van een kerncentrale?

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
geologische eindberging			
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Wat wordt er exact verwacht met betrekking tot afvalverwerking (door publiek, politiek, bedrijven en andere partijen)?	7-1-2	Wat zijn de implicaties hiervan op het transport naar de opslaglocatie?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Wat wordt er exact verwacht met betrekking tot afvalverwerking (door publiek, politiek, bedrijven en andere partijen)?	7-1-3	Wat zijn de implicaties hiervan op eindberging?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval zoveel mogelijk worden verminderd en hergebruikt? Hoe verschilt dit voor verschillende typen reactoren (derdegeneratie, vierdegeneratie, SMR's)	7-2-1	Op welke manier kan transmutatie van radioactief afval worden ingezet om langlevende radionucliden om te zetten in radionucliden die een korte halfwaardetijd hebben? Denk hierbij aan toepassingen op plutonium, americium en langlevende splijtingsproducten, zoals technetium.
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval zoveel mogelijk worden verminderd en hergebruikt? Hoe verschilt dit voor verschillende typen reactoren (derdegeneratie, vierdegeneratie, SMR's)	7-2-2	Is het wenselijk (in economische, technische en ethische zin) om gebruikt splijtstof op te werken?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval zoveel mogelijk worden verminderd en hergebruikt? Hoe verschilt dit voor verschillende typen reactoren (derdegeneratie, vierdegeneratie, SMR's)	7-2-3	In hoeverre is het wenselijk (in economische, technische en ethische zin) om Mixed Oxides-splijtstoffen te gebruiken?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval zoveel mogelijk worden verminderd en hergebruikt? Hoe verschilt dit voor verschillende typen reactoren (derdegeneratie, vierdegeneratie, SMR's)	7-2-4	Hoe kan het proces waarin plutonium opnieuw tot brandstof wordt verwerkt (bijvoorbeeld via MOX) beter, efficiënter en goedkoper worden?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval zoveel mogelijk worden verminderd en hergebruikt? Hoe verschilt dit voor verschillende typen reactoren (derdegeneratie, vierdegeneratie, SMR's)	7-2-5	Welk onderzoek is nodig naar andere nieuwe materialen voor de splijtstofmatrix en -hulzen?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval veilig geborgen worden?	7-3-1	Welk geologisch onderzoek is nodig? Denk aan: lange termijn chemische en fysische interacties in de ondergrond, oplosbaarheid en transport van radionucliden, heterogeniteit en eigenschappen van de ondergrond, grondwatertransport, geo-engineering zoals terugneembaarheid en het gebruik maken van boorgaten, geologische evolutie van grondlagen.
Verwerking en opslag van radioactief afval en	Hoe kan radioactief afval veilig geborgen worden?	7-3-2	Hoe lang moeten verschillende soorten afval worden opgeslagen?

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
geologische eindberging			
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval veilig geborgen worden?	7-3-3	Is het wenselijk om afval zo te bergen dat het door volgende generaties terug te halen is, of juist niet?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval veilig geborgen worden?	7-3-4	Welke kosten gaan gepaard met eindberging van kernafval, en wie betaalt deze kosten?
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	Hoe kan radioactief afval veilig geborgen worden?	7-3-5	Welke vereisten aan infrastructuur (bijv. kennis, faciliteiten in het buitenland, opslagruimte, eindberging, verpakking) brengen de afvalproducten van verschillende reactoren met zich mee?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Wat is de kennis, houding en het gedrag in de maatschappij ten opzichte van kernenergie?	8-1-1	Hoe verschilt kennis, houding en gedrag van de maatschappij zich over verschillende maatschappelijke stakeholders?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Wat is de kennis, houding en het gedrag in de maatschappij ten opzichte van kernenergie?	8-1-2	Hoe ontwikkelt kennis, houding en gedrag van de maatschappij zich over tijd?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Wat is de kennis, houding en het gedrag in de maatschappij ten opzichte van kernenergie?	8-1-3	Door welke factoren worden kennis, houding en gedrag van de maatschappij bepaald?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Wat is de kennis, houding en het gedrag in de maatschappij ten opzichte van kernenergie?	8-1-4	Wat betekent kennis, houding en gedrag van de maatschappij voor beleid?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Wat is de kennis, houding en het gedrag in de maatschappij ten opzichte van kernenergie?	8-1-5	Wat wordt in de maatschappij verwacht van kernenergie, op het gebied van berging van afval, veiligheid, economische aspecten, duurzaamheid, et cetera?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Hoe kan een inclusieve besluitvorming over de bouw van kerncentrales en de eindberging van nucleair afval worden georganiseerd, zodat het vertrouwenwekkend is voor lokale, nationale en internationale bevolking?	8-2-1	Wat is een goed maatschappelijk debat over kernenergie en hoe kan dat het best georganiseerd worden?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Hoe kan een inclusieve besluitvorming over de bouw van kerncentrales en de eindberging van nucleair afval worden georganiseerd, zodat het vertrouwenwekkend is voor lokale, nationale en internationale bevolking?	8-2-2	Hoe stel je mensen in staat een goed oordeel te vormen en deel te nemen aan de besluitvorming? (Hoe) moeten we basiskennis onder burgers en maatschappelijke groepen beschikbaar maken?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Hoe kan een inclusieve besluitvorming over de bouw van kerncentrales en de eindberging van nucleair afval worden georganiseerd, zodat het vertrouwenwekkend is voor lokale, nationale en internationale bevolking?	8-2-3	Hoe verspreid je de resultaten van de besluitvorming naar algemeen publiek en welke organisaties worden hiervoor ingezet?

Themanaam	Hoofdvraag	ID	Kennisvraag
Perceptie, communicatie & draagvlak	Hoe kan een inclusieve besluitvorming over de bouw van kerncentrales en de eindberging van nucleair afval worden georganiseerd, zodat het vertrouwenwekkend is voor lokale, nationale en internationale bevolking?	8-2-4	Wat kunnen we leren van vergelijkbare casussen (zoals opslag van gevaarlijke, stoffen in Nederland en kerncentrales in andere landen (Zweden en Finland))?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Hoe kan een inclusieve besluitvorming over de bouw van kerncentrales en de eindberging van nucleair afval worden georganiseerd, zodat het vertrouwenwekkend is voor lokale, nationale en internationale bevolking?	8-2-5	Hoe gaan we om met beslissingen rondom kernenergie die van invloed zijn op volgende generaties?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Hoe kan kernenergie economisch & sociaalmaatschappelijk ingepast worden in de regio?	8-3-1	Hoe kan lokale bevolking worden voorbereid op uitdagingen tijdens bouw (i.h.b. logistiek) en exploitatie?
Perceptie, communicatie & draagvlak	Hoe kan kernenergie economisch & sociaalmaatschappelijk ingepast worden in de regio?	8-3-2	Wat zijn de maatschappelijke kosten en baten van kernenergie?
Overige vraagstukken	Hoe geven we het best vorm aan kennismanagement op het gebied van kernenergie?	9-1-1	Hoe gaan we om met kennisbeheer & dataopslag?
Overige vraagstukken	Hoe geven we het best vorm aan kennismanagement op het gebied van kernenergie?	9-1-2	Hoe kunnen we een common ground creëren waarin kennis in het ecosysteem wordt uitgewisseld? Hoe kan hier een duurzaam ecosysteem voor gebouwd worden?
Overige vraagstukken	Hoe geven we het best vorm aan kennismanagement op het gebied van kernenergie?	9-1-3	Hoe kan een kennisinfrastructuur op de lange termijn gefinancierd, gecoördineerd en gecontinueerd worden?
Overige vraagstukken	Welke economische kansen biedt kernenergie voor de Nederlandse economie?	9-2-1	Hoe kan het Nederlandse bedrijfsleven betrokken worden?
Overige vraagstukken	Welke economische kansen biedt kernenergie voor de Nederlandse economie?	9-2-2	Welke kansen zijn er voor het Nederlandse bedrijfsleven?
Overige vraagstukken	Welke economische kansen biedt kernenergie voor de Nederlandse economie?	9-2-3	Hoe kan commercialisatie door het Nederlands bedrijfsleven worden geborgd?
Overige vraagstukken	Wat is een goede beleidsmatige inbedding van de acht MMIP-thema’s?	9-3-1	Hoe kan een langetermijnvisie op kernenergie worden ontwikkeld?
Overige vraagstukken	Wat is een goede beleidsmatige inbedding van de acht MMIP-thema’s?	9-3-2	In welke mate is een duidelijke langetermijnvisie belangrijk voor verschillende stakeholders?
Overige vraagstukken	Hoe gaan we om met onderlinge afhankelijkheden en kruisverbanden tussen verschillende thema's?	9-4-1	Welke kansen en bedreigingen zijn er op het knooppunt van verschillende thema's?
Overige vraagstukken	Hoe gaan we om met onderlinge afhankelijkheden en kruisverbanden tussen verschillende thema's?	9-4-2	Hoe kunnen we digitalisering (AI, robotica, et cetera) zo inzetten dat kernenergie efficiënter wordt?

4.4 Relatie tussen kennisvragen en doelstellingen

Zoals bekend kent het Nederlandse beleid met betrekking tot kernenergie twee primaire doelstellingen, namelijk:

- **Verlengde bedrijfsduur** van de centrale in Borssele.
- **Nieuwbouw** van vier (generatie 3+) kerncentrales.

Daarnaast worden ontwikkelingen rondom **SMR's** meegenomen. In deze studie is verder aan bod gekomen dat het **verbreden en verdiepen van de kennisinfrastructuur** noodzakelijk is voor het behalen van de bovenstaande doelstellingen. In dit onderzoek zijn de kennisvragen gekoppeld aan de bovenstaande doelstellingen.

We aggregeren de uitkomsten naar het niveau van de negen thema's. Tabel 5 toont in welke mate kennisvragen binnen de thema's relevant zijn voor de drie doelstellingen. Hierbij zijn de doelstellingen afgekort: LTO (long term operation) voor de verlengde bedrijfsduur van Borssele, Generatie III+ voor de nieuwbouw van twee tot vier nieuwe kerncentrales gebaseerd op bewezen techniek en Generatie IV en SMR's[33] voor de toekomstige ontwikkelingen. We hebben geteld hoeveel kennisvragen relateren aan specifieke doelstellingen. Dit is een indicatie van relevantie, maar dit soort rechte tellingen geeft echter slechts een indicatie. Eén specifieke kennisvraag kan immers essentieel zijn om een doel te realiseren.

Uit deze tabel komt naar voren dat voor bedrijfsduurverlening van Borssele relatief weinig kennisvragen spelen ten opzichte van de andere twee doelstellingen. Wat ook opvallend is, is dat de thema's (1) *Perceptie, communicatie & draagvlak* voor alle doelstellingen alle kennisvragen relevant zijn. Een ander opvallend element is dat de vragen rondom de systeemkennis weinig relevant zijn voor de bedrijfsduurverlenging. Dit is logisch omdat deze centrale al deel uitmaakt van het energiesysteem.

Tabel 5. Relatie tussen kennisvragen en de doelstellingen

Thema	LTO	Gen III+	SMR/Gen IV
Perceptie, communicatie & draagvlak	100%	100%	100%
Overige vraagstukken	100%	100%	100%
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	71%	100%	100%
Stralingsbescherming	69%	92%	77%
Materiaalonderzoek	50%	50%	83%
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	46%	69%	100%
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	44%	56%	100%
Systeemkennis	14%	95%	100%
Hoge temperatuur waterstofproductie	0%	50%	50%
Eindtotaal	**51%**	**82%**	**91%**

Er is ook een analyse gemaakt van de relatie tussen de thema's en de fases in de levenscyclus van een kerncentrale. In Tabel 6 wordt hiervan een overzicht gegeven. Hieruit komt

[33] Binnen de Programma-aanpak Small Modular Reactors ligt de nadruk op Generatie III+-SMR's, omdat deze dichter staan bij realisatie. Generatie IV-SMR's worden meegenomen, daar waar dat een win-win oplevert voor de Nederlandse maakindustrie (conform de motie van de leden Erkens en Bontenbal; Kamerstuk 32813, nr. 1255). Zie Kamerstuk 32645, nr. 123.

naar voren dat de meeste vragen liggen op het gebied van het *bedrijven* van een centrale. Dat is niet zo heel vreemd aangezien dit de fase is het langste duurt. Vanuit de as van de thema's komt naar voren dat (wederom) *perceptie, communicatie & draagvlak* in alle fases een zeer relevant is.

Tabel 6. Relatie tussen thema's en de fases in de levenscyclus van een kerncentrale

	Ontwerp en planning	Bouw	Reactor-bedrijf	Ontman-teling
Perceptie, communicatie & draagvlak	100%	100%	100%	100%
Overige vraagstukken	100%	100%	100%	100%
Nucleaire reactor- en splijtstoftechnologie	67%	67%	56%	33%
Hoge temperatuur waterstofproductie	60%	0%	40%	0%
Stralingsbescherming	54%	54%	100%	54%
Systeemkennis	50%	5%	64%	0%
Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen	43%	57%	71%	14%
Verwerking en opslag van radioactief afval en geologische eindberging	8%	8%	100%	8%
Materiaalonderzoek	0%	17%	83%	0%
Eindtotaal	**55%**	**41%**	**79%**	**33%**

4.5 Achtergrond bij de kennisvragen

In deze paragraaf lichten we achtergronden van de verschillende kennisvragen onder de negen thema's toe. Hierdoor wordt het mogelijk om de context van de kennisvragen beter te begrijpen. Hiermee schetsen we een kader waardoor het opstellen van onderzoeksprogramma's, en het beoordelen hiervan, vereenvoudigd kan worden. Het onderstaande moet niet gezien worden als een uitputtende uiteenzetting van concrete onderzoeksonderwerpen, maar meer als een begeleidende tekst die richtinggevend en duidend kan werken.

4.5.1 Thema 1: Stralingsbescherming

Bij stralingsbescherming is het goed om te benoemen dat er op dit moment al een zeker niveau van stralingsbescherming is waardoor veilig met kernenergie gewerkt wordt. Enkele principes zijn volgens experts echter matig onderbouwd of niet optimaal. Kennisvragen zijn dus van belang om deze principes te kunnen optimaliseren, maar ook om veilig te blijven werken met (toepassingen van) kernenergie bij volgende generaties reactoren. Hierbij geldt dat niet al het onderzoek zich richt op de vergunning en bouw van kerncentrales, maar ook op exploitatie en voorbereiding op eventuele noodsituaties.

Veilig werken met straling

Organisaties aan wie de ANVS een vergunning heeft verleend, dienen veilig te werken met straling en preventieve maatregelen te nemen om hun medewerkers te beschermen volgens het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (en preventieve maatregelen dienen te nemen om hun medewerkers te beschermen).[34] Daarvoor zijn verschillende deelonderwerpen relevant die we hieronder toelichten.

[34] De ANVS publiceert een overzicht van de verleende vergunningen.

De toepassing van stralingsbescherming bij Small Modular Reactors kent specifieke aandachtspunten met betrekking tot veiligheidsmaatregelen. Deze aandachtspunten houden verband met onder andere de schaalverkleining, de bronterm, locatiekeuze, milieu-impact bij inzet, personeelsbezetting, ervaringsniveau en noodplanningsprocedures.[35] Aanvullend onderzoek is hier van belang.

Veilig werken met straling betekent ook dat mensen opgeleid worden en vertrouwd raken met de veiligheid- en gezondheidseisen van het werken met straling, zoals is opgenomen in o.a. de BBS, RSBB.

Gezondheidseffecten

De principes van stralingsbescherming (rechtvaardiging, optimalisatie volgens ALARA en dosislimieten) worden toegepast in verschillende sectoren waar ioniserende straling wordt aangewend, zoals kernenergie. Het huidige beleid in stralingsbescherming is gebaseerd op de LNT-hypothese (Linear No Threshold) en het ALARA-principe (As Low As Reasonably Achievable).[36] De LNT-hypothese gaat ervan uit dat iedere stralingsdosis schadelijk is, dat de kans op een schadelijk effect lineair met de dosis is en dat er geen drempeldosis is. Er zijn echter studies met tegenstrijdige uitkomsten over het gebruik van het LNT-model – specifiek bij lagere doses, wat vragen oproept of men bij het nemen van (preventieve) maatregelen de effecten niet over- of onderschat. Deze principes hebben de afgelopen zeventig jaar een evolutie gekend die resulteerde in nieuwe normen en limieten. Er is bijgevolg een blijvende noodzaak om te garanderen dat state-of-the-art kennis in de Nederlandse context in stralingsbescherming geborgd blijft. Er is behoefte aan onderzoek om na te gaan hoe deze principes kunnen worden toegepast in nieuwe generatie reactoren, én hoe de betrokkenheid van alle relevante stakeholders kan geborgd worden. Ook is het relevant om te achterhalen hoe de ervaring van andere sectoren, zoals de medische sector, kan worden toegepast in kernenergie. Onderzoek op het gebied van stralingsdosimetrie geeft meer zicht in de preventie en minimalisering van de negatieve gevolgen op de gezondheid (zogeheten dosisoptimalisatie). Hieraan gerelateerd is het ook relevant om best practices te achterhalen voor het implementeren van stralingsbescherming in de veiligheids- en bedrijfscultuur.

Er is veel kennis beschikbaar over de gezondheidseffecten van blootstelling aan ioniserende straling op mens (met name op weefselniveau) en milieu. Bij onderzoek betrokken experts benadrukken de relevantie aan meer en diepgaandere kennis over de effecten van deze straling op cellulair niveau en de onderliggende pathofysiologische mechanismen als gevolg van blootstelling, zoals de ontwikkeling van kanker. Hierdoor kunnen stralingsnormen verder geoptimaliseerd worden.

Emergency response preparedness

Naast de operationele veiligheid en de impact van de bouw en bedrijfsvoering op de stralingsbescherming van werknemers, publiek en leefmilieu vormt emergency preparedness één van de hoekstenen in nucleaire veiligheid en stralingsbescherming. De basis om te kunnen opereren is aanwezig (via onder andere de ANVS, de IAEA en internationale wetgeving). Er zijn echter wel mogelijkheden om onderzoek te doen naar aanvullende of aangescherpte maatregelen, om bijvoorbeeld methoden voor het achteraf inschatten van de effectieve dosis te verbeteren. Verder onderzoek kan uitgevoerd worden om noodplanning te actualiseren en robuuster te maken met state-of-the-art technologie en methoden. Een voorbeeld hiervan is de inzet van communicatiemiddelen tijdens een incident, wat een grote uitdaging was

[35] Zie deze toelichting van OECD-NEA voor meer informatie.

[36] Ministerie van IenW (2022), Wegwijzer Nationaal beleid nucleaire veiligheid en stralingsbescherming 2022, Den Haag

tijdens het incident in Fukushima. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van de geleerde lessen uit het onderzoek van de National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission (NAIIC) en STI/PUB/2061 van de IAEA.[37] Het is verder van belang om in Nederland over de nodige kennis en expertise te beschikken om stresstests uit te voeren die risico's zoals aardbevingen, overstromingen en aanvallen (zowel fysiek als digitaal) in kaart brengen.

Al sinds 2008 wordt gewaarschuwd voor de afname van wetenschappelijke expertise in Nederland op het gebied van stralingsbescherming. Daarnaast staan de opleidingen in dit vakgebied onder druk door vergrijzing en problemen bij het aantrekken van nieuwe docenten. Het is cruciaal om een solide fundament te behouden om de continuïteit en kwaliteit van het systeem te waarborgen. Hierbij kan worden voortgebouwd op de aanbevelingen van de interdepartementale werkgroep Kennisbasis Nucleaire Technologie en Stralingsbescherming uit 2023, waaronder het opstellen van een nationale Kennisagenda Stralingsbescherming.[38]

4.5.2 Thema 2: Systeemkennis

Locatieonderzoek

De keuze voor de meest geschikte locaties van kerncentrales is uiteraard een centraal vraagstuk in het dossier rondom kernenergie en is al onderdeel van onderzoek (zie H3.1.3. voor een beknopt overzicht van ontwikkelingen op dit vlak). Locatieonderzoek draagt bij aan een goede ruimtelijke en technische inpassing in het lokale systeem. Hiermee kunnen de sociaalmaatschappelijke, economische en milieueffecten op de regio's waar kerncentrales geplaatst kunnen worden, in kaart worden gebracht. Onderdeel hiervan kan zijn wat de benodigde en werkelijke capaciteit van het elektriciteitsnet is en welke infrastructuur nodig is voor de inpassing van kerncentrales.[39] Een specifiek vraagstuk is hoe kerncentrales geïntegreerd kunnen worden in het bredere energiesysteem van een regio.

Het onderzoek of andere locaties dan genoemd in het huidige waarborgingsbeleid een optie zijn kan verder worden uitgebreid.[40] Locaties aan de kust zijn weliswaar aantrekkelijk vanwege de beschikbaarheid van koelwater, maar dit geeft ook concurrentie op het stroomnet met de aanlanding van windenergie op zee. Dit kan leiden tot relatief hoge kosten voor elektrische infrastructuur. Alternatieve locaties, zoals langs rivieren (Rijn, Maas) nabij grote afnemers van energie en in Oost-Nederland[41], zouden wellicht op dit gebied voordelen kunnen bieden.

De rol van kerncentrales in het energiesysteem

Er is veel onderzoek gedaan naar de rol van kerncentrales in het toekomstige energiesysteem, maar dit kan voor de huidige Nederlandse context verder verdiept worden. Enkele mogelijke onderzoeksonderwerpen in dit kader lichten we hieronder nader toe:

---

[37] International Atomic Energy Agency, A Decade of Progress After the Fukushima Daiichi NPP Accident, Proceedings Series - International Atomic Energy Agency, IAEA, Vienna (2023).

[38] Interdepartementale werkgroep Kennisbasis Nucleaire Technologie en Stralingsbescherming (2023). Oplossingsrichtingen ter versterking van de kennisbasis voor nucleaire technologie en stralingsbescherming.

[39] TenneT heeft in 2024 de netinpassing van nieuwe kerncentrales op de locaties Borssele en Maakvlakte onderzocht. Het ging daarbij om de inpassing van 1,6 tot 3,2 GW aan productievermogen. Zie: TenneT (2024), Analyse netinpassing nieuwe kerncentrales.

[40] Recentelijk zijn Terneuzen en Maasvlakte II als opties geïdentificeerd (Kamerstuk 32645, nr. 131).

[41] Zie Witteveen + Bos, eRisk Group, HCCS (2022). Scenariostudie kernenergie.

- **Aandacht voor het gehele energiesysteem:** Verschillende studies geven aan dat kernenergie een economische rol kan spelen in het Europese energiesysteem in combinatie met een groot aandeel hernieuwbare energie. Het energiesysteem van de toekomst zal deels grotendeels gebaseerd zijn op zonne- en windenergie. Ook krijgen energiedragers als waterstof en methanol een rol. Hierbij spelen uitdagingen zoals intermittentie, transportnetwerken, opslagverliezen en de noodzaak van regelbaar vermogen een grote rol. Meer onderzoek naar de (potentiële) rol van kernenergie in het vullen van de energievraag kan bijdragen.
- **Economische aspecten van kerncentrales:** Kerncentrales vereisen grote investeringen en het is cruciaal om een goed beeld te krijgen van de economische aspecten van investeringen in kernenergie. Dit betekent dat niet alleen naar de Levelized Cost of Energy (LCOE) gekeken moet worden, maar ook naar systeemkosten. Belangrijke vragen zijn hoe zeker en aantrekkelijk investeringen in kerncentrales zijn, wat een acceptabele afnameprijs is, en wie de kosten draagt bij incidenten (specifiek in relatie tot de uitdagingen op het gebied van verzekering). Gezien de hoge investeringskosten en lange levensduur van kerncentrales, en fluctuaties op de energiemarkt, zal daarbij ook gekeken moeten worden naar de bereidheid van energie-intensieve industrieën om kernenergie af te nemen, naar de investeerders, en welke financiële garanties (zoals afnameprijsgaranties) daarvoor nodig zijn.
- **Optimalisatie van marktmodellen:** In het verlengde van het bovenstaande kan onderzoek naar marktmodellen passend zijn. Het huidige *energy-only* marktmodel zou aangevuld kunnen worden om bevoorradingszekerheid te garanderen. Denk aan onderzoek naar robuustere marktmodellen, zoals capaciteitsmarkten en *contracts for difference*, om een betrouwbaar en stabiel energiesysteem te waarborgen.
- **Regelbaarheid[42] van kerncentrales:** Kerncentrales hebben een hoge eenmalige kosten en lage variabele kosten, waardoor er een voorkeur is voor een zo hoog mogelijke capaciteitsfactor. Er kan onderzocht worden in hoeverre kerncentrales flexibel kunnen opereren binnen een systeem met veel wind- en zonne-energie. Kan de bedrijfstijd van kerncentrales worden afgestemd op de beschikbaarheid van hernieuwbare energiebronnen? En hoe verhouden grootschalige kerncentrales zich tot eventuele Small Modular Reactors die gekoppeld zijn in een netwerk en mogelijk afgeschakeld kunnen worden om de baseload te reguleren? Kerncentrales kunnen, net als gas- en kolencentrales, stabiliteit bieden aan het elektriciteitsnet door te zorgen voor inertie en een stabiele frequentie. Naarmate gas- en kolencentrales uitgefaseerd worden, zou kernenergie een belangrijke rol kunnen spelen in het behoud van deze stabiliteit. Onderzoek kan kwantificeren wat de kosten en baten zijn van deze inertie in vergelijking met (opkomende) alternatieven. Ook kan onderzocht worden wat de economische rationale is achter het tijdelijk terugbrengen van de capaciteit van kerncentrales. Het voordeel is dan dat er geen elektriciteit tegen lage tarieven geleverd hoeft te worden en mogelijk nadeel is dat de systemen door af- en aanschakelen mogelijk sneller vervangen moeten worden.

Een groep landen, waaronder Nederland, heeft tijdens COP28 in 2023 gepleit voor een verdrievoudiging van de inzet van kernenergie tegen 2050. In september 2024 spraken veertien banken en financiële instellingen hun steun uit voor kernenergie en pleitten zij voor meer toegang tot duurzame financieringsmechanismen voor kernenergie.[43] Grote financiële instellingen erkennen daarmee de rol die kernenergie speelt in de wereldwijde overgang naar net-

[42] De regelbaarheid van kerncentrales is meegenomen in de technische haalbaarheidsstudies.

[43] https://world-nuclear.org/news-and-media/press-statements/14-major-global-banks-and-financial-institutions-express-support-to-triple-nuclear-energy-by-2050-23-september-2024

zero emissies, en benadrukken dat verbeterde toegang tot financiering kan bijdragen aan het volledig benutten van het potentieel van kernenergie.

Toepassingsgebieden van kerncentrales

Kernreacties leveren primair warmte en vervolgens kan die warmte op meerdere manieren worden toegepast. Toepassingen bestaan onder andere uit (maar zijn niet beperkt tot):

- Opwekking van elektriciteit via stoom;
- Levering van proceswarmte aan de industrie (zoals raffinaderijen en chemie en chemicaliën, zoals ammoniak, methanol en ethyleen);
- Restwarmte voor stadsverwarming;
- Thermochemische productie van (roze) waterstof.

Vandaag de dag worden kerncentrales voornamelijk toegepast voor de productie van elektriciteit. Onderzoek kan echter mogelijk andere, relevante toepassingsgebieden van kernenergie in kaart brengen. Welk toepassingsgebied is wanneer de beste optie en welke implicaties zijn hieraan verbonden? Een voorbeeld hiervan is het leveren van warmte aan de industrie. Hierbij speelt locatieonderzoek een belangrijke factor omdat de centrale en industrie dicht bij elkaar in de buurt moeten liggen om te voorkomen dat er hoge kosten voor infrastructuur en een lage mate van energie-efficiëntie zijn. Onderzoek kan uitwijzen in hoeverre dit realistisch is en of een bepaald toepassingsgebied een centrale tot een "must-run" installatie maakt, waarbij de centrale continu moet draaien om deze warmtelevering te garanderen. Hierbij kunnen ook de kosten, voordelen en operationele beperkingen worden onderzocht, evenals de integratie met bestaande warmtenetten en industriële processen.

Naast een single-purpose, kunnen kerncentrales eventueel ook worden ingezet voor coproductie, bijvoorbeeld de levering van zowel elektriciteit als warmte. Indien haalbaar kan onderzocht worden hoe deze coproductie onder verschillende omstandigheden kan worden geoptimaliseerd, wat de implicaties hiervan zijn voor de operationele flexibiliteit van kerncentrales, en hoe dit kan bijdragen aan een efficiënter energiegebruik.

Verder wordt er momenteel internationaal onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van het direct koppelen van kerncentrales aan een (industriële) installatie, waarbij centrales eventueel niet verbonden hoeven worden aan het elektriciteitsnet (zogeheten 'behind the meter' toepassingen). Er kan onderzocht worden in welke mate dat voor Nederland interessant is. Het voorzien van energie aan datacenters kan een voorbeeld zijn dat voor Nederland relevant is, aangezien deze een hoge en continue energiebehoefte hebben. Dit biedt eventueel ook kansen voor de implementatie van Small Modular Reactors (zie onderstaande box voor recente ontwikkelingen op dit vlak).

Voor datacenters is een betrouwbare en continue levering van een grote hoeveelheid energie van kritisch belang. Door de beperkte beschikbaarheid van hernieuwbare energiebronnen in deze regio is het niet evident om aan alle bijkomende elektrische vraag te voldoen. Met name de combinatie van een hoge vraag en beperkte capaciteitsfactoren maken het lastig voor baseload processen.

Techreuzen als Google, Microsoft en Amazon kijken daarom momenteel naar kerncentrales (met in het bijzonder 'behind the meter' SMR's) als een mogelijke optie om aan deze behoefte te voldoen. Hetzelfde geldt voor industriële faciliteiten, zoals fabrieken die 'groen staal' willen maken (bijvoorbeeld via H2-DRI). Voor de transformatie naar een competitieve en groene industrie is eveneens een constante baseload nodig. Google heeft in oktober 2024 een contract getekend met Kairos Power voor zeven SMR's om hun datacenters van energie te voorzien, waarvan de eerste naar verwachting in 2030 operationeel zal zijn. Microsoft heeft eerder in september 2024 een contract getekend met Constellation Energy om twintig

jaar lang alle energie af te nemen van één van de kerncentrales (Unit 1) op Three Mile Island. Naar verwachting wordt de kerncentrale in 2028 operationeel. Verder heeft Amazon ook zeer recent aangekondigd te willen investeren in de SMR's van X-energy.

Toepassingsgebieden van Small Modular Reactors

Bepaalde SMR-concepten kunnen geschikt zijn voor de Nederlandse situatie. Het is daarom interessant om te onderzoeken welke SMR-types het best aansluiten bij de behoeften van Nederland en wanneer deze (commercieel) beschikbaar worden. Over het algemeen heerst de vraag welke typen SMR's binnen afzienbare tijd beschikbaar kunnen zijn en wat hun techno-economische kenmerken, voor- en nadelen, temperatuurniveaus van restwarmte en de aansluitingsmogelijkheden op bestaande infrastructuren zijn. Daarnaast moet per locatie worden gekeken naar hoe in de koeling van SMR's kan worden voorzien, bijvoorbeeld via rivierwater of koeltorens, indien waterkoeling benodigd is.

Small Modular Reactors bieden mogelijk kansen voor zowel elektriciteits- als warmteproductie en kunnen daarmee bijdragen aan de verduurzaming van industrieclusters en energie-intensieve bedrijven. Een van de mogelijke toepassingsgebieden voor SMR's is de integratie bij industrieclusters. Sommige bedrijven zouden interesse kunnen hebben in de plaatsing van een (behind-the-meter) SMR op hun site. Onderzocht kan worden in welke mate en op welke wijze deze kleinere kerncentrales niet alleen elektriciteit kunnen leveren, maar ook restwarmte op hoge temperatuur, die direct gebruikt kan worden door de industrie. Aan de andere kant zou ook onderzocht kunnen worden of SMR's interessant zijn voor stadsverwarmingscentrales in stedelijke gebieden waar duurzame warmtevoorziening nodig is.[44] In het onderzoek kan gekeken worden naar uitdagingen op het gebied van ruimtegebruik, energetische inpassen, randvoorwaarden en maatschappelijk draagvlak, vooral in de nabijheid van de leefomgeving van burgers.

Systeemkennis en systeemintegratie bij SMR's

Het integreren van Small Modular Reactors in het Nederlandse energiesysteem roept vragen op met betrekking tot geschikte locaties en hun rol in het balanceren van de elektriciteitsvoorziening. Er zou onderzocht kunnen worden in welke mate de huidige locaties van kolen- en gascentrales goede vestigingsplaatsen voor SMR's zijn, gezien de bestaande infrastructuur voor elektriciteitsproductie en transport. Dit biedt mogelijk logistieke voordelen, maar vereist onderzoek naar de geschiktheid van deze locaties voor SMR's, zowel technisch als economisch.

Ook de economische haalbaarheid van SMR's kan nader onderzocht worden. Hierbij kunnen wellicht lessen worden getrokken uit het verleden, zoals de sluiting van de kerncentrale in Dodewaard (met een vermogen van 55 MWe), die economisch niet rendabel bleek in een geliberaliseerde energiemarkt. SMR's worden gepromoot als kostenefficiënter door hun modulaire karakter, wat in theorie schaalvoordelen en kostenreducties zou kunnen opleveren, maar hoeveel de first-of-a-kind SMR's kosten, en in hoeverre die modulaire opzet werkelijk bijdraagt aan lagere kosten, moeten nog worden vastgesteld. Dit omvat ook de effecten op de investeringen in (nieuwe) infrastructuur. Ook geschikte financieringsmodellen voor SMR-projecten vereisen verdere verkenning. Er zijn verscheidene landen die momenteel inzetten op de bouw van SMR's. Dit biedt mogelijkheden voor Nederland om te leren van deze ervaringen uit het buitenland, zoals Tsjechië en het Verenigd Koninkrijk.

[44] Dit lijkt echter een minder interessante optie ten opzichte van zo veel mogelijk warmte op hoge temperatuur (bijvoorbeeld in de orde van 300°C) op een andere manier te valoriseren.

Vanuit een systeemintegratieperspectief kan onderzocht worden in welke mate SMR's mogelijkheden bieden om vraag en aanbod van het elektriciteitsnet te balanceren. In tegenstelling tot grote kerncentrales, die minder flexibel zijn in vermogen-aanpassingen, kunnen SMR's (met name wanneer deze gebundeld worden in een cluster) mogelijk eenvoudiger aan- en uitgeschakeld worden om flexibel op veranderende vraag te reageren zonder economische of technische nadelen. Dat roept ook de vraag op of SMR's kunnen worden ingezet bij het mitigeren van problemen zoals netcongestie, vooral in regio's waar grootschalige elektriciteitsproductie en -transport uitdagingen ondervinden.

In 2023 heeft NRG|PALLAS, in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, een marktanalyse uitgevoerd naar SMR's. In deze analyse zijn 13 reactorconcepten onderzocht. Het doel was om een beter inzicht te krijgen in de haalbaarheid van SMR's in het algemeen en de mogelijkheden voor Nederland in het bijzonder. De Rolls-Royce SMR en de GE-Hitachi BWRX-300, beide lichtwatergekoelde ontwerpen, werden hierbij gezien als de meest geschikte opties voor Nederland.[45] Binnen de Programma-aanpak SMR sorteert Nederland echter niet voor op specifieke SMR-ontwerpen.

De Europese Commissie heeft in februari 2024 een European Industrial Alliance on SMR's opgericht, met als doel de ontwikkeling van deze SMR's in Europa richting 2030 te bevorderen en specifieke SMR-projecten te ondersteunen en hun snelle invoering op de Europese markt te bevorderen. In oktober 2024 is de eerste groep SMR-projecten geselecteerd. Tot de geselecteerde projecten behoren:

- EU-SMR-LFR (Ansaldo Nucleare, SCK-CEN, ENEA, RATEN).
- CityHeat (Calogena, Steady Energy).
- Project Quantum (Last Energy)
- European LFR AS (Newcleo)
- Nuward (EDF)
- European BWRX-300 SMR (OSGE)
- Rolls-Royce SMR (Rolls-Royce SMR Ltd)
- NuScale VOYGR SMR (RoPower Nuclear SA)
- Thorizon One (Thorizon)

Daarnaast heeft het Amerikaanse ministerie van Energie (Department of Energy) in oktober 2024 aanvragen geopend voor financiering tot $900 miljoen om de eerste binnenlandse inzet van Generatie III+ (lichtwater) SMR's te ondersteunen.[46]

In november 2024 kwamen Tweede Kamerleden Bontenbal (CDA) en Erkens (VVD) met een SMR-actieagenda om urgentie te vragen voor de ontwikkeling en implementatie van SMR's in Nederland. Tegelijkertijd toonde chemiebedrijf Dow interesse in het co-financieren van onderzoek naar de bouw van SMR's.[47] Ook voerden TNO en NRG een scenariostudie uit om de rol van SMR's in het Nederlandse energiesysteem te onderzoeken.[48]

[45] NRG (2023). Marktanalyse – Small Modular Reactors 2023.

[46] Department of Energy (17 juni 2024). DOE Announces $900 Million to Accelerate the Deployment of Next-Generation Light-Water Small Modular Reactors. Geraadpleegd op 17 oktober via [energy.gov].

[47] CDA en VVD (2024). SMR-actieagenda. Maak werk van het bouwen van kleine kerncentrales in Nederland [cda.nl]. Omroep Zeeland (2024). Interesse Dow in 'mini-kerncentrales' [omroepzeeland.nl].

[48] TNO en NRG (2024). Small modular reactor in the Dutch energy system. Combined heat and power production in industry. [nrg.eu]

4.5.3 Thema 3: Nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie

Toezichthouden en veiligheidsaspecten

Er kan (aanvullend) onderzoek nodig zijn naar veiligheidsaspecten van kerncentrales en hun inpassing in de daarvoor geldende wettelijke kaders. Deze aspecten kunnen per type centrale verschillen. De lessen in het kader van de Evaluatie stelsel Kernenergiewet uit 2023 (Kamerstuk 32645, nr. 125) zijn hierbij mogelijk relevant om op voort te bouwen.[49]

Ontwikkelingen op het gebied van splijtstofconcepten en de brandstofcyclus

Nieuwe splijtstofconcepten kunnen mogelijk bijdragen aan een efficiëntere, duurzamere en veiligere brandstofcyclus. Een vraag hierbij is of men moet streven naar een open of gesloten cyclus. In een gesloten cyclus zou bijvoorbeeld plutonium gerecycled worden, wat momenteel voor veel langlevend radioactief afval zorgt. Indien er in de toekomst gekozen wordt voor het bouwen van generatie IV-reactoren, zou het mogelijk kunnen zijn om plutonium als brandstof te gebruiken (generatie IV-reactoren kunnen efficiënter met uranium omgaan en een groter deel van het uranium gebruiken; generatie III-reactoren kunnen dit slechts deels), wat het volume voor geologische berging zou verminderen (wat ook kan bijdragen aan een groter draagvlak voor kerncentrales). Thans draaien Generatie III-reactoren (deels) op Mixed Oxide (MOX)-brandstof[50], waarmee delen van plutonium worden hergebruikt. Momenteel is de opwerking beperkt tot één ronde (mono-recycling). Orano werkt momenteel aan de ontwikkeling van multi-recycling. Tevens kan onderzocht worden hoe dit economisch aantrekkelijker gemaakt kan worden en hoe het rendement verhoogd kan worden. Nederland produceert nu zelf te weinig plutonium (dit geldt ook als er twee tot vier nieuwe kerncentrales worden gebouwd) om een opwerkingsfaciliteit continu te laten draaien. Om dergelijke faciliteiten en oplossingen economisch rendabel te maken is internationale samenwerking dan ook cruciaal, bijvoorbeeld op internationale of Europese schaal. In dit opzicht is het interessant om na te gaan wat de plannen van Orano zijn voor na 2040 met de La Hague site en of Frankrijk überhaupt openstaat voor de verwerking van meer radioactief materiaal uit andere landen zoals Nederland. Bij het uitbreiden en normalisering van reprocessing en gebruik van MOX-brandstof spelen echter ook geopolitieke vraagstukken mee, waaronder mogelijke risico's ten aanzien van nucleaire proliferatie.

Verder zijn er ontwikkelingen rondom het gebruik van verarmd en gerecycled uranium, evenals het potentieel van alternatieve splijtstoffen zoals thorium en High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU) die een interessant onderwerp van onderzoek kunnen zijn. Een ander onderwerp voor nader onderzoek zijn innovatieve splijtstofconcepten, zoals Accident Tolerant Fuel (E-ATF) en Enhanced Performance Fuel (EPF). Deze zijn ontwikkeld na het incident in Fukushima. Deze splijtstoffen verbeteren niet alleen de veiligheid van kernreactoren, maar kunnen ook operationele voordelen bieden, zoals grotere operationele marges en een betere

---

[49] Ten behoeve van de ontwikkelingen op het gebied van kernenergie is in 2023 het stelsel van de Kernenergiewet geëvalueerd voor drie categorieën nucleaire technologieën: (1) grote lichtwatergekoelde en gemodereerde reactoren; (2) kleine modulaire reactoren (SMR's) gebaseerd op conventionele reactortechnologie, die nu of op korte termijn commercieel beschikbaar zijn of komen; en (3) meer geavanceerde technologieën en/of ontwerpen op de lange termijn. Belangrijkste conclusie van de evaluatie was dat de kernenergiewetgeving voor de komende jaren goed toepasbaar is voor de twee eerste categorieën en dat er wat dat betreft dus geen belemmeringen zijn voor de realisatie van de gestelde doelen. Meer geavanceerde ontwerpen (zoals mobiele kernreactoren) vergen mogelijk wel aandacht voor de toepassing van het wettelijk kader (Kamerstuk 32645, nr. 125).

[50] MOX is een nucleaire brandstof dat verschillende oxidevormen van splijtbaar materiaal bevat. Het bestaat uit een mix van plutonium en uranium. MOX is een alternatief voor het laagverrijkt uranium dat in de meeste centrales wordt gebruikt. De kerncentrale Borssele maakt gebruik van MOX.

prestatie in 'load-following'-scenario's. De Europese Commissie heeft Accident Tolerant Fuel dan ook opgenomen als een criterium voor het toekennen van een duurzaamheidslabel aan kernreactoren (zie Commission Delegated Regulation (EU) 2022/1214 van 9 maart 2022).

Tot slot is de beschikbaarheid van grondstoffen, met in het bijzonder uranium een relevant vraagstuk. Uranium is over het algemeen niet zeldzaam, maar gezien de wereldwijde ambities op het gebied van kernenergie, zal Nederland voldoende toegang tot deze grondstoffen en opwerkingsfaciliteiten (zowel nu als in de toekomst) zeker moeten stellen. Dit verhoudt zich ook tot strategische autonomie, aangezien slechts een beperkt aantal landen beschikt over uranium. Van sommige landen wil Nederland mogelijk niet afhankelijk zijn, welke in dat geval geen optie zijn. In 2022 werd uranium gewonnen (in volgorde van groot naar klein) in Kazachstan, Canada, Namibië, Australië, Oezbekistan, Rusland, Niger, China en India; en in mindere mate (<500 ton) in Zuid-Afrika, Oekraïne, Verenigde Staten, Pakistan, Brazilië en Iran. Kazachstan, Canada en Australië zijn gezamenlijk goed voor twee-derde van de wereldwijde uraniumwinning.[51]

Ontwikkelingen op het gebied van reactortechnologie

Op het gebied van reactortechnologie wordt mondiaal onderzoek gedaan naar verschillende innovatieve reactorconcepten en hun toepassingen. Dat onderzoek richt zich op de technische haalbaarheid van deze nieuwe technologieën en op hun veiligheid, kosten, en potentiële bijdrage aan de energietransitie. De bouw van generatie III(+)-reactoren bevat (aanvullende) verbeteringen in het ontwerp ten opzichte van de bestaande (geïnstalleerde) reactoren.

Onder onderzoekers is aandacht voor het ontwikkelen van kennis over generatie IV-reactoren, zoals gesmolten zoutreactoren (MSR), gasgekoelde snelle reactoren (GFR), natriumgekoelde snelle reactoren (SFR), metaalgekoelde reactoren (LFR), superkritisch watergekoelde reactoren (SCWR) en very high-temperature reactors (VHTR). Deze technologieën kunnen in de toekomst een belangrijke rol spelen, vooral vanwege hun potentieel op het gebied van brandstofverbruik en afvalbeheer. Elk van deze technologieën heeft unieke voordelen en uitdagingen. Met technologie-assessments kunnen verwachtingen rondom hun beschikbaarheid, voordelen en nadelen, evenals implementatiekosten, worden onderzocht. Deze analyses zijn belangrijk om te bepalen welke reactoren het beste passen bij de Nederlandse situatie en de toekomstige energiemix. Prototypes kunnen worden ontwikkeld, waarmee experimenten uitgevoerd kunnen worden om meer inzicht te krijgen in hun werking en toepasbaarheid.

Onderzoek naar dit soort reactoren sluit weliswaar niet direct aan op de ambities van Nederland op de korte termijn, maar dergelijk onderzoek kan wel zorgen voor een stevigere kennisbasis in Nederland omdat het de partijen in het kennisecosysteem stimuleert om op de hoogte te blijven van ontwikkelingen in het veld (en zij daar ook aan kunnen bijdragen). Het biedt bovendien interessante aanknopingspunten voor de acquisitie van talent, zoals studenten, PhD's, hoogleraren en onderzoekers. De ervaring leert daarnaast dat personen die zich in het kader van hun academische werk en vorming met name gericht hebben op generatie IV-reactoren, nadien in hun niet-academische beroepspraktijk heel goed inzetbaar zijn in een omgeving waar gewerkt wordt met generatie III(+)-reactoren.

Een ander innovatief gebied betreft de ontwikkeling van (micro)reactoren, waaronder voor maritieme voortstuwing. Dit type reactor kan een belangrijke rol spelen in de verduurzaming van de maritieme sector, waar momenteel nog geen oplossingen bestaan voor de civiele

[51] [world-nuclear.org]

scheepsvaart. De kennis die daaruit volgt kan bovendien ook voor andere toepassingen gebruikt worden.

Modelleren

Op het gebied van modellering en simulatie is er behoefte aan de ontwikkeling van experimentele loops voor het valideren van nucleaire codes en modellen, echter is hier vooralsnog nog weinig tot geen budget voor beschikbaar. Het valideren van deze modellen speelt een rol bij het aantonen van de veiligheid van kernenergiesystemen. Ze worden bijvoorbeeld gebruikt om belangrijke parameters zoals corrosiegedrag te meten en analyseren. Deze gevalideerde modellen zijn niet alleen van belang voor de ontwikkeling en optimalisatie van nieuwe en innovatieve reactorconcepten, maar ook voor het verkrijgen van vergunningen. Met nauwkeurige en gevalideerde simulaties kan aangetoond worden dat reactoren veilig en betrouwbaar kunnen functioneren, wat bijdraagt aan het efficiënter doorlopen van het vergunningsproces. Het ontwikkelen en valideren van adequate modellen kunnen dit proces bevorderen.

Ontwikkeling en valorisatie van SMR-concepten

SMR-ontwikkelaars hebben behoefte aan duidelijkheid over de toetsingskaders voor de inpassing van deze technologie in de nationale energie-infrastructuur, waaronder het regelen van vergunningstrajecten en het ontwikkelen van protocollen voor bouw, exploitatie en afvalbeheer.[52] Om SMR's bovendien sneller operationeel te krijgen, kan Nederland eventueel profiteren van een *fast track*-programma voor de typegoedkeuring van reactoren. De overheid zou – uiteraard binnen de wettelijke eisen en voorwaarden die worden gesteld aan onder andere de veiligheid – kunnen werken met versnelde procedures. Hierbij zou Nederland kunnen leren van de praktijk in landen zoals het Verenigd Koninkrijk, waar de toezichthouder al werkt met een snellere goedkeuringsprocedure voor bepaalde lichtwaterreactor-SMR's, zoals die van Rolls-Royce. Verschillende andere landen hebben ook stappen gezet in de ontwikkeling van SMR's, zoals Rusland, China, de Verenigde Staten en Canada, waar de eerste first-of-a-kind SMR's worden gerealiseerd. Het leren van hun ervaringen, zoals technische uitdagingen, vergunningstrajecten en publieke perceptie, kan Nederland helpen bij het navigeren van de complexe regelgeving en marktontwikkelingen. Het toetsingskader dat andere landen hebben opgezet, kan als voorbeeld dienen voor het ontwikkelen van een nationale variant. De ANVS heeft aangegeven dat dit is ook reeds is gebeurd.

4.5.4 Thema 4: Enabling onderwerpen

Data science en modellering

Asset management en data science kunnen wellicht een sleutelrol spelen in het bevorderen van de veiligheid en efficiëntie van kerncentrales. Slimme, digitale systemen en sensoren kunnen mogelijk de situatie binnen een reactor nauwlettend meten en helpen bij het vroegtijdig voorspellen van onderhoudsbehoeften door verouderingsprocessen als gevolg van straling. Het gebruik van AI, bijvoorbeeld machine learning, en digital twins[53] kan hierbij verder worden verkend. Dit vraagt om een state-of-the-art infrastructuur, die in staat is om een breed scala aan condities te meten. Er moeten potentieel echter ook maatregelen worden

---

[52] De simulaties, die onderdeel uitmaken van de Programma-aanpak SMR, moeten duidelijkheid bieden bij legio van dergelijke vraagstukken (Kamerstuk 32645, nr. 123).

[53] Digital twins zijn een essentieel onderdeel van het trainen van AI-modellen en het in de praktijk vergelijken van gemeten en berekende signalen. Met behulp van machine learning kunnen afwijkingen herkend worden.

genomen voor het geval sensoren falen: kunnen (en mogen) ze bijvoorbeeld zelfstandig en automatisch actie ondernemen? En welke ethische overwegingen komen hierbij kijken? Daarnaast zijn het inzetten van robots voor onderhoud op gevoelige plekken en het gebruik van digital twins interessante mogelijkheden om te verkennen die de efficiëntie en veiligheid van onderhoudsprocessen te verhogen. Ook is aandacht nodig voor 'condition-based maintenance' in reactoren. Hierin kunnen verbeterslagen gemaakt worden door te leren van de ervaringen hiermee in onder andere de luchtvaartindustrie.

Een ander vraagstuk is hoe reactoren op afstand bestuurd kunnen worden. Dit roept de vraag op of meerdere (kleinere) reactoren vanuit één regelkamer kunnen worden beheerd, wat de operationele flexibiliteit zou kunnen vergroten. Het is goed op te merken dat de ANVS bij deze aspecten altijd moet kijken naar de (mogelijke) impact op de nucleaire veiligheid voordat iets mag worden toegepast in de praktijk.

Certificaten en kwalificaties

Op het gebied van certificaten en kwalificaties is er vanuit het veld behoefte aan duidelijkheid om tijdig de juiste voorbereidingen te kunnen treffen. Organisaties moeten goed geïnformeerd zijn over welke certificaten en kwalificaties nodig zijn, zodat zij zich adequaat kunnen voorbereiden. Dit omvat ook het bepalen van de benodigde bevoegdheden en het identificeren van instanties die trainingen en certificeringen kunnen aanbieden.

Er is een trend gaande om kwalificaties te vereisen voor constructeurs betrokken bij de constructieve aspecten van projecten, met het Constructeur Register als een belangrijk voorbeeld. Sinds 2021 kunnen registerontwerpers zich ook laten kwalificeren als Chartered Engineer (CEng) of Incorporated Engineer (IEng) bij het Koninklijk Instituut Van Ingenieurs (KIVI). Voor niet-constructieve aspecten zijn dergelijke kwalificaties minder noodzakelijk; hier leunt men meer op generieke kennis, vaardigheden en ervaring.

Projectmanagement en harmonisatie van wet- en regelgeving

In het kader van projectmanagement en harmonisatie is het essentieel om de bouwduur en -kosten van nucleaire projecten, zoals Small Modular Reactors, beheersbaar te houden. Een snel bouwproces zonder tussentijdse wijzigingen in het ontwerp voorkomt uitloop en budgetoverschrijdingen. Het bouwtraject van Olkiluoto 3 in Finland toont bijvoorbeeld aan hoe een te ambitieus project leidt tot vertraging (en daarmee een overschrijding van het budget): er was geen recente ervaring met nieuwbouw van kerncentrales, er was onvoldoende tijd genomen om de bouwfase goed voor te bereiden (een compleet en goedgekeurd ontwerp, het betrekken van competente organisaties, het specificeren van duidelijke verantwoordelijkheden van de betrokken partijen, zorgen voor de beschikbaarheid van gekwalificeerd personeel en de afhandeling van mogelijke regelgevende onzekerheden), zorgen voor toegang tot voldoende en de juiste materialen en de benodigde tijd voor kwaliteitscontrole bij oplevering.[54] Grondig onderzoek naar de exacte oorzaken van vertragingen en kostenoverschrijdingen in projecten in landen als Finland, Frankrijk, Tsjechië, het Verenigd Koninkrijk, de Verenigde Staten en andere landen kunnen bijdragen aan de voorbereiding van het bouwtraject.

De voorbereidingen voor de bouw en de vergunningverlening van de PALLAS-reactor hebben de afgelopen jaren veel waardevolle ervaring opgeleverd voor partijen die betrokken (zullen) zijn bij de bouw van volgende centrales. Dit betreft unieke expertise, aangezien het de eerste vergunningverlening voor nucleaire reactoren in Nederland is in meer dan 50 jaar. Deze

[54] Jukka Laaksonen (2010). Experiences from Construction of Olkiluoto 3 Nuclear Plant in Finland. Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK).

kennis is cruciaal, niet alleen voor de PALLAS-reactor, maar ook voor de nieuwbouw van andere reactoren. Gezien de wereldwijde ambities op het gebied van nucleaire energie, is het van groot belang om deze expertise in Nederland te behouden, omdat dergelijke experts wereldwijd gewild zijn en de spoeling dun is. Het programma moet daarom actief ingezet worden om deze kennis voor Nederland te waarborgen. Voor het opzetten van de benodigde waardeketen voor de bouw van nieuwe reactoren is het belangrijk om te onderzoeken of Nederland de capaciteit heeft om een organisatie te creëren voor het beheer van deze reactoren. Het team achter de PALLAS-reactor kan hierbij als model dienen voor het opzetten van een 'delivery organization' voor toekomstige kerncentrales.

Long term operation (LTO) en bedrijfsduurverlenging

De long term operation (LTO) van kerncentrales en de daarbij behorende bedrijfsduurverlenging zijn complexe vraagstukken die verschillende kennisgebieden en methodologieën vereisen. Om een veilige en effectieve werking van nucleaire installaties op de lange termijn te waarborgen is kennis op de volgende thema's essentieel:

- Een belangrijk aspect van LTO is aging management, dat zich richt op het beheersen van de veroudering van reactorcomponenten en systemen. Methodologieën kunnen ontwikkeld en verder verfijnd worden om de scope van bedrijfsduurverlenging helder te definiëren. Dit vereist dat er aging management reviews worden uitgevoerd, waarin de staat van de verschillende systemen en componenten wordt beoordeeld en verbeterplannen worden geformuleerd.
- Daarnaast is het van belang om de ontwikkeling, implementatie en verbetering van Aging Management Programs (AMPs) te versterken, zodat deze programma's adequaat de verouderingsprocessen kunnen adresseren. Dit omvat ook de identificatie en hervalidatie van Time-Limited Aging Analyses (TLAAs), die cruciaal zijn voor het begrijpen van de effecten van veroudering op de integriteit van reactorcomponenten.
- Het voorbereiden en uitvoeren van een Periodic Safety Review (PSR) is een ander essentieel onderdeel van LTO, aangezien dit een systematische evaluatie van de veiligheid van de reactor inhoudt. De datamanagementprocessen moeten eveneens worden geoptimaliseerd om de veiligheid en operationele efficiëntie te verbeteren.
- Bij al deze aspecten is het noodzakelijk om ze in lijn te brengen met de safety standards van de ANVS en de IAEA om (inter)nationale best practices te waarborgen. Het is ook essentieel om de vereiste kennis en expertise te identificeren om generatie III(+) reactortechnologie op de lange termijn te kunnen handhaven.

Het veilige bedrijven van nucleaire installaties vereist uitgebreide kennis van de verouderingsprocessen en hun effecten op de eigenschappen van reactormaterialen. In de afgelopen decennia zijn een aanzienlijke hoeveelheid kennis en methodieken ontwikkeld, gericht op de verlenging van de bedrijfsduur tot 60 jaar. Het LTO-onderzoek na 60 jaar vraagt echter om verdere inzichten in de gevolgen van veroudering op de integriteit van reactorcomponenten en systemen. In de periode 2023-2025 voert NRG, in het kader van de 'Working Group on Integrity and Ageing of Components and Structures' van de OECD-NEA, een inventarisatie uit naar de additionele kennis en expertise die in de komende jaren ontwikkeld moet worden om deze uitdagingen aan te pakken. Het zou onzes inziens verstandig zijn de inzichten hieruit mee te nemen in het uitzetten van nieuw onderzoek op dit vlak.

Naast deze overwegingen is de doorontwikkeling van methodieken voor inspectie, beoordeling en vervanging van materialen en componenten essentieel. Deze methodieken zijn gericht zijn op het waarborgen van de integriteit en veiligheid van de reactoren gedurende hun levensduur, e. Daarnaast is het van belang om robuuste (niet-destructieve) meet- en detectiemethoden en -apparatuur te ontwikkelen. Effectieve monitoring en detectie zijn cruciaal voor het tijdig identificeren van potentiële bedreigingen en risico's (zoals controle van

de integriteit van het reactorvat), zodat er tijdig en adequaat kan worden gereageerd. Dit wordt reeds in de praktijk gebracht (onder andere door de EPZ en ANVS), echter kan aanvullend onderzoek leiden tot nieuwe inzichten en/of methodieken om de bestaande praktijk te bevorderen.

Veiligheid en beveiliging (safety en security)

De (cyber)veiligheid en beveiliging van kerncentrales zijn van cruciaal belang, gezien de mogelijke risico's zoals hacking van digitale systemen, drone-aanvallen en sabotage van binnenuit. Dit laatste is bijvoorbeeld aan de orde geweest in België, waar een incident heeft geleid tot de invoering van het vier-ogen principe in nucleaire installaties. Dit principe vereist dat werkzaamheden door minimaal twee personen worden uitgevoerd om de kans op kwaadwillige acties te minimaliseren (dit principe geldt momenteel niet in Nederland).

Veiligheidseisen zullen grotendeels reactoroverschrijdend zijn. De manier waarop ze kunnen worden gerealiseerd niet; dit hangt (deels) af van het ontwerp van de desbetreffende reactor. Om in te kunnen spelen op nieuwe ontwikkeling (bijvoorbeeld op het gebied van SMR's) is er behoefte aan een overzicht van deze veiligheidseisen. Een ander aspect van veiligheid en beveiliging is het begrip en de documentatie van alle mogelijke *failure modes* binnen een systeem. Dit vereist een systematische aanpak om risico's te identificeren en te beheersen.

Ontmanteling van kerncentrales

Dit omvat onder andere aandacht voor de materialen die worden gebruikt, de toegankelijkheid van componenten en systemen, en andere factoren die de ontmantelingskosten kunnen beïnvloeden. Dit kan bijvoorbeeld betrekking hebben tot de circulariteit van materialen zoals beton. Het ontmantelen van kerncentrales is momenteel zeer kostenintensief, onder andere door de activatie van beton met neutronenstraling. Aanvullend onderzoek naar manieren om beton (beter) te karakteriseren of alternatieve materialen te gebruiken kan de recyclering van beton en de hoeveelheid afval verminderen en de kosten verlagen.

4.5.5 Thema 5: Hogetemperatuur waterstofproductie

De productie van waterstof via elektrolyse vereist aanzienlijke hoeveelheden energie. Er zijn verschillende methoden voor waterstofproductie, waaronder solid oxide-elektrolyse, die bij hogere temperaturen werkt (450-1000 °C) en tot 30% efficiënter is dan conventionele methoden zoals alkaline en PEM. Met behulp van hogetemperatuur warmte van kerncentrales, vooral generatie IV-reactoren die kunnen werken bij temperaturen tussen 600 en 900 graden Celsius, kan elektrolyse efficiënt worden uitgevoerd. Zo kan kernenergie mogelijk een aantrekkelijke optie voor grootschalige waterstofproductie worden. Solid oxide-technologie is momenteel nog een innovatieve techniek en nog niet op commerciële schaal (TRL 9) beschikbaar. Indien Nederland hier kansen wil verzilveren, lijkt het verstandig om samenwerking te zoeken met al bestaande onderzoeksagenda 's, zoals de Innovatieagenda waterstof (TKI New Gas), GroenvermogenNL en Smart Delta Resources.

Toepassingsgebieden van en voor hogetemperatuur waterstofproductie

De eerste stap in de discussie over dit onderwerp is de vraag of überhaupt kerncentrales in willen (en kunnen) zetten voor hoge temperatuur waterstofproductie. In de verkenning die we hebben uitgevoerd in het kader van dit onderzoek merken we dat niet alle experts overtuigd zijn van de noodzaak van waterstofproductie via kerncentrales, met name in verband met concurrerend vermogen. Ze stellen zich de vraag: *Is er een use case voor de integratie van hogetemperatuurwaterstofproductie?* Nader onderzoek naar de haalbaarheid ligt dan ook voor de hand. Daarnaast zijn er ook allerlei vragen gerelateerd aan het inzet van waterstof, maar dit valt buiten de scope van dit project. Een mogelijke toepassing van waterstof

is de productie van synthetische brandstoffen om de logistieke sector (zoals de luchtvaart en scheepvaart) te verduurzamen.

Systeemkennis en systeemintegratie

Vanuit een systeemperspectief kunnen we ons afvragen in welke mate waterstof op basis van nucleaire energie op termijn competitief zal zijn, bijvoorbeeld ten opzichte van geïmporteerde waterstof of waterstof op basis van aardgas met koolstof afvang. Hiervoor is meer inzicht nodig in de prijsontwikkeling van beide vormen. Daarnaast kan gekeken worden in welke mate het kan concurreren met fossiele brandstoffen en welk prijspeil daarvoor nodig is (al dan niet inclusief de emissiekosten).

Een andere vraag die uit onze inventarisatie naar voren komt is de mate waarin kerncentrales op momenten wanneer de elektriciteitsprijzen laag zijn hun energie zouden kunnen inzetten voor de productie van waterstof. Het is niet duidelijk of deze flexibele inzet een aantrekkelijke optie is. Zo zijn er vragen of het opstarten en afschakelen van elektrolysers geen grote nadelen kent, zoals schade aan keramische componenten van elektrolysers als gevolg van temperatuurschommelingen.

Interface tussen kerncentrales en waterstofproductie

De interface tussen de warmteproductie van kerncentrales vereist aandacht. Voor hogetemperatuur waterstofproductie kan onderzocht worden hoe een kerncentrale effectief kan worden gekoppeld aan een elektrolyser. Dit vraagt om systemen die in staat zijn om de warmte van kernreactoren efficiënt te benutten. Onderzocht kan worden in welke mate Nederland potentieel heeft om een rol te spelen in de ontwikkeling van onder andere proton-conducting hogetemperatuur elektrolysers voor waterstofproductie. Deze technologie bevindt zich echter nog in een lage ontwikkelingsfase.

Veiligheid en juridische aspecten

Het gebruik van nucleaire reactoren voor waterstofproductie brengt mogelijk nieuwe veiligheidsuitdagingen met zich mee, onder andere op het gebied van warmteafvoer. Dat komt omdat er een ander systeem bij kan komen dat ook in warmteafvoer voorziet, maar dan specifiek voor waterstofproductie. Een stabiele afvoer van overtollige warmte is cruciaal voor de operationele veiligheid. Het balanceren van productiviteit en veiligheid, vooral bij hoge temperaturen, is een complex proces dat verdere studie vereist. Er zijn kennishiaten op het gebied van het beheer van overtollige warmte, wat mogelijk nieuwe veiligheidsrisico’s kan introduceren.

Voor de implementatie van waterstofproductie bij kerncentrales zijn mogelijk juridische aanpassingen nodig, waaronder aangepaste regels voor vergunningverlening, risico-evaluatie en veiligheidsbeoordeling. Het juridisch kader moet mogelijk worden uitgebreid om rekening te houden met de specifieke risico's en vereisten van nucleaire waterstofproductie, zoals de opslag en verwerking van grote hoeveelheden warmte en gas.

4.5.6 Thema 6: Materiaalonderzoek

De beschrijving van thema Materiaalonderzoek in het MMIP wordt te breed ervaren door betrokkenen, waardoor de afbakening mogelijk te veel ruimte biedt voor onderzoek naar aanpalende zaken, zoals de toepassing van straling in onderzoek naar batterijen of halfgeleiders. Het kan verstandig zijn om het thema nadrukkelijk in te zetten voor aan kernenergiegerelateerde onderwerpen, zoals materialen die toegepast kunnen worden in reactoren. De opgedane kennis en vaardigheden kunnen vervolgens uiteraard wel in andere sectoren worden toegepast, bijvoorbeeld in de ruimtevaart, halfgeleidertechnologie en micro-elektronica.

Gedrag en bestendigheid van materialen onder extreme omstandigheden

Materiaalonderzoek speelt een rol bij het ontwikkelen van nieuwe generatie nucleaire installaties, zoals generatie III- en IV-reactoren, met materialen die bloot worden gesteld aan extreme omstandigheden. Deze omstandigheden kunnen zeer hoge temperaturen, intense straling, chemische interacties en corrosieve omgevingen omvatten. Het gedrag en de bestendigheid van materialen onder dergelijke condities zijn van groot belang voor de veiligheid en levensduur van nucleaire installaties. Voorbeelden van onderzoeksonderwerpen zijn:

- Eigenschappen van gesmolten zouten. Deze veranderen door variaties in temperatuur en samenstelling in de reactorkern. Dit heeft invloed op de interactie tussen het zout en andere materialen.
- De synergetische invloed van factoren zoals thermische spanningen, chemische processen, erosie, corrosie, depositie, en neutronen speelt een rol in de degradatie van materialen. Nikkelhoudende hitte- en corrosiebestendige legeringen spelen een belangrijke rol in het waarborgen van de integriteit, duurzaamheid en prestaties op lange termijn van kerncentrales. Ze worden gebruikt in zowel de warmteoverdrachts- en koelsystemen als in het reactorvat.
- Corrosie-interacties tussen koelmiddelen (zoals gesmolten metalen, fluoride of chloride zouten), splijtstoffen (zoals MOX met een variërend plutoniumgehalte), en de structurele materialen van het primaire circuit van de reactor. Hierbij is bijvoorbeeld de invloed van neutronen- en gammastraling op corrosie van belang. Dit onderzoek draagt bij aan het begrijpen van materiaalgedrag en het ontwikkelen van modellen om de levensduur van kernreactoren te voorspellen, wat belangrijk is voor levensduurverlenging van bestaande reactoren.
- Verouderingsstudies zijn relevant voor het bewaken van de veiligheid van reactorvaten en andere cruciale componenten. Dit onderzoek helpt bij de ontwikkeling en validatie van rekenmodellen, waardoor experimenten eventueel verminderd kunnen worden.
- Onderzoek naar specifieke soorten staal ten behoeve van de integriteit van reactorvaten. Verbrossing van reactorvaten door straling dient nauwlettend gevolgd moet worden om de veiligheid van de reactor te waarborgen.
- Innovatieve materialen voor toepassingen zoals het creëren van houders waarin (medische) isotopen veilig kunnen worden bestraald.

Ontwikkeling van nauwkeurige meet- en detectietechnieken kan bovendien bijdragen aan het monitoren van de prestaties en veroudering van materialen. De ontwikkeling van geavanceerde meetapparatuur kan meer en betere data opleveren dan nu voor handen is, wat mogelijk toegepast kan worden ten behoeve van nauwkeurigere inschattingen tijdens de bouwfase. Een voorbeeld van de toepassing van dergelijke data is het berekenen van de benodigde dikte van bijvoorbeeld muren of reactorvaten, wat kosten kan besparen door minder materiaal te gebruiken zonder afbreuk te doen aan de veiligheid.

Tot slot is onderzoek naar de levensduur van verschillende materialen in diverse soorten reactoren van belang voor het kunnen beoordelen en beheren van de long-term operation (LTO) van kerncentrales. Kunstmatige intelligentie, zoals machine learning (ML), kan daarnaast mogelijk een bijdrage leveren aan de ontdekking en ontwikkeling van nieuwe materialen. Door grote hoeveelheden data te integreren uit zowel experimenten als theoretische modellen, kunnen ML-algoritmes patronen ontdekken en voorspellen welke materialen het beste bestand zijn tegen de extreme omstandigheden in een kernreactor. Prediction models kunnen bijvoorbeeld helpen bij het evalueren van de duurzaamheid en stralingsbestendigheid van materialen voor de lange termijn (60 tot 100 jaar), wat essentieel is voor de veiligheid en levensduur van reactoren.

Materialen voor radioactief afvalbeheer

Voor kerncentrales en toepassingen zoals opslag en transport van radioactief materiaal is het cruciaal dat de gebruikte materialen en systemen stralingsbestendig zijn. Dit omvat onder meer transportsystemen, opslagsystemen, houders en containments die langdurig blootgesteld worden aan straling. Materialen die bestand zijn tegen degradatie door straling moeten robuust blijven in termen van structurele integriteit, terwijl ze ook veilig omgaan met hoge niveaus van ioniserende straling. Dit onderzoek sluit aan bij de ontwikkeling van veilige oplossingen voor opslag en transport van radioactief materiaal, evenals voor medische isotopen in stralingsbescherming. In de volgende paragraaf gaan we hier verder op in.

4.5.7 Thema 7: Verwerking en opslag radioactief afval en geologische eindberging

De verwerking en veilige opslag van radioactief is randvoorwaardelijk voor het gebruik van kernenergie. Er is eerder onderzoek verricht naar (onderdelen van) dit onderwerp. Nederland kan bijvoorbeeld voortbouwen op het voormalig Nederlandse Onderzoeksprogramma Eindberging Radioactief Afval (OPERA) van COVRA. Ook kan verbinding gezocht worden met het Nationaal Programma Radioactief Afval (NPRA), aangezien daarin het Nederlandse beleid voor radioactief afval wordt bepaald. Internationale samenwerking bij de verwerking en veilige opslag van radioactief kan schaalvoordelen opleveren aangezien het voor elk land afzonderlijk kostbaar en complex is om zelf een volledig afvalbeheerprogramma te ontwikkelen en uit te voeren.

Daarnaast is het logisch om de Nederlandse kennisvragen over afvalverwerking in de nationale context te blijven beantwoorden, zoals locatieonderzoek voor berging. Lessen uit landen als België, Duitsland, Finland, Zweden en Zwitserland kunnen hierbij waardevol zijn. Nederland kan zich mogelijk profileren op specifieke gebieden, zoals mijnbouw en diepe boorgaten voor afvalopslag. Internationale samenwerkingen, zoals met de European Repository Development Organisation (ERDO), bieden mogelijkheden om voort te bouwen op bestaande kennis en ervaringen op het gebied van eindberging en afvalbeheer. Ook kan er onderzoek gedaan worden naar gedeelde eindberging met buurlanden (of daar in ieder geval kennis en ervaring over uitwisselen).

Onderzoek naar het type afvalproductie

Verschillende type reactoren genereren mogelijk radioactieve reststromen met andere samenstellingen, stralingsintensiteiten en volumes dan conventionele reactoren, wat implicaties met zich meebrengt voor infrastructuur, beveiliging en eindberging. Het beheer van deze reststromen, inclusief geschikte opslaglocaties en transportmethoden, vereist onderzoek naar de benodigde techniek en capaciteit.

Onderzoek naar de Nederlandse grondlagen

Dit thema omvat geologisch onderzoek naar lange termijn chemische en fysische interacties in de ondergrond, oplosbaarheid en transport van radionucliden, en de invloed van grondwater. Ook gaat dit over (experimenteel) onderzoek naar de geschiktheid van verschillende grondlagen, zoals Boomse Klei (waar momenteel al onderzoek naar wordt gedaan) en de mogelijkheden van eindberging in diepe ondergrond. Hierbij kan Nederland haar kennis van mijnbouw en diepe boorgaten benutten om een significante bijdrage te leveren. Ook onderzoek naar de invloed van warmteproductie van radioactief afval op de chemische samenstelling in de ondergrond en de migratie van radionucliden naar de biosfeer is relevant. Hoe kleiner de onzekerheden in de berekeningen van de safety case, hoe meer vertrouwen radioactief-afvalverwerkers en het publiek kunnen hebben in ondergrondse opslag.

Een consortium, waartoe onder andere Huisman Equipment behoort, werkt (d.d. 2024) aan een project dat het mogelijk moet maken om diepe boorgaten tot 5 kilometer te boren. Dit zou de opslag van radioactief afval op veel grotere dieptes mogelijk maken, in vergelijking met de huidige opslag in Boomse Klei, die zich op ongeveer 200-300 meter diepte bevindt. Te beantwoorden vragen hierbij zijn onder andere welke boor- en vergruisingssystemen nodig zijn en wat het consortium nodig heeft om de beoogde technologie verder te ontwikkelen.

Tijdelijke versus permanente berging

Een relevant vraagstuk is de keuze tussen tijdelijke of permanente berging van radioactief afval. In landen zoals Finland kiest men voor permanente eindberging, terwijl België de gebruikte splijtstof tijdelijk opslaat in afwachting van toekomstige recyclagemogelijkheden. Dit roept de vraag op of Nederland haar afval zo moet opslaan dat het terugwinbaar blijft voor toekomstige generaties.

Voor de veilige eindberging van radioactief afval, dat voor vele honderdduizenden jaren opgeslagen moet worden, worden safety cases gebruikt. Dit vraagt om een nationale standaard met referentiemodellen en databases die systematisch getoetst en verfijnd worden. Internationale samenwerking, zoals via de European Repository Development Organisation (ERDO)[55], kan waardevolle kennis opleveren. Nederland moet daarbij voortbouwen op haar opgebouwde expertise, vooral op het gebied van steenzoutformaties en boortechnieken.

In Nederland wordt het radioactieve afval op dit moment tijdelijk bovengronds bewaard bij de Centrale Organisatie voor Radioactief Afval (COVRA) in Zeeland. Met de komst van twee tot vier nieuwe kerncentrales, of meerdere kleinere installaties, zal de hoeveelheid afval groeien, hoewel de exacte omvang afhankelijk is van de gekozen technologie. De tijdelijke opslag bij COVRA is veilig en beproefd, maar vormt geen permanente oplossing voor de lange termijn. Europese regelgeving stelt dat eindberging noodzakelijk is als laatste stap in het beheer van radioactief afval. Nederland was oorspronkelijk van plan om pas rond 2100 een beslissing te nemen over eindberging, in de verwachting dat er tegen die tijd meer kennis en ervaring zou zijn. Het Rathenau Instituut adviseert echter om nu al te beginnen met het nadenken over het besluitvormingsproces rondom eindberging.[56] Daarbij zou de bevolking betrokken moeten worden bij het onderzoeken en ontwikkelen van mogelijke oplossingen. Het kabinet gaat bekijken welke stappen nodig zijn om een besluit te nemen over de eindberging van radioactief afval.[57] Hoewel het besluit oorspronkelijk voor 2100 gepland stond, wil het kabinet dit proces naar voren halen.

Minimaliseren van radioactieve reststromen

Zoals eerder vermeld kan plutonium gerecycleerd worden en als brandstof worden toegepast, met name in toekomstige generatie IV-reactoren. Daarnaast zijn er innovaties denkbaar op het gebied van transmutatie van radioactief afval. Dergelijke toepassingen kunnen het volume van radioactief afval potentieel verminderen en daarmee de schaalgrootte voor geologische berging verkleinen. Dit kan ook bijdragen aan het maatschappelijk draagvlak van kerncentrales. Technieken zoals transmutatie, recyclage en onderzoek naar nieuwe materialen voor de splijtstofmatrix en -hulzen kunnen hieraan bijdragen.

[55] ERDO - Working Group (erdo-wg.com)

[56] Rathenau Instituut (2024). Nu samen stappen maken – Advies voor het besluitvormingsproces over het langdurig beheer van radioactief afval. Den Haag (auteurs: R. Dekker, V. Lagendijk, M. Schuijer en R. van Est).

[57] Kamerstuk 25422, nr. 302.

Transmutatie van radioactief afval

Transmutatie biedt een veelbelovende methode om de milieueffecten van radioactief afval te verminderen door langlevende radionucliden om te zetten in kortlevende varianten. Dit proces kan niet alleen de hoeveelheid en de stralingsintensiteit van het afval verlagen, maar ook de lange termijn risico's van geologische eindberging verkleinen. Er zijn drie groepen producten die in aanmerking komen voor transmutatie:

- Plutonium kan in huidige Generatie III lichtwaterreactoren één keer worden gerecycleerd. Daarna moet het verder worden verwerkt in Generatie IV-reactoren om verdere transmutatie te realiseren. Aangezien de geplande Generatie III-reactoren een rol zullen spelen in de energietransitie, is het raadzaam om ook rekening te houden met de transmutatie van plutonium in toekomstige Generatie IV-reactoren.
- Americium kan alleen gerecycleerd worden in Generatie IV-reactoren of in *special purpose* reactoren, die ontworpen zijn voor dit doel. Hoewel de noodzaak voor americiumrecyclering momenteel minder groot is dan voor plutonium, zal het probleem toenemen zodra in Nederland meer plutonium gerecycleerd gaat worden. Bij meer recyclering van plutonium zal de hoeveelheid americium ook toenemen (en daarmee de behoefte om ook americium te kunnen recycleren).
- Langlevende splijtingsproducten, zoals technetium, hebben invloed op de stralingsdoses die na honderdduizenden jaren in de biosfeer kunnen worden waargenomen door lekken uit geologische opslag en verspreiding via grondwater. Hoewel de resulterende doses zeer klein zijn, kan dit toch problematisch zijn vanuit het oogpunt van publieke acceptatie. Het onderzoek hier moet er dus op gericht zijn om de resterende onzekerheden in studies zo klein mogelijk te maken, zodat we vertrouwen kunnen hebben in de keuze die wordt gemaakt.

Burgerparticipatie op het vlak van radioactief afvalbeheer

Het betrekken van burgers in het besluitvormingsproces rondom de berging van radioactief afval draagt bij aan maatschappelijk draagvlak en transparantie. Er wordt al onderzoek gedaan naar besluitvormingsprocessen voor de energietransitie, en voor radioactief afvalbeheer specifiek.[58] Ook kan ook lering worden getrokken uit sociaalwetenschappelijke inzichten en internationale voorbeelden, zoals uit Finland, waar men succesvol burgerparticipatie heeft geïntegreerd in het proces van locatieonderzoek voor geologische eindberging. Concrete vragen zijn: hoe bepaal je welke locaties geschikt zijn voor opslag en hoe communiceer je dat duidelijk aan het publiek? In de volgende paragraaf gaan we hier nader op in.

4.5.8 Thema 8: Perceptie, communicatie en draagvlak

Het thema 'Perceptie, communicatie en draagvlak' is een dwarsdoorsnijdend onderdeel met de andere thema's, waar ook sociaal-maatschappelijke vraagstukken aan de orde komen (zie bijvoorbeeld het vorig thema over verwerking en opslag van radioactief afval). Meerdere deelnemers aan deze studie (interviewrespondenten, deelnemers aan werksessies) stellen dat sociaal-maatschappelijke vraagstukken rondom kernenergie nog onvoldoende aandacht krijgen in het MMIP.

In Nederland is het maatschappelijk draagvlak voor kernenergie de laatste jaren zichtbaar toegenomen, mede door zorgen over klimaatverandering en recente geopolitieke

[58] Rathenau Instituut (2024). Nu samen stappen maken – Advies voor het besluitvormingsproces over het langdurig beheer van radioactief afval. Den Haag (auteurs: R. Dekker, V. Lagendijk, M. Schuijer en R. van Est). Zie de kabinetsappreciatie als onderdeel van Kamerstuk 25422, nr. 302.

ontwikkelingen.[59] Hierbij speelt de maatschappelijke afweging van waarden zoals energiezekerheid, betaalbaarheid, veiligheid, duurzaamheid en rechtvaardigheid ook een rol. Het vergelijken van deze factoren met andere energietechnologieën en het bepalen van een eerlijke verdeling van de lusten en lasten – zoals de keuze voor locaties van toekomstige kerncentrales of de eindberging van radioactief afval – vergt zorgvuldige overweging. Daarnaast spelen de mogelijke gevolgen voor toekomstige generaties een rol in de publieke opinie.

Verschillende vormen van burgerparticipatie, zoals burgerfora, bieden kansen om de besluitvorming over kernenergie inclusiever te maken en het draagvlak te vergroten. De maatschappelijke steun voor kernenergie is afhankelijk van meerdere factoren. Nucleaire technologie kent voordelen die te maken hebben met bijvoorbeeld energiezekerheid en behandelingsmogelijkheden voor kanker, maar tegelijkertijd zijn er maatschappelijke vragen over het beheer van afval. Burgerparticipatie kan helpen zorgen van burgers te inventariseren en daar een dialoog over te voeren.

Maatschappelijke perceptie van kernenergie

Het gaat hier om het ontwikkelen van (beter) maatschappelijk begrip voor de redenen waarom de overheid wil dat kernenergie een groter aandeel gaat krijgen in de Nederlandse energiemix. Burgers zullen hun oordeel en begrip baseren op allerlei factoren als vertrouwen in de overheid, energiezekerheid, betaalbaarheid, veiligheid, duurzaamheid en rechtvaardigheid. In deze dialoog met en door de samenleving kan geleerd worden van ervaringen in andere landen, zoals België, Finland en Zweden en Finland. Daarnaast is er behoefte om continu te monitoren wat de algemene kennis, houding en gedrag zijn ten opzichte van kernenergie in de samenleving. Hoe ontwikkelen opvattingen zich over de tijd en welke factoren spelen hierbij een rol in de ontwikkeling van deze opvattingen.

Daarbij kan mogelijk nog een onderscheid worden gemaakt tussen het bredere publiek en de bewoners van een regio waar een kerncentrale wordt gebouwd. Op het laatste niveau kan men onderzoeken welke zorgen er leven onder de bevolking en welke voorwaarden lokale bewoners stellen aan de komst van nieuwe kerncentrales, zoals ook een aanzet is gedaan door de Borsele Voorwaarden Groep en de Provinciale Voorwaarden ten behoeve van het Rijk-Regio Pakket.[60] Dit omvat ook de vraag op welke manier mensen betrokken willen worden bij de besluitvorming en welke afwegingen zij maken met betrekking tot kernenergie. Begrip van de beweegredenen en belangen van zowel voor- als tegenstanders helpen om hier adequaat op in te spelen en het begrip verder te vergroten.

Impact op de lokale omgeving

Bij de bouw en exploitatie van nieuwe kerncentrales helpt het om de economische en sociaalmaatschappelijke impact op de lokale omgeving goed te begrijpen en optimaal te benutten. Kerncentrales kunnen een regionale impuls geven aan economische ontwikkeling. Een historisch vergelijkbaar voorbeeld van zo'n impuls voor de regio is de ontwikkeling van de havens in Zeeland in de vorige eeuw, die een krachtige stimulans waren voor de industriële groei in de regio.

HZ Kenniscentrum Zeeuwse Samenleving, een onderdeel van de Hogeschool Zeeland, onderzoekt samen met adviesbureau Lysias wat de bouw van twee kerncentrales voor Zeeland betekent. De onderzoekers maken een inschatting van de impact van deze centrales. Dit

[59] Zie o.a. Meer Nederlanders voorstander van kernenergie (CBS) en Meer voor- dan tegenstanders van kernenergie in Nederland (EenVandaag).

[60] Voor iedere uiteindelijke locatie zal een Rijk-Regio Pakket opgesteld worden.

omvat onder andere het in kaart brengen van de kansen die nieuwe kerncentrales bieden en welke negatieve effecten mogelijk kunnen optreden en welke maatregelen genomen kunnen worden om die te voorkomen of te verminderen. Het Lokaal Impact Rapport wordt naar verwachting eind 2024 gepresenteerd.

Eerder in 2023 heeft Technopolis in opdracht van de provincie Noord-Brabant en het MOSAEIC-consortium onderzocht welke economische en maatschappelijke bijdrage de ontwikkeling van gesmolten-zoutreactoren kan leveren en welke impact het kan hebben op het doel om in 2035 een CO2-vrije elektriciteitssector te hebben in Nederland.[61] De conclusie was dat gesmolten zoutreactoren een belangrijke rol kunnen spelen in het bereiken van dit doel, mits de technologie beschikbaar komt. Voordelen zijn de levering van CO2-vrije energie (en daarmee minder afhankelijkheid van andere landen), een vermindering van radioactief afval, economische kansen voor de Nederlandse industrie en nieuwe werkgelegenheid.

Kennis op het gebied van omgevingspsychologie kan helpen om het gedrag, de risicoperceptie en risicocommunicatie met betrekking tot kernenergie en straling te analyseren. Een goed begrip van deze factoren kan bijdragen aan een maatschappelijk debat over kernenergie en toepassingen daarvan.

Bij de communicatie met de bevolking is het belangrijk om het onderscheid tussen grootschalige kerncentrales en kleinere modulaire reactoren duidelijk te maken. De kennis over dit onderscheid is bij het brede publiek echter nog beperkt. Een inhoudelijke dialoog met een goede informatievoorziening voor het publiek kan eventuele vragen over SMR's beantwoorden.

De bouw van kerncentrales heeft een impact op de ruimtelijke omgeving (zoals een grote bouwlocatie, verkeersdrukte, huisvesting van bouwers, de toegankelijkheid voor de lokale bevolking en verlichting van bouwplaatsen) en kan voor een tijdelijke (maar lange) tijd voor overlast zorgen. Daarnaast kunnen landschappelijke elementen, zoals mogelijk de zichtbaarheid van koeltorens en hoogspanningsmasten, een significante rol spelen. Wat zijn mogelijke alternatieven (zoals ondergrondse kabels) en welke implicaties hebben dergelijke alternatieven? Hoe kunnen we redelijkerwijs tijdelijke en structurele overlast zoveel mogelijk voorkomen?

Burgerparticipatie en maatschappelijk debat

Er is behoefte om de reeds opgedane kennis op het gebied van burgerparticipatie in de praktijk toe te passen (wat overigens ook al volop gebeurt). De focus voor dit onderwerp zou dan ook moeten liggen op praktijkgericht onderzoek: hoe kunnen we bestaande participatietrajecten effectief implementeren in de besluitvorming rondom nieuwe kerncentrales?

Bureau Ideate voert eind 2024 een onderzoek uit naar participatietrajecten binnen de energietransitie, waaruit waardevolle lessen getrokken kunnen worden voor toekomstige projecten, zoals op het gebied van kernenergie. Eerder is er ook onderzoek gedaan naar het gebruik van burgerfora in het klimaat- en energiebeleid. In 2021 heeft de commissie Brenninkmeijer hierover een adviesrapport uitgebracht (Kamerstuk 32813, nr. 674).

Burgerparticipatie verlangt dat deelnemers op tijd informatie ontvangen over het proces en onderwerp van het participatief traject, zodat zij in staat zijn om actief deel te nemen aan het debat en besluitvormingsprocessen. De vraag is welke basale kennis toegankelijk moet worden gemaakt en hoe deze kennis het beste kan worden aangeboden. Hierbij kan gedacht

[61] Technopolis en Strategy Unit (2023). Economische en maatschappelijke impact van de ontwikkeling van een Molten Salt Reactor in Nederland.

worden aan informatie over hoe kernenergie werkt, de gevolgen ervan voor het energiesysteem, de leveringszekerheid, energie-onafhankelijkheid, duurzaamheid en de impact op de leefomgeving en wat er met de resultaten van het participatief traject gebeurt.

Daarnaast spelen ethische vragen over intergenerationele verantwoordelijkheid een rol. Hoe gaat Nederland om met beslissingen die vandaag genomen worden over kernenergie en die een invloed hebben op volgende generaties?

Er zijn ook vragen over hoe besluitvormingsprocessen rondom de locatiekeuze van nieuwe kerncentrales optimaal kunnen worden ingericht, en hoe de lokale bevolking hierbij kan worden betrokken. Hierbij zijn niet alleen de lokale bewoners aangewezen stakeholders, maar ook andere groepen zoals maatschappelijke organisaties, bedrijven en experts. Het stimuleren van lokale betrokkenheid is een uitdaging op zich. Er zijn inzichten nodig over welke participatieve aanpakken geschikt zijn. Er kunnen lessen worden getrokken uit eerdere initiatieven zoals de Borselse Voorwaarden Groep om toekomstige participatietrajecten te verbeteren. Dit alles draagt bij aan een breder draagvlak en vertrouwen in het besluitvormingsproces rondom kernenergie in Nederland.

Informatievoorziening

Correcte en transparante informatievoorziening helpt alle betrokkenen een eigen afweging te maken over het belang van kernenergie en de daaraan verbonden vraagstukken. Het helpt om goed te weten welke informatiebehoeften burgers hebben en hen op een heldere manier te informeren over de risico's en kenmerken van kernenergie.

Daarnaast is er behoefte aan communicatie over de stapeling van risico's, bijvoorbeeld in gebieden als de Maasvlakte en Zeeland waar al veel industriële activiteiten plaatsvinden. Hoe gevaarlijk is radioactief afval daadwerkelijk en waar wordt het opgeslagen? Deze informatie moet helder en transparant gedeeld worden, zodat er geen misverstanden of onnodige zorgen ontstaan bij de bevolking. Een uitdaging hierbij is het vertalen van de complexe materie rondom kernenergie naar een begrijpelijke boodschap voor leken.

Verder is het belangrijk dat de lokale en regionale bevolking (onder andere cf. het Espooverdrag) adequaat geïnformeerd wordt over de aspecten rondom de bouw en exploitatie van kerncentrales, zoals logistieke verstoringen. Goede en tijdige communicatie hierover kan onnodige spanningen voorkomen. Een informatiecentrum kan hierbij een belangrijk hulpmiddel zijn. Hoe kan zo'n centrum beter worden ingericht en zichtbaarder worden voor het publiek? Het gebruik van multimedia, zoals dynamisch videomateriaal, kan de toegankelijkheid en het begrip vergroten. Onderzoek naar wetenschapscommunicatie biedt waardevolle inzichten die kunnen bijdragen aan de effectiviteit van deze centra en er kunnen lessen worden getrokken uit succesvolle voorbeelden, zoals het bezoekerscentrum Tabloo in Dessel, België.

In de provincie Zeeland zijn diverse grote energieprojecten gepland, wat bij inwoners vragen kan oproepen. Om deze vragen op een toegankelijke manier te beantwoorden, is in juli 2024 (officieel geopend in september 2024) het Infopunt Energie Zeeland opgericht. Hier kunnen inwoners van Zeeland informatie krijgen over lopende en toekomstige energieprojecten in de regio. Het infopunt biedt een vaste tentoonstelling met informatiepanelen over de projecten, een overzichtskaart met alle locaties, en de mogelijkheid om in gesprek te gaan met medewerkers van de betrokken organisaties om vragen en zorgen te bespreken.

Stabiliteit van de politiek en betrouwbaarheid van de overheid

Het realiseren van kerncentrales vraagt om een consistent overheidsbeleid op de lange termijn. Langetermijn politieke steun voor de bouw van kerncentrales maakt het voor

(particuliere) investeerders en bedrijven eenvoudiger de neuzen te richten op de bouw en exploitatie.

Het kernenergiebeleid wordt beïnvloed door politieke keuzes die het kabinet en de volksvertegenwoordiging maken. Deze kunnen veranderlijk zijn, ook op het vlak van (kern)energie. Een voorbeeld hiervan is de sluiting van kolencentrales in Nederland, die eerder in het vorige decennium werden gesloten voordat ze volledig operationeel waren. Dergelijke politieke keuzes creëren onzekerheid voor investeerders en andere betrokken actoren, wat met name problematisch is in de bouwfase van kerncentrales, die vaak tien jaar of langer duurt. Deze onzekerheden kunnen verminderd worden wanneer de politiek en de overheid zich voor langere termijn committeren aan de bouw van kerncentrales. De vraag is echter in hoeverre een dergelijke zekerheid gegarandeerd kan worden binnen de context van de Nederlandse democratische rechtsstaat.

5 Roadmap

5.1 Introductie

De uitkomsten van de inventarisatie uit de vorige hoofdstukken vormen de basis van de roadmap die we in dit hoofdstuk presenteren. De roadmap biedt een globaal overzicht van de stappen die op korte en lange termijn kunnen worden gezet voor de verdere ontwikkeling van het benodigde nucleaire kennisecosysteem.

Aan de hand van de roadmap kunnen stakeholders (overheid, bedrijven en kennisinstellingen) afspreken wie op welk van de acht thema's en het thema SMR aan zet is, welke investeringen daarvoor worden gedaan (en door wie), waar kennisvragen worden belegd (en dat zowel binnen het MMIP als daarbuiten) en welke resultaten dat moet opleveren. Daarbij kan nog een onderscheid worden gemaakt tussen de korte termijn (2024-2035) en de lange termijn (2035-2050).

Deze roadmap is niet in beton gegoten. Zij moet ruimte bieden om in te spelen op nieuwe ontwikkelingen en na enige tijd bijstellingen mogelijk maken. Kennisbehoeften kunnen immers veranderen na verloop van tijd. In het eerste hoofdstuk van dit rapport worden de vragen voor deze roadmap getoond.

De ambities die we in dit document benoemen zijn een direct uitvloeisel van de kennisvragen. Het gaat dus niet om ambities van de overheid op het gebied van kernenergie, hoewel er uiteraard overlap kan bestaan.

5.2 Thema 1: Stralingsbescherming

5.2.1 Ambitie

De ambitie binnen het thema Stralingsbescherming is om de veiligheid en gezondheid te waarborgen, nu en ook in een toekomst met meer kerncentrales, van iedereen die met straling werkt of eraan blootgesteld kan worden, door middel van optimale en wetenschappelijk onderbouwde stralingsbeschermingsmaatregelen. Dit omvat het verbeteren van kennis over gezondheidseffecten van lage doses, het optimaliseren van preventieve maatregelen binnen kernenergie en andere sectoren, en het versterken van noodplanningen en -respons. Hierbij streven we naar een robuust systeem van opleiding, kennisdeling, en interdisciplinaire samenwerking, dat duurzame expertise in Nederland garandeert en voorbereid is op nieuwe technologische en maatschappelijke uitdagingen.

5.2.2 Stappen

Voor het realiseren van deze ambitie zijn de volgende stappen nodig:

1. **Versterken en vernieuwen van toepasbare, wetenschappelijke expertise.** Voortzetten en uitbreiden van opleidingsprogramma's en onderzoeksinitiatieven om vergrijzing en tekorten in wetenschappelijke en technische expertise aan te pakken. Dit omvat het opstellen van een nationale Kennisagenda Stralingsbescherming, gerichte opleidingstrajecten (en borging hiervan) en kennisuitwisseling binnen de sector. Ook aandacht voor stap van (wetenschappelijke) kennis naar praktijkimplementatie van die kennis (op het gebied van stralingsbescherming).[62]

[62] Zie ook het rapport van de Werkgroep Kennisbasis, zoals omschreven in paragraaf 2.2.

2. **Uitbouwen van emergency response preparedness en stresstesten.** Om voorbereid te zijn op eventuele incidenten met kernenergie en -centrales, is het van belang om lessen op te doen uit bijvoorbeeld Fukushima en lessen die ondergebracht zijn in IAEA-publicaties. Specifiek is genoemd dat het uitvoeren van onderzoek naar effectievere communicatie en coördinatie hiervoor relevant is. Daarnaast omvat dit het plannen van langdurige maatregelen voor evacuees, drinkwatervoorziening, en economische continuïteit. Ten slotte is er behoefte aan robuuste stresstesten voor kerninstallaties om risico's van natuurlijke en menselijke dreigingen (zoals aardbevingen, overstromingen en cyberaanvallen) systematisch in kaart te brengen.
3. **Optimaliseren van stralingsbeschermingsprincipes en -normen.** Om accurate normen en principes te formuleren voor stralingsbescherming, is verder onderzoek naar de effectiviteit en toepasbaarheid van de huidige LNT-hypothese en ALARA-principes nodig. Hierbij is in het bijzonder aandacht voor gezondheidseffecten van lage doses straling gewenst. Onderdeel hiervan kan zijn om inzicht op te doen in de gezondheidseffecten op cellulair niveau, en de bijbehorende pathofysiologische processen, maar ook de impact van een lagere stralingsdosis op het milieu en ecosysteem is een belangrijk aandachtsgebied. Daarnaast is de toepassing van bevindingen op dit gebied in nieuwe generatie reactoren en SMR's relevant. Het doel van dit onderzoek is om de impact van preventieve maatregelen beter af te stemmen op de werkelijke risico's.
4. **Versterken van stralingsdosimetrie en dosisoptimalisatie.** Het doel hiervan is om veiligheidsprotocollen en dosisbepaling te verbeteren door het ontwikkelen van nieuwe technologieën en best practices. Hiervoor zijn twee aspecten relevant, namelijk het enerzijds onderzoeken van geavanceerde dosimetrie-technieken en optimalisatie van stralingsbelasting voor medewerkers te minimaliseren. Anderzijds is integratie van stralingsbescherming binnen de veiligheids- en bedrijfscultuur in nucleaire installaties door het opstellen van richtlijnen en praktijkvoorbeelden voor continue verbetering belangrijk om daadwerkelijk de gewenste effecten te bereiken.

5.2.3 Partners

Stap	Partners	Rollen
Versterken van nieuwe, toepasbare, wetenschappelijke expertise.	Universiteit (TU Delft) Onderwijsinstellingen NRG	Ontwikkelen van kennis Afstemming met doelgroep Opleiden van personeel
Optimaliseren van stralingsbeschermingsprincipes en -normen.	Rijksoverheid ANVS + NVS Universiteit (TU Delft) EPZ/COVRA Mbo/hbo	Vaststellen principes & normen Implementeren van normen Ontwikkelen van benodigde kennis Aandragen van de meest recente context Inbreng van ervaring met verankering middels onderwijs
Versterken van stralingsdosimetrie en dosisoptimalisatie.	Universiteiten (TU Delft) Hogescholen	Ontwikkeling nieuwe methoden. Toepassen nieuwe methoden
Emergency response preparedness en stresstesten.	IAEA RIVM ANVS	Centrale organisatie van kennis Sleutelspeler in metingen bij incidenten Communicatie bij incidenten, toezicht

Stap	Partners	Rollen
	Veiligheidsregio's, Defensie, AIVD	Preventie van en reactie op crisissituaties

5.2.4 Termijn

Korte termijn (tot 2035)

- **Versterken en vernieuwen van benodigde expertise om continuïteit en kwaliteit van het systeem te borgen.** Het is van belang om voldoende kennis te organiseren in Nederland om normen in de praktijk te kunnen brengen. Vanwege vergrijzing en de structurele afname van wetenschappelijke expertise op het gebied van stralingsbescherming, is het van belang dat hier op korte termijn op wordt ingezet, om zo ook personeel van de toekomst naar hoge standaarden te kunnen blijven opleiden.
- **Uitbouwen van emergency response preparedness en stresstesten.** Ontwikkelen en implementeren van robuuste noodplanningsprotocollen en stresstesten voor nieuwe en bestaande installaties. Inclusief communicatie-infrastructuur en plannen voor langdurige opvang en ondersteuning van evacuees. Dit is direct relevant voor de nieuw te bouwen kerncentrales, die zo snel mogelijk na 2035 operationeel moeten zijn.

Lange termijn (vanaf 2035)

- **Optimaliseren van stralingsbeschermingsprincipes en -normen.** Doorlopend onderzoek is nodig om verdere kennis op te doen van de impact van straling op de gezondheid van mens, milieu en ecosysteem. Zo kunnen principes en normen voor stralingsbescherming verder geoptimaliseerd worden.
- **Versterken van stralingsdosimetrie en dosisoptimalisatie.** Ontwikkeling van geavanceerde dosimetrie-technieken, implementatie van dosisoptimalisatie, en het integreren van stralingsbescherming in veiligheids- en bedrijfscultuur. Langetermijnmonitoring van dosimetrie en optimalisatie bij nieuwe technologieën.

5.2.5 Internationalisering

Nederland is op het gebied van stralingsbescherming volgens diverse betrokkenen al relatief sterk. Het is dus realistisch om op dit gebied een competitieve positie na te streven. Belangrijk is om te blijven monitoren hoe andere landen zich (blijven) ontwikkelen. Daarnaast is het van belang om organisaties die in Nederland met straling werken, te kunnen voorzien van de juiste informatie.

Naast de kennis die in Nederland wordt ontwikkeld op dit vlak, is het van belang om aangehaakt te blijven bij IAEA en internationale onderzoeksplatforms. Dit betreft bijvoorbeeld collectief onderzoek naar 1) de effecten van straling en mogelijke bescherming; 2) onderzoek naar lagere dosissen inclusief emergency preparedness; 3) radiobiologie; 4) medisch onderzoek 5) sociale en geesteswetenschappen en 6) dosimetrie. Denk aan Europese platformen zoals MEENAS, waaronder het EU-onderzoeksplatform voor stralingsdosimetrie (EURADOS), lage dosis onderzoek (MELODI), radio-ecologie (ALLIANCE), socio-humaan onderzoek (SHARE) en voorbereiding op noodsituaties (NERIS) geschaard worden, en het European Partnership for Radiation Protection Research PIANOFORTE.

5.2.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

Onzekerheden	Maatregelen
Kennisbasis wordt te versnipperd, waardoor het zicht op de volledige set mogelijkheden voor stralingsbescherming zoekraakt.	Ontwikkelen van een Nederlands kennissysteem voor stralingsbescherming.
Nederland verliest haar expertise op het gebied van stralingsbescherming doordat er geen experts meer worden opgeleid. Hierdoor is onvoldoende kennis beschikbaar om nationale normen up to date te houden.	Meer aandacht voor onderwijs op het gebied van kernenergie, en het enthousiasmeren van studenten om zich hierin te specificeren.
Het is onduidelijk hoe ontwikkelde kennis didactisch vertaald kan worden in het opleiden van nieuwe medewerkers.	Meer onderzoek naar wat werkt in de praktijk om aan te sluiten bij de leerstijlen van studenten, actief inzetten op onderwijsontwikkeling.

5.3 Thema 2: Systeemkennis

5.3.1 Ambitie

De ambitie binnen dit thema is om kernenergie op een optimale manier in te passen in het Nederlandse energiesysteem. Hierbij moet nadrukkelijk de focus liggen op de lange termijn: de bouwfase en operationele fase samen beslaan letterlijk decennia. Er moet een balans worden gezocht tussen deze energiebron en andere energiebronnen die recht doet aan de unieke eigenschappen van verschillende bronnen. Daarnaast is het vinden van een optimale inpassing in de energieinfrastructuur, met name het elektriciteitssysteem, belangrijk. In een dichtbevolkt land als Nederland is ook de locatiekeuze een relevant en complex vraagstuk. Tot slot moet een beter beeld worden ontwikkeld over hoe de primaire output van atoomsplitsing (warmte) wordt ingezet. Is dat alleen de klassieke conversie naar elektrische energie of worden andere opties steeds interessanter?

5.3.2 Stappen

Voor het realiseren van deze ambitie zijn de volgende stappen nodig:

1. Er moet een **duidelijke positionering van stroom uit kernenergie in het energiesysteem in Nederland** zijn. Met andere woorden: we moeten een beter beeld ontwikkelen waarvoor we de stroom uit kerncentrales in Nederland willen gebruiken en wat de waarde hiervan is. Daarbij gaat het nadrukkelijk niet om de eigenschappen van stroom die uit het stopcontact komt: daarbij is elke Watt gelijk. Het gaat om specifieke eigenschappen van kernenergie in vergelijking met andere energiebronnen. Kernenergie heeft als eigenschap dat het (bij voorkeur) een constante output levert. Hoe waarderen we deze eigenschap in relatie tot buffersystemen? Verder komt deze output op één locatie op het netwerk terecht en zijn er geen CO_2-emissies. Ook is de impact van kernenergie op het elektriciteitsysteem belangrijk. Hoe zorgen we ervoor dat inpassing van kernenergie kostenoptimaal is en het systeem robuust en veilig blijft? Tot slot is de vraag vanuit de (grote) afnemers sterk bepalend voor de positionering van kernenergie in ons energiesysteem. Al deze perspectieven moeten op systeemniveau worden gekwantificeerd (zoals met een maatschappelijke kosten-baten analyse) zodat deze inzichten in de volgende stap kunnen worden meegenomen. Voor deze eerste stap geldt overigens dat er een sterke relatie is tussen het *aantal* kerncentrales in Nederland en de impact op het systeem. Inpassing van

kernenergie in het systeem is altijd relevant, maar hoe meer kerncentrales er zijn (of komen), hoe relevanter deze kernenergie wordt.

2. Om daadwerkelijk kerncentrales te realiseren is het essentieel dat **investeerders voldoende zekerheid hebben over hun business case**. We moeten meer kennis verwerven wat het optimale niveau van zekerheid is. Hoe meer zekerheid hen geboden kan worden (bijvoorbeeld door prijsgaranties) hoe lager hun kapitaalkosten en hoe goedkoper de realisatie wordt. De overheid kan dergelijke garanties afgeven op basis van de (maatschappelijke) waarde van kernstroom die in de vorige stap naar voren is gekomen. Naast prijsgaranties kan gekeken worden naar andere marktmodellen en financieringsmodellen. (En ook hierbij geldt dat het aantal kerncentrales in Nederland het antwoord op deze vraag deels bepaalt.) Aan de andere kant betekenen te veel garanties hoge kosten voor de overheid en slecht functionerende markten omdat de prijsprikkels te beperkt zijn.
3. Voor het vinden van een **locatie** voor de eerste twee centrales is begin 2024 een projectprocedure gestart, waarbinnen meerdere locaties gelijkwaardig worden gewogen op hun effecten op techniek, kosten, milieu, omgeving en toekomstvastheid. Over enige tijd zal ook duidelijkheid moeten komen over de locatie(s) van de twee andere generatie-III kerncentrales. Ook voor de plaatsing van SMR's moet beleid ontwikkeld worden. Specifiek zou er ook onderzocht kunnen worden onder welke omstandigheden kleine SMR's (microreactoren) direct naast zeer grote stroomgebruikers geplaatst kunnen worden.
4. Voor de langere termijn moet een strategie worden gevormd hoe en of **de energie uit kerncentrales voor andere doelen dan elektriciteit** moet worden ingezet. Hierbij speelt de wijze waarop we onze economie en infrastructuren inrichten een grote rol. Gaan we voor verwarming grootschalig inzetten op warmtenetten, waterstof of elektriciteit? Kernenergie kan voor alle drie vormen energie leveren, maar een duidelijke keuze van de afnamezijde is relevant. Een belangrijk element is uiteraard wat de meest efficiënte oplossing is.

5.3.3 Partners

Universiteiten en kennisinstituten zullen uiteraard een grote rol spelen bij het ontwikkelen van de modellen. De afgelopen jaren hebben partijen als TNO en TU Delft verschillende scenariostudies uitgevoerd. Daarnaast zijn de volgende partners relevant.

Stap	Partners	Rollen
Positionering	KGG	Regie nemen in discussie over positionering
	Energieproducenten, energieleveranciers, TenneT en regionale netbeheerders	Inhoudelijke input leveren en duidelijk maken wat de (financiële, maatschappelijke, ruimtelijke, technische, et cetera) impact is van keuzes
	Grote afnemers	Vraagarticulatie
	ACM	Toezicht houden op de markt
Zekerheid investeerders	Investeerders	Duidelijkheid geven over de (gevoeligheid van de) business case
	KGG, MinFin	Kaders voor prijsvorming afgeven en financiële impact hiervan dragen

Stap	Partners	Rollen
	ACM	Toezicht houden op de markt
Locaties kerncentrales	Rijksoverheid, provincies, gemeenten	Integrale afweging maken over optimale locatiekeuze en mitigeren negatieve aspecten
	Inwoners (zie thema 8)	Zie thema 8
Andere energie dan elektriciteit	Producenten kerncentrales	Systemen leveren waarbij dit technisch en economisch haalbaar is.
	Investeerders	Investeren in kerncentrales
	Exploitanten	Exploiteren van kerncentrales
	Grote afnemers	Vraag articuleren en energie daadwerkelijk gaan afnemen

5.3.4 Termijn

Korte termijn (tot 2035)

Voor de korte termijn is het vooral essentieel dat er snel gestart kan worden met de bouw van de twee kerncentrales. Hierbij is het evident dat er een goed beeld moet zijn waar de eerste twee kerncentrales geplaatst gaan worden. Ook moet het beeld over de positionering van de stroom uit kernenergie in het energiesysteem in Nederland voor een groot deel duidelijk zijn. Tot slot moet het uiteraard duidelijk zijn hoe investeerders voldoende zekerheid, dat wil zeggen niet te veel en niet te weinig, verkrijgen voor het doen van investeringen in kernenergie.

Lange termijn (vanaf 2035)

Op langere termijn moet het beeld van de positionering van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem verder aangescherpt worden, waarbij decarbonisatie van de industrie in het oog moet worden gehouden. Relevant punten hierbij zijn onder meer de mogelijke inzet van energie uit kerncentrales voor andere doelen dan elektriciteit en met de locaties van deze kerncentrales.

5.3.5 Internationalisering

Op het gebied van internationalisering zijn er verschillende relevante dimensies:

- Ten eerste is het Nederlandse stroomnet direct gekoppeld aan het netwerk van Duitsland, België, Noorwegen, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk. Dit biedt kansen voor op het bepaalde tijden exporteren en importeren van stroom uit kerncentrales.
- Ten tweede wordt het Nederlandse energiesysteem sterk beïnvloed door de import van energiebronnen (biomassa, gas, kolen, olie, waterstof) uit het buitenland. De (prijs)ontwikkelingen op de internationale markt zullen een sterke invloed uitoefenen op het Nederlandse energiesysteem.
- Ten derde wordt het Nederlandse energiesysteem beïnvloed door de technologische paden die onze buurlanden kiezen. De recente Duitse beslissing om zwaarder in te

gaan zetten op waterstof[63] maakt de business case voor waterstof (vanuit welke bron dan ook) in Nederland waarschijnlijk positiever.
- Ten vierde zien we dat Nederland te maken zal gaan krijgen met energieproducenten en investeerders die in het buitenland zitten.
- Ten vijfde is het niet duidelijk in welke mate energie-intensieve industrie de komende decennia in Nederland gevestigd blijft of vertrekt naar landen waar de energieprijzen lager liggen. Hierbij speelt de inzet van kerncentrales maar ook EU-beleid met betrekking tot strategische autonomie (bijvoorbeeld op het gebied van chemie en staal) een rol.

5.3.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

Onzekerheden	Maatregelen
Vraag en aanbod ontwikkelen zich de komende decennia anders dan verwacht.	Geregeld toetsen of de positionering van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem nog steeds actueel is of dat er een aanpassing (bijvoorbeeld in het marktmodel) nodig is.
De ontwikkeling van nieuwe generatie kerncentrales duurt langer dan gedacht.	Er zijn weinig mitigerende maatregelen hiervoor. De enige optie is om te voorkomen dat we te afhankelijk gaan worden van verwachtingen over technologische ontwikkelingen.

5.4 Thema 3: Nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie

5.4.1 Ambitie

De ambitie binnen dit thema is om kennis en expertise op het gebied van nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie niet alleen te behouden, maar ook verder te ontwikkelen. Dit is essentieel om voorbereid te zijn op toekomstige uitdagingen en kansen, nieuw talent aan te kunnen trekken in onderwijs en onderzoek, én om een sterke *absorptive capacity*[64] te borgen. Deze capaciteit stelt Nederland in staat een basiskennisniveau op te bouwen of te behouden, zodat nieuwe internationale ontwikkelingen begrepen en in perspectief geplaatst kunnen worden – en hierop kan worden ingespeeld als ze relevant blijken voor de Nederlandse context.

Voor de bouw van nieuwe generatie III(+)-kerncentrales ligt de nadruk op operationele en procedurele aspecten. Een mogelijkheid is de inzet van AI en digital twins om de veiligheid van centrales, de beveiliging van en het onderhoud aan centrales te verbeteren en mogelijk goedkoper te maken. Tegelijkertijd denken Nederlandse stakeholders actief mee over innovatieve en geavanceerde technologieën zoals generatie IV-reactoren, Small Modular Reactors, en innovatieve splijtstofconcepten zoals Accident Tolerant Fuel en Enhanced Performance Fuel. Deze technologieën bieden mogelijk voordelen zoals verbeterd brandstofverbruik, een vermindering van radioactief afval en verhoogde operationele veiligheid. Door deze ontwikkelingen te volgen en de *absorptive capacity* te benutten, wordt bijgedragen aan een duurzamere, veiligere en efficiëntere energietransitie.

---

[63] https://nos.nl/artikel/2541747-duitsland-legt-waterstofnetwerk-van-19-miljard-euro-aan

[64] Met *absorptive capacity* bedoelen we de absorptiecapaciteit van Nederland. Absorptiecapaciteit is het vermogen van individuen of organisaties om externe kennis (in dit geval uit het buitenland) te verwerven, assimileren, transformeren en gebruiken om te innoveren en zich aan te passen aan de Nederlandse context. Om dit te borgen is een minimum niveau aan kennis benodigd.

5.4.2 Stappen

Voor het realiseren van deze ambitie zijn de volgende stappen nodig:

1. **Stel een nationaal prioriteitenkader op en definieer daarin gerichte onderzoeksthema's.** Creëer een duidelijk, doelgericht kader voor onderzoek naar reactor- en splijtstoftechnologieën die aansluiten bij nationale ambities, zodat de beperkt beschikbare middelen doeltreffend en doelmatig kunnen worden ingezet. Specifieke onderzoeksgebieden zouden geavanceerde reactorontwerpen, innovatieve concepten in de nucleaire brandstofcyclus, afvalminimalisatie en het recyclen van gebruikte splijtstof kunnen zijn.
2. **Faciliteer onderzoeksinfrastructuur om experimenten mogelijk te maken.** Om hoogwaardig experimenteel onderzoek in nucleaire technologie mogelijk te maken, is het essentieel om de onderzoeksinfrastructuur te versterken en uit te breiden. Dit geeft wetenschappers toegang tot de gespecialiseerde faciliteiten die nodig zijn voor onderzoek naar reactortechnologie, splijtstofcycli en stralingsgerelateerde experimenten. Dit kan door bestaande faciliteiten te ondersteunen en uit te breiden. Daarnaast is internationale samenwerking essentieel. Door samenwerkingsprogramma's met buitenlandse onderzoeksfaciliteiten en kenniscentra kunnen Nederlandse onderzoekers gebruikmaken van aanvullende mogelijkheden voor experimenten in unieke en grootschalige onderzoeksreactoren en laboratoria. Met een robuuste en gespecialiseerde onderzoeksinfrastructuur kan Nederland een leidende rol spelen in nucleair experimenteel onderzoek en de technologische kennisbasis in reactor- en splijtstofcyclusonderzoek aanzienlijk versterken. Dit legt ook een solide basis voor het opleiden van een nieuwe generatie nucleaire onderzoekers en technici en bevordert innovatieve ontdekkingen die bijdragen aan een veilige, duurzame en efficiënte nucleaire sector. Zie ook de aanbeveling in hoofdstuk 6.3.
3. **Stel doorlopende onderzoekslijnen op voor de ontwikkeling van (nieuwe) reactortechnologieën** zonder nadrukkelijke focus op het ontwikkelen en verdiepen van expertise in specifieke technologieën, zodat op voorhand geen expliciete keuzes worden gemaakt en er onverhoopt 'lock-in'[65] plaatsvindt. Dit zorgt ervoor dat Nederland een breed technologisch perspectief behoudt en kan inspelen op ontwikkelingen door daar vervolgens nichespecialisatie voor op te bouwen. Dit vergt een fors onderzoekpotentieel dat Nederland momenteel niet bezit. Een prioriteitenkader (conform stap 1) zal daarom op termijn richting moeten geven aan specifieke onderzoeksonderwerpen (die ook technologie-overstijgend kunnen zijn). Ons advies hierbij is een breed onderzoeksprogramma op te zetten, dat zich richt op diverse reactortechnologieën op basis van een langetermijnvisie. Zoek hierbij nadrukkelijk de verbinding met de Strategic Research Agenda op Europees niveau en de Coordinated Research Projects (CRPs) van het Internationaal Atoomagentschap IAEA, en maak een strategische selectie van agendapunten die relevant zijn voor de Nederlandse context en/of waar Nederland een bijdrage aan kan leveren. Naarmate het programma vordert, kan het geleidelijk consolideren op basis van onderzoeksresultaten en technische haalbaarheid, zodat technologieën die het beste aansluiten bij de nationale doelen verder worden ontwikkeld. Dit brede programma legt een divers en robuust kennisfundament in verschillende reactortechnologieën, waardoor Nederland in de toekomst weloverwogen keuzes kan maken voor specifieke reactorontwerpen. Dit stelt Nederland in staat om een leidende positie in een

[65] *Lock-in* verwijst naar een situatie waarin een technologie of standaard dominant wordt, waardoor alternatieven moeilijker geaccepteerd of geïmplementeerd worden. Het gevolg is dat innovatie beperkt wordt doordat nieuwe en potentieel betere oplossingen minder kans krijgen om door te breken.

nichespecialisme te bereiken, met de flexibiliteit om in te spelen op toekomstige technologische en marktvraagstukken. Het selecteren van specifieke reactortechnologieën en type reactor is bovendien randvoorwaardelijk voor het op kunnen bouwen van benodigde toeleveringsketens. Het is hier van essentieel belang dat acties ten behoeve van deze specifieke technologieën (zoals voor Generatie IV-reactoren) zo snel mogelijk van start gaan, zodat men voorbereid is om in te kunnen spelen op de nieuwste ontwikkelingen.

4. **Stel doorlopende onderzoekslijnen op voor de ontwikkeling van innovatieve concepten binnen de splijtstofcyclus.** Deze lijnen moeten de kennis en innovatie rond de splijtstofcyclus verdiepen om duurzaamheid en efficiëntie in de brandstofketen bevorderen. De splijtstoftechnologie is verbonden met de keuze voor een bepaalde reactortechnologie en -ontwerp, en vice-versa. Start met onderzoekslijnen die gericht zijn op brandstoffen die bijdragen aan verbeterde prestaties en verhoogde veiligheid, zoals Enhanced Performance Fuel (EPF), Accident Tolerant Fuel (ATF), Low-Enriched Uranium (LEU)[66], Low-Enriched Uranium Plus (LEU+), High-Assay Low-Enriched Uranium (HALEU), en thorium. Deze brandstoffen bieden veelbelovende mogelijkheden voor hogere prestaties en verhoogde veiligheid onder uiteenlopende omstandigheden. Als één van de weinige landen in de wereld bezit Nederland de industriële capaciteit om hieraan te werken; Urenco verrijkt al LEU, LEU+ (6-9%) en HALEU (tot 19,75%) en investeert in capaciteit om aan de vraag te kunnen voldoen. De vraag naar verrijkt uranium neemt toe door diversificatie weg van Rusland en meer kernenergie in de energiemix (energiezekerheid en verduurzaming). Daarnaast is het van belang technologieën voor het hergebruik van splijtstoffen te onderzoeken, inclusief technieken voor de recycling van plutonium en andere actiniden in Generatie III(+) en toekomstige (Generatie IV) reactoren. Dit kan processen omvatten zoals pyroprocessing en andere opkomende recyclingsystemen in Generatie IV-reactoren. Door een solide kennisbasis te ontwikkelen in alternatieve en duurzame brandstoffen en een beter begrip te krijgen van efficiënte brandstofrecyclingopties, kan Nederland zichzelf positioneren om de veiligheid en duurzaamheid van de nucleaire energievoorziening te bevorderen.
5. **Evalueer de onderzoekslijnen en stel prioriteiten iteratief bij om richting te geven.** Om in te kunnen spelen op ontwikkelingen op het gebied van reactor- en splijtstoftechnologie achten wij het belangrijk om de onderzoekslijnen continu te evalueren om prioriteiten bij te stellen. Er zijn relatief beperkte middelen beschikbaar gesteld ten behoeve van het MMIP en dat vraagt om een heldere focus op prioritaire onderzoeksonderwerpen. Wij adviseren om rond 2030 een eerste evaluatiepunt te bereiken. Hoewel het aannemelijk is dat er dan nog geen definitieve keuzes gemaakt zullen kunnen worden, heeft Nederland tegen die tijd waarschijnlijk een beter inzicht in de toekomst van kernenergie en is er internationaal meer over trends en ontwikkelingen bekend. Vervolgens zou men periodieke trajecten aan kunnen houden van 5 tot 10 jaar, waarna er opnieuw geëvalueerd wordt.

5.4.3 Partners

Stap	Partners	Rollen
Stel nationale prioriteiten en definieer prioritaire onderzoeksthema's	KGG, MMIP Missieteam, Programmacommissie (in consultatie met het veld,	Beleidsmatige prioriteiten stellen onder behoud van input uit het veld. Het MMIP Missieteam en/of programmacommissies

[66] LEU wordt momenteel in gebruik zijnde reactoren toegepast tot circa 4-5% verrijkt uranium. De andere genoemde splijtstofconcepten zijn (relatief) nieuw.

Stap	Partners	Rollen
	waaronder universiteiten en hogescholen)	van onderzoeks- en implementatieprogramma's bieden nadere prioritering aan in de opgehaalde inventarisatie en wijzen concrete prioritaire onderwerpen aan
Faciliteer onderzoeksinfrastructuur om experimenten mogelijk te maken	Rijksoverheid (incl. het Innovatie Attaché Netwerk van EZ), relevante stakeholders (zoals NRG, DIFFER, TU Delft/RID)	Onderhouden en beschikbaar stellen van onderzoeksfaciliteiten. Onderzoeken wat de Rijksoverheid hierin kan faciliteren (zowel financieel als op het gebied van internationale innovatiesamenwerking met internationale aanbieders van onderzoeksfaciliteiten)
Stel doorlopende onderzoekslijnen op voor de ontwikkeling van (nieuwe) reactortechnologieën	KGG, MMIP Missieteam, Programmacommissies, onderzoekers op academisch niveau (w.o. universiteiten, kennisinstituten), Urenco, EPZ, COVRA, vendors	Het MMIP Missieteam en/of programmacommissies van onderzoeks- en implementatieprogramma's bieden nadere prioritering aan in de opgehaalde inventarisatie en wijzen concrete prioritaire onderwerpen aan. Aan de hand van beleidsmatige keuzes (cf. stap 1) zal nader ingevuld moeten worden waar de nadruk op ligt
Stel doorlopende onderzoekslijnen op voor de ontwikkeling van innovatieve concepten binnen de splijtstofcyclus	KGG, MMIP Missieteam, Programmacommissies, onderzoekers op academisch niveau (w.o. universiteiten, kennisinstituten), Urenco, EPZ, COVRA, vendors	Het MMIP Missieteam en/of programmacommissies van onderzoeks- en implementatieprogramma's bieden nadere prioritering aan in de opgehaalde inventarisatie en wijzen concrete prioritaire onderwerpen aan. Aan de hand van beleidsmatige keuzes (cf. stap 1) zal nader ingevuld moeten worden met het veld waar de nadruk op ligt
Evalueer de onderzoekslijnen en stel prioriteiten iteratief bij om richting te geven	KGG, MMIP Missieteam, Programmacommissies (in consultatie met het veld)	Evalueren, trends signaleren, bijsturen

5.4.4 Termijn

Het is lastig om strak te differentiëren tussen de korte en lange termijn op het gebied van reactor- en splijtstoftechnologie, aangezien dit onderwerp zich continu ontwikkelt en er momenteel nog geen concrete keuzes zijn gemaakt ten behoeve van eventuele toekomstige kerncentrales – los van de beoogde twee tot vier generatie III/III+ newbuild kerncentrales. Op het moment dat Nederland een keuze maakt voor specifieke technologieën (zoals een vierde generatie kernreactor) zijn er concrete aanknopingspunten om onderzoeksprogramma's gerichter vorm te geven. Het is echter van belang dat acties niet op de lange baan

worden geschoven, omdat men voorbereid moet zijn om in te kunnen spelen op nieuwe ontwikkelingen.

Korte termijn (tot 2035)

Voor de korte termijn is het vooral essentieel dat er meer duidelijkheid komt over de Nederlandse langetermijnambities op het gebied van kernenergie (zoals het al dan niet bouwen van SMR's of Generatie IV-reactoren), zodat de onderzoeksprogramma's gerichter ingestoken kunnen worden. Dit impliceert ook dat er zorg wordt gedragen voor het faciliteren van voldoende adequate onderzoeksinfrastructuur. Nederland kent al diverse onderzoeksfaciliteiten. Het is van belang dat er voldoende financiering wordt voorzien omwille van de toegankelijkheid en beschikbaarheid van faciliteiten.

Onderwijs en onderzoek op het gebied van moderne generaties kerntechnologieën dragen bij aan zowel het enthousiasmeren van nieuw talent en het versterken van de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur. In eerste instantie gaat het hier om het behouden van wat we al hebben en vervolgens het opschalen van die capaciteit.

Lange termijn (vanaf 2035)

Op langere termijn moet het beeld van de positionering van kernenergie in Nederland verder aangescherpt worden, zodat concrete doelstellingen ten behoeve van onderzoek geformuleerd kunnen worden.

5.4.5 Internationalisering

Nederland zou er goed aan doen binnen het thema reactor- en splijtstofcyclustechnologie in te zetten op een gecombineerde strategie van internationale samenwerking en nationale specialisatie. Internationale samenwerking is essentieel om ontwikkelingen en trends uit de rest van de wereld te internaliseren. Door bijvoorbeeld actief deel te nemen aan internationale onderzoeksprogramma's en -platforms waar al onderzoek wordt uitgevoerd kan Nederland toegang krijgen tot kritische inzichten en technologieën. Dit gebeurt voor een belangrijk deel al, onder andere via deelname aan de Euratom programma's. Internationale samenwerking moet ook geen doel op zich zijn, maar dienen als instrument om kennis en expertise te delen. Het ontwikkelen van eigen speerpunten is derhalve belangrijk voor het aangaan van samenwerkingsverbanden. Wij raden dan ook aan om op termijn te verkennen in welke specifieke niches Nederland kan (en wil) excelleren.

Onderstaande is een niet-uitputtend overzicht van enkele relevante gremia, platforms en onderzoeksagenda's waar Nederland deel van uitmaakt of kan maken. Het is hierbij goed om na te gaan wat dergelijke gremia bijdragen en de politieke aard ervan. Het uitvoeren van de bovengenoemde stap 1 moet uiteindelijk leiden tot een duidelijke visie voor de toekomst van kernenergie en het daaraan gerelateerd onderzoek in Nederland. Vervolgens biedt dat de mogelijkheid om passende internationale partners te zoeken bij de beoogde speerpunten.

- Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP), met in het bijzonder Nuclear Generation II & III Alliance (NUGENIA) voor Generatie II/III reactortechnologie en European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) voor Generatie IV reactortechnologie demonstraties
- EU Industrial SMR Alliance (KGG is hiervan lid, evenals meerdere Nederlandse stakeholders; Urenco is voorzitter van de roadmap brandstofcyclus)
- MYRRHA (SCK CEN)
- ALFRED (Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator)
- Advanced Reactors for Cogeneration of Heat and Electricity (ARCHER)
- European Consortium for the Development of Fusion Materials (EUROfusion)

- International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)
- European Commission Joint Research Centre (JRC)
- Euratom (European Atomic Energy Community) Research and Training Programme
- European Research Infrastructure for Nuclear Reaction, Radioisotope, and Radiochemical Studies (EUFRAT)
- OECD-NEA, waaronder ook via Generation IV International Forum (GIF), International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC) en Multinational Design Evaluation Programme (MDEP)
- Coordinated Research Projects (CRPs) van het Internationaal Atoomagentschap (IAEA)

5.4.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

Onzekerheden	Maatregelen
Het thema blijft te breed georiënteerd of er worden geen prioriteiten gesteld, waardoor een te breed scala onderwerpen wordt gefinancierd en de onderzoeksmiddelen in mindere mate doeltreffend en doelmatig ingezet kunnen worden.	Door extra aandacht te besteden aan het afbakenen in dit thema binnen het MMIP, bijvoorbeeld binnen het MMIP Missieteam of een Programmacommissie van de onderzoeks- of implementatieprogramma's.
Er worden verkeerde keuzes gemaakt, waardoor het programma een focus blijkt te hebben die niet aansluit bij toekomstige ontwikkelingen.	Nederland sluit zich aan bij internationale gremia, platforms, initiatieven en onderzoeksagenda's (zoals de Strategic Research Agenda van de EU) en sluit de nationale focus hierop aan, in plaats van een nationaal programma in isolement op te tuigen.
Het thema krijgt onvoldoende prioriteit waardoor kennis te laat wordt ontwikkeld.	Het thema wordt – ook onder beleidsmakers – regelmatig onder de aandacht gebracht. Door in andere landen uitdagingen bij de bouw en exploitatie van een kerncentrale te identificeren, kunnen deze urgentie krijgen op de Nederlandse agenda.

5.5 Thema 4: Aan reactoren gerelateerde enabling onderwerpen

5.5.1 Ambitie

Omdat dit thema erg breed is en de afbakening niet voor alle veldpartijen duidelijk is, is het moeilijk om een heldere ambitie te formuleren. Een eerste ambitie kan zijn om samen met het veld te bepalen welke onderdelen wel of juist niet binnen dit thema vallen. De aangedragen kennisvragen geven een drietal ambities weer, namelijk 1) het organiseren van een zo efficiënt en soepel mogelijk proces in de bouw en exploitatie van een kerncentrale; 2) het (vroegtijdig) in kaart brengen en invullen van de randvoorwaarden voor bouw en exploitatie van kerncentrales; 3) het optimaal benutten van kansen van bouw en exploitatie van kerncentrales voor de Nederlandse economie, door een bredere groep van bedrijven hierbij te betrekken.

5.5.2 Stappen

1. **Specificeer duidelijk welke onderwerpen in dit thema geadresseerd moeten worden.** Het is voor diverse onderzoekers niet duidelijk hoe dit thema zich verhoudt tot bijvoorbeeld de thema's 2 en 8. Om het veld te mobiliseren voor dit thema, is het belangrijk om scherp te hebben wat precies verwacht wordt.

2. **Ontwikkel een duidelijke strategie voor de governance en het projectmanagement bij de bouw van een kerncentrale.** De bouw van kerncentrales duurt regelmatig langer en kost vaak meer dan vooraf geraamd. Het beantwoorden van kennisvragen over governance, projectmanagement, organisatiemanagement en personeelsmanagement, eventueel op basis van ervaringen in andere sectoren of landen, kunnen helpen om de bouw van een kerncentrale (inclusief opdrachtgeverschap) op een efficiëntere manier voor te bereiden en uit te voeren. Zo kunnen inefficiënte processen en vertraging bij de bouw van centrales voorkomen worden.
3. **Onderzoek de kansen van de bouw en exploitatie van kerncentrales voor de Nederlandse economie.** Welke bedrijven kunnen betrokken worden, en welke kansen horen hierbij? Dit gaat breder dan bedrijven voor het ontwikkelen van kerncentrales; het kan bijvoorbeeld ook gaan om bedrijven uit de maakindustrie of betonbouwers. Hierdoor kan Nederland zo optimaal mogelijk kansen benutten die voortkomen uit kernenergie, maar kan ook zo efficiënt mogelijk gebruik gemaakt worden van eigen expertise. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de omvang van projecten: veel bedrijven moeten risicotechnisch en inhoudelijk voorbereid worden op een dusdanig groot project.
4. **Specificeer de *ontbrekende* randvoorwaarden voor de bouw van kerncentrales, en onderzoek hoe deze ingevuld kunnen worden.** Denk aan onderwerpen zoals veiligheid, financieringsconstructies, vergunningverlening, certificering en locatiekeuze. Op dit thema is al werk verricht: er zijn voorkeuren uitgesproken voor de locatiekeuze van nieuwe kerncentrales en er is onderzoek gedaan naar mogelijke financieringsconstructies voor kernenergie[67]. Het is belangrijk om continuïteit te waarborgen op gemaakte keuzes, maar ook te onderzoeken in hoeverre deze keuzes passend blijven voor de bouw van volgende kerncentrales.
5. **Analyseer hoe het best omgegaan kan worden met de materialen in en om een kerncentrale.** Gebruik bijvoorbeeld nieuwe ontwikkelingen van AI om de bouw en exploitatie van centrales te monitoren, en analyseer de kansen van nieuwe civieltechnische materiaalkeuzes. Zo kan op een meer circulaire manier, met minder impact op het milieu gewerkt worden.

Bij stappen 2 tot 5 van dit thema wordt expliciet gewezen op het belang van kennisbenutting uit landen die recente ervaring hebben met de bouw van kerncentrales, bijvoorbeeld het Verenigd Koninkrijk, Finland en Frankrijk. Ook vanuit de bouw van de PALLAS-reactor kunnen waardevolle lessen worden opgehaald, bijvoorbeeld op het gebied van vergunningverlening en projectmanagement.

5.5.3 Partners

Stap	Partners	Rollen
Afbakening van het thema	Missieteam, Nederlandse onderzoekers, Nederlandse bedrijven, vendors	Afstemmen over mogelijke onderwerpen, verhouding definiëren tussen dit thema en de andere thema's

[67] Minister voor Klimaat en Energie (2022). Nadere uitwerking van de afspraken uit het coalitieakkoord op het gebied van kernenergie [Kamerbrief]; KPMG (2023). Onderzoek financieringsconstructies kernenergie; Minister voor Klimaat en Energie (2023). Stand van zaken van de nieuw te bouwen kerncentrales.

Stap	Partners	Rollen
Governance & projectmanagement	Bouwend Nederland, NRG Pallas, Vendors, Bestuurskundige onderzoeksbureaus of universiteiten. Buitenlandse ontwikkelaars (bijv. EDF Energy), NRG PALLAS	Informeren en adviseren over projectmanagement
Randvoorwaarden voor de bouw van kerncentrales	Betrokkenen bij de kerncentrale in Borssele, experts op gebied van locatie-onderzoek (bijv. Anteagroup), NRG PALLAS, financieel experts (bijv. KPMG)	Delen van kennis en ervaringen over o.a. financiering & locatie van kerncentrales
Omgang met materialen	Maakindustrie, vendors, betonindustrie, fieldlabs voor smart maintenance, ontwikkelaars van kerncentrales	Samenwerken om kansen te identificeren van nieuwe ontwikkelingen in andere sectoren voor de ontwikkeling van kerncentrales
Kansen voor de Nederlandse economie	Brancheorganisaties van bijv. Nederlandse maakindustrie (VNO-NCW, FME, Holland High Tech), ANVS	Meedenken over mogelijke partijen die betrokken kunnen worden bij de bouw van kerncentrales ANVS kan ondersteunen in normen voor veiligheid bij het betrekken van (nieuwe) partijen

5.5.4 Termijn

De vragen in dit thema richten zich grotendeels op de randvoorwaarden voor de bouw en exploitatie van kerncentrales. Daarom zouden alle vragen bestempeld kunnen worden als vragen voor de korte termijn. Bij het doen van vervolgonderzoek zijn twee aspecten belangrijk voor de prioritering. Ten eerste is het van belang om gemaakte beleidskeuzes niet opnieuw in twijfel te trekken, maar te zorgen voor continuïteit. Ten tweede is het belangrijk om onderscheid te maken tussen kennis die specifiek en onmisbaar is voor Nederland, en kennis die ontwikkeld kan worden of wordt in het buitenland.

- Zorg voor een duidelijke afbakening van dit thema. *Dit is wellicht een open deur, maar is cruciaal om kennisvragen en prioriteiten te definiëren.*
- Onderzoek een duidelijke strategie voor de governance en het projectmanagement bij de bouw van een centrale. *Om te voorkomen dat excessieve vertragingen of budgetoverschrijdingen optreden, is het belangrijk om het proces ook organisatorisch goed vorm te geven.*
- Onderzoek de kansen van de bouw van kerncentrales voor de Nederlandse economie. *Deze kennis is van belang voor de bouw en exploitatie van een kerncentrale, omdat hiermee de afweging gemaakt kan worden tussen werkzaamheden die buitenlands aanbesteed moeten worden, en werkzaamheden die met binnenlandse partijen kunnen worden uitgevoerd.*

Daarnaast hebben we enkele vragen geïdentificeerd die wel relevant zijn, maar waarvan kennisontwikkeling in Nederland niet direct onmisbaar is voor de bouw of exploitatie van een kerncentrale.

- Analyseer hoe het best omgegaan kan worden met de materialen in en om een kerncentrale. *Deze kennis zou eventueel ook samen met of door internationale partijen ontwikkeld kunnen worden.*
- Specificeer de ontbrekende randvoorwaarden voor de bouw van kerncentrales, en onderzoek hoe deze ingevuld kunnen worden. *Een aantal keuzes voor de korte termijn zijn op dit vlak al gemaakt. Voor op de langere termijn is het van belang om ook een goed onderbouwde keuze op andere onderwerpen te maken.*

5.5.5 Internationalisering

Een aantal van deze stappen moet Nederland zelf realiseren. Het gaat hier vooral om het identificeren van kansen voor de Nederlandse economie, en het duidelijk afbakenen van het thema. Andere stappen richten zich specifiek op de ontwikkeling in Nederlandse context, maar kunnen met internationale kennis goed ingevuld worden. Denk bijvoorbeeld aan het ophalen van ervaringen van andere landen als het gaat om projectmanagement en governance, en mogelijke financieringsconstructies. Ook kennis met betrekking tot locatiekeuze die in andere landen is gebruikt, kunnen hier worden toegepast. Al deze zaken vragen een specificering naar de situatie in Nederland, maar hebben zeker baat bij het ophalen van kennis uit het buitenland.

5.5.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

Onzekerheden	Maatregelen
Het thema blijft te breed, waardoor het moeilijk is geschikte partijen te definiëren.	Door extra aandacht te besteden aan het afbakenen in dit thema binnen het MMIP.
Het thema krijgt onvoldoende prioriteit waardoor kennis te laat wordt ontwikkeld.	Het thema wordt – ook onder beleidsmakers – regelmatig onder de aandacht gebracht. Door in andere landen uitdagingen bij de bouw en exploitatie van een kerncentrale te identificeren, kunnen deze urgentie krijgen op de Nederlandse agenda.
Nederlandse bouwers hebben of zien negatieve ervaringen en willen niet meer in dit soort grote projecten instappen of bijdragen aan onderzoek.	Opnieuw in gesprek gaan en afspreken hoe omgegaan wordt met risico's, voordelen en nadelen.

5.6 Thema 5: Hoge temperatuur waterstofproductie

5.6.1 Ambitie

Het thema *Hoge temperatuur waterstofproductie* heeft een bijzondere eigenschap. Het is gebaseerd op de inzet van bepaalde soorten kerncentrales die daadwerkelijk de mogelijkheid hebben om een voldoende hoge temperatuur te kunnen genereren waarmee de productie van waterstof efficiënt kan verlopen. Deze centrales zijn nu echter nog niet (commercieel) operationeel en het is nog niet duidelijk of en wanneer hier sprake van zal zijn. De ambitie bij dit thema ligt dan ook vooral om een beter beeld te krijgen onder welke (technische en economische) condities hoge temperatuur waterstofproductie in Nederland aan de orde kan zijn. Er is verder een duidelijke link met systeemkennis (thema 2), te weten op welke wijze waterstofproductie middels kernenergie in het Nederlandse energiesysteem past.

Omdat er duidelijke links zijn tussen deze vorm van hoge temperatuur waterstofproductie en andere vormen van waterstofproductie via kernenergie, is het verstandig om

waterstofproductie middels kernenergie integraal te onderzoeken. Hierbij zijn drie varianten denkbaar:

- **Elektrolyse met stroom van een kerncentrale**. In dit model kan elke kerncentrale (sterker nog: elke bron van elektrische energie) worden ingezet om waterstof te genereren.
- **Elektrolyse met stroom en warmte van een kerncentrale**. In dit model wordt het water eerst voorverwarmd door de warmte die het nucleaire proces in een kernreactor genereert en wordt de stroom uit de kerncentrale ingezet. Hier kan (vanuit technisch perspectief) elk type kerncentrale voor worden ingezet aangezien elke centrale warmte genereert.
- **Hoge temperatuur waterstofproductie.** In dit model wordt door het verhitten van water tot een zeer hoge temperatuur waterstof (en zuurstof) gegenereerd. Alleen bepaalde soorten kerncentrales werken op een dermate hoge temperatuur dat dit mogelijk is.

5.6.2 Stappen

1. De eerste stap die in dit thema gezet zal moeten worden is het simpelweg verkrijgen van (meer) kennis van waterstofproductie via kerncentrales. Het TRL-niveau van hoge temperatuur waterstofproductie is dermate laag dat er meer onderzoek nodig is voor het commercieel ingezet kan worden. Voor de twee andere varianten is er sprake van een laag TRL-niveau van de systemen die kernenergie en elektrolyse integreren. Voor alle drie de opties gaat het om de volgende aspecten die onderzocht kunnen worden: technische vraagstukken, economische haalbaarheid, inpassing in het energiesysteem, veiligheid en juridische aspecten.
2. Voor hoge temperatuur waterstof geldt dat het onderzoek erop gericht moet zijn dat Nederland (als hoge temperatuur waterstofproductie een interessante optie is) andere landen relatief snel kan volgen bij de invoering hiervan. Zelf het voortouw nemen in dit dossier lijkt niet voor de hand te liggen. Het ontwikkelen en bouwen de kerncentrales die nodig zijn voor hoge temperatuur waterstofproductie is redelijkerwijs alleen haalbaar voor landen met decennialange ervaring in dit dossier en de ambitie om door te blijven investeren. Gezien de lange termijnen (2050 en verder) waarover sprake is bij dit thema, is het niet opportuun om vervolgstappen te definieren.
3. Voor de twee varianten waarbij waterstof via elektrolyse op basis van kernenergie wordt gegenereerd, zal de focus veel meer liggen op het ontwikkelen van systemen die commercieel ingezet kunnen gaan worden. SMR’s kunnen hier mogelijk een rol bij spelen. Een specifieke vraag hierbij is hoe de Nederlandse industrie hiervan kan profiteren. Een mogelijkheid kan zijn dat er goedkopere waterstof in Nederland beschikbaar komt, waar de energie-intensieve industrie baat bij heeft. Maar het kan ook door het op de markt brengen van geïntegreerde oplossingen voor deze vorm van waterstofproductie.

5.6.3 Partners

Universiteiten en kennisinstituten zullen vanzelfsprekend een grote rol gaan spelen bij de kennisontwikkeling op dit onderwerp. De volgende partners zijn daarnaast relevant:

Stap / aspecten	Partners	Rollen
Technische vraagstukken	Ontwikkelaars (op het gebied van kerncentrales en	Onderzoek naar: • Nieuwe soorten kerncentrales

Stap / aspecten	Partners	Rollen
	elektrolysers) en wetenschap	• interfaces tussen kerncentrales en waterstofproductie • systemen voor waterstofproductie
Economische haalbaarheid	Mogelijke investeerders Grote afnemers	Onderzoek naar business case Articulatie van de vraag bij bepaald prijsniveau
Inpassing in het energiesysteem	KGG Grote afnemers GroenvermogenNL	Stimuleren van innovatie Onderzoek naar ontwikkeling vraag, aanbod en energiebronnen
Veiligheid	Ontwikkelaars en wetenschap ANVS	Ontwikkeling van fail-safe systemen voor deze technologie
Juridische aspecten	IenW en KGG	Ontwikkeling van juridische kaders voor deze systemen

5.6.4 Termijn

Korte termijn (tot 2035)

Op de korte termijn kan de haalbaarheid van deze systemen worden onderzocht.

Lange termijn (na 2035)

Op de langere termijn kunnen de systemen op basis van elektrolyse ontwikkeld en in gebruik genomen worden. Uiteraard kan dit alleen als er sprake is van een haalbare case. Hoge temperatuur waterstofproductie is iets voor de zeer lange termijn.

5.6.5 Internationalisering

Voor hoge temperatuur waterstofproductie is Nederland sterk afhankelijk van het buitenland. De ontwikkeling van kerncentrales is een sterk internationaal speelveld, waarbij Nederland een kleine rol speelt. Voor de ontwikkeling van elektrolysers geldt hetzelfde, echter in minder mate. De rol van Nederlandse bedrijven is hier groter en groeiende. Het is dus een sterk geïnternationaliseerd thema waarbij Nederland een grote afhankelijkheid heeft van het buitenland. Nederland zou wel een unieke positie kunnen innemen bij *de integratie* van nucleaire technologie en waterstofopwekking.

Internationale deelname aan European Nuclear Cogeneration Industrial Initiative (NC2I), wat onderdeel uitmaakt van het Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP), kan bijdragen aan het uitvoeren van demonstraties ten behoeve van cogeneratie van warmte en elektriciteit en waterstofproductie.

5.6.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

Onzekerheden	Maatregelen
Onduidelijk welke vierde generatie ontwerp kerncentrale leidend wordt en of dit systeem hoge temperatuur waterstofproductie faciliteert.	Geregeld kritisch evalueren in welke mate hoge temperatuur waterstofproductie haalbaar is. Als duidelijk is dat de kans op een positieve business case zeer gering is, het onderzoek hierna afschalen.
Onduidelijk of roze waterstof over enkele decennia kan concurreren met (groene) waterstof.	Geregeld kritisch evalueren in welke mate de business case voor hoge temperatuur

Onzekerheden	Maatregelen
	waterstofproductie positief is. Als duidelijk is dat de kans op een positieve business case zeer gering is, het onderzoek hierna afschalen.
Onduidelijk in welke mate de locatie van SMR's passend is bij (1) afnemers van waterstof of (2) de transportinfrastructuur voor waterstof.	Medio 2025 verschijnt een overheidsvisie op dit vlak. Dit kan meer duidelijkheid geven.

5.7 Thema 6: Materiaalonderzoek

5.7.1 Ambitie

Materiaalonderzoek met behulp van ioniserende straling richt zich op het verbeteren van de veiligheid, betrouwbaarheid en levensduur van nucleaire installaties, door te focussen op de bestendigheid van materialen tegen hitte, straling, chemische interacties en corrosieve omgevingen. Ook wordt ingezet op nieuwe technieken voor het monitoren van materiaaldegradatie, met behulp van geavanceerde meet- en detectietechnieken en kunstmatige intelligentie. Deze technologieën maken nauwkeuriger inschattingen mogelijk en dragen bij aan een langere operationele levensduur van kerninstallaties. Daarnaast kan materiaalonderzoek bijdragen aan innovatieve oplossingen voor het beheer van radioactief afval, de opwerking en mogelijke recycling van (gebruikte) splijtstof, en het gebruik van stralingsbestendige materialen voor transport- en opslagsystemen. Het is de ambitie om deze kennis en de toepassingen daarvan verder te versterken.

Nederland heeft al een sterke basis hebben in de ontwikkeling van innovatieve materialen, waaronder materialen in de procesindustrie en circulaire materialen.[68] Daarnaast werkt Nederland internationaal samen om state-of-the-art-technologieën te ontwikkelen, te demonstreren en toe te passen.

5.7.2 Stappen

Voor het realiseren van deze ambitie zijn de volgende stappen nodig:

1. **Faciliteer onderzoeksinfrastructuur om experimenten mogelijk te maken.** Om hoogwaardig experimenteel onderzoek in nucleaire technologie mogelijk te maken, is het essentieel om de onderzoeksinfrastructuur te versterken en uit te breiden. Dit geeft wetenschappers toegang tot de gespecialiseerde faciliteiten die nodig zijn voor onderzoek naar reactortechnologie, splijtstofcyclus en stralingsgerelateerde experimenten. Dit kan door bestaande faciliteiten te ondersteunen en uit te breiden. Daarnaast is internationale samenwerking essentieel. Door samenwerkingsprogramma's met buitenlandse onderzoeksfaciliteiten en kenniscentra kunnen Nederlandse onderzoekers gebruikmaken van aanvullende mogelijkheden voor experimenten in unieke en grootschalige onderzoeksreactoren en laboratoria (waaronder instituten als ESS). Met een robuuste en gespecialiseerde onderzoeksinfrastructuur kan Nederland een leidende rol spelen in nucleair experimenteel onderzoek en de technologische kennisbasis in reactor- en splijtstofcyclusonderzoek aanzienlijk versterken. Dit legt ook een solide basis voor het opleiden van een nieuwe

[68] Dit bleek onder andere uit een eerdere studie die Dialogic in samenwerking met SEO uitvoerde: 'Groeimarkten voor Nederland'. Twee groeimarkten voor Nederland betroffen (a) innovatieve en hoogwaardige nieuwe materialen in de procesindustrie en (b) circulaire materialen. Ook is Nederlands van oudsher sterk in de metaal- en staalindustrieën.

generatie nucleaire onderzoekers en technici en bevordert innovatieve ontdekkingen die bijdragen aan een veilige, duurzame en efficiënte nucleaire sector. Zie ook de aanbeveling in hoofdstuk 6.3.

2. **Doorlopende onderzoekslijnen voor onderzoek naar nucleaire materialen.** Dit omvat onderzoek naar onder andere brandstoffen (materiaalonderzoek naar brandstoffen heeft een nadrukkelijke link met thema 3), cladding-materialen, koelmiddelen (met in het bijzonder voor niet-watergekoelde reactoren) en moderators/reflectors. Zoek hierbij nadrukkelijk de verbinding met de Strategic Research Agenda op Europees niveau en maak een strategische selectie van agendapunten die relevant zijn voor de Nederlandse context en/of waar Nederland een bijdrage aan kan leveren.
3. **Doorlopende onderzoekslijnen voor onderzoek naar structurele en functionele materialen.** Dit omvat onderzoek naar materialen die bestendig zijn tegen reactoromstandigheden (zoals hitte, straling en corrosie), zoals speciale staalsoorten en corrosiebestendige legeringen, die essentieel zijn voor de veiligheid van bijvoorbeeld reactorvaten en andere structurele componenten van de kerncentrale. Maar ook andere interne reactoronderdelen, leidingen en kleppen. Dit onderzoek moet bijdragen aan de identificatie en ontwikkeling van materialen die bestendig zijn tegen fysieke en chemische belasting, in het bijzonder in moderne (generatie IV-) reactoren.
4. **Onderzoek naar materiaalrecycling en circulariteit.** Stimuleer onderzoek naar circulaire materiaaltoepassingen, zoals de karakterisering en recycling van reactormaterialen. Hierbij kan aandacht gaan naar zowel preventieve maatregelen om bijvoorbeeld activering van materialen (zoals beton) te voorkomen en decontaminatie van geactiveerd materiaal. Preventie in dezen richt zich met name op *newbuilds* (zoals de beoogde generatie III/III+-kerncentrales), maar is ook van toepassing bij de toekomstige ontmanteling van de Kerncentrale Borssele. Dit heeft dan ook een nadrukkelijke link met thema 7.
5. **Gericht onderzoeksprogramma op monitoring- en detectietechnologie.** Dit omvat de ontwikkeling, implementatie en toepassing van (onder andere) sensoren in *newbuilds* en de toepassing van kunstmatige intelligentie om veroudering en degradatie in vroegtijdige stadia te kunnen herkennen en te voorspellen, waarmee de long term operation van kerncentrales gefaciliteerd zou kunnen worden.

5.7.3 Partners

Stap	Partners	Rollen
Faciliteer onderzoeksinfrastructuur om experimenten mogelijk te maken.	Rijksoverheid (incl. het Innovatie Attaché Netwerk van EZ), relevante stakeholders (zoals NRG, DIFFER, TU Delft/RID)	Onderhouden en beschikbaar stellen van onderzoeksfaciliteiten. Onderzoeken wat de Rijksoverheid hierin kan faciliteren (zowel financieel als op het gebied van internationale innovatiesamenwerking met internationale aanbieders van onderzoeksfaciliteiten).
Doorlopende onderzoekslijnen voor onderzoek naar nucleaire materialen.	KGG, MMIP Missieteam, Programmacommissies, onderzoekers op academisch niveau (w.o. universiteiten, kennisinstituten), Urenco, EPZ, COVRA, vendors	Het MMIP Missieteam en/of programmacommissies van onderzoeks- en implementatieprogramma's bieden nadere prioritering aan in de opgehaalde inventarisatie en wijzen concrete prioritaire

Stap	Partners	Rollen
		onderwerpen aan. Aan de hand van beleidsmatige keuzes (cf. stap 1) zal nader ingevuld moeten worden met het veld waar de nadruk op ligt.
Doorlopende onderzoekslijnen voor onderzoek naar structurele en functionele materialen.	KGG, MMIP Missieteam, Programmacommissies, onderzoekers op academisch niveau (w.o. universiteiten, kennisinstituten), Urenco, EPZ, COVRA, vendors, relevante maakindustrie (zoals Delmeco)	Het MMIP Missieteam en/of programmacommissies van onderzoeks- en implementatieprogramma's bieden nadere prioritering aan in de opgehaalde inventarisatie en wijzen concrete prioritaire onderwerpen aan. Aan de hand van beleidsmatige keuzes (cf. stap 1) zal nader ingevuld moeten worden met het veld waar de nadruk op ligt.
Onderzoek naar materiaalrecycling en circulariteit.	Universiteiten, hogescholen, kennisinstituten	Uitvoeren van onderzoek. Operationele en praktijkgerichte aspecten kunnen opgepakt worden door hogescholen.
Gericht onderzoeksprogramma op monitoring- en detectietechnologie.	Universiteiten, hogescholen, kennisinstituten, EPZ, vendors	Uitvoeren van onderzoek en implementatie in pilotprojecten en/of newbuilds.

5.7.4 Termijn

Het is lastig om strak te differentiëren tussen de korte en lange termijn op het gebied van materiaalonderzoek, aangezien dit onderwerp zich continu ontwikkelt en doorlopend relevant is.

Korte termijn (tot 2035)

Voor de korte termijn is het vooral essentieel dat er meer duidelijkheid komt over de Nederlandse langetermijnambities op het gebied van kernenergie, zodat het materiaalonderzoek en de daarvoor beschikbare middelen gericht ingezet kunnen worden. Ook is het van belang dat er zorg wordt gedragen voor het faciliteren van voldoende adequate onderzoeksinfrastructuur. Nederland kent al diverse onderzoeksfaciliteiten. Met name het voorzien in voldoende financiering om de toegankelijkheid en beschikbaarheid van faciliteiten te borgen en eventueel te vergroten speelt hierin een rol.

Ook de ontwikkeling van circulaire materiaaltoepassingen en monitoring- en detectietechnologie is relevant op de korte termijn, evenals onderzoek naar innovatieve materialen die kunnen bijdragen aan het veilig ontwerpen en exploiteren van nieuwe generaties kerncentrales. De kennis die hierbij wordt opgedaan, kan direct worden toegepast in huidige en geplande centrales.

Lange termijn (vanaf 2035)

Het bovenstaande onderzoek draagt er ook aan bij dat Nederland op de lange termijn in kan blijven spelen op nieuwe ontwikkelingen. Een concreet onderzoeksthema wat in dit opzicht relevant kan zijn is onderzoek naar het gedrag van materialen, zoals van gesmolten zouten.

5.7.5 Internationalisering

Nederland zou er goed aan doen binnen het thema materiaalonderzoek voor kernenergie in te zetten op een gecombineerde strategie van internationale samenwerking en nationale specialisatie. Hoewel Nederlandse kennisinstellingen en bedrijven een sterke basis hebben in de ontwikkeling van innovatieve materialen, is internationale samenwerking essentieel om het brede scala aan benodigde expertise en technologieën verder op te bouwen. Door bijvoorbeeld actief deel te nemen aan internationale onderzoeksprogramma's en kennisuitwisseling met toonaangevende landen kan Nederland toegang krijgen tot kritische inzichten en technologieën. Tegelijkertijd kan Nederland specifieke niches verkennen waarin het kan excelleren en daarmee internationaal waarde toevoegen.

Denk aan aansluiting bij gremia, platforms, consortia en onderzoeksagenda 's, zoals hieronder opgesomd. Nederland is overigens reeds bij veel van deze gremia aangesloten.

- Strategic Research Agenda van de Joint Programme on Nuclear Materials (JPNM) van de European Energy Research Alliance (EERA)
- ORIENT-NM (vervolg op CONNECT-NM)
- Onderzoeksreactoren SCK CEN voor materiaalonderzoek[69]
- International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented NEutron Source (IFMIF-DONES)
- European Consortium for the Development of Fusion Materials (EUROfusion)
- European Spallation Source (ESS)
- Euratom Research and Training Programme
- Coordinated Research Projects van het Internationaal Atoomagentschap IAEA

5.7.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

Onzekerheden	Maatregelen
Technologische doorbraken kunnen later plaatsvinden dan verwacht, waardoor de ontwikkeling langer duurt.	Ontwikkel flexibele onderzoeksprogramma's om te kunnen divergeren wanneer dat nodig blijkt, in plaats van deze vast te zetten op specifieke technologieën.
Nederland wordt te afhankelijk van internationale partners of vindt onvoldoende aansluiting.	Internationale samenwerking is van belang, maar te grote afhankelijkheid of onvoldoende in staat zijn om die samenwerking te realiseren kunnen risico's opleveren. Nederland kan dit mitigeren door een robuust netwerk op te bouwen met meerdere partners en door ook kennis intern op te bouwen. Het borgen van voldoende middelen kan bovendien als een randvoorwaarde fungeren bij het vormgeven van de samenwerking, bijvoorbeeld wanneer er voorwaarden worden gesteld aan samenwerking zoals het leveren van een financiële bijdrage.

[69] Zie https://www.sckcen.be/nl/infrastructuur voor de infrastructuur van SCK CEN.

5.8 Thema 7: Verwerking & opslag van radioactief afval en geologische eindberging

5.8.1 Ambitie

De ambitie ten aanzien van dit thema is zorgen dat radioactieve afvalstromen voor de korte en lange termijn zo efficiënt mogelijk veilig beheerd blijven en deze (redelijkerwijs) door het ontwerp en bij het runnen en de ontmanteling van kerncentrales zo veel mogelijk beperkt en hergebruikt worden. Het is in dit verband nodig om inzicht te krijgen welke verwachtingen er over radioactieve afvalverwerking leven onder het brede publiek en andere betrokkenen.

5.8.2 Stappen

Voor het realiseren van deze ambitie zijn de volgende stappen nodig:

1. Verrichten van **onderzoek** naar welke verschillende **vormen van verwerking, opslag en berging van Nederlandse radioactieve reststromen** mogelijk zijn en wat de voor- en nadelen zijn van deze verschillende vormen, vooral wat betreft risico's ("safety cases"-studies), maar bijvoorbeeld ook wat betreft noodzakelijke infrastructuur, transport, opslagruimte, verpakking en kosten.
2. Verrichten van onderzoek naar de **maatschappelijke aanvaardbaarheid** die er voor deze verschillende vormen van afvalverwerking, -opslag en –berging bestaat.
3. Organisatie van een **transparant, inclusief en stapsgewijs besluitvormingsproces** over de verwerking, opslag en berging van radioactieve reststromen eventueel uitmondend in een maatschappelijk afsprakenkader (overheid, burgers en bedrijven) over verwerking, opslag en eindberging.
4. Door bij het ontwerp en ontmanteling van kerncentrales in te zetten op **technologieën** die de **hoeveelheid radioactieve reststromen** gedurende de levensduur van een kerncentrale (ontwerp, bouw, exploitatie en ontmanteling) **minimaliseren.** Daarbij ook inzetten op technologieën die efficiënt hergebruik van radioactieve reststromen mogelijk maken en/of verwerkings- en opslag-, bergingsoplossingen die het mogelijk maken radioactieve reststromen in een later stadium te neutraliseren.
5. Inzichtelijk maken van de **langetermijnkosten** van de gekozen methode voor verwerking, opslag en berging en zorgen dat deze kosten gedekt zijn.

5.8.3 Partners

Stap	Partners	Rollen
Onderzoek naar verschillende vormen van verwerking, opslag en berging van Nederlandse radioactieve reststromen	Kennisinstellingen, afvalorganisatie(s) (COVRA), overheid (ministeries, regionale partijen (alle overheidslagen) en toezichthouder)	Kennisinstellingen voeren onderzoek uit in samenwerking met bedrijven (bijvoorbeeld nucleaire afvalbergers, laboratoria, transporteurs, etc.) Overheid als opdrachtgever
(Participatief) Onderzoek naar de maatschappelijke aanvaarding verschillende vormen van afvalverwerking, –opslag en –berging	Overheid, onderzoekers, (maatschappij/civil society), afvalorganisatie	Overheid als opdrachtgever en gebruiker van het onderzoek Onderzoekers als uitvoerder van het onderzoek Burgers als respondent/actief deelnemer van het onderzoek Afvalorganisatie als technisch expert

Stap	Partners	Rollen
Transparant, inclusief en stapsgewijs besluitvormingsproces	Overheid (o.a. IenW), burgers, politiek, experts (bijv. COVRA), belanghebbenden, (sociale) media	Organiseren van besluitvormingsproces, kennis leveren voor het besluitvormingsproces, deelnemen aan het besluitvormingsproces en zorgen voor disseminatie
Technologieën voor minimaliseren en hergebruik van radioactieve reststromen	Kennisinstellingen, radioactief-afvalorganisatie, overheid, exploitanten kerncentrales	Kennisinstellingen voeren onderzoek uit in samenwerking met bedrijven (bijvoorbeeld radioactief-afvalorganisaties, laboratoria, transporteurs, etc.) Overheid als opdrachtgever
Dekking lange termijnkosten afvalberging	Overheid, exploitanten kerncentrales	Financier

5.8.4 Termijn

Korte termijn (tot 2035)

De meeste stappen kunnen op korte termijn worden gestart. Nederland heeft immers al ervaring met de verwerking en opslag van radioactief afval. Deze kennis kan ingezet en uitgebouwd worden bij de bouw van nieuwe centrales. Het is bij de bouw van deze nieuwe centrales noodzakelijk om bij het ontwerp kennis te verwerken die ertoe leidt dat radioactieve restproducten geminimaliseerd dan wel hergebruikt kunnen worden. Het is daarbij van belang dat de maatschappelijke aanvaardbaarheid voor de verschillende vormen bekend is en dat er ook politieke (en dus ook financiële) steun bestaat voor gekozen oplossingen. Wat dat betreft zou er vooral gestart moeten worden met een inclusief besluitvormingsproces rondom afvalverwerking en -opslag zodat de maatschappelijke aanvaarding gestimuleerd wordt.

Lange termijn (vanaf 2035)

Voor de lange termijn is het van belang dat er continu onderzoek wordt gedaan naar betere, veiligere en efficiënte mogelijkheden voor de verwerking en berging van radioactief afval. De keuzes daartoe worden op korte termijn gemaakt, maar de technologieën hiervoor zullen ongetwijfeld verder ontwikkeld en verbeterd worden (waarbij het tempo en de richting ervan niet voorspelbaar zijn).

5.8.5 Internationalisering

Alle landen die kernenergie gebruiken, hebben te maken met de verwerking, opslag en berging van radioactief afval en doen er dus ook onderzoek naar. Dit is bij uitstek een vraagstuk dat internationale aandacht heeft. Nederland kan binnen dit thema dus kennis gebruiken die hierover in het buitenland wordt ontwikkeld en – bij veel onderzoek en ervaring in eigen land – delen met andere landen.

Voor geologische eindberging van radioactief afval kan Nederland leren van de ervaringen in België, Frankrijk, Finland, Zweden en Zwitserland. Voor opwerking van hergebruik en ook opslag is het raadzaam om internationaal samenwerkingsverbanden op te zetten om krachten te bundelen (en daarmee ook efficiënter werken). Te denken valt bijvoorbeeld aan

schaalvoordelen bij de implementatie van technologische oplossingen of gezamenlijk afvalbeheer. Ook kan aangesloten worden bij internationale onderzoeksprogramma's en platforms – zoals Implementing Geological Disposal of radioactive waste Technology Platform (IGD-TP) en EU Joint Programme on Radioactive Waste Management (EURAD) – en zal Nederland moeten voldoen aan internationale afspraken over afvalverwerking en -opslag. Als onderdeel van EURAD wordt ook de School of Radioactive Waste Management aangeboden, waarmee trainingen worden aangeboden waar studenten en PhD's kunnen deelnemen. Ook kan er mogelijk voortgebouwd worden op het onlangs afgeronde EU-project PREDIS (Euratom).

5.8.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

Onzekerheden	Maatregelen
De politieke en maatschappelijke steun voor kernenergie daalt (sterk) (zie ook thema 8) waardoor de steun voor de verwerking en berging van radioactief afval afneemt.	Overheid en afvalbedrijven moeten paraatheid tonen en bevolking goed informeren over de veiligheid van de gekozen oplossingen voor de verwerking en berging van radioactief afval.
Verwachtingen over het minimaliseren en hergebruiken van radioactief afval kunnen niet worden waargemaakt waardoor de hoeveelheid radioactief afval meer toeneemt dan maatschappelijk wordt geaccepteerd.	Overheid en bedrijven moeten hierover transparant zijn en burgers laten meedenken over oplossingen.

5.9 Thema 8: Perceptie, communicatie en draagvlak

5.9.1 Ambitie

De ambitie ten aanzien van dit thema moet worden gezien in het licht van het overheidsbesluit om kernenergie een (groter) onderdeel te laten uitmaken van de Nederlandse energiemix. De overheid streeft daarbij naar een maximale acceptatie van haar besluit. Dit wil zij bereiken door de bevolking en partijen uit het ecosysteem te betrekken bij de wijze waarop deze ambitie wordt vormgegeven waarbij aandacht is voor de gehele levenscyclus (van idee tot ontwerp, bouw, reactorbedrijf en afsluiting van kerncentrales).

Daartoe organiseert de overheid een participatief en inclusief besluitvormingsproces dat de bevolking en partijen uit het kernenergieecosysteem continu betrekt bij publieke beslissingen over kernenergie (en alle aspecten die daarbij komen kijken). Dit met het oog op het opbouwen van een publiek vertrouwen in de overheid en aanvaardbaarheid van kernenergie voor de lange termijn. In dialoog met de bevolking en betrokken partijen verwerft de overheid een beter beeld verworven van kennis, houding en gedrag van het publiek ten opzichte van kernenergie. Dit betreft geen momentopname, maar kan tijdens ontwerp, bouw, gebruik en ontmanteling van kerncentrales continu gevolgd worden. Voor de aanvaarding (draagvlak) van kernenergie van belang dat kerncentrales en de verwerking en opslag van radioactief afval op specifieke locaties economisch, maatschappelijk en ruimtelijk goed ingepast worden.

5.9.2 Stappen

Voor het realiseren van deze ambitie zijn de volgende stappen nodig:

1. **Organiseren van een participatief en inclusief besluitvormingsproces** waarbij de bevolking, maatschappelijke organisaties en partijen uit het ecosysteem kernenergie hun mening, kennis en ervaring kunnen inbrengen in publieke besluitvorming over de rol van kernenergie in de Nederlandse energiemix, over

kerncentrales en over de verwerking, opslag en berging van radioactief afval. Dit moet een open proces zijn waarbij de uitkomst niet van tevoren vaststaat. Hierbij kan aangesloten worden bij het recente advies van het Rathenau Instituut. [70] Kijk hierbij ook naar ervaringen met dit type besluitvormingsprocessen in andere sectoren in Nederland (denk aan de totstandkoming van de Omgevingswet).

2. **Monitoren van opvattingen van de Nederlandse bevolking** over de energietransitie, kernenergie en de verwerking, opslag en berging van radioactief afval. Betrek doelgroep van de monitor ook bij het samenstellen van de monitor (zodat zij alle relevante aspecten meet).
3. **Ontwikkelen van een aanvaard afsprakenkader voor de maatschappelijke, ruimtelijke en economische inpassing van kernenergie** en de verwerking en opslag van radioactief afval. De intentieverklaring Rijk-Regiopakket Nieuwbouw Kerncentrales kan hier als voorbeeld voor dienen. Van belang is dat burgers ook betrokken worden bij het opstellen van dit afsprakenkader.
4. **Regisseren dat de bevolking toegang heeft tot en beschikking krijgt over betrouwbare kennis over kernenergie en radioactief afval** (opbouwen van "empowerment"[71] en wegnemen van eventuele barrières). Partijen uit het ecosysteem kernenergie dragen hieraan bij door openheid (delen wat een organisatie doet) en transparantie (delen waarom een organisatie dat doet).

5.9.3 Partners

Stap	Partners	Rollen
Participatief en inclusief besluitvormingsproces	Burgers, politiek, experts (bijv. COVRA en experts participatieve processen), belanghebbenden, maatschappelijke organisaties, (sociale) media	Organiseren van besluitvormingsproces, kennis leveren voor het besluitvormingsproces, deelnemen aan het besluitvormingsproces
Monitoren van opvattingen van de Nederlandse bevolking over kernenergie	Overheid, onderzoekers, maatschappij/civil society	Overheid als opdrachtgever en gebruiker van de monitor Onderzoekers als uitvoerder van de monitor Burgers als medeontwerper en respondent van de monitor
Aanvaard afsprakenkader	Rijk, gemeenten, provincies en burgers	Ontwikkelen van een pakket van maatregelen dat uitgaat van het (zoveel mogelijk) mitigeren van negatieve gevolgen en tegelijkertijd inspelen op gezamenlijke kansen en belangen voor de toekomst van een regio waar een kerncentrale wordt gebouwd en/of radioactief afval wordt verwerkt en opgeslagen
Toegang tot en beschikking over kennis over kernenergie	Overheid, partijen uit het ecosysteem kernenergie, (sociale)	Geïnformeerd deelnemen aan bijvoorbeeld publieke

[70] Rathenau Instituut (2024), *Nu samen stappen maken. Advies voor het besluitvormingsproces over het langdurig beheer van radioactief afval*, Den Haag.

[71] Hiermee bedoelen we dat burgers op basis van uiteenlopende informatiebronnen zelfvertrouwen en zelfbewustzijn over kernenergie ontwikkelen.

Stap	Partners	Rollen
en radioactief afval (empowerment)	media, bevolking, kennisinstellingen, communicatie-experts	besluitvorming en het opbouwen en delen van kennis over kernenergie Delen van kennis kan ook open dagen van nucleaire faciliteiten betreffen

5.9.4 Termijn

Korte termijn (tot 2035)

Vrijwel alle voorgestelde vier stappen kunnen op korte termijn worden gestart waarbij de doorlooptijd van sommige stappen langer kan zijn (bijvoorbeeld het monitoren van opvattingen over kernenergie). De besluitvorming over kernenergie is eigenlijk al gaande (in de politiek), maar zou wat betreft participatie en inclusie nog een stap verder kunnen gaan. Bijvoorbeeld bij beslissingen over de ruimtelijke en maatschappelijke inpassing van kerncentrales of over hoe om te gaan met radioactief afval (zie ook thema 7). Ook het monitoren van de publieke opinie kan worden gestart. Dit betekent dat het regisseren van de brede toegang tot en beschikbaarheid van kennis over kernenergie ook gestart kan worden (inclusief een afspraak over wie deze regisseursrol krijgt).

Het afsprakenkader zou later van start kunnen gaan. Het afsprakenkader geldt voornamelijk voor regio's waar kerncentrale gebouwd gaan worden (nu nog niet bekend voor alle vier).

Lange termijn (vanaf 2035)

Voor de lange termijn gelden vooral de stappen die een langere doorlooptijd hebben zoals het monitoren, het afsprakenkader en het zorgen voor empowerment, transparantie en openheid. Er bevinden zich onder deze vier stappen geen zaken die pas na 2035 opgepakt hoeven te worden. Belangrijkste advies is om permanent voeling te houden met de publieke acceptatie van en vertrouwen in kernenergie.

5.9.5 Internationalisering

Nederland is voor dit thema niet afhankelijk van het buitenland, maar het is natuurlijk goed om te kijken welke ervaringen in andere (Europese) landen zijn opgedaan met monitors, besluitvorming en informatievoorziening/empowerment (o.a. in België, Finland, het VK en Zweden). België kent bijvoorbeeld een monitor over kernenergie en beschikt over een bezoekers- en ontmoetingscentrum over radioactief afval en radioactiviteit (Tabloo in Dessel). Ook COVRA is een dergelijk centrum.

Het is verplicht om bij de bouw van kerncentrales in de buurt van de grenzen met buurlanden rekening te houden met de gevoeligheden die bij de bevolking daar kunnen leven (dit is geregeld in het Verdrag van Espoo).

5.9.6 Onzekerheden en mitigerende maatregelen

In de volgende tabel noemen we enkele onzekerheden en welke maatregelen er mogelijk zijn.

Onzekerheden	Maatregelen
Er doet zich een nucleair incident of ongeval voor als Fukushima of Tsjernobyl waardoor publieke steun voor kernenergie sterk afneemt.	Zorg dat er bij de bouw van nieuwe centrales maximale veiligheid wordt nagestreefd en communiceer daarover. Ook kan de overheid sturen op paraatheid (opstellen van en oefenen met plannen rondom incidenten en ongevallen). Tegelijkertijd kan een incident of ongeval leiden tot een democratisch besluit over een andere (kleinere) rol van kernenergie.
De hoge (financiële) kosten die gepaard gaan met de bouw van nieuwe kerncentrales roepen maatschappelijke weerstand op.	Goed sturen op het beperken van budgetoverschrijdingen. Ook inzichtelijk maken welke financiële voordelen de bouw oplevert voor de samenleving als geheel.
Informatie-asymmetrie tussen betrokken partijen.	Zorg dat alle betrokkenen (inclusief het brede publiek) toegang hebben tot alle relevante informatie over kernenergie dan wel in staat worden gesteld informatie hierover te delen.
Zelfselectie in de maatschappelijke dialoog en participatieve en inclusieve besluitvormingsprocessen leidt ertoe dat niet alle meningen worden gehoord of meetellen.	Organisatoren en deelnemers aan de dialoog moeten er continu op letten dat deze processen niet gedomineerd worden door specifieke politieke, maatschappelijke of economische belangen en dat iedereen ruimte krijgt deel te nemen aan het debat.

6 Aanbevelingen

In dit laatste hoofdstuk presenteren we enkele aanbevelingen. Deze aanbevelingen zijn afkomstig uit de gesprekken die met een groot aantal personen en organisaties in verschillende modaliteiten (interviews, workshops, et cetera) zijn gevoerd. Dit hoofdstuk moet gezien worden als inspiratie voor toekomstig aanpalend beleid.

6.1 Versterk programma's voor onderwijs en training

Een sterk onderwijs- en opleidingskader is essentieel voor het behoud en opschaling van een gekwalificeerde beroepsbevolking in de nucleaire sector. Er is vanuit het veld een sterke behoefte aan opschaling van de human capital gearticuleerd. Immers: zonder de benodigde mensen kan er geen invulling gegeven worden aan de uitdagingen. Technopolis heeft onderzoek gedaan naar de humancapitalcomponent van het MMIP. Voor de daaraan gerelateerde conclusies en aanbevelingen verwijzen we dan ook naar dat rapport. De human capital component hangt echter ook samen met kennis en innovatie en geldt daarmee tevens voor de onderzoekscomponent die in deze studie is onderzocht. Verscheidene stakeholders hebben aangegeven de komende jaren in eerste instantie in te willen zetten op het opschalen van hun teams met nieuw talent, waaronder PhD's, om voldoende uitvoeringscapaciteit op te bouwen. Dit vergt tijd en middelen.

Het is daarnaast aan te raden om aan een gemeenschappelijke grond te werken. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden door de 'nuclear taxonomy' van de Human Resources Observatory van het JRC te hanteren.[72] Hiermee kunnen alle betrokkenen dezelfde taal spreken over welke kennis en competenties nodig zijn voor bepaalde beroepen en functies in het nucleaire veld. Dit kan de ontwikkeling van specifieke competenties bevorderen. Het is verder aan te raden dat Nederland hierin samenwerkt met internationale partners en netwerken, zoals ENEN (European Nuclear Education Network), ETSON (European Technical Safety Organisations Network), EUTERP (European Training and Education in Radiation Protection Foundation), FORATOM (European Atomic Forum) en FUSENET (European Fusion Education Network).

6.2 Stimuleer samenwerking

6.2.1 Nationaal

Voor het realiseren van de Nederlandse ambities voor kernenergie is samenwerking tussen een groot aantal verschillende actoren van groot belang. Het is belangrijk dat deze partijen elkaar kunnen vinden en openstaan voor samenwerking. Voor landelijke samenwerking is het verder belangrijk dat duidelijk is waar de expertises liggen van de verschillende kennis- en onderwijsinstellingen. Mbo-instellingen, hbo-instellingen en universiteiten kunnen samenwerken om benodigde kennisoverdracht te organiseren. Daarnaast kunnen kennisinstellingen, de nucleaire sector, de Nuclear Academy, andere stakeholders zoals VNO-NCW en bestaande onderzoeksprogramma's (zoals die van DIFFER, COVRA, NRG, PALLAS, TNO, TUD en RIVM) betrokken worden bij dit geheel.

Het lijkt goed om bij het kennis- en innovatieprogramma expliciet aandacht te hebben voor de toegevoegde waarde van de hogescholen. Een deel van de kennisvragen die in hoofdstuk

[72] Eriksson & Eriksen (2023). Job Classification and Taxonomy in the Nuclear Sector. [joint-research-centre.ec.europa.eu]

4 aan de orde kwamen, zijn bij uitstek geschikt om door hogescholen te worden opgepakt. Hogescholen kunnen bijdragen middels praktijkgericht onderzoek aan dit thema, o.a. op het gebied van ruimtelijke ordening, wegeninfrastructuur, emergency response preparedness, integratie in het energiesysteem, veiligheid, netcongestie, ontmanteling, civieltechnische aspecten – en dan met name met een koppeling met de regionale context.

Ook adviseren we om tot een goede afstemming te komen welk onderzoek men met betrekking tot SMR's in het MMIP wil beleggen en wat er wordt uitgevoerd in het kader van de Programma-aanpak SMR. De rol van SMR's met betrekking tot de grote industrieclusters in Nederland (cf. een motie van het lid Bontenbal c.s.; Kamerstuk 32645, nr. 111) en de wensen vanuit provincies is bijvoorbeeld voorzien als onderdeel van de programma-aanpak (Kamerstuk 32645, nr. 123). Anderzijds kan er eventueel ook gekozen worden om onderzoeksmiddelen die zijn gealloceerd aan de programma-aanpak, in te zetten op onderzoek ten behoeve van SMR's binnen het MMIP.

MMIP en cross-links tussen de thematische roadmaps

Tijdens de inventarisatie is een breed aantal inzichten opgehaald die hun weg vonden naar de roadmaps. Het detailniveau van de kennisvragen varieert echter en vergt mogelijk een diepgaandere prioritering om concrete en gerichte onderzoeksprogramma's in te kunnen richten. In sommige gevallen vereist dit ook beleidsmatige keuzes die in deze studie niet gemaakt kunnen worden. Ons advies is om hier nader invulling aan te geven via het Missieteam en/of eventuele programmacommissies.

Ook zouden er – als laag onder het Missieteam – thematische werkgroepen georganiseerd kunnen worden, waardoor een bredere groep stakeholders input kan meegeven aan de leden van het Missieteam en nationale samenwerking geborgd kan worden. Tijdens onze werksessies is geconstateerd dat er behoefte is aan periodieke stakeholdersbijeenkomsten. Ook is het te overwegen om interdisciplinaire werkgroepen te organiseren, waarin experts uit verschillende thema's samenwerken aan thema-overlappende vraagstukken. Hoewel de MMIP-thema's afgebakend zijn, zijn ze niet in alle gevallen wederzijds exclusief. Door ervoor te zorgen dat de roadmaps niet geïsoleerd functioneren kan het Missieteam een samenhangend effectief onderzoeksnetwerk bevorderen.

Samenhangende aanpak

Er zou verkend kunnen worden in welke mate er behoefte is aan een landelijke structuur en coördinatie van kennis in het nucleaire domein. Voor de betrokkenheid van de Nederlandse industrie is de creatie van een platform waar bedrijven en kennisinstellingen met elkaar in contact komen mogelijk interessant. Voor een samenhangende aanpak kan een organisatie worden opgericht die het resulterende kennisconsortium (welke onderzoek gaat doen in het kader van het MMIP) gaat begeleiden. Daarbij moet ook worden gekeken hoe dit consortium uiteindelijk gaat samenwerken met het bouwconsortium dat de daadwerkelijke centrale bouwt.

Maatschappelijke betrokkenheid

De inzet van kernenergie roept maatschappelijke reacties op en vraagt om een responsieve en open overheid die accuraat omgaat met verschillende en soms zelfs conflicterende signalen uit de samenleving. De vraag over de rol die kernenergie in de bredere energiemix zou moeten spelen en beslissingen over de bouw, reactorbedrijf en ontmanteling van kerncentrales (en het beheer van radioactieve reststromen) kan niet alleen achter tekentafels van politici, experts en (kernenergie)bedrijven beantwoord worden. Deze en andere rapportages bieden een kans om met de samenleving (burgers, maatschappelijke organisaties) een dialoog te voeren over genoemde onderwerpen.

6.2.2 Internationaal

Als Nederland internationaal wil samenwerken, dan moeten we andere landen ook iets te bieden hebben. We kunnen enkel meedoen in internationale gremia en werkgroepen als we een solide kennisbasis hebben. We zullen in Nederland een solide kennisbasis moeten opbouwen. Als Nederland een aantal specialisaties ontwikkelt, worden we juist interessant voor internationale partijen. Nu Nederland een hernieuwde nucleaire toekomst van 40 tot 100 jaar heeft, hebben we een groter belang om internationaal mee te denken en mede de richting te bepalen. Dit vereist expertise op een voldoende hoog niveau en ook genoeg omvang van die nucleaire expertise.

Internationale samenwerking kent in het nucleaire domein twee gezichten. Aan de ene kant is het essentieel om kennis, expertise en ervaringen uit te wisselen met andere landen. Aan de andere kant is (bij specifieke landen) ook voorzichtigheid geboden in verband met bescherming van intellectueel eigendom en spionage. Ook het aantrekken van (internationaal) talent en onderwijs koppelen met het bedrijfsleven kan daarom risico's met zich meebrengen. Nederland werkt internationaal al veel samen, bijvoorbeeld in:

- MYRRHA, European Spallation Source (ESS), IFMIF-DONES
- EU Industriële SMR Alliantie
- Generation IV International Forum (GIF).
- European Repository Development Organisation (ERDO).
- Platforms: Euratom, SNETP, IGDTP, MEENAS, Nuclear Europe
- Onderzoeksinstellingen: ANL, CEA, ENEA, JAEA, KAERI, KIT, NNL, PSI, SCK CEN, VITO, VTT, CERN
- IAEA, OECD/NEA/IEA, Euratom

Internationale samenwerking lijkt ook voor de hand te liggen als het gaat om training programma's met betrekking tot de exploitatie van kerncentrales. Samenwerking zou verder uitgediept kunnen worden in:

- Bilaterale samenwerkingsverbanden met de landen waaruit de beoogde vendors komen, te weten Zuid-Korea, Verenigde Staten en Frankrijk.
- Formaliseren en institutionaliseren van samenwerkingsverbanden met landen als België, Tsjechië, VK, Duitsland, Zweden, Zwitserland.

6.3 Zorg voor hoogwaardige faciliteiten en adequate coördinatie

De ontwikkelingen op het gebied van kernenergie in Nederland vereisen state-of-the-art onderzoeks- en onderwijsfaciliteiten. Nederland kent al verscheidene faciliteiten, waaronder een actinidenlab (NRG en JRC), hot cell laboratory (NRG), High Flux Reactor (NRG; gaat sluiten), gammastralingfaciliteit (NRG), medische isotopenreactor (NRG|PALLAS), onderzoeksreactor RID/TU Delft, Magnum-PSI (DIFFER), Ion Beam Facility (DIFFER) en DICE (DIFFER). Ook verwelkomde EPZ eind 2024 een eigen control room simulator voor on-site trainingen; deze simulator is een exacte kopie van de control room van de Kerncentrale Borssele en biedt operators de mogelijkheid om in een levensechte omgeving te oefenen.

Het is te overwegen om de faciliteiten in Nederland te versterken ten behoeve van de ambities op het gebied van kernenergie. In 2020 schreef Rathenau Instituut een kritisch rapport over faciliteiten ten behoeve van materiaalonderzoek. Hieruit bleken twee centrale knelpunten: (1) een gebrek van financiering voor de bemensing en het onderhouden en updaten van infrastructuur en (2) een gebrek aan coördinatie binnen de onderzoeksgemeenschap en de

financiers.[73] Dit vraagt om voldoende budget om state-of-the-art experimentele faciliteiten te ontwikkelen en te onderhouden, en een adequate coördinatie om de bestaande infrastructuur zo optimaal mogelijk te benutten en in te zetten.

6.4 Borg opgedane kennis zorgvuldig

Kennisplatform en kennismanagement

Het kennis- en innovatieprogramma gaat leiden tot de ontwikkeling van kennis. In dit kader is het belangrijk dat de kennis ook geborgd wordt. Om samenwerking en innovatie te bevorderen, zou Nederland een gecentraliseerd en toegankelijk (digitaal) **kennisplatform** voor nucleaire kennis kunnen opzetten. Dit platform kan dienen als een uitgebreide databank met onderzoekspublicaties, experimentele data, operationele inzichten en best practices. Toegang moet zorgvuldig worden beheerd om openheid te balanceren met beveiliging, zodat gevoelige informatie adequaat wordt beschermd.

Een **kennismanagementsysteem** kan bijdragen aan het delen en onderhouden van kennis. Er wordt veel data geproduceerd via onderzoek, maar deze data worden vaak opgeslagen in verschillende databases, waardoor het risico bestaat dat deze data verloren gaan of niet gevaloriseerd kunnen worden. Als er geen bezwaren zijn vanuit nationale veiligheid, wordt onderzoek via open access gedeeld. Dit vraagt om afspraken over de manier waarop data het best ingezet en gedeeld kunnen worden om vervolgonderzoek en valorisatie door derden mogelijk te maken; dit vraagt ook om goed kennismanagement. Verder kan er worden nagedacht in welke mate de deelname aan dit systeem een eis is bij het verkrijgen van middelen.

Dissemineren van kennis

Evenementen, zoals workshops en conferenties, kunnen de dialoog tussen onderzoekers, beleidsmakers en industrieprofessionals verder versterken en ideeënuitwisseling stimuleren. Het beschikbaarstellen van open data en het publiceren van belangrijke bevindingen kan de transparantie vergroten en het vertrouwen van het publiek en internationale gemeenschap in het Nederlandse nucleaire programma versterken.

Learning communities (samenwerkingen tussen onderzoek, onderwijs en bedrijfsleven) zijn belangrijk voor de ontwikkeling van het kennis- en innovatiesysteem. Het kan ook helpen om gespecialiseerde taskforces, werkgroepen of comités op te richten. Organisaties binnen het ecosysteem kunnen hiervoor afgevaardigden aanwijzen.

6.5 Valoriseren van kennis

De valorisatie van kennis en innovatie is essentieel om onderzoeksresultaten om te zetten in praktische toepassingen. Kaders en stimulansen om commercialisering te bevorderen, waaronder de samenwerking tussen onderzoeksinstellingen, industrie en startups, en financiering voor pilots en demonstraties, evenals ondersteuning bij intellectueel eigendomsbeheer zouden hieraan bij moeten dragen.

[73] Jos van den Broek & Jasper Deuten (2020). Onderzoeksinfrastructuur voor Materialen in Nederland – Knelpunten en oplossingen in beeld naar aanleiding van ADEM-rondetafelbijeenkomst. Den Haag: Rathenau Instituut. [rathenau.nl]

6.6 Continuïteit borgen

Tijdens de Voorjaarsbesluitvorming 2024 zijn de gereserveerde middelen voor het MMIP toegekend. Deze middelen zijn tot en met 2030 beschikbaar voor de versterking van de nucleaire kennis- en innovatiestructuur en de uitvoering van het MMIP Kernenergie (Kamerstuk 32645, nr. 128). Eventuele verdere (structurele) financiering na 2030 is aan het huidige of een volgend kabinet (Kamerstuk 32645, nr. 120). We achten het van belang om nu al aandacht te besteden aan de continuïteit van de nucleaire kennisagenda zodat deze ook na 2030 geborgd kan worden. Op deze manier kan men effectief inzetten op langjarige trajecten en biedt het stakeholders een perspectief, wat kan bijdragen aan hun commitment.

Bijlage 1. Lijst met stakeholders

Niet-uitputtende lijst met relevante stakeholders in het Nederlandse nucleaire ecosysteem.

Categorie	Organisatie
Overheid	Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)
Overheid	Ministerie van Economische Zaken (EZ)
Overheid	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW)
Overheid	Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS)
Overheid	Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OCW)
Overheid	Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW)
Overheid	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS)
Overheid	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
Overheid	Rijkswaterstaat (RWS)
Overheid	Waterschappen
Overheid	Provincies
Overheid	Gemeenten
Overheid	Europese Commissie (JRC, Euratom, Horizon Europe)
Overheid	Internationaal Atoomagentschap (IAEA)
Overheid	OECD (Nuclear Energy Agency, NEA)
Overheid	NWO
Netbeheerders	TenneT
Netbeheerders	Regionale netbeheerders
Onderwijsinstellingen	TU Delft (ook onderzoeksinstelling Reactor Institute Delft, RID)
Onderwijsinstellingen	TU Eindhoven
Onderwijsinstellingen	Rijksuniversiteit Groningen (ook onderzoeksinstelling Energy and Sustainability Research Institute Groningen, ESRIG)
Onderwijsinstellingen	Universiteit Utrecht
Onderwijsinstellingen	Universiteit Twente
Onderwijsinstellingen	Nuclear Academy
Onderwijsinstellingen	Hogeschool Zeeland
Onderwijsinstellingen	Hogeschool Rotterdam
Onderwijsinstellingen	Avans Hogeschool
Onderwijsinstellingen	Saxion Hogeschool
Onderwijsinstellingen	Hogeschool Zeeland
Onderwijsinstellingen	HAN University of Applied Sciences
Onderwijsinstellingen	Joint Research Centre
Onderzoeksinstellingen	NRG
Onderzoeksinstellingen	Laborelec
Onderzoeksinstellingen	Tractebel
Onderzoeksinstellingen	M2i
Onderzoeksinstellingen	TNO
Onderzoeksinstellingen	Top Institute for Comprehensive Analytical Science and Technology (TI-COAST)

Categorie	Organisatie
Onderzoeksinstellingen	DSM
Onderzoeksinstellingen	Witteveen+Bos
Onderzoeksinstellingen	Energy Impact Center
Onderzoeksinstellingen	Rathenau Instituut
Onderzoeksinstellingen	Dialogic
Onderzoeksinstellingen	Technopolis
Onderwijsinstellingen	Dutch Institute for Fundamental Energy Research (DIFFER)
Afvalverwerkers	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA)
Energieproducenten	EPZ
Verrijking	Urenco
Ontwikkelaars	GE Benelux (GE Hitachi)
Ontwikkelaars	EDF
Ontwikkelaars	Westinghouse
Ontwikkelaars	KHNP (KEPCO)
Ontwikkelaars	Rolls-Royce Group
Ontwikkelaars	ULC-Energy
Ontwikkelaars	Thorizon
Ontwikkelaars	NuScale Power Corporation
Ontwikkelaars	Terrestrial Energy
Ontwikkelaars	Bechtel
Ontwikkelaars	CEZ
Ontwikkelaars	Doosan
Ontwikkelaars	Fennovoima
Ontwikkelaars	Hyundai
Ontwikkelaars	Seaborg Technologies
Maakindustrie/toeleveranciers	Fluor
Maakindustrie/toeleveranciers	Siempelkamp
Maakindustrie/toeleveranciers	Arcadis
Maakindustrie/toeleveranciers	BAM
Maakindustrie/toeleveranciers	Besix
Maakindustrie/toeleveranciers	Huisman
Maakindustrie/toeleveranciers	IV Groep
Maakindustrie/toeleveranciers	Bouwman Industries
Maakindustrie/toeleveranciers	Demcon
Maakindustrie/toeleveranciers	VDL Energy Systems
Maakindustrie/toeleveranciers	Siemens
Maakindustrie/toeleveranciers	Technolution
Maakindustrie/toeleveranciers	Croon, Wolter & Dros
Maakindustrie/toeleveranciers	Yellow Project Management
Maakindustrie/toeleveranciers	KEMA
Maakindustrie/toeleveranciers	DNV
Maakindustrie/toeleveranciers	SGS

Categorie	Organisatie
Maakindustrie/toeleveranciers	Strukton Infratechnieken
Maakindustrie/toeleveranciers	Stirling Cryogenics Nederland
Maakindustrie/toeleveranciers	Demaco Holland
Maakindustrie/toeleveranciers	Royal HaskoningDHV
Maakindustrie/toeleveranciers	Combigas B.V.
Netwerkorganisatie	Regieorgaan SIA
Netwerkorganisatie	Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP)
Netwerkorganisatie	European Nuclear Education Network (ENEN)
Netwerkorganisatie	Nederlandse Federatie van Universitair Medische Centra (NFU)
Netwerkorganisatie	Universiteiten van Nederland (UNL)
Netwerkorganisatie	Vereniging Hogescholen (VH)
Netwerkorganisatie	MBO-raad
Netwerkorganisatie	Topsector Energie
Netwerkorganisatie	FME
Netwerkorganisatie	VNO-NCW
Netwerkorganisatie	MKB-Nederland
Netwerkorganisatie	HitechNL
Netwerkorganisatie	EU Industriële Alliantie voor SMR's
Netwerkorganisatie	Stichting Netherlands Nuclear Society (NNS)
Netwerkorganisatie	Stichting Energietransitie & Kernenergie (SEK)
Netwerkorganisatie	Stichting KernVisie
Netwerkorganisatie	Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS)
Netwerkorganisatie	Koninklijk Instituut Van Ingenieurs (KIVI)
Netwerkorganisatie	Stichting Kennis Infrastructuur Nucleaire Technologie (KINT)
Maatschappelijke organisaties	Greenpeace
Maatschappelijke organisaties	Milieudefensie
Maatschappelijke organisaties	Milieu Centraal
Maatschappelijke organisaties	Stichting Laka
Maatschappelijke organisaties	WISE
Maatschappelijke organisaties	Stichting Natuur en Milieu
Maatschappelijke organisaties	Zeeuwse Milieufederatie
Maatschappelijke organisaties	Borsele Voorwaarden Groep
Vergunninghouders	~4000 organisaties (medisch, industrieel, bouw en infrastructuur, onderzoek en onderwijs)
Medische actoren	PALLAS
Medische actoren	SHINE
Medische actoren	Stralingsupport BV
Medische actoren	VUmc
Medische actoren	Erasmus MC
Medische actoren	Radboud UMC
Medische actoren	UMC Groningen
Medische actoren	Curium Pharma
Medische actoren	AccTec

Categorie	Organisatie
Medische actoren	Quirem Medical
Medische actoren	HollandPTC
Medische actoren	Cyclotron Noordwest
Medische actoren	Amsterdam UMC
Medische actoren	BV Cyclotron VU
Medische actoren	NRG
Medische actoren	Antoni van Leeuwenhoek Ziekenhuis (Netherlands Cancer Institute; NKI)
Medische actoren	Maastro
Medische actoren	Comecer
Medische actoren	PI Medical
Medische actoren	Sun Nuclear
Elektriciteitsbedrijven	Eneco
Elektriciteitsbedrijven	EON
Elektriciteitsbedrijven	RWE
Elektriciteitsbedrijven	Vattenfall

Bijlage 2. Lijst met respondenten (interviews)

Organisatie	Naam
Alliander	Pallas Agterberg
ANVS	Erik Schreurs
ANVS	Mark van Bourgondiën
Avans Hogeschool	Saleh Mohammadi
BAM Infra Nederland	Leon Groenewegen
BAM Infra Nederland	Sytske Scheerens
COVRA	Ewoud Verhoef
Delmeco	Paul Schalk
Delmeco	Raymond Potters
DIFFER	Marco de Baar
EPZ	Rick Lindhout
Gemeente Vlissingen	Geoffrey Sips
Impuls Zeeland	Laurens Meijering
JEIL Partners	Hee Yong Lee
Joint Research Centre	Brian Eriksen
KHNP	Arume Choi
KHNP	Bongjun Choi
KHNP	Jinghu Park
KHNP	Jonghu Park
KHNP	K. Yeung Lee
Last Energy	Hans Schoenmakers
MBO Raad	Bob Klaasen
Ministerie van Economische Zaken	Tycho Smit
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Hedwig Sleiderink
NRG	Geert-Jan de Haas
NRG	Hermen van der Lugt
NRG	Joost van den Broek
NRG (Nuclear Academy)	Robert Beekveldt
NWO	Tom van Rens
PALLAS	Peter Dijk
PBL	Jaco Stremler
Provincie Zeeland	Piet Goossen
Rathenau Instituut	Romy Dekker
Rathenau Instituut	Vincent Lagendijk
Regieorgaan SIA	Annejet Spierenburg
Regieorgaan SIA	Oscar Brandt Corstius
Rijksuniversiteit Groningen	Nasser Kalantar-Nayestanaki
RVO	Kim Bischot

Organisatie	Naam
Scalda Zeeland	Patricia de Bruyckere
Scalda Zeeland	Rob Duijm
Techniek College Rotterdam	Erik Boehle
Techniek College Rotterdam	Igor Runsink
TenneT	Emiel van Druten
Thorizon	Sander de Groot
TNO	Martin Scheepers
Topsector Energie	Mart van Bracht
Topsector Energie	Richard van de Sanden
TU Delft	Jan Leen Kloosterman
TU Delft	Jurriaan Peters
TU Delft	Rene Pecnik
TU Delft	Wiebren de Jong
TU Delft (RID)	Wim Koppers
ULC-energy	Dirk Rabelink
Universiteit Twente	Aayan Banerjee
Universiteit Utrecht	Wim Turkenburg
Urenco	Ad Louter
Westinghouse	Joel Eacker

Bijlage 3. Lijst met respondenten (workshop hogescholen)

Organisatie	Naam
Avans Hogeschool	Saleh Mohammadi
HAN	Frank Karelse
Hogeschool Rotterdam	Conny Ouwerkerk
Hogeschool Saxion	Stefan van Ekeren
Hogeschool Zeeland	Walter Roovers
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Bertie van der Heijdt
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Stefanie Klaassen
Regieorgaan SIA	Oscar Brandt Corstius

Bijlage 4. Lijst met respondenten (workshop thema 1 en 6)

Organisatie	Naam
DIFFER	Marco de Baar
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Stefanie Klaassen
NRG	Arjan Vreeling
NRG	Govert de With
NRG	Murthy Kolluri
NWO	Leon Leu
Regieorgaan SIA	Oscar Brandt Corstius
RUG	Nasser Kalantar-Nayestanaki
SCK CEN	Tom Clarijs
Topsector Energie	Mart van Bracht
TU Delft	Erik Offerman
TU Delft (RID)	Wim Koppers

Bijlage 5. Lijst met respondenten (workshop thema 2 en 5)

Organisatie	Naam
Hogeschool Zeeland	Jorick Vos
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Bertie van der Heijdt
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Stefanie Klaassen
NRG	Cornelis Zandt
Regieorgaan SIA	Oscar Brandt Corstius
Rijksuniversiteit Groningen	Nasser Kalantar-Nayestanaki
Rijksuniversiteit Groningen	Arjan Veenstra
TNO	Casper Versteylen
TNO	Martin Scheepers
Topsector Energie	Mart van Bracht
TU Delft	Machteld van den broek
VITO	Pieter Vingerhoets

Bijlage 6. Lijst met respondenten (workshop thema 3, 4 en SMR's)

Organisatie	Naam
DIFFER	Marco de Baar
Hogeschool Zeeland	Jorick Vos
Last Energy	Hans Schoenmakers
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Esther Kiezebrink
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Marleen de Haan
NRG	Ferry Roelofs
NRG	Frederic Blom
NRG	Marieke van Gemert
NWO	Silke Diedenhofen
RUG	Nasser Kalantar-Nayestanaki
Thorizon	Sander de Groot
TU Delft	Henk Polinder
TU Delft	Klaas Visser
TU Delft	Martin Rohde
TU Delft (RID)	Wim Koppers
Urenco	Hidde Baars

Bijlage 7. Lijst met respondenten (workshop thema 7 en 8)

Organisatie	Naam
COVRA	Robbert-Jan Nortier
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Stefanie Klaassen
NRG	Govert de With
NRG	Roland Jansma
NWO	Monika Brasser
Rathenau Instituut	Vincent Lagendijk
SCK CEN	Gaston Meskens
TNO	Kevin Broecks
TU Delft	Hemmo Abels
Urenco	Hidde Baars
VITO	Pieter Vingerhoets

Bijlage 8. Lijst met respondenten (workshop Roadmap)

Organisatie	Naam
Alliander	Pallas Agterberg
ANVS	Erik Schreurs
COVRA	Ewoud Verhoef
DIFFER	Marco de Baar
EPZ	Rick Lindhout
Hogeschool Rotterdam	Conny Ouwerkerk
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Sanne Echten
Ministerie van Klimaat en Groene Groei	Stefanie Klaassen
NRG	Geert-Jan de Haas
NWO	Marieke Goedhart
TNO	Martin Scheepers
Rathenau Instituut	Vincent Lagendijk
Regieorgaan SIA	Oscar Brandt Corstius
Rijksuniversiteit Groningen	Nasser Kalantar-Nayestanaki
Scalda	Rob Duijm
Topsector Energie	Mart van Bracht
TU Delft	Jan Leen Kloosterman
TU Delft	Martin Rohde
Urenco	Hidde Baars

VNO-NCW en PALLAS waren eveneens uitgenodigd, maar waren onverhoopt verhinderd.



Contact:
Dialogic innovatie & interactie
Hooghiemstraplein 33-36
3514 AX Utrecht
Tel. +31 (0)30 215 05 80
www.dialogic.nl