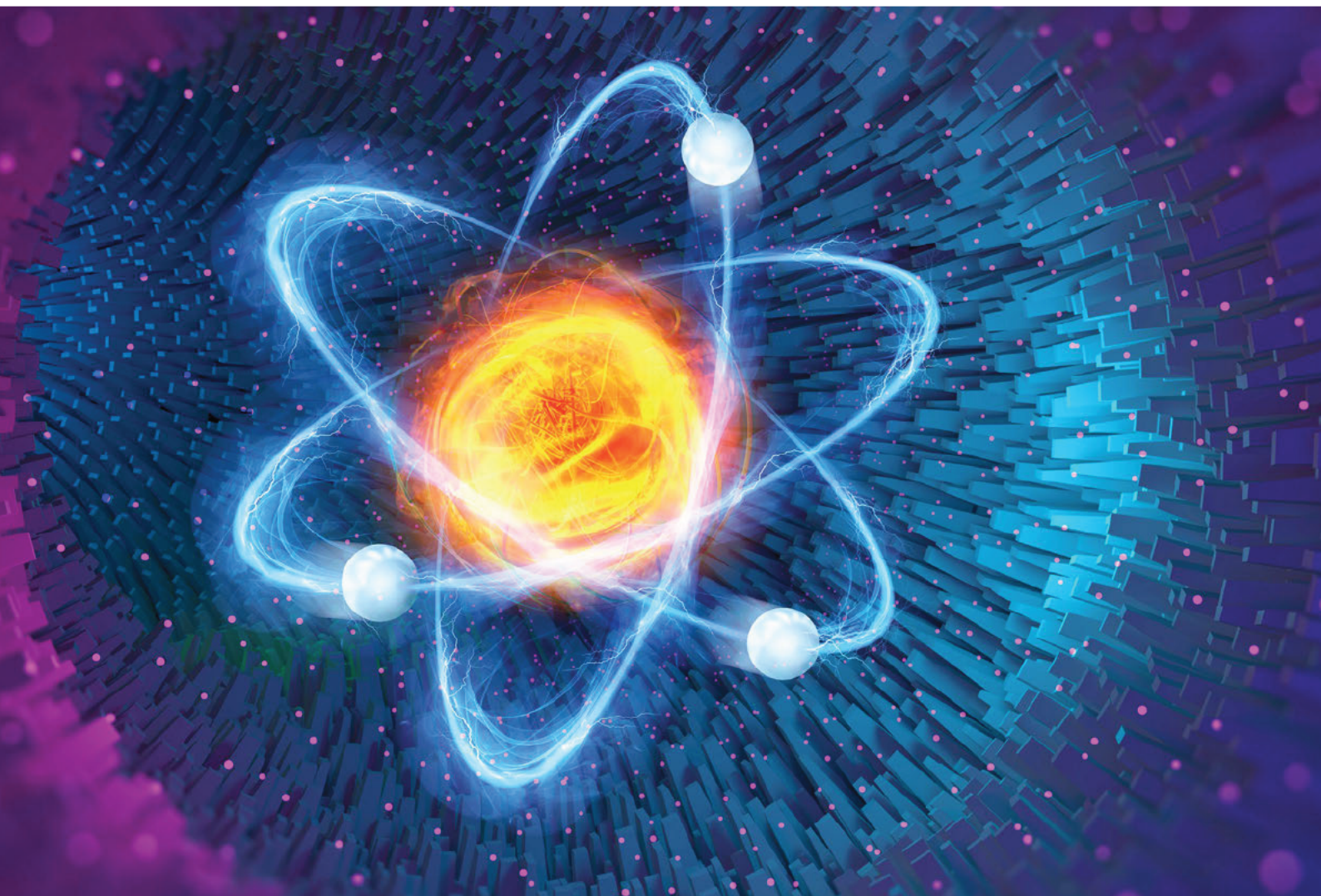




TOPSECTOR ENERGIE

Innovatie voor een duurzame toekomst



Verkenning rol nucleaire technologie op de Integrale Kennis en Innovatie Agenda Klimaat & Energie

In opdracht van de Topsector Energie en het ministerie van EZK

— Topsector Energie
TU Delft

Februari 2023



Inhoudsopgave

| | |
|--|-----------|
| 1 Inleiding | 3 |
| 2. Trends | 4 |
| Reactortechnologie kerncentrales | 4 |
| Nucleaire installaties: niet alleen kernenergie | 5 |
| Kernenergie in een energiesysteem vol onzekerheden | 5 |
| 3. Randvoorwaarden | 7 |
| Nucleair betekent denken in decennia | 7 |
| Human capital: cruciaal voor het slagen van de uitbouw van kernenergie | 7 |
| Draagvlak: uitdagingen en kansen | 8 |
| 4. Conclusie en aanbevelingen | 9 |
| Conclusie 1: Structurele investeringen in kennis en innovatie | 9 |
| Conclusie 2: Een integrale blik op het nucleair domein is noodzakelijk | 10 |
| Conclusie 3: Internationale samenwerking is cruciaal | 10 |
| 5. Uitwerking kennis- en innovatiethema's | 11 |
| 1. Stralingsveiligheid | 11 |
| 2. Systeemkennis | 11 |
| 3. Kennis over nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie | 12 |
| 4. Aan reactoren gerelateerde 'enabling' onderwerpen | 13 |
| 5. Hoge temperatuur waterstofproductie | 13 |
| 6. Materialenonderzoek | 14 |
| 7. Opslag en eindberging radioactieve materialen | 14 |
| 8. Onderzoek naar draagvlak voor kernenergie en andere nucleaire technologie | 15 |
| Bijlage 1. Aanleiding en aanpak | 16 |
| Bijlage 2. Geraadpleegde documentatie t.b.v. deskresearch | 18 |



1. Inleiding

Het is in Nederland alle hens aan dek om de klimaatdoelen te halen. Kernenergie kan het toekomstige gat tussen vraag en aanbod helpen verkleinen omdat het een CO₂-vrije bron van constante (regelbare) elektriciteit is. Stabiele CO₂-vrije elektriciteitsproductie kan een belangrijke aanvulling vormen op stroom die wordt opgewekt door zon en wind. Ook leent kernenergie zich voor een energetisch efficiënte productie van waterstof en voor slimme sectorkoppeling. Bovendien maakt kernenergie Nederland minder afhankelijk van internationale energie. Daar staan echter serieuze risico's tegenover, met name veroorzaakt door radioactieve straling en afval die aan kernenergie verbonden zijn. Eind 2021 heeft het kabinet in het **Coalitieakkoord** vastgelegd dat het voornemens is de kerncentrale in Borssele langer open te houden en dat het voorbereidingen treft voor de bouw van twee nieuwe kerncentrales.

Dit is aanleiding geweest voor onderhavige verkenning naar de vraag of kernenergie als thema in de (herijkte) Integrale Kennis- en Innovatie Agenda van de Topsector Energie (TSE) opgenomen moet worden. *“Binnen de TSE is een verschuiving zichtbaar van focus op hernieuwbare energie naar een CO₂-vrije samenleving, waarmee kernenergie (niet hernieuwbaar, wel CO₂-vrij) in beginsel zou kunnen passen binnen de missies waar de Topsector invulling aan geeft door beantwoording van kennis- en innovatievragen.”* aldus de opdrachtomschrijving. Deze verkenning heeft als doel te onderzoeken of kernenergie¹ onderdeel moet worden van de missiegedreven Integrale Kennis- en Innovatie Agenda. Hiertoe zijn interviews gehouden en heeft een deskresearch plaatsgevonden (zie bijlage 1 en 2). In dit document gaan we achtereenvolgens in op de trends en randvoorwaarden die uit deze gesprekken en rapporten naar voren zijn gekomen en tot welke conclusies en aanbevelingen deze leiden. Het uitvoeringsteam benadrukt de noodzaak van het betrekken van de huidige en een bredere groep stakeholders en experts bij de verdere uitwerking van deze Kennis- en Innovatie Agenda Kernenergie.

Dit document is opgesteld op basis van interviews met diverse stakeholders en desk research (zie bijlage 1 en 2). Laatste technische review door prof. J.L. Kloosterman, hoogleraar reactorfysica, TU Delft.

¹ In deze studie wordt 'kernfusie' niet meegenomen.



2. Trends

Reactortechnologie kerncentrales

De technologie van de huidige, operationele kerncentrale in Borssele bestaat uit een lichtwaterreactor die 500 MW aan elektriciteit levert en 1000 MW aan restwarmte afvoert naar de omgeving. Indien op zo kort mogelijke termijn twee nieuwe kerncentrales bijgebouwd worden, ligt het voor de hand te kiezen voor eenzelfde, bewezen technologie (generatie 3+). De bouw van een dergelijke kerncentrale vindt on-site plaats gedurende een geplande periode van 6-8 jaar.

Nucleaire technologie blijft echter innoveren, met name door de groeiende vraag naar kernenergie. Innovaties bij generatie 3 reactoren liggen voornamelijk op het gebied van reactorveiligheid. Lichtwaterreactoren (LWR) leveren warmte tot ca. 300° C. Een ontwikkeling naar gasgekoelde hogetemperatuurreactoren (HTR), die warmte leveren tot 700° C, maakt de reactoren geschikt voor plaatsing nabij zware industrie vanwege toepassing van de warmte voor industriële processen die hoge temperaturen nodig hebben (waterstof).

Daarnaast is er een trend zichtbaar naar kleinere kernreactoren [<300 MW elektrisch vermogen] op basis van lichtwaterreactoren die ook gebruik maken van uranium als grondstof. Deze centrales zullen, in tegenstelling tot grote generatie 3+ kerncentrales, in meer geïntegreerde modules worden gebouwd in fabrieken, vervolgens vervoerd naar de site waar de kerncentrale moet komen, en ter plekke samengesteld. Deze ontwikkeling vormt een belangrijke marktinnovatie: de zogenaamde 'Small Modular Reactors' (SMR). De modules worden in gecontroleerde omgevingen gebouwd en meervoudig getest, wat een significante controle in het land van herkomst biedt en vereist, inclusief kleinere kostenrisico's. Dit type kerncentrales zullen de komende jaren beschikbaar gaan komen. Als SMR's marktgeraad zijn, kost het misschien langer om ze door de vergunningverlening te krijgen (want nieuw) maar de bouwtijd is aanzienlijk korter (en dus minder kostbaar). De modulaire bouw zorgt ervoor dat er minder (schaars) nucleair personeel nodig is voor on-site bouw en dat de kans op grote kostenstijgingen afneemt. Maar het vraagt tegelijkertijd veel van transportroutes en vergunningverlening. SMR's zijn aantrekkelijk om te combineren met energieintensieve industrie. Dit heeft als voordeel dat er minder wind- en zonne energie nodig is en infrastructuur eenvoudiger kan zijn.

In plaats van gebruik te maken van water wordt ook onderzoek gedaan naar gesmolten-zout-reactoren (Molten Salt Reactors: MSR's). Deze zijn nog in de onderzoeksfase en worden daarom gezien als 4^e generatie kerncentrales. Het voordeel van gesmolten-zout-reactoren met thorium als brandstof is de verhoogde veiligheid van de reactie zelf, en een aanzienlijke (1000x) reductie van langlevend radioactief afval. Ook snelle metaalgekoelde reactoren worden verkend, bijvoorbeeld in België. Frankrijk onderzoekt beide opties. Het eerdergenoemde modulaire bouwen dat nu in opkomst is, gebeurt nu nog vooral op basis van 3^e generatie (LWR- en HTR) technologie, maar zou in de toekomst ook denkbaar zijn op basis van deze metaal- of zoutgekoelde reactoren (generatie IV).



Nucleaire installaties: niet alleen kernenergie

Nucleaire installaties worden niet alleen ingezet voor de productie van energie; ze worden ook ontworpen en gebruikt voor geavanceerd materiaalonderzoek, uraniumverrijking, en voor de productie van medische isotopen. Materiaalonderzoek wordt steeds relevanter vanwege de toepassing ervan voor materialen ten dienste van de energietransitie (zoals batterijen en zonnecellen) maar ook in halfgeleiders en constructiematerialen als staal en beton. Medische isotopen worden vooral ingezet voor diagnose en behandeling van onder meer kanker. Als gevolg van de vergrijzing wordt er een sterke groei voorspeld van de vraag naar isotopen, vooral voor therapeutische doeleinden. Nederland is internationaal (nog?) een kleine speler op het gebied van kernenergie; dat geldt zeker niet voor materiaalonderzoek, verrijking, en medische isotopen, waarin we een koppositie innemen. Deze toepassingen van nucleaire technologie nemen toe en kunnen niet los gezien worden van de benodigde kennis over stralingsbescherming die eveneens noodzakelijk is voor de bouw, operatie en ontmanteling van kerncentrales t.b.v. energieproductie. Want nucleaire installaties, of het nu reactoren zijn die energie opwekken, materiaalonderzoek faciliteren, of medische isotopen produceren, hebben een aantal gemeenschappelijke kenmerken. Bovendien zijn deze installaties niet alleen qua technologie nauw verbonden, maar zijn ze ook qua veiligheid, beveiliging en safeguards, zowel nationaal als internationaal, op eenzelfde wijze gereguleerd.

Voor de bouw, het onderhoud en het beheer van reactoren is ook niet-nucleaire kennis nodig. Denk hierbij aan kennis voor betonnen constructies, lastechnologie, procestechnologie, onderhouds-systemen onder extreme omstandigheden, en complex project management. Hier liggen verschillende cross-overs met innovatieprogramma's in andere sectoren.

Met de bouw van twee nieuwe kerncentrales wordt ook het vraagstuk omtrent ontmanteling, kernafval en eindberging prominenter. Bij ontwerp en bouw dient immers altijd rekening te worden gehouden met de uiteindelijke ontmanteling naar een 'green field' eindsituatie. En bij de ontwikkeling van generatie III en later ook generatie IV reactoren moeten ontwerpkeuzes gemaakt worden die invloed hebben op de verwerking van het radioactief afval. Daarnaast is de ontwikkeling van SMR's relevant voor de opslag van afval. Kerncentrales genereren tijdens exploitatie zowel radioactief als niet-radioactief afval (de volumes van die laatste categorie zijn vele malen hoger). Tegelijkertijd is er wel al een tijdelijke oplossing voor radioactief afval in Nederland (op voorhand betaald door de producent) en zijn er technische oplossingen voor de eindberging in ontwikkeling.

De ontwikkeling om naast 'safe-by-design' ook na te denken over 'circular-by-design' staat nog in de kinderschoenen bij de ontwikkeling van kerncentrales, maar zou in de (verre) toekomst ook het ontwerp van centrales vergaand kunnen beïnvloeden. In alle scenario's zal een intensivering nodig zijn van geologisch onderzoek naar opslag ten behoeve van de eindberging van langlevend radioactief afval in Nederland.

Kernenergie in een energiesysteem vol onzekerheden

Kernenergie zal het totale (Noord-West-Europese) energiesysteem beïnvloeden vanwege de grote hoeveelheden stroom en warmte die het CO₂-vrij kan genereren. Daarnaast heeft kernenergie economische effecten (bijvoorbeeld voor de energie-intensieve industrie) en



impact op de kwaliteit van de leefomgeving. De ontwikkelingen van het energiesysteem, de interactie tussen economie en samenleving, is echter aan veel onzekerheden onderhevig. Met name de impact van SMR's op de energievoorziening kan zeer groot zijn. Door directe koppeling aan grootverbruikende industrieën neemt de vraag naar andere CO₂-vrije energie af. Dit kan bijvoorbeeld betekenen dat er minder import van energie nodig is en ook minder zware infrastructuur. Over de mogelijkheden en consequenties van de introductie van SMR's is echter nog veel onduidelijk. Veranderingen in het energiesysteem kunnen hoe dan ook technische, economische en financiële consequenties met zich meebrengen. Uitgebreid systeemonderzoek is dan ook noodzakelijk.

Waterstofproductie wordt veel genoemd in relatie tot kernenergie. Met een kerncentrale kan waterstof worden geproduceerd vanwege de elektriciteit en hoge temperatuur warmte die ontstaat bij de technologie van gasgekoelde hoge temperatuurreactoren. Belangrijk hierbij is opnieuw dat er een gedetailleerde doorrekening nodig is van hoe de varianten in het systeem uitpakken. Zo zal de beschikbaarheid van opslagplaatsen voor waterstof, zoals zoutcavernes, invloed hebben in het totale energiesysteem, evenals andere variabelen als afstand tot gebruiker, de hoogte van de gasprijs en de capaciteit van het elektriciteitsnet. Ook in dit verband is de Europese wet- en regelgeving en de definitie van het begrip groen/duurzaam van invloed (zie hiervoor de recente taxonomie-discussie in EU-verband). Tot slot vraagt de combinatie van kerncentrales met waterstofproductie het een en ander van risicoevaluatie en -beoordeling en vergunningverlening. In de praktijk is de kans dat iets in de omgeving van een kerncentrale misgaat immers vele malen groter dan dat het in de centrale zelf fout gaat.



3. Randvoorwaarden

Nucleair betekent denken in decennia

Als besloten wordt de Nederlandse productie van kernenergie met nieuwe kernenergiecentrales naar een hoger niveau te brengen, is het van groot belang dat de kennisagenda zich committeert aan kernenergie. Internationale afspraken binnen de IAEA vereisen immers een vitale en hoogwaardige kennisbasis en kennisinfrastructuur op het gebied van stralingsbescherming en nucleaire technologie. Dat vraagt om een andere tijdshorizon dan we van de politiek gewend zijn, namelijk een tijdspanne van vele tientallen jaren. Een kerncentrale wordt immers gebouwd voor decennia, en dat vereist langdurige politieke commitment en stabiliteit op dit dossier. Bovendien is langjarige toewijding nodig voor het aantrekken van het broodnodige talent: 'human capital'.

Human capital: cruciaal voor het slagen van de uitbouw van kernenergie

In de industrie en bij ingenieursbureaus zijn met name MBO- en HBO-opgeleiden nodig; bij kennisinstellingen, toezichthouder en de overheid vooral WO-opgeleiden. Dat lukt alleen als er perspectief wordt geboden: een sector met toekomst. Jongere generaties zijn idealistisch en zeer 'purpose-driven' en willen een bijdrage leveren aan een duurzaam energiesysteem. Onderzoek en innovatie naar nieuwe toepassingen en vierde generatie kerncentrales is dan ook belangrijk om nieuwe studenten en jonge onderzoekers aan te trekken. In het verlengde hiervan is voldoende onderzoeksbudget nodig. Als er geen funding te vinden is, zullen talentvolle onderzoekers zich tot andere domeinen wenden. Internationale samenwerking is hoe dan ook noodzakelijk en wenselijk; een interessante partij dichtbij is België.

Hogescholen zien voor zichzelf een rol in het opleiden van breed georiënteerde ingenieurs die in de beroepspraktijk verder leren. Het HBO en zeker ook het MBO zijn sterk geworteld in het bedrijfsleven en daarom bij uitstek geschikt voor samenwerking met de industrie, al dan niet in netwerkverband met universiteiten. Nucleaire technologie vindt zijn basis in de fysica en chemie maar heeft daarnaast ook raakvlakken met, en kan ingebracht worden bij, allerlei andere opleidingen, zoals civiele techniek, werktuigbouwkunde, systems & control, bestuurskunde, projectmanagement en (internationaal) recht. Denk daarbij ook aan de inzet van simulatoren; veiligheidsbewustzijn is niet alleen in de strikt nucleaire maar ook in andere domeinen noodzakelijk. Daarnaast kunnen interessante crossovers worden gemaakt met cyber security, data science, machine learning voor onderhoudsmanagement en reactorregeling, security en robotisering, waarmee nieuwe doelgroepen aangeboord kunnen worden. Als de markt SMR's gaat implementeren zou dat een extra manier zijn om regionale spreiding te bewerkstelligen en bijvoorbeeld MBO-ers en HBO-ers in de praktijk op te leiden.

Voor stralingsbescherming wordt met geld uit de motie Erkens-Dassen een leerstoel aan de TU Delft in het leven geroepen. De afbrokkeling als gevolg van het ontbreken van academisch opgeleiden in de stralingsbescherming is namelijk reeds zichtbaar. Hoewel op dit moment het kennisniveau en opleidingsaanbod nog op het vereiste niveau zijn, dreigt er een 'veenbrand'. Zodra dit onder een bepaald niveau zakt is het niet meer te herstellen. Het TU Delft Reactorinstituut is, nu andere instellingen hiermee gestopt zijn, nog de enige aanbieder van het hoogste niveau stralingsdeskundigheid in Nederland. Dit zorgt ervoor dat opleidingen gevaar lopen als het



onderwijs daar niet wordt versterkt, omdat dan het ‘teach-the-teacher’ idee uiteindelijk verdwijnt, met als gevolg dat zelfs voor de basisniveaus van stralingsbescherming geen opleiding meer kan worden gewaarborgd, en Nederland geen adequate vertegenwoordiging meer kan inbrengen in internationaal verband. Dat laatste zien we ook op andere terreinen in het nucleaire domein: als Nederland bijvoorbeeld geen onderzoeksprogramma op het gebied van eindberging zou hebben, kan/mag het niet aan tafel zitten in internationale gremia en loopt het relevante kennis mis.

Niet alleen in Nederland is een tekort aan technisch geschoolden op alle niveaus. Ook andere landen kampen hiermee. Belangrijk in dit verband is dat, als verschillende landen in Europa tegelijkertijd nieuwe kerncentrales gaan bouwen, iedereen in dezelfde vijver vist.

Draagvlak: uitdagingen en kansen

Draagvlak is noodzakelijk voor alle ruimtelijke initiatieven in ons drukbevolkte land, zo ook voor kernenergie. De laatste jaren is het draagvlak voor kernenergie sterk verbeterd onder alle lagen van de samenleving. We willen zekere en betaalbare energie én klimaatactie. Voor alle energiebronnen zijn er evengoed tegenstanders. Denk aan windmolens of grote zonneweides in dichtbevolkte gebieden. Ten aanzien van kernenergie zijn er grote verschillen in publieke perceptie. Belangrijk hierbij is ook dat de publieke perceptie ten aanzien van nucleaire toepassingen in het gezondheidsdomein juist relatief positief is. Bovendien heerst steeds meer de gedachte dat Nederland en Europa zich minder afhankelijk moeten opstellen van energie en grondstoffen uit minder stabiele landen. Leveringszekerheid (van energie en van medische isotopen) is hierbij een veelgebruikt argument. Dit vraagt om open, eerlijke en transparantie communicatie, niet om te overtuigen, maar wel om goed te informeren. Niet alleen over kernenergie op zichzelf, maar ook over de consequenties van keuzes die worden gemaakt voor het energiesysteem, leveringszekerheid, leefomgeving, energie onafhankelijkheid en duurzaamheid.



4. Conclusie en aanbevelingen

Uit de voorgaande hoofdstukken kunnen wat betreft de inzet op kernenergie in Nederland de volgende conclusies worden getrokken:

1. Er zijn structureel (over decennia) investeringen in nucleaire opleiding, kennis en innovatie nodig.
2. Het nucleaire domein in Nederland vraagt om een integrale blik vanuit de overheid. Met integraal wordt bedoeld: energie, gezondheid, materialen en straling.
3. Het onderhouden en verder ontwikkelen van het nucleaire domein in Nederland is alleen mogelijk middels internationale samenwerking op velerlei gebieden: (wetenschappelijk) onderzoek, opleidingen, innovatie, regelgeving, grondstoffenbeleid, en human capital.

Conclusie 1: Structurele investeringen in kennis en innovatie

Zoals in voorgaande hoofdstukken reeds is beschreven is er in Nederland de afgelopen decennia nauwelijks geïnvesteerd in opleiding, kennis en innovaties voor kernenergie. Uitgaande van de sterktes van Nederland, de ambities wat betreft de energietransitie, in het bijzonder kernenergie in het regeerakkoord en de bij deze ambitie behorende kennispositie kunnen de volgende kennis- en innovatiethema's worden geïdentificeerd:

1. Stralingsbescherming: de basis voor alle nucleaire toepassingen.
2. Systemkennis: naar de rol (en impact) van kernenergie in het energiesysteem, economie en maatschappij nu en in de toekomst.
3. Kennis over nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie.
4. Aan reactoren gerelateerde 'enabling' onderwerpen, zoals 'plant integrity', onderhoud onder extreme omstandigheden, etc.
5. Hogetemperatuurwaterstofproductie (breder dan alleen nucleair).
6. Materiaalonderzoek met behulp van nucleaire / ioniserende straling (neutronen, positronen).
7. Opslag radioactief afval en geologische berging.
8. Perceptie, communicatie en draagvlak.

Een aantal van deze 8 thema's hebben een relatie met thema's van reeds lopende Meerjarige Missiegedreven Innovatie-Programma's (MMIP). Dit geldt met name voor de thema's 4, 5 en 8. Daarnaast is er ook een relatie met het bestaande onderzoeksprogramma PIONIER van NRG en met internationale onderzoeksagenda's, zoals de Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) van **SNETP**.

Om voldoende kennis op te doen en innovatie in de praktijk te kunnen realiseren is het belangrijk dat een kennis- en innovatie-ontwikkelingsprogramma een lange tijdshorizon heeft. Hier moet worden gedacht aan een tijdshorizon van decennia.

Bij het nucleaire ecosysteem behoren ook kennis en innovatievragen die gericht zijn op de productie van isotopen voor de gezondheidszorg. Omdat deze niet in de scope van de Topsector Energie passen zijn deze niet in dit document meegenomen.



Conclusie 2: Een integrale blik op het nucleair domein is noodzakelijk

Gezien de grote verwevenheid van de kwetsbare Nederlandse nucleaire kennisbasis met de domeinen energieproductie, isotopenproductie, materialenonderzoek en straling, is het belangrijk om te werken met één regie op de kennisinfrastructuur. Geadviseerd wordt daarom één gezamenlijke innovatiemanager voor het gehele nucleaire ecosysteem aan te stellen en te werken met één kennis- en innovatieagenda en één Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma. Deze integrale aanpak wordt ook geadviseerd voor de Human Capital Agenda (HCA). Hier is extra effort nodig. Dit geldt op de eerste plaats voor een versterking en uitbreiding van de onderwijssector inclusief opleiding- en (bij)scholingsfaciliteiten. Denk hierbij aan uitbreiding van academische leerstoelen, HBO lectoraten en docenten op HBO en MBO niveau. Buiten het reguliere onderwijs is het noodzakelijk te zoeken naar alternatieve scholingstrajecten om voldoende goed opgeleide medewerkers te krijgen. Denk hierbij aan zij-instromers, het werven van internationaal talent en het ‘nucleariseren’ van reeds bestaande beroepen/opleidingen. Het is hierbij van cruciaal belang dat er voor nucleaire functies en beroepen voldoende toekomstperspectief is. Het gaat hierbij om een langjarige commitment (over decennia).

Conclusie 3: Internationale samenwerking is cruciaal

Nucleaire technologie is een wereldwijd onderwerp. Nederland is op kernenergiegebied een kleine speler en is sterk afhankelijk van technologie en kennis uit het buitenland. Samenwerking met buitenlandse partners is daarom essentieel. Daarentegen heeft Nederland in aanpalende vakgebieden een sterke positie. Dit geldt bijvoorbeeld voor materialenonderzoek, waar Nederland op een derde positie staat¹. Deze kennis is bijvoorbeeld belangrijk voor de ontwikkeling van zonnecellen en batterijen. Ook heeft Nederland een leidende positie op de wereldmarkt voor medische isotopen. Hierbij neemt Nederland 30% van de marktvraag voor zijn rekening. Ook op het vlak van verrijking heeft Nederland een sterke positie (nummer 2 van de wereld): Nederland levert 25-35% van de wereldwijde productie. De kennis op het gebied van reactortechnologie (generatie III) is in Nederland echter beperkt tot een zeer kleine groep.

Gezien de geopolitieke situatie ligt samenwerking met name binnen de EU voor de hand; betere coördinatie kan versnellend werken. De beschikbaarheid en prijs voor grondstoffen zijn vanwege de (volatiele) wereldwijde grondstofmarkt voor uranium bij uitstek een vraagstuk dat in internationaal verband moet worden aangevlogen. Daarnaast vindt de regulatie op het gebied van veiligheid, beveiliging en safeguards zowel nationaal als internationaal plaats; een proactieve plek aan de internationale onderhandelingstafel is van groot belang. Daarnaast zijn potentiële partners uit andere ‘geopolitiek veilige’ landen (VK, USA, Canada enz.) relevant. Een interessante partner dichtbij is België: de kennisbasis inclusief onderwijssector zijn daar sterker en breder dan in Nederland. Internationale samenwerking betekent ook dat hiervoor investeringen nodig zijn.

1 Op basis van citaties in Scopus per inwoner. Dit geldt als een goede benadering voor wetenschappelijk onderzoek.



5. Uitwerking kennis- en innovatiethema's

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste kennisvragen voor de in hoofdstuk 4 weergegeven kennis- en innovatiethema's verder uitgewerkt.

1. Stralingsveiligheid

Voor alle activiteiten waarbij sprake is van nucleaire technologie is stralingsveiligheid van belang. Het is noodzakelijk dat deze kennis up-to-date blijft en efficiënt kan worden overgedragen aan verschillende stakeholders. Het gaat hierbij dus om verschillende sectoren energieproductie, gezondheidszorg en materialenonderzoek en verschillende functies in het publieke en private domein.

Kennisvragen in dit verband zijn:

- Dosis-definities, radiobiologische vragen (zoals effecten van straling op weefsels), hoe kan de efficiency van straling worden vergroot (meer effect met minder straling) enz.?
- Hoe beschermen we mens en omgeving tegen nadelige effecten van straling en hoe maken we optimaal gebruik van de voordelen van straling?
- Hoe monitoren we straling op een efficiënte en effectieve wijze?

Kennisontwikkeling voor het thema stralingsveiligheid zal in internationaal verband moeten worden opgepakt. Tegelijkertijd is een stabiel niveau van kennis over stralingsbescherming in Nederland vereist om überhaupt nucleaire installaties te mogen draaien (nogmaals: dit geldt dus voor zowel kerncentrales als voor onderzoeksreactoren, verrijkingsinstallaties, en nucleaire installaties voor de productie van medische isotopen).

2. Systeemkennis

De inpassing van kernenergie kan het Nederlandse energiesysteem aanzienlijk veranderen (zie ook scenariostudie Witteveen & Bos et al. (2022)). Dit geldt met name bij de introductie van SMR's en vierde generatie reactoren. Deze ontwikkeling kan aanzienlijke impact hebben op de lay-out en het functioneren van het energiesysteem, op uitbreidingsplannen voor wind en zon, op import van energie, maar ook voor decarbonisatie plannen voor de industrie (met name voor industrie op grotere afstand van windparken) en aldus op de Nederlandse en Europese economie en de kwaliteit van de leefomgeving.

Kennisvragen in dit verband zijn:

- Welke rollen kan kernenergie, inclusief SMR's, spelen, nu en in de toekomst? Het gaat hierbij om multiple doelen zoals:
 - De combinatie van elektriciteitsproductie samen met warmte voor de industrie en waterstofproductie.
 - Sectorkoppeling, bijvoorbeeld de combinatie CO₂-vrije elektriciteitsproductie en CO₂-vrij regelbaar vermogen voor de industrie; moeten kerncentrales regelbaar vermogen leveren, of gaan ze basislast leveren? Dit beïnvloedt het ontwerp van de centrale (mate van regelbaarheid) en de behoefte aan flankerende investeringen in bijvoorbeeld electrolyzers.



- Wat is de impact van verschillende rollen vanuit een technisch (ontwikkeling toekomstig energiesysteem), economisch en sociaal maatschappelijk perspectief en wat betreft leveringszekerheid en effecten op de leefomgeving?
- Hoe kan kernenergie een rol spelen in de productie van waterstof, zowel vanuit een technisch, als financieel economisch en/of geopolitiek oogpunt?
- Hoe ziet een roadmap er over de komende 30-50 jaar uit (3^e en 4^e generatie, SMR's enz.)?

Naast bovenstaande onderwerpen zijn er ook andere vraagstukken die aandacht verdienen, zoals financieringsvraagstukken en strategische industriepolitiek. Welke rol kan de (Nederlandse/Europese) industrie spelen bij de bouw van Gen. III kerncentrales of de ontwikkeling van SMR's? Welk perspectief wordt er geboden? Welk business modellen worden wel of niet gestimuleerd?

Voor deze systeemvraagstukken is het nodig het methodologisch instrumentarium op orde te brengen om integraal de effecten op het energiesysteem/economie/leefomgeving/maatschappij, inclusief alle onzekerheden, te kunnen berekenen. Dit vereist rekenkracht van computers en geschikte visualisatie- en kwantitatieve analysetools.

Kennisontwikkeling voor dit thema kan primair door Nederlandse partijen worden uitgevoerd, eventueel in samenwerking met (West-) Europese partners. Dit thema past binnen de scope van MMIP 13, systeemintegratie.

3. Kennis over nucleaire reactor- en splijtstofcyclustechnologie

Omdat Nederland geen kernenergieprogramma had is de kennis over 3^e generatie reactoren zeer beperkt, maar niet nul. Zo levert NRG | Pallas diensten op het gebied van nucleaire veiligheid aan 3^e generatie reactoren in het buitenland en is zij betrokken bij de harmonisering van de ontwerpisen voor onder andere 3^e generatie reactoren. Ook wetenschappelijk onderzoek is in Nederland op dit vlak zeer bescheiden. Dit met name omdat NWO funding hiervoor ontbreekt en er alleen EU financieringsmogelijkheden beschikbaar zijn voor Nederlandse universiteiten.

Deze situatie zou serieus kunnen veranderen als kernenergie doorzet. Om te kunnen functioneren als een deskundig opdrachtgever bij de aanbesteding, inkoop en monitoring van derde generatie technologie is namelijk een stabiel niveau van kennis nodig. Daarnaast is kennis nodig voor beleid en VTH (vergunning, toezicht en handhaving). Ook bij de verdere ontwikkeling van SMR technologie is de Nederlandse kennispositie klein. Hier zijn echter wellicht kansen in niches. Nederland speelt een bescheiden rol bij de ontwikkeling van vierde generatie reactoren (bijvoorbeeld de thorium gesmolten zout reactor en metaal-gekoelde reactoren), maar het is een zeer aansprekend thema voor een nieuwe generatie onderzoekers en studenten. Door gerichte investeringen, om te beginnen op wetenschappelijk niveau, kan de Nederlandse positie worden uitgebouwd. Tenslotte kan Nederland haar sterke positie bij verrijking en isotopenproductie verder versterken.



Voor het thema nucleaire technologie zouden aldus de volgende onderwerpen moeten worden opgepakt:

- Algemene kennis derde generatie reactoren, voldoende om een deskundig opdrachtgever te zijn.
- Disciplinaire kennis (chemie, fysica, technologie en engineering) gericht op kernenergie en de bijbehorende splijstofcyclus voor ontwikkeling/ondersteuning van nucleaire industrie in Nederland.
- Niche onderwerpen voor de ontwikkeling van SMR's.
- Een ontwikkelingsprogramma voor vierde generatie reactoren, bijv thorium-MSR, metaalgekoelde reactoren, kleine en micro reactoren etc.
- Onderzoek naar cross-cutting thema's tussen kernsplijting.
- Verrijking en isotopen productie.

Kennisontwikkeling op dit thema heeft alleen zin in Europees en internationaal verband. Er zijn geen links met vigerende Nederlandse innovatieprogramma's.

4. Aan reactoren gerelateerde 'enabling' onderwerpen

Voor het bouwen, onderhouden, monitoring en beheer van kerncentrales zijn er innovatieve crossovers uit andere domeinen die hun toepassing (kunnen) vinden in (alle soorten) nucleaire installaties:

- Onderhoudssystemen voor onderhoud en monitoring van installaties in complexe omgevingen. Hier ligt mogelijk een relatie met MMIP 1 (wind-op-zee sector). Denk hierbij aan 'self-healing materialen en systemen', 'remote handling tools' zoals drones, circulair ontwerpen en bouwen.
- 'Plant integrity' systemen voor monitoring en control. Slimme systemen met AI en 'machine learning'. Hier ligt een mogelijke relatie met lucht- en ruimtevaart (ook een zeer veiligheidsbewuste sector) en met de procesindustrie en aldus met Missie C: duurzame industrie, het Programma Digitalisering van de Topsector Energie en ICT programma's (AI).
- Er is steeds meer mogelijk in de betonbouw (zoals de inzet van 'legosteentjes' van beton, in plaats van beton gieten), waardoor bij ontmanteling of reparaties de betonstructuur in delen verwijderd kan worden zonder te hoeven boren of breken.
- Innovaties in lastechnologie kunnen las- (en dus bouw-)tijden aanzienlijk verkorten.
- Projectmanagement voor complexe projecten. De bouw van een kerncentrale is een zeer complexe operatie. Hiervoor zou Nederlandse kennis uit de civiele sector kunnen worden gebruikt.

Deze thema's zouden als 'top-up' van lopende innovatie programma's in de bouw, industrie en ICT meegenomen kunnen worden.

5. Hoge temperatuur waterstofproductie

Kernenergie kan worden gebruikt voor hoge temperatuur elektrolyse en/of thermochemische watersplitsing voor de productie van waterstof. Hiervoor zijn reactoren nodig met een hogere outlet temperatuur (bij thermochemische splitsing is dit $>1000^{\circ}\text{C}$). De ontwikkeling van deze reactoren zijn nog in een ontwikkelingsfase en vergen nog onderzoek, bijvoorbeeld naar



structurele materialen die bestand zijn tegen hoge temperatuur en straling. Maar de huidige generatie hoge-temperatuur gasgekoelde reactoren (circa 700° C) , waar Nederland in het verleden veel onderzoek naar gedaan heeft, is reeds in China in bedrijf. Nederland heeft grote ambities wat betreft waterstof en investeert fors in R&D op verschillende TRL niveaus. Door deze programma's te koppelen aan hoge temperatuur waterstofproductie liggen hier grote kansen voor Nederland. Niet alleen voor eigen behoefte, maar ook om op dit vlak een internationale positie te verwerven. In de Kennisagenda waterstof van de Topsector Energie is hiernaar reeds verwezen. Samenwerking met Europese en internationale partners is hierbij belangrijk. Het thema 'waterstofproductie' staat ook centraal in het groeifonds programma 'Groeivermogen'.

6. Materialenonderzoek

Een succesvolle energietransitie en materialentransitie in andere sectoren vereist de ontwikkeling van innovatieve materialen, bijvoorbeeld voor de ontwikkeling van zonnecellen, batterijen, halfgeleiders, constructiematerialen enz. Met behulp van nucleaire/ioniserende straling (neutronen, positronen, protonen), kunnen de prestaties, capaciteit en levensduur van materialen worden verbeterd. Nederland heeft in dit domein een zeer sterke kennispositie. Europese en internationale samenwerking blijft echter belangrijk. Het thema materialenonderzoek past goed bij verschillende MMIP's voor klimaat en energie. Het gaat hierbij met name om MMIP's van Missie A, grootschalige elektriciteitsproductie en Missie C, duurzame industrie. Materialenonderzoek past ook bij andere materialenprogramma's bijvoorbeeld bij de Topsector HTSM.

7. Opslag en eindberging radioactieve materialen

Kerncentrales genereren zowel radioactief als niet-radioactief afval. Met de bouw van nieuwe kerncentrales is het dan ook belangrijk het afval en eindbergingsvraagstuk te integreren met huidige oplossingen (zoals op voorhand betalen) en technologische oplossingen op dit terrein.

De volgende kennisvragen zijn belangrijk:

- Ontwikkeling van verschillende scenario's voor verwerking en opslag van radioactief en niet-radioactief afval (zoals de keuze om gebruikte splijtstof wel/niet op te werken, of wel/geen MOx splijtstoffen in te zetten, de inzet van SMR's en de volumes niet-radioactief, niet-heterogeen afval die deze produceren, etc.).
- Geologische onderzoek naar eindberging van langlevend radioactief afval. Het gaat daarbij om thema's als chemische interacties in de ondergrond, oplosbaarheid en transport van radionucliden, heterogeniteit en eigenschappen van de ondergrond, grondwatertransport en geo-engineeringsvraagstukken als terugneembaarheid en het gebruikmaken van boorgaten.

Bij geologisch onderzoek kan worden aangesloten bij lopend wetenschappelijk onderzoek dat n.a.v. mijnbouwvraagstukken is opgestart. Geologisch onderzoek op dit vlak gebeurt in bijna elk Europees land. In veel gevallen gaan deze studies veel verder dan in Nederland.

Samenwerking met deze trajecten is belangrijk. Hierbij zijn met name België en Duitsland (in Nordrhein-Westfalen en Nedersaksen) belangrijk, omdat in deze landen de geologische omstandigheden enigszins vergelijkbaar zijn met Nederland. Bovendien is de kennis op dit vlak aanzienlijk groter dan in Nederland.



8. Onderzoek naar draagvlak voor kernenergie en andere nucleaire technologie

De huidige coalitie heeft het proces in gang gezet om twee nieuwe kerncentrales te bouwen in Zeeland. De nieuwe Pallas reactor in Petten zal waarschijnlijk in het voorjaar van 2023 definitief groen licht krijgen. Nederland kent een smalle, maar zeer solide nucleaire sector. Binnen en buiten Nederland is een trend zichtbaar van een groeiende publieke acceptatie voor kernenergie.

Dat neemt niet weg dat de perceptie over kernenergie uiteenloopt. Investeren in versterking van het draagvlak voor kernenergie, inclusief een zorgvuldige inpassing in de leefomgeving, is belangrijk om de uitbreiding van kernenergie te kunnen realiseren. Dat betekent luisteren naar omwonenden van kerncentrales, het juist en neutraal informeren van mensen die vragen hebben over kernafval en de eindberging ervan en het nut laten zien van kernenergie in een brede context. Overtuigen is niet het doel, wel het goed, tijdig en transparant informeren van mensen.

Dit sluit goed aan bij onderzoek in andere domeinen van de energietransitie. Het gaat hierbij om MMIP's voor Missie B, gebouwde omgeving, Missie C, Industrie, Missie MMIP 13, systeemintegratie en het MVI (Maatschappelijk Verantwoord Innoveren) programma van de Topsector Energie. Dit thema heeft een duidelijke nationale focus; desondanks zijn ervaringen en know-how van buiten Nederland altijd waardevol.



Bijlage 1. Aanleiding en aanpak

Op 1 juli 2022 beantwoordde minister Jetten (EZK) de Kamervragen leden Erkens en Van der

Woude (VVD) in de Tweede Kamer [kamervragen](#) naar aanleiding van het Telegraafartikel 'Interesse in kerncentrales groeit, maar: waar zijn de nucleair specialisten?': "Bent u bereid om kernenergie toegang te geven tot de topsectorregeling energie? Zo nee, waarom niet?" Het antwoord:

"Binnen de Topsector Energie vindt een korte verkenning plaats over de rol die de Topsector kan spelen in de Nederlandse bevordering van innovatie rondom kernenergie. Onderwerpen waar de Topsector een rol zou kunnen spelen:

- Systeemfunctie van kernenergie binnen het energiesysteem;
- Eventuele bijdrage van kernenergie aan productie van CO₂-vrije waterstof;
- Stimulering en mogelijke verbreding van innovatie in het ecosysteem rond kernenergie (inclusief bijvoorbeeld toeleveranciers voor de bouw van kerncentrales);
- Stimulering van de kennisontwikkeling en opleidingscapaciteit ten behoeve van goed geschoold personeel in alle fases van de ontwikkeling van de huidige en toekomstige generatie kerncentrales.

Het streven is om eind dit jaar deze verkenning af te ronden en daarna uw Kamer hierover te informeren."

Op 18 november 2022 stuurde minister Jetten (EZK) een [brief naar de Tweede Kamer](#) waarin het volgende vermeld staat over de Topsector Energie:

"Eerder heb ik uw Kamer geïnformeerd in antwoorden op Kamervragen dat er binnen de Topsector Energie een korte verkenning plaatsvindt over de rol die de Topsector kan spelen in de Nederlandse bevordering van innovatie rondom kernenergie. Het streven is om eind dit jaar deze verkenning af te ronden. Begin volgend jaar zal ik uw Kamer nader informeren over de inzet op het gebied van innovatie wat betreft kernenergie vanuit de missiegedreven Topsectoren aanpak als integraal onderdeel van de herijking van de meerjarige missiegedreven innovatieprogramma's voor Klimaat en Energie."

Ten behoeve van deze verkenning heeft een uitvoeringsteam van de Topsector Energie bijgaand rapport samengesteld aan de hand van de volgende onderzoeksvragen:

- Welke kennis- en innovatievragen met betrekking tot kernenergie en nucleaire technologie en -veiligheid kunnen gesteld worden om kernenergie in Nederland te benutten in de transitie naar een betrouwbaar en duurzaam energiesysteem?
- Hoe ziet het innovatie-ecosysteem op het gebied van kernenergie en nucleaire technologie en -veiligheid eruit?
- Wat is er nodig om kennis en innovatie op dit terrein in de toekomst te stimuleren en te borgen (incl. Human Capital agenda)?

Om deze vragen te beantwoorden zijn interviews gehouden binnen de nucleaire sector en heeft een deskresearch plaatsgevonden van recente rapporten en documenten (zie bijlage 3). Vanwege het korte tijdsbestek tussen opdrachtverlening (eind september '22) en oplevering



(medio december '22) is ervoor gekozen het net op te halen bij een eerste ring van experts en betrokkenen in de nucleaire wereld en het HBO, en een selectie van recente rapporten te bestuderen. Het uitvoeringsteam benadrukt de noodzaak van het betrekken van een bredere groep stakeholders en experts bij de verdere uitwerking van deze Kennis- en Innovatie Agenda Kernenergie.

Geïnterviewde organisaties

ANVS, COVRA, EPZ Borssele, Haagse Hogeschool, Hogeschool Zeeland, Human Capital Topsectoren, Ministerie van IenW, NRG / Pallas, Reactor Instituut Delft, RIVM, Saxion Hogeschool, Thorizon, TU Delft, ULC Energy, Urenco, Water & Energy solutions.

Interview thema's

1. Welke kennis- en innovatievragen met betrekking tot kernenergie en nucleaire technologie en -veiligheid kunnen gesteld worden om kernenergie in Nederland te benutten in de transitie naar een betaalbaar, betrouwbaar en duurzaam energiesysteem?

Denk bijvoorbeeld aan:

- Bouw, exploitatie en ontmanteling kerncentrales
- Verwerking, opslag en eindberging radioactief afval
- Nieuwe generatie kerncentrales en innovatieve technologieën
- Hoog temperatuur waterstof productie
- Sociaalwetenschappelijke, juridische, financieel-economische en geopolitieke kennis
- Rol kernenergie in het totale energiesysteem

2. Hoe ziet het innovatie-ecosysteem op het gebied van kernenergie en nucleaire technologie en -veiligheid eruit?

Denk bijvoorbeeld aan:

- Nucleaire sector en aanpalende sectoren
- Fysieke infrastructuur en (grond)stoffen
- Kansrijke (domeinoverstijgende en/of publiek-private) partnerships

3. Wat is er nodig om kennis en innovatie op dit terrein in de toekomst te stimuleren en te borgen (incl. Human Capital agenda)?

Denk bijvoorbeeld aan:

- MBO, HBO, WO (kenniscompetentiepiramide)
- Regionale speerpunten en kansen
- Internationale context



Bijlage 2. Geraadpleegde documentatie t.b.v. deskresearch

| Jaar | Titel | Door |
|----------------|--|---|
| 2022 (dec) | Visie voor een nucleair en stralingsecosysteem in Nederland – discussiedocument Link naar document | TU Delft |
| 2022 (nov) | Kamerbrief en beslisnota over invulling kennisinfrastructuur n.a.v. de motie Erkens-Dassen Link naar document | MinEZK, DG Klimaat en Energie, Programmadirectie Kernenergie |
| 2022 (sept) | De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector; Nu en verwachtingen voor 2030/2035. Link naar document | Technopolis Group in opdracht van Nucleair Nederland |
| 2022 (sept) | Hoofdrapport Scenariostudie Kernenergie Link naar document | Witteveen + Bos, eRisk Group en The Hague Centre for Strategic Studies in opdracht van het ministerie van EZK |
| | Financing models for nuclear power plants – European Nuclear Power Plant case studies Link naar document | Baringa in opdracht van het ministerie van EZK |
| 2022 (juli) | Kamerbrief Stralingsveiligheid Link naar document | MinlenW / interdepartementale werkgroep (HAW) |
| 2022 (juni) | Analyse toekomstige vraag naar nucleaire kennis(werkers) in Nederland. Indicatief beeld van de huidige en verwachte schaarste. Link naar document | Berenschot i.o.v. interdepartementale werkgroep (HAW) |
| 2022 (juli) | Brief met beantwoording Kamervragen Link naar document | MinEZK, DG K&E, directie Elektriciteit |
| 2022 (juli) | Kamerbrief over acties die zijn ingezet om uitvoering te geven aan het coalitieakkoord op het gebied van kernenergie. Link naar document | MinEZK, DG K&E, directie Elektriciteit |
| 2022 (juni) | Kamerbrief Contouren Nationaal Plan Energiesysteem Link naar document | MinEZK, DG K&E, directie Elektriciteit |
| 2022 (mei) | Brief en notitie Uitgangspunten Outlook energiesysteem 2050 Link naar document | Expertteam Energiesysteem 2050 in opdracht van MinEZK, Jetten |
| 2021 (dec) | Kamerbrief ‘Naar een nationaal plan voor het energiesysteem 2050’ Link naar document | Min EZK, DG K&E, directie Warmte en Ondergrond |
| 2021 (sep) | Dossier Advies Besluitvormingsproces toekomst radioactief afval, met projectplan Link naar dossier | Rathenau Insituut in opdracht van MinlenW |



| | | |
|-----------------|---|--|
| 2021 (juli) | Marktconsultatie Kernenergie Link naar document | KPMG, i.o.v. minEZK |
| 2021 (juni) | SCHEER review of the JRC report on Technical assessment of nuclear energy Link naar document | SCHEER commission i.o.v. Europese Commissie |
| 2021 (juni) | Opinion of the Group of Experts referred to in Article 31 of the Euratom Treaty on the JRC report on Technical assessment of nuclear energy Link naar document | Artice 31 group of experts i.o.v. Europese Commissie |
| 2021 (april) | Het Energiesysteem van de Toekomst. Integrale Infrastructuur-verkenning 2030-2050 Link naar document | Netbeheer Nederland (gezamenlijke netbedrijven, o.a. TenneT, Gasunie etc.) |
| 2020 | Kernenergie is nodig om de klimaatdoelen te halen. CO ₂ -neutraal, stabiel, betaalbaar | Nucleair Nederland |
| 2020 | JRC report 'Technical assessment of nuclear energy' Link naar document | JRC i.o.v. Europese Commissie |
| 2020 | Van der Zande rapport: Naar een Agenda en Platform Nucleaire Technologie en Straling Link naar rapport | Commissie Van der Zande i.o.v. de ANVS |
| 2020 (sep) | Possible Role of Nuclear in the Dutch Energy Mix of the Future Link naar rapport | ENCO Europe i.o.v. minEZK |
| 2020 (juni) | PIONIER: NRG onderzoeksprogramma (2021-2024) Link naar website | NRG i.o.v. minEZK |



