

*Augustus 2023*

# **Economische en maatschappelijke impact van de ontwikkeling van een Molten Salt Reactor in Nederland**

---

**Een ex-ante impactbeoordeling voor het  
MOSAIEC Consortium in opdracht van de  
Provincie Noord-Brabant**

*Augustus 2023*

## **Economische en maatschappelijke impact van de ontwikkeling van een Molten Salt Reactor in Nederland**

### **Een ex-ante impactbeoordeling voor het MOSAIEC Consortium in opdracht van de Provincie Noord-Brabant**

---

**Technopolis Group:** [Anna Menenti](#), Chiel Scholten, Erwin Karsten en Geert van der Veen

**Strategy Unit:** Christian Janssen

# Inhoudsopgave

---

1	Introductie	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Kader van de impactbeoordeling	1
1.3	Leeswijzer	3
2	Context: MSR in Nederland en daarbuiten	4
2.1	Wat is een Molten Salt Reactor?	4
2.2	Alternatieven Molten Salt Reactor met oog op energiebehoefte	4
2.2.1	Competitiviteit MSR	5
2.3	Ontwikkeling van een Molten Salt Reactor in Nederland	7
3	Theory of change als kader voor de impactmeting	8
3.1	Wat is een Theory of Change?	8
3.2	De Theory of Change voor de ontwikkeling van een MSR in Nederland	8
3.3	Assumpties bij impactmeting middels de Theory of Change	10
4	Bijdrage MSR-ontwikkeling aan maatschappelijk verdienvermogen	11
4.1	Beschrijving impactpaden duurzaamheid en sociaal-ethisch	11
4.2	Outcomes	12
4.2.1	Sterke CO <sub>2</sub> -vrije waterstofsector	12
4.2.2	Emissievrije opgewekte energie	12
4.2.3	Radioactief afval	13
4.2.4	Veiligheid MSR	16
4.3	Impacts	18
4.3.1	Betrouwbare lokale energievoorziening	18
4.3.2	Minder internationale afhankelijkheid voor energieproductie en nucleaire technologie van o.a. politiek instabiele landen	18
4.3.3	Bijdrage aan klimaatdoelen: Significante reductie CO <sub>2</sub> - uitstoot	19
4.3.4	Publiek draagvlak	20
5	Bijdrage MSR-ontwikkeling aan economisch verdienvermogen	23
5.1	Beschrijving impactpad economisch verdienvermogen	23
5.2	Outcomes	23
5.2.1	Directe effecten met betrekking tot elektriciteit, warmte en waterstof	23
5.2.2	Effecten met betrekking tot spin-offs & innovatie	28
5.2.3	Opschalen en export MSR Technologie	30
5.2.4	Kostenbesparingen door lokale opwekking, geen netverzwaring nodig	30
5.2.5	Versterkte industriële basis & nucleaire (service) sector in Nederland	31
5.2.6	Voldoende gekwalificeerd en technisch talent nucleaire en energiesector	33

5.3	Impacts	34
5.3.1	Economische groei	34
5.3.2	Sterk vestigingsklimaat nucleaire en energie-intensieve industrie	35
5.3.3	Betrouwbare duurzame energievoorziening	36
6	Belang van een human capital strategie/roadmap	37
6.1	Brede & smalle nucleaire sector	37
6.2	Vraag naar arbeid tijdens de ontwikkeling, bouw en operationele fase van een MSR	38
6.2.1	Vorbereidingsfase/Ontwikkelfase	38
6.2.2	Bouwfase	40
6.2.3	Operationele fase	40
6.3	Aanbod van arbeid vanuit opleidingen met komst MSR	41
6.4	Afhankelijkheden en randvoorwaarden	43
7	Conclusies	44
7.1	Maatschappelijke impact	44
7.1.1	Duurzaamheid	44
7.1.2	Sociaal-ethisch	45
7.2	Economische impact	45
7.3	Human Capital	47
	Appendices A Bronnenlijst	48
	Appendices B Geraadpleegde personen	53

# 1 Introductie

---

## 1.1 Aanleiding

Met de ondertekening van het Klimaatakkoord van Parijs in 2016 heeft ook Nederland zich gecommitteerd aan het doel om de opwarming van de aarde te beperken tot maximaal 2 graden Celsius en bij voorkeur 1.5 graden Celsius. Nederland heeft daarin als welvarend land dat veel uitstoot heeft veroorzaakt een belangrijke bijdrage te leveren. In het kader daarvan presenteerde Minister Jetten eind april 2023 een pakket met extra maatregelen om de klimaatdoelen in 2030 te kunnen halen<sup>1</sup>. Onderdeel daarvan is het doel om per 2035 een CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteitssector te hebben. Dit kan volgens de Minister alleen gerealiseerd worden met een brede duurzame energiemix waarin het Kabinet Rutte IV ook inzet op kernenergie.

De koers van het Kabinet Rutte IV is om de levensduur van de huidige kerncentrale in Borssele te verlengen en twee nieuwe kerncentrales te realiseren. Hiervoor wordt gekeken naar Small Modular Reactors (SMR, generatie-IV-reactoren, innovatieve nieuwe reactoren). Er worden extra middelen ingezet om de ontwikkeling van Small Modular Reactors “die in hun ontwerpfase dicht tegen de markt aan zitten”<sup>1</sup> (generatie-III+-reactoren, een doorontwikkeling van bestaande reactoren) te versnellen en de waardeketen te versterken, gekoppeld aan de Nederlandse maakindustrie.

De gesmoltenzoutreactor (Molten Salt Reactor, MSR) valt onder de vierde generatie kernreactoren (nieuwe concepten met verbeteringen richting veiligheid, duurzaamheid, efficiëntie en kosten). Hiervoor zijn diverse ontwerpen in ontwikkeling in binnen- en buitenland. In Nederland werkt het bedrijf Thorizon aan de ontwikkeling van een Thorium Molten Salt Reactor.

Voor versnelling van de ontwikkeling van een MSR in Nederland hebben diverse partijen de handen ineengeslagen en samen het consortium “Molten Salt Innovation Ecosystem” (MOSAEIC) gevormd. Hieraan hebben bedrijven (o.a. Huisman, Thorizon, Demcon, Orano), kennisinstellingen (TU Delft, NRG) en provincies (o.a. Noord-Brabant en Zeeland) zich verbonden. In het kader van het uitbreiden van de strategische partnerschappen heeft de Provincie Noord-Brabant, namens het MOSAEIC-consortium, aan Technopolis B.V. gevraagd om **het potentiële economische en maatschappelijke verdienvermogen van de ontwikkeling en implementatie van een MSR in Nederland nader in kaart te brengen**.

Technopolis B.V. heeft samen met de Brabantse STERconsortium-partner Strategy Unit een impactbeoordeling uitgevoerd naar het potentiële maatschappelijke en economische verdienvermogen van een MSR. In dit rapport worden de bevindingen van de studie gepresenteerd.

## 1.2 Kader van de impactbeoordeling

In deze impactbeoordeling staat het potentiële maatschappelijke en economische verdienvermogen voor Nederland van de ontwikkeling en implementatie van een MSR in Nederland centraal. We beschouwen daarvoor een MSR met een gesloten splijstofcyclus. Dat betekent dat de splijstof – de brandstof van een MSR in de vorm van een mengsel van gesmolten zouten – steeds teruggevoerd wordt in de reactor. Hierdoor kan een MSR de gebruikte splijstof nagenoeg geheel 'opbranden' en wordt het radioactieve afval dat een

---

<sup>1</sup> Kamerbrief over [voorjaarsbesluitvorming Klimaat](#), 26 april 2023

MSR produceert geminimaliseerd. Dit is het type MSR waaraan in Nederland (en op andere plekken in Europa) wordt gewerkt. In het rapport zullen we op sommige plekken ter illustratie specifiek verwijzen naar het MSR-concept van Thorizon, maar de bevindingen in deze rapportage gelden breder, voor alle MSR's met een gesloten splijstofcyclus.

**Wanneer we spreken over een MSR in dit rapport, bedoelen we een generieke MSR met een gesloten splijstofcyclus.**

We werken voor deze impactbeoordeling met een Theory of Change. Dat is een methode om activiteiten logisch te verbinden aan de daaruit voortvloeiende uitkomsten (outcomes) en impacts. Daarmee brengen we in kaart hoe de ontwikkeling en implementatie van een MSR in Nederland kan bijdragen aan het (gewenste) maatschappelijke en economische verdienvermogen van Nederland. Deze aanpak is analoog aan de aanpak die binnen het Nationale Groeifonds wordt gehanteerd bij de beoordeling van voorstellen.

De Theory of Change beschrijft dus de outcomes en impacts. Er is echter niet altijd specifieke data of informatie beschikbaar om deze outcomes en impacts te kwantificeren. Daarom kijken we, waar dat zinvol is, naar andere soorten kernenergiereactoren en energiebronnen in onze analyse en besteden dan ook aandacht aan de verschillen tussen een MSR en de andere soort energiebron om een gevoel te geven voor de robuustheid van onze analyse.

**Om de impact van een MSR in kaart te brengen, en in context te plaatsen, moeten we soms vergelijkingen trekken met andere soorten kernenergiereactoren of energiebronnen.**

Met de impactbeoordeling kijken we naar de kansen voor Nederland van de ontwikkeling en implementatie van een MSR. We wegen de voor- en nadelen van een MSR. De voor- en nadelen zijn soms niet uniek voor een MSR, maar spelen ook bij andere energiebronnen of kernenergie. Die context geven we zo veel mogelijk aan. **We nemen daarbij de onderscheidenheid van een MSR in ogenschouw.** Een MSR is vooral onderscheidend en vernieuwend in ontwerp, brandstof, modulariteit, flexibiliteit en passieve veiligheid, daarmee biedt de MSR een aantal verbeteringen ten opzichte van conventionele kernenergiecentrales. Voordelen van een MSR ten opzichte van een conventionele kerncentrale zijn o.m. de reductie van langlevend radioactief afval en grotere veiligheid (incidenten en proliferatie).

*Tabel 1 Enkele onderscheidende kenmerken van een MSR*

Kenmerk	Toelichting
<b>Modulair</b>	In tegenstelling tot de huidige conventionele kerncentrales kan een MSR modulair gebouwd worden. Daardoor kunnen onderdelen vooraf seriematig gemaakt worden en relatief eenvoudig worden vervangen. Dat vereenvoudigt de bouw (en mogelijk de licentiering) van een MSR in vergelijking tot de huidige kerncentrales en beperkt het deel van de reactor dat nucleair is. Dat kan op termijn leiden tot substantieel lagere en beter beheersbare bouwkosten voor kernenergiecentrales. Op dit aspect is een MSR enigszins vergelijkbaar met een Small Modular Reactor – een SMR – alleen maakt het gebruik van een ander reactorconcept dat de voordelen van gesmolten zout als brandstof benut.
<b>Andere brandstof</b>	De brandstof van een MSR is een mengsel van gesmolten zouten dat zowel als brandstof als koelmiddel fungeert. In conventionele kernenergiereactoren worden vaste brandstofstaven gebruikt waar er water nodig is als koelmiddel, hetgeen het ontwerp veel complexer, in termen van actieve veiligheidssystemen, maakt. Daarnaast kan een MSR meerdere, verschillende radioactieve elementen als brandstof gebruiken, waaronder thorium – wat ook in Europa voorradig is en wereldwijd meer voorradig is dan uranium. Een MSR kan deze brandstof voor een groot deel 'opbranden', waardoor er minder langlevend afval overblijft.
<b>Hergebruik van splijstof</b>	Een MSR leent zich ervoor om gebruikte splijstof van conventionele kernenergiereactoren te hergebruiken. Bestaand verwerkt radioactief afval leent zich hier echter niet voor. Elementen van uranium, thorium en verschillende transuranen in gebruikte splijstoffen kunnen na een recyclingproces hergebruikt worden als brandstof in een MSR. Ook kan het

Kenmerk	Toelichting
	zout dat een MSR gebruikt opnieuw gerecycled worden. Het proces om uit de recyclingsprocessen zouten te maken, dan wel herinductie van gebruikt zout, voor gesmolten zout reactoren wordt momenteel op bestaande basis verder ontwikkeld.
<b>Minder lang levend afval</b>	De andere brandstof, het hergebruik van gebruikte splijtstoffen en de recycling van de brandstof leiden uiteindelijk tot afval dat minder langlevend (<300 jaar) is dan bij conventionele kernenergiereactoren.
<b>Flexibel</b>	Een MSR kan vrij flexibel de vraag naar elektriciteit volgen, door – op momenten dat er te veel aanbod is van elektriciteit – de geproduceerde warmte tijdelijk op te slaan in het gesmolten zout in een secundair circuit of door (voor zover mogelijk of gewenst op de locatie van de MSR) om te schakelen naar de productie van waterstof. Daarin wijkt het af van kolencentrales en van zonne- en windenergie.
<b>Hoge Temperatuur warmte</b>	Een MSR kan stoom genereren met een temperatuur tussen de 500-600 °C, vergelijkbaar met kolen- en gascentrales, maar hoger dan bij conventionele kernenergiecentrales. Door deze hoge temperatuur is de omzettingsefficiëntie van een MSR naar elektriciteit zeer hoog. Ook maakt deze temperatuur de MSR geschikt om warmte te leveren voor industriële processen en om op een zeer efficiënte wijze waterstof te produceren. Het leveren van hoge temperatuur warmte aan de industrie is niet (rechtstreeks) mogelijk met hernieuwbare energiebronnen.
<b>Passieve veiligheid</b>	Door gebruik te maken van gesmolten zouten is een meltdown met drukescalatie niet mogelijk. De zouten zetten uit bij hoge temperatuur waardoor er minder brandstof in de kern achterblijft en de temperatuur en het vermogen van de reactor afnemen. De reactie stopt als de stroom uitvalt en het zoutmengsel niet meer rondgepompt wordt of te heet wordt. Daardoor is een MSR inherent veiliger dan conventionele kernreactoren.
<b>Innovatief</b>	MSR's vormen een nieuwe generatie reactoren die nog volop in ontwikkeling zijn, in tegenstelling tot conventionele kernenergiecentrales en de meeste andere fossiele en hernieuwbare energiebronnen. Dat biedt kansen voor nieuwe spelers, marktcreatie en verdienvermogen, maar ook risico's – een succesvolle ontwikkeling van een MSR is op voorhand niet verzekerd en vraagt om investeringen.

### 1.3 Leeswijzer

- In hoofdstuk twee nemen wij de lezer mee in de context van de MSR en de rol daarvan in de (toekomstige) energiebehoefte;
- In hoofdstuk drie presenteren we de Theory of Change voor een MSR: de wijze waarop ontwikkeling en implementatie van een MSR kan leiden tot (maatschappelijke en economische) veranderingen. Wij introduceren daarbij de impactpaden die horen bij het maatschappelijk en economisch verdienvermogen;
- In hoofdstuk vier wordt de bijdrage van de MSR-ontwikkeling aan het maatschappelijk verdienvermogen toegelicht middels de uiteenzetting van de outcomes en impacts die onderdeel vormen van de impactpaden Duurzaamheid en Sociaal & Ethisch;
- In hoofdstuk vijf wordt de bijdrage van de MSR-ontwikkeling aan het economisch verdienvermogen toegelicht door outcomes en impacts in dit impactpad volgorde-lijk uiteen te zetten;
- In hoofdstuk zes richten we ons op het belang van een human capital strategie;
- Tot slot vatten wij onze bevindingen ten aanzien van het verdienvermogen samen in hoofdstuk zeven.

## 2 Context: MSR in Nederland en daarbuiten

---

### 2.1 Wat is een Molten Salt Reactor?

Een gesmoltenzoutreactor (Molten Salt Reactor, MSR) is een type kernreactor waarin onder atmosferische druk een mengsel van gesmolten zouten wordt gebruikt als splijtstof en koelmiddel. De splijtstof, de brandstof van een kernreactor, bestaat uit bijv. een fluoride of chloride van uranium, plutonium of thorium.

De basis voor de MSR-technologie is in de jaren '50 ontstaan in de Verenigde Staten en in de jaren '60 opgevolgd door verschillende experimenten met onder andere een test reactor. Ondanks dat deze experimenten vrij succesvol waren, werd het onderzoeksprogramma stopgezet om mensen en budget vrij te maken voor een, al verder ontwikkelde, metaalgekoelde kweekreactor die uiteindelijk niet succesvol bleek.

Na een aantal decennia uit de belangstelling te zijn geweest, is het idee van de gesmoltenzoutreactor de afgelopen jaren weer opgepakt door verscheidene onderzoeksgroepen in de wereld: in de Verenigde Staten, China en Europa, waaronder in Nederland. Aanleiding is de toenemende, grootschalige vraag naar duurzaam (m.n. CO<sub>2</sub>-arm), goedkoop en veilig geproduceerde energie. Men hoopt met een MSR de technologie voor kernenergie te verbeteren en, mede daardoor, kernenergie meer acceptabel te maken.

Ten opzichte van een conventionele (tweede generatie) watergekoelde kernreactor kan (maar dat is nog niet op commerciële schaal bewezen) de MSR een hoger rendement halen doordat de reactortemperatuur hoger is. Daarnaast wordt er minder en minder langlevend radioactief afval geproduceerd. Het MSR-ontwerp is veiliger (passieve veiligheid) en kan thorium als splijtstof gebruiken dat drie tot vier keer meer voorradig (en bovendien in Europa) is dan uranium.

### 2.2 Alternatieven Molten Salt Reactor met oog op energiebehoefte

De energiebehoefte stijgt en de vraag naar CO<sub>2</sub>-arme bronnen om in deze behoefte te voorzien ook. Daarnaast hebben recente geopolitieke ontwikkelingen als gevolg van de oorlog in Oekraïne zwaktes met betrekking tot de leveringszekerheid en afhankelijkheden binnen het huidige Nederlandse energiesysteem verduidelijkt. Het reduceren van gaswinning staat al jaren op de agenda en met de uitkomsten van de parlementaire enquêtecommissie over de aardgaswinning in Groningen worden de gasvelden nu echt gesloten. Dit alles laat zien dat de Nederlandse energiemix in de toekomst zal moeten veranderen. Energie Beheer Nederland presenteerde diverse scenario's, die, ondanks onzekerheden, met zekerheid laten zien dat er een grote variëteit aan energiebronnen nodig is om in de toekomst in onze energiebehoefte te voorzien – zeker als daarin de afhankelijkheid van het buitenlands beperkt moet zijn. In een optimistisch scenario becijferen zij dat ook bij opschalen van energiebronnen als wind (offshore), wind en zonne-energie (onshore), geothermisch en kernenergie in 2050 nog steeds ca. 1/3 van de energie geïmporteerd zal worden om aan de energiebehoefte te kunnen voldoen<sup>2</sup>.

Kernenergie speelde in Nederland tot op heden een kleine rol in de energiemix. Met het oog op het doel om in 2040 CO<sub>2</sub>-neutraal elektriciteit te produceren, is er sinds kort ook weer beleidsmatig aandacht voor kernenergie. Het Kabinet Rutte IV zet concreet in op de realisatie

---

<sup>2</sup> Energie Beheer Nederland (2023), <https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2023/01/EBN-Infographic-2023-A4-Engels.pdf>



van twee kerncentrales, idealiter in Borssele (vanwege reeds aanwezige infrastructuur voor kernenergie) en anders op de eerste Maasvlakte<sup>3</sup>. Gezien het doel om in 2040 CO<sub>2</sub>-neutraal te zijn, dienen de nieuwe kerncentrales voordien operationeel te zijn. Met de bestaande type kerncentrale denkt het Kabinet dat per 2035 te kunnen realiseren en daarmee 9-13% van het energieaanbod in 2035 te realiseren. Hiervoor wordt naar twee reactoren van 'generatie-III+' gekeken, een verdere ontwikkeling van de 'generatie II/III' Light Water Reactors (een bestaand type kerncentrale).

Nieuwere generaties zoals MSR/Thoriumreactoren en Small Modular Reactors (SMR) worden door het Kabinet op dit moment niet geschikt geacht; deze nieuwe generaties zijn nog volop in ontwikkeling en zouden niet per 2035 operationeel zijn. Een mogelijke rol zien beleidsmakers wel na 2050, maar ook dan verwachten zij momenteel niet meer dan 20% van het energieaanbod middels kernenergie te realiseren. Gezien de tijdspaden voor ontwikkeling, vergunningen en bouw van kernreactoren is commitment op korte termijn vereist om die groei van kernenergie binnen het huidige beeld met betrekking tot het energieaanbod waar te kunnen maken.

De OECD en Nuclear Energy Agency schetsten het tijdspad voor de Small Modular Reactors als onderdeel van het SMR-dashboard dat zich richt op het in kaart brengen van de voortgang van de realisatie van de SMR met betrekking tot vergunningen, locatie, brandstof, interesse, supply chain en financiering<sup>4</sup>. Het realiseren van een First Of A Kind (FOAK) MSR in Nederland lijken deze MSR-experts rond 2038 in te schatten, vergelijkbaar met de non-LWR (licht water reactor) SMR's. Dit is uitgaande van een financieel commitment dat verschillende publieke en private partijen in staat stelt hierin intensief samen te werken. Het Kabinet Rutte IV kondigde een reservering van 65 miljoen euro aan, bedoeld als bijdrage die van toepassing is op de SMR's om de overgangsfase van ontwerp naar realisatie te versnellen<sup>5</sup>.

Dergelijke tijdslijnen zijn echter uiterst speculatief: er zijn veel factoren die de ontwikkelingstijd positief en negatief kunnen beïnvloeden en bovendien zijn MSR's heel anders dan reactoren die de laatste decennia zijn gebouwd en ontwikkeld. Er is dus beperkte historische informatie. Het zal hoogstwaarschijnlijk enkele jaren duren voordat een meer betrouwbare inschatting van de ontwikkelingstijd gegeven kan worden.

### 2.2.1 Competitiviteit MSR

Een van de economisch meest relevante indicatoren voor competitiviteit van een elektriciteitscentrale is de Levelised Cost Of Electricity (LCOE) van de geproduceerde elektriciteit. Dit omvat alle levenscycluskosten, en wordt uitgedrukt in kosten per eenheid elektriciteit, meestal als [€/MWh]. Vanuit beleidsperspectief wordt een elektriciteitscentrale economisch aantrekkelijk wanneer de LCOE lager is dan de verwachte gemiddelde elektriciteitsprijs, of goedkoper is dan alternatieve bronnen.

In de nucleaire sector zijn de kapitaalkosten voor de bouw van de kernenergiecentrale het voornaamste onderdeel van de LCOE, vaak zo'n 75%<sup>6</sup>, gevolgd door kosten voor operatie,

---

<sup>3</sup> Zie: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/opwekking-kernenergie>

<sup>4</sup> OECD & Nuclear Energy Agency (2023) [The NEA Small Modular Reactor Dashboard](#). NEA No. 7650

<sup>5</sup> Kamerstuk ah-tk-20222023-2623, Antwoord van Minister Jetten op vragen van leden Erkens (VVD) en Bontebal (CDA), 16 mei 2023.

<sup>6</sup> IAEA, 2018. Economic Assessment of the Long Term Operation of Nuclear Power Plants: Approaches and Experience.

onderhoud en brandstof<sup>7</sup>. Het proces van vergunningverlening voor een nucleair ontwerp brengt vaak ook grote kosten met zich mee, zeker wanneer het ontwerp afwijkt van conventionele centrales. Die vergunningskosten hangen echter ook af van het ontwerp: indien een ontwerp 'zonder twijfel' veilig is, kan de vergunningverlening ook sneller verlopen. Een MSR bevat een aantal ontwerpeigenschappen die gunstig zijn voor de (passieve) veiligheid van de reactor. In die zin kunnen de kosten en tijd voor vergunningverlening ook gunstig uitvallen. Hiervoor is geen precedent en daarom is dit aspect lastig in te schatten.

Vanwege schaalvoordelen neemt de LCOE van een kerncentrale af wanneer productievefficiënties en het elektrisch vermogen toenemen. Deze kostenreductie komt door verschillende factoren: de hogere prestaties van grotere apparatuur (stoomgeneratoren, pompen); het efficiënter gebruik van grondstoffen en vaste overheadkosten die niet toenemen met schaalvergroting. Wel geldt natuurlijk ook dat de investeringskosten toenemen met de reactor grootte. Daarnaast kan het lastig zijn om meer vermogen op elektriciteitsnet in te passen (sectie 5). Deze en andere factoren, zoals de 'economy of multiples' zijn de drijvende krachten achter de groeiende interesse in kleine modulaire kernreactoren (SMR's)<sup>8,9</sup>. Daarbij speelt ook mee dat een MSR een modulaire reactor is waarbij het primaire systeem van een MSR (geheel of grotendeels) vooraf in een fabriek (seriematig) kan worden geproduceerd, in plaats van op locatie. Dat zou een kostenreductie met zich mee moeten brengen ten opzichte van conventionele, niet-modulaire kernreactoren.

### *Schattingen LCOE en vergelijking alternatieve energiebronnen*

De LCOE is sterk afhankelijk van met name de kapitaalkosten, omdat de LCOE de totale kosten als de totale opbrengsten door opwek over de hele levenscyclus (vaak al minstens 20 jaar voor een nucleaire reactor) in acht neemt, en omdat de kosten vooral in het begin liggen (aanvangsinvesteringen). De kosten en opbrengsten worden in een LCOE 'teruggebracht' naar het heden in de netto contante waarde, gebruikmakend van de verdisconteringsvoet (dit vereist een schatting van de kapitaalkosten, welke markt- en beleidsafhankelijk zijn).

Daarnaast is de LCOE sterk afhankelijk van het aantal vollasturen van de installatie. Aangezien dat de 'opbrengstenkant' van de vergelijking is, kunnen kleine assumptieverschillen leiden tot grote uitkomstverschillen. Ook een vergelijking met andere energiebronnen is niet eenvoudig, zo zijn de kosten voor kolen- en gascentrales sterk afhankelijk van de prijs van hun grondstoffen. Deze grondstoffenprijzen zijn momenteel erg volatiel. Met een lange voorspellingstermijn hebben deze grondstofprijzen dus een grote impact op de LCOE. De meeste LCOE-berekeningen laten de kosten van externaliteiten buiten beschouwing. Zo zijn de kosten van de CO<sub>2</sub>-uitstoot niet altijd meegenomen in de LCOE van gas- en koleninstallaties. De lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot van hernieuwbare en nucleaire installaties is dus vaak niet zichtbaar in het verschil

---

<sup>7</sup> Carelli, M.D., Ingersoll, D.T., 2014. Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. Woodhead Publishing, Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857098535.2.149>.

<sup>8</sup> Mignacca, B., Locatelli, G., 2020. Economics and finance of Small Modular Reactors : a systematic review and research agenda. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 118, 109519

<sup>9</sup> De 'economy of multiples' bij de constructie van kerncentrales is gerelateerd aan het idee van "massaproductie". De 'economy of multiples' wordt bereikt vanwege twee belangrijke factoren: het leerproces (verlagen kosten apparatuur, materiaal en werk en verkort van bouwschema's) en de Co-siting-besparingen<sup>9</sup>. Deze vloeien voort uit de opzetactiviteiten met betrekking tot siting (bijv. verwerving van grondrechten, aansluiting op het transportnet) die reeds zijn uitgevoerd, en door bepaalde vaste kosten die kunnen worden bespaard bij het installeren van de tweede en volgende units (Locatelli, 2017). Daarom, hoe groter het aantal co-sited modules, hoe lager de totale investeringskosten per module.

tussen LCOE's – indien dat wel consistent meegenomen zou worden, kunnen de verschillen in LCOE dus groter zijn t.o.v. gas- en kolencentrales.

### 2.3 Ontwikkeling van een Molten Salt Reactor in Nederland

Rondom de ontwikkeling van een Molten Salt Reactor in Nederland heeft zich een netwerk gevormd van bedrijven, kennisinstellingen en regionale overheden op basis van competenties en complementariteit, het Molten Salt Innovation Ecosystem (MOSAIEC). Zo kan gezamenlijk gewerkt worden aan de ontwikkeling en voorbereiding van (de bouw van) een MSR, bijvoorbeeld aan het vergroten van de materiaalkennis, het bepalen van de impact van een MSR op veiligheid en het verkrijgen van indicatoren met betrekking tot vergunningen. Ook wenst men samen te werken met betrekking tot het oplijnen en opleiden van Human Capital. Op dit moment vinden onderzoeksactiviteiten in Nederland op kleine schaal plaats. Er zijn plannen voor meer structurele samenwerking, maar deze zijn vooralsnog door gebrek aan middelen beperkt. Men ziet kansen, maar er is meer nodig om tot integrale trajecten, bijvoorbeeld met betrekking tot o.a. materiaalkennis, productie en human capital, te komen. Met betrekking tot het bevorderen van kennis & innovatie op dit terrein heeft het Kabinet Rutte IV in de voorjaarsnota van 2023 aangegeven hiervoor middelen vrij te maken.

## 3 Theory of change als kader voor de impactmeting

---

### 3.1 Wat is een Theory of Change?

Om de impact van de ontwikkeling van een MSR in Nederland in kaart te brengen is een Theory of Change (Figuur 1) opgesteld. Dit is een methode -een kapstok- om verwachte effecten van een bepaalde investering te duiden. Een Theory of Change geeft weer hoe investeringen (inputs) kunnen leiden tot bepaalde (beoogde) langetermijneffecten (impacts). Middels publieke en private investeringen worden activiteiten gefinancierd en bemenst, deze leveren directe resultaten op korte termijn (outputs), afgeleide effecten op middellange termijn (outcomes) en (uiteindelijk) lange termijn (impacts).

### 3.2 De Theory of Change voor de ontwikkeling van een MSR in Nederland

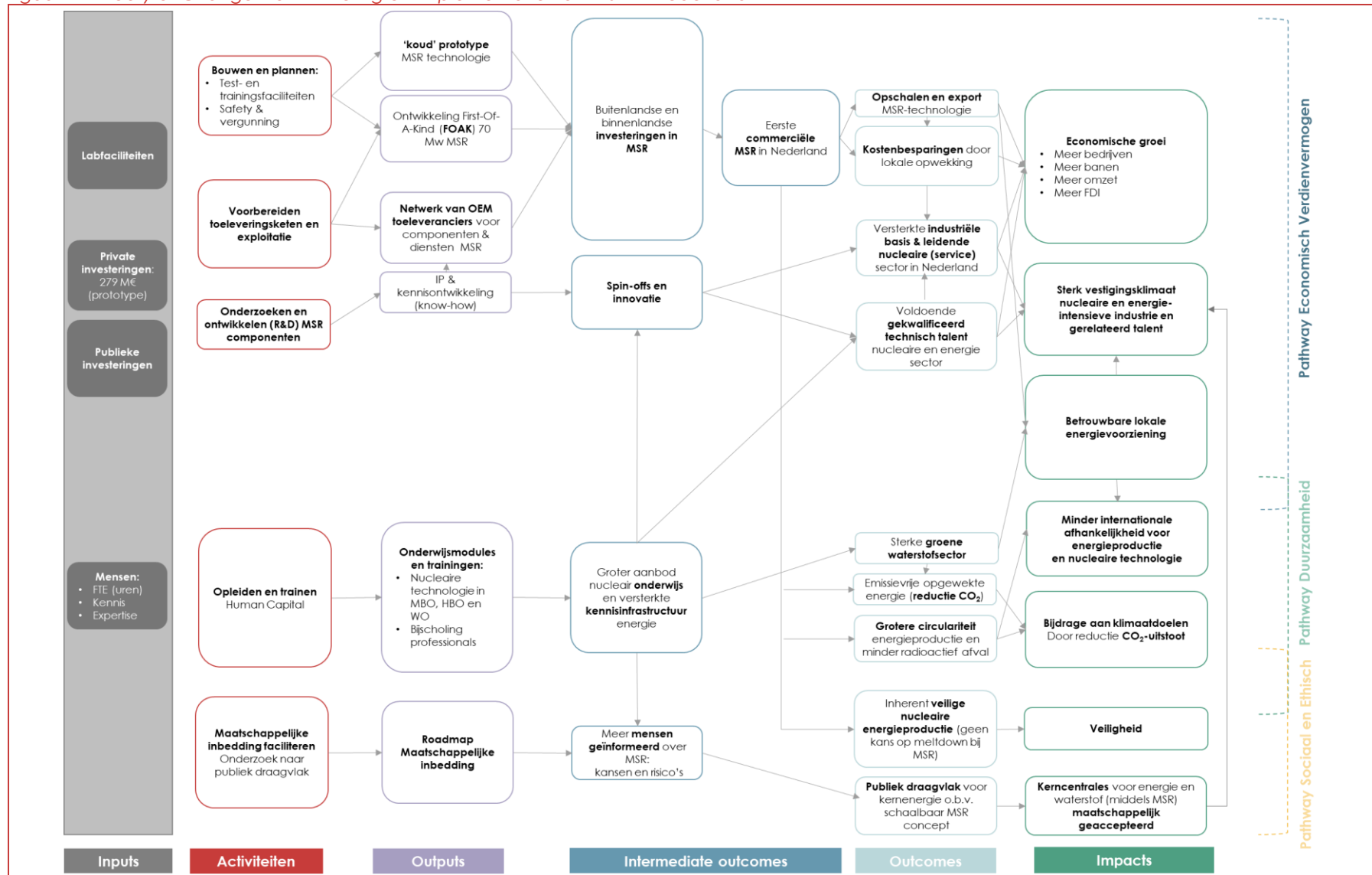
Momenteel is nog veel onduidelijk over welke activiteiten precies (en door wie) ondernomen zullen worden. De breedte van de activiteiten en organisatie daarvan hangen af van de beschikbare financiële middelen. De Theory of Change toont die activiteiten die volgens de huidige inzichten nodig zijn om tot de beoogde impacts te komen. Via zogenaamde *impact pathways* wordt zichtbaar hoe één of meerdere activiteiten bijdragen aan de lange termijn doelstellingen.

We zien twee belangrijke impacts, met drie verschillende impactpaden:

- *Maatschappelijke impact:*
  - **Duurzaamheid.** Hier gaat het om effecten op emissies en de kwaliteit van het milieu.
  - **Sociaal, ethisch.** Dit betreft kwaliteitsaspecten die niet of niet direct via het bbp worden gemeten en die ook geen duurzaamheid betreffen. Voorbeelden zijn gezondheid, inclusiviteit en prettig werk.
- *Economische impact:*
  - **Verdienvermogen.** Hier gaat het om effecten op de omzet en productiviteit van bedrijven en andere organisaties, en om de toegevoegde waarde voor de Nederlandse economie (bbp-effect)

In de volgende hoofdstukken gaan we in detail in op de impactpaden binnen de overkoepelende Theory of Change, waarbij we de verwachte bijdrage van de ontwikkeling van een MSR aan de hand van outcomes en impacts beschrijven.

Figuur 1 Theory of Change – ontwikkeling en implementatie van MSR in Nederland



Technopolis B.V. & Strategy Unit, 2023

### 3.3 Assumpties bij impactmeting middels de Theory of Change

De Theory of Change biedt duiding van de relaties tussen activiteiten en impacts, en de (mogelijke) omvang van de effecten. Vanwege diverse onzekerheden rondom de ontwikkeling van de MSR hebben wij verschillende assumpties moeten doen om (de omvang van) mogelijk effecten te bepalen.

Deze assumpties hebben betrekking op:

- **De tijdschaal waarbinnen een MSR ontwikkeld en geïmplementeerd kan worden.** Dat hangt voor een groot deel af van de beschikbare financiële middelen, de technologische uitdagingen die zich voordoen en regelgeving. In de huidige ontwikkelingsfase van MSR-technologie in Nederland ligt de focus nu op toegepast onderzoek met betrekking tot risico's (o.a. effecten van corrosie op materialen) en het beheersen daarvan. Wanneer risico's zich manifesteren kunnen deze een vertragend effect hebben of effect hebben op de eigenschappen van de MSR. Deze factoren kunnen de periode beïnvloeden waarin de geïdentificeerde effecten zich voordoen.
- **De activiteiten die daadwerkelijk plaats zullen gaan vinden.** Niet alle activiteiten die in de Theory of Change staan vinden nu al plaats. We gaan ervanuit dat deze activiteiten wel plaats zullen vinden. De doorgang daarvan zal afhangen van de beschikbare financiële middelen. Indien activiteiten niet doorgaan, kan dat gevolgen hebben op de geïdentificeerde outcomes en impacts.
- **Het vermogen dat de MSR's zullen hebben.** Het vermogen van een MSR bepaalt hoeveel energie geleverd kan worden in de vorm van warmte, elektriciteit en/of waterstof. Ook het aantal MSR's dat gerealiseerd zal worden is hierin een factor van belang. Hiervoor doen wij in de volgende hoofdstukken een aantal aannames.
- **Het aantal MSR's dat gerealiseerd zullen worden.** Dat volgt uit de vraag vanuit de markt. Aangezien de MSR nog niet te koop is, is er nog geen concrete vraag. Wel kan gesteld worden dat er behoefte is aan energiebronnen die de uitstoot van CO<sub>2</sub> beperken en er momenteel vanuit diverse overheden interesse is in kernenergie en in kleine modulaire kernreactoren (zoals een MSR) in het bijzonder. Op basis daarvan nemen we aan dat er voldoende vraag zal zijn naar MSR's en maken wij in de volgende hoofdstukken schattingen op basis van potentie.
- **Voortzetting van bestaand beleid.** We gaan ervanuit dat vigerend beleid voortzet. We nemen bijvoorbeeld aan dat het beleid en de bekostiging rondom radioactief afval en de eindberging daarvan niet wijzigt. Indien dat het geval is, heeft dit invloed op zowel het economisch als het maatschappelijk verdienvermogen van een MSR.
- **De ontwikkeling van alternatieve, betere technologie.** Indien er alternatieve technologieën ontstaan die goedkoper of op enige wijze beter of gunstiger zijn, kan dat invloed hebben op de voortgang van de ontwikkeling van de MSR en ook het aantal MSR's dat geïmplementeerd zal worden. Wij laten deze factor in onze analyse buiten beschouwing en nemen dus aan dat hier geen sprake van zal zijn.
- **De mate waarin activiteiten in Nederland plaats zullen vinden.** We kijken naar de baten voor Nederland en gaan er daarbij vanuit dat een substantieel deel van de activiteiten in Nederland plaats zullen vinden. Wanneer de uiteindelijke bedrijvigheid in het buitenland plaatsvindt, kunnen de economische impacts voor Nederland beperkt blijven. Dat zal ook deels gestuurd worden door de financiering van en door betrokken partijen bij de ontwikkeling van een MSR.

## 4 Bijdrage MSR-ontwikkeling aan maatschappelijk verdienvermogen

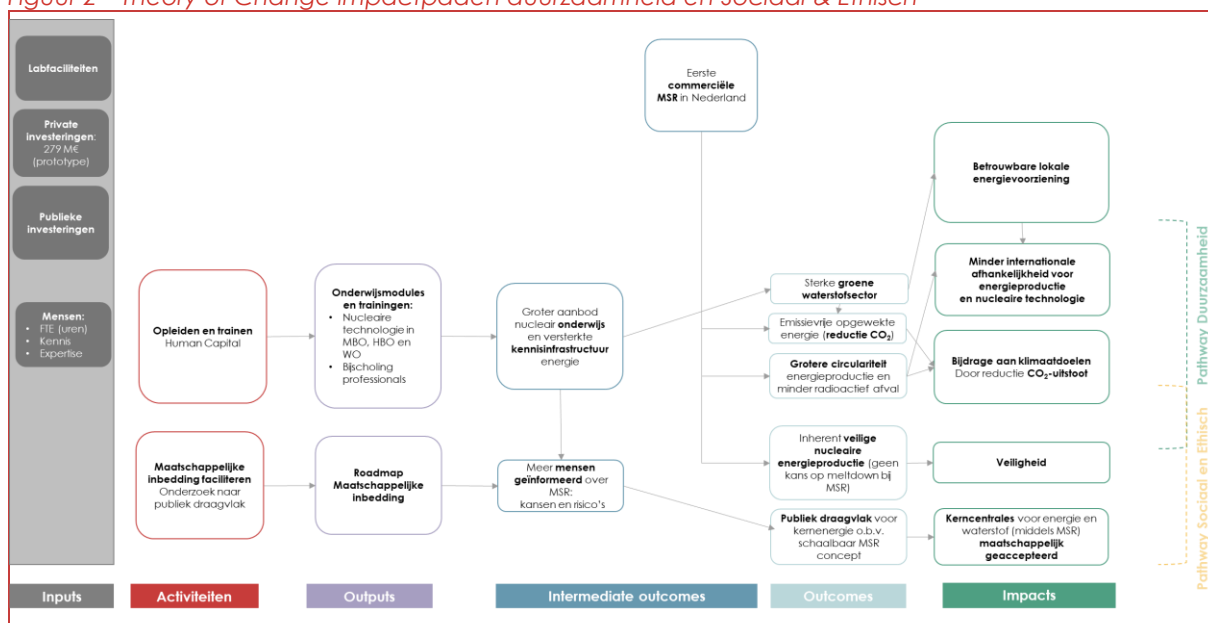
### 4.1 Beschrijving impactpaden duurzaamheid en sociaal-ethisch

In het impactpad duurzaamheid worden de potentiële voordelen van kernenergie, en waar mogelijk specifiek van een MSR, voor duurzame ontwikkeling beschreven. Ten eerste biedt kernenergie het potentieel voor CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteitsproductie. Ten tweede bieden kerncentrales energie die betrouwbaar en continu beschikbaar is, waardoor zij een belangrijke aanvulling vormen op intermitterende hernieuwbare bronnen zoals wind- en zonne-energie en zodoende de energietransitie bevorderen. Ten derde kunnen MSR's worden gebruikt voor de productie van zgn. "paarse" waterstof – CO<sub>2</sub>-vrije waterstof dat wordt geproduceerd door elektrolyse van water met behulp van kernenergie (zie ook volgende paragraaf). Ten vierde wordt bij gebruik van MSR's slechts ca. 3% van het langlevende kernafval geproduceerd dan bij gebruik van conventionele reactoren. Het meeste radioactieve afval van een MSR is veel minder langlevend. Daarnaast kan het gebruik van MSR's, net als dat van andere compacte kerncentrales (bijv. andere SMR's), ook leiden tot kostenbesparingen bij de infrastructuur voor elektriciteitsdistributie en -transmissie, aangezien ze dichterbij gebieden met een grote vraag naar elektriciteit kunnen worden gebouwd.

Het impactpad sociaal en ethisch overlapt deels met het impactpad duurzaamheid. Binnen dit pad staan veilige nucleaire energieproductie en publiek draagvlak voor kernenergie dankzij de MSR centraal. Dit moet leiden tot meer veiligheid en maatschappelijke acceptatie van de productie van elektriciteit, warmte en waterstof middels kernenergie. Ook de reductie van radioactief afval kan bijdragen aan een gevoel van veiligheid en maatschappelijke acceptatie. Bovendien kan het verminderen van radioactief afval ook als ethisch aspect beschouwd worden: zorgen voor minder schadelijk materiaal voor toekomstige generaties kan beschouwd worden als juist (en dus ethisch) handelen.

Figuur 2 toont de impactpaden "Duurzaamheid" en "Sociaal en Ethisch" die samen het maatschappelijk verdienvermogen van de ontwikkeling van een MSR beschrijven.

Figuur 2 Theory of Change impactpaden duurzaamheid en Sociaal & Ethisch



Technopolis Group & strategy unit, 2023

## 4.2 Outcomes

### 4.2.1 Sterke CO<sub>2</sub>-vrije waterstofsector

Blauwe en grijze waterstof hebben dezelfde chemische samenstelling maar een verschillende productiemethode. Bij grijze waterstof wordt aardgas gebruikt om waterstofgas te produceren door middel van stoomreforming. Hierbij wordt aardgas verhit met waterdamp, waarbij waterstofgas en koolstofdioxide vrijkomen. Het geproduceerde koolstofdioxide wordt meestal niet afgevangen en opgeslagen, wat betekent dat het de atmosfeer in gaat en bijdraagt aan klimaatverandering. Blauwe waterstof wordt op een vergelijkbare manier geproduceerd, met als verschil dat het geproduceerde koolstofdioxide wordt afgevangen en opgeslagen in plaats van dat het in de atmosfeer terecht komt. Dit afvangen en opslaan van CO<sub>2</sub> wordt ook wel Carbon Capture and Storage (CCS) genoemd. Blauwe waterstof wordt vaak gezien als een tijdelijke oplossing op weg naar de productie van groene waterstof, waarbij hernieuwbare energiebronnen worden gebruikt voor de productie van waterstofgas zonder dat er CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten. 'Paarse' waterstof wordt geproduceerd door middel van elektrolyse van water met behulp van nucleaire energie. Paarse waterstof heeft het voordeel dat er **geen fossiele brandstoffen nodig zijn voor de productie van waterstofgas** (niet bij de elektrolyse en niet bij het opwekken van de elektrische energie). Hierdoor komt er geen CO<sub>2</sub> vrij en is er geen afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.<sup>10</sup>

Paarse waterstof heeft een **hogere energie-efficiëntie** dan blauwe of grijze waterstof, omdat het gebruikte proces voor waterstofproductie efficiënter is. Bij een MSR zal het rendement voor waterstofproductie nog hoger liggen, aangezien hogere temperaturen in de reactor Hoge Temperatuur Elektrolyse (het) mogelijk maken of zelfs Hoge Temperatuur Stoom Elektrolyse (HTSE), wat een nog hoger rendement heeft.<sup>11,12,13</sup>

Het gebruik van nucleaire energie uit een MSR voor de efficiënte productie van paarse waterstof kan dus **bijdragen aan de vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot en het bevorderen van een klimaatvriendelijke energievoorziening**.

### 4.2.2 Emissievrije opgewekte energie

Nucleaire energie biedt **potentieel voor CO<sub>2</sub>-emissiereductie bij elektriciteitsopwekking** in Nederland. **Een kerncentrale (en ook een MSR) is echter niet geheel emissievrij**: het is daarom wellicht beter om over emissiearm te spreken. Om de MSR in bedrijf te houden zullen er activiteiten plaats moeten vinden waarbij vooralsnog emissies zoals CO<sub>2</sub> vrijkomen. Dat komt omdat een MSR brandstof verbruikt. Op verschillende plekken in de keten komt er daardoor CO<sub>2</sub> vrij, bijvoorbeeld tijdens de winning en verwerking van uranium en thorium en tijdens het transport van brandstof en radioactief afval. **Over de gehele levenscyclus van een conventionele kerncentrale is de CO<sub>2</sub>-equivalent 12 g/kWh, dat komt overeen met wind op zee en is minder dan bij zonne-energie.**<sup>14</sup> Voor een MSR kan dit mogelijk nog lager uitvallen door het efficiëntere gebruik van brandstof en de eenvoudigere, modulaire constructie.

---

<sup>10</sup> T. Ten Brinck (2019). Duurzame en fossiele waterstof in alle kleuren van de regenboog.

<https://www.wattisduurzaam.nl/17586/featured/duurzame-en-fossiele-waterstof-in-alle-kleuren-van-de-regenboog/>

<sup>11</sup> IAEA (2013). *Hydrogen Production Using Nuclear Energy*. Vienna: IAEA.

<sup>12</sup> Zie: <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses.aspx>

<sup>13</sup> Zie: <https://www.kernvisie.com/energie/waterstof-uit-kernenergie.html>

<sup>14</sup> World Nuclear Association (2022). *Carbon Dioxide Emissions From Electricity*. <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx>



Nucleaire energie is een **betrouwbare en continu beschikbare bron van elektriciteit**, wat relevant is in een klimaatneutrale elektriciteitsmix met een steeds groter deel intermitterende bronnen zoals wind- en zonne-energie omdat een dergelijke bron kan helpen bij de stabilisatie van het elektriciteitsnet (in andere landen als bijv. Zweden is waterkracht een dergelijke bron). **MSR's kunnen daarbij vrij flexibel regelbaar vermogen bieden** aan het net. Doordat een MSR warmte kan opslaan in het zout, hoeft de energieopwekking uit die warmte niet direct plaats te vinden. In Amerika is hiervoor tevens een aanvullende techniek ontwikkeld waarbij het gesmolten zout als een soort batterij wordt ingezet om balans op het net te borgen.<sup>15,16</sup>

Doordat een kleine MSR (modulair) gebouwd kan worden waar de elektriciteitsvraag (en evt. warmte en waterstofvraag) is, zoals bijvoorbeeld bij energie-intensieve industrieparken, kunnen netwerkkosten (bijv. voor netverzwaring) bespaard worden. De energie wordt dan direct opgewekt waar het gebruikt wordt. Dit is in contrast met bijvoorbeeld windenergie, dat vaak lange afstanden aflegt van opwek (vaak op zee) naar gebruiker. Ook het flexibel regelbaar vermogen van een MSR draagt hieraan bij. **Een MSR heeft dus de potentie om netverzwaring te voorkomen.** In de praktijk zal de noodzaak van netverzwaring echter ook sterk afhangen van de (lokale) energieopwek en samenstelling van de energiemix op de voorziene locatie van een MSR.

#### 4.2.3 Radioactief afval

Het grootste nadeel van kernenergie is het ontstaan van radioactief afval dat lange tijd (meerdere generaties) schadelijk is voor mens en milieu. Om risico's voor mens en milieu weg te nemen, moet dit afval op een veilige manier opgeslagen en beheerd worden en, zo is in Nederland besloten, uiteindelijk in een ondergrondse eindberging worden geplaatst. In een dergelijke eindberging kan de radioactiviteit veilig afnemen, een proces dat bij de huidige samenstelling van radioactief afval uit kerncentrales tienduizenden jaren duurt. Dit afval heeft grote invloed op de politieke en maatschappelijke aanvaardbaarheid van kernenergie.

Ook een MSR zal radioactief afval produceren. Het afval is echter anders van aard dan bij een conventionele kernreactor – dat geldt zeker als er gebruik gemaakt wordt van een thorium als brandstof. Er zitten zowel positieve als negatieve aspecten aan een MSR als het gaat om radioactief afval.

#### Positieve aspecten:

- **Minder langlevend radioactief afval.** Het volume radioactief afval in een thorium-MSR zal naar verwachting **35 keer minder<sup>17</sup> zijn dan bij conventionele** reactoren (bij dezelfde hoeveelheid energieproductie). Dat komt doordat splijtbare elementen in het gesmolten zout achterblijven en aan kernreacties onderhevig blijven terwijl splijttingsproducten uit het zout worden gefilterd. Daardoor worden ook langlevende elementen, zoals kleine hoeveelheden plutonium, direct als brandstof gebruikt. Van het radioactieve afval (de gefilterde splijttingsproducten) dat uit een Thorium MSR overblijft, wordt **99,99% stabiel binnen 300 jaar**. Meer specifiek: 83% van de geproduceerde splijttingsproducten is in slechts

---

<sup>15</sup> Zie GridReserve van MoltexFLEX: <https://www.moltexflex.com/blog/gridreserve-the-future-of-energy-storage/>

<sup>16</sup> C. Denbow, N. Le Brun, N. Dowell, N. Shah, C. Markides (2020). *The Potential Impact of Molten Salt Reactors on the UK Electricity Grid*. *Journal of Cleaner Production*, 276 (122873).

<sup>17</sup> Environmental impact of MSR's (2018), beschikbaar op <http://www.afaqscientific.com/jnpr/v14n003.pdf>

10 jaar stabiel en 17% in ongeveer 300 jaar<sup>18,19</sup>). Conventioneel kernafval is pas na tienduizenden jaren stabiel.

- **Potentie om 'afval' te 'verbranden' in de MSR.** Gebruikte splijtstof, het 'afval' uit Nederlandse of buitenlandse conventionele kerncentrales, kan verwerkt worden in een gesmolten zout dat als brandstof kan dienen in een MSR (reprocessing). Hierdoor wordt de splijtstofcyclus efficiënter, worden langlevende radioactieve elementen omgezet in korter levende radioactieve elementen en vermindert het ontstaan van nieuw radioactief afval. Bestaande gebruikte splijtstof dat al geclassificeerd en verwerkt is als afval (bijv. afval dat al is verglaasd) kan niet hergebruikt worden in een MSR. Het gaat dus niet om bestaand/historisch radioactief afval dat in een MSR 'verband' kan worden – een MSR vermindert dus ook niet het reeds opgeslagen radioactieve afval, maar kan wel nieuw afval verminderen.<sup>20</sup>
- **Mogelijk minder brandstof door hogere efficiëntie en recycling.** Het hoge smelt- en kookpunt van zout maakt het mogelijk om met hoge temperaturen en atmosferische druk te werken. Dit geeft voordelen t.a.v. het verhogen van de efficiëntie bij elektriciteitsopwekking, wat betekent dat er per kg brandstof meer opgewekte elektriciteit is. Daardoor is er in principe voor dezelfde hoeveelheid opgewekte elektriciteit minder nucleaire brandstof nodig, hetgeen ook bijdraagt aan de productie van minder afval. Daarnaast kan de brandstof gerecycled worden middels een chemisch proces, waardoor de brandstof langdurig (meerdere jaren) gebruikt kan worden.

#### Negatieve aspecten:

- **De totale hoeveelheid radioactief afval wordt waarschijnlijk niet minder dan bij een conventionele reactor (maar is wel minder langlevend):** Uit enkele recente onderzoeken en publicaties van experts<sup>21</sup> blijkt dat de hoeveelheid radioactief afval van MSR's niet minder zal zijn – al is dit wel minder langlevend afval. Het totale volume radioactief afval van een reactor wordt vooral bepaald door de materialen van de reactor die radioactief raken. Bij een MSR zou dat volgens Krall et al. (2022) veel meer zijn dan een conventionele reactor, omdat in een MSR materialen sneller aangetast worden door de gebruikte zouten en extreme omstandigheden.<sup>22</sup> Andere experts geven aan dat de aantasting (en daarmee de hoeveelheid afval) afhangt van de gebruikte materialen en het ontwerp van de reactor. Nieuwe materialen of legeringen zouden de levensduur van enkele reactoronderdelen onder deze extreme omstandigheden kunnen verlengen en/of de activering kunnen verlagen. Dat zou de hoeveelheid radioactief afval kunnen beperken. Experts geven bijvoorbeeld aan dat er bij de TU Delft onderzoek is uitgevoerd naar materialen voor in een MSR die beperkt activeren en snel uitgestraald zijn, en dus kortlevend afval opleveren.

---

<sup>18</sup> Robert Hargraves & Ralph Moir, "Liquid Fluoride Thorium Reactors: An old idea in nuclear power gets reexamined" in *American Scientist*. Vol. 98, 304 -313 (2010)

<sup>19</sup> GBCN. Net. 2013. Talk with US: The LFTR Guild

<sup>20</sup> Bestaand radioactief materiaal dat al geclassificeerd en verwerkt is als afval (bijv. afval dat al is verglaasd) kan niet gebruikt worden in een MSR. Het gaat dus niet om bestaand/historisch radioactief afval dat in een MSR 'verband' kan worden – een MSR vermindert dus niet het reeds opgeslagen radioactieve afval.

<sup>21</sup> Zie de referenties in voetnoten 22 en 23.

<sup>22</sup> L.M. Krall, A.M. Macfarlane and R.C. Ewing (2022). *Nuclear Waste from small modular reactors*. PNAS. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>

- **De chemische eigenschappen van het zout maakt het vloeibare afval mogelijk lastiger te verwerken:** De *Committee on Radioactive Waste Management* in het Verenigd Koninkrijk is kritisch op de stelling dat MSR's minder afval zouden produceren.<sup>23</sup> Zij benoemen enkele uitdagingen die gemoeid zijn bij het verwerken van het afval dat vrijkomt bij een MSR indien er geen reprocessing (meer) plaatsvindt. De gebruikte gesmolten zouten zijn radioactief en daardoor lastiger als afval te verwerken. Er kunnen bij de verwerking ervan gassen vrijkomen die gevaarlijk zijn. Dat betekent dat dit radioactief afval in een vorm verwerkt moet worden dat geschikt is voor veilige opslag en eindberging. Het gaat om een nieuwe afvalstroom. Die processen zijn er momenteel nog niet of nog niet voldoende ontwikkeld. Ook de ontmanteling van een MSR benoemen zij als uitdagend, maar daar kan (en moet wellicht) ook al in het ontwerp rekening mee gehouden worden.

*Box 1 Het perspectief van Thorizon: verminderen van radioactief afval door een slim ontwerp*

**Het Nederlandse Thorizon ontwikkelt een modulaire MSR.** In het ontwerp van deze MSR houdt Thorizon rekening met afvalreductie. Daarin trekt het samen op met Orano, dat de brandstof voor deze MSR – het gesmolten zout – moet gaan leveren en gaan reprocessen voor hergebruik. Het ontwerp van Thorizon voorziet in een modulair en gesloten primair circuit. Dat is het nucleaire deel van de reactor. Deze bestaat uit gestandaardiseerde en verwijderbare cartridges waarin het gesmolten zout (een chloride) zich bevindt. Deze cartridges sluiten aan op de processen van Orano voor leveren en het reprocessen van het gesmolten zout. Door deze cartridges is de ontmanteling van het nucleaire deel van de reactor eenvoudiger. Thorizon wil bovendien in het ontwerp van hun MSR materialen gebruiken die lang meegaan (goed tegen hoge temperaturen en zouten kunnen) en weinig activeren – dat wil zeggen dat deze materialen beperkt radioactief worden en alleen kortlevend afval opleveren. Daarmee zou in het ontwerp de hoeveelheid langlevend radioactief afval tot een minimum beperkt moeten worden.

Bron: op basis van informatie gedeeld door Thorizon

#### 4.2.3.1 Implicaties voor kosten opslag en eindberging radioactief afval

De kosten voor de opslag en eindberging van radioactief afval voor Nederland worden enerzijds bepaald door het reeds bestaande radioactieve afval en door het toekomstige radioactieve afval. Aan het bestaande radioactieve afval zal een MSR weinig veranderen, dit afval is al verwerkt in een vorm die (vooralsnog) niet geschikt is voor terugwinning van brandstof voor een MSR. Wel kan de brandstofcyclus van een MSR bijdragen aan het verminderen van nieuw langlevend radioactief afval, zoals beschreven in voorgaande paragraaf. Dat betekent dat er in de toekomst mogelijk een kleiner volume aan langlevend en hitte genererend radioactief afval bijkomt terwijl er meerdere kernreactoren (MSR's) operationeel zijn.

**Of dit de totale kosten voor opslag en eindberging substantieel zal veranderen is lastig vast te stellen.** Wel kunnen we de volgende factoren die meespelen benoemen:

- **Kosten verlagende factor:** MSR-afval bevat minder transuranen dan afval uit conventionele centrales en is daardoor minder langlevend en hitte genererend. Daardoor hoeft er waarschijnlijk minder (lang) afval in de eindberging geplaatst te worden. Doordat het nieuwe MSR-afval minder transuranen bevat, kan het mogelijk efficiënter in een eindberging geplaatst worden. Dat zou kunnen leiden tot minder kosten doordat de eindberging minder groot hoeft te zijn dan het geval zou zijn bij conventionele reactoren.

<sup>23</sup> Committee on Radioactive Waste Management (2022). *Written evidence from the Committee on Radioactive Waste Management (NCL0053)*. <https://committees.parliament.uk/writtenevidence/112075/pdf/>

Het volume van het afval zal echter ook afhangen van de wijze waarop/vorm waarin het afval uiteindelijk verwerkt kan worden.

- **Kosten verhogende factor:** Elke nieuwe kernreactor zal (op termijn) extra radioactief afval toevoegen en dus ook extra kosten voor opslag en eindberging met zich meebrengen. Dat zal ook gelden voor een MSR dat ook afval bevat dat pas na 300 jaar stabiel is. Ook minder langlevend radioactief afval moet opgeslagen en beheerd worden. Verder zijn brandstoffen in de vorm gesmolten zouten een nieuwe afvalstroom waarvan de kosten van verwerking nog niet bekend zijn.
- **Kosten neutrale factor:** Het huidige middellang en langlevende radioactieve afval zal – volgens vigerend beleid – in een ondergrondse eindberging belanden. De kosten van deze eindberging zijn substantieel. Omdat dit afval er reeds is (opgeslagen in de tijdelijke opslag bij de COVRA), en niet gebruikt kan worden als brandstof in een MSR, zal een eindberging nodig blijven. De kosten van het beheer en opslag van het reeds bestaande radioactieve afval zullen niet veranderen.

**In alle gevallen zouden de kosten voor Nederland – d.w.z. de Rijksoverheid – in principe niet moeten veranderen.** De kosten voor beheer, opslag en eindberging van het afval worden namelijk (in principe volledig) gedragen door de producent van het afval via de afvaltarieven (kosten per ton afval) die zij moeten betalen aan de COVRA. Afvaltarieven kunnen voor afvalproducenten een drijfveer vormen om oplossingen te ontwikkelen voor de reductie van afvalvolumes – en dus bijdragen aan innovatie. Een stijging (of daling) van afvalkosten heeft (in principe) geen effect op de kosten voor de Rijksoverheid.

#### 4.2.4 Veiligheid MSR

Waar de kansen op ongevallen in een conventionele kernreactor al klein zijn door allerlei veiligheidsmaatregelen, is een MSR nog veiliger en stabielere. Een MSR biedt in het ontwerp mogelijkheden om acceptabele veiligheid te bereiken middels passieve veiligheid. Dat komt vooral doordat een MSR gebruikmaakt van gesmolten zout dat zowel fungeert als koelmiddel en brandstof op atmosferische druk. Bij een MSR zijn de risico's op ongelukken veel kleiner dan bij een conventionele kernreactor (met name doordat er geen drukescalatie scenario's optreden).<sup>24</sup>

**In vergelijking tot andere energiebronnen scoort kernenergie in het algemeen vrij goed op veiligheid.** Volgens een studie van de OECD NEA is binnen OECD-landen het risico op een nucleair ongeval met meer dan 100 latente dodelijke slachtoffers<sup>25</sup> 10x of meer lager dan het risico van een ongeval met 100 directe dodelijke slachtoffers ten gevolge van energieproductie uit kolen, olie, gas of water. De frequentie van nucleaire ongelukken is lager dan in de ketens van energie uit olie, kolen, gas of water, maar bij een grootschalig nucleair incident zoals in Tsjernobyl kunnen wel veel meer mensen uiteindelijk overlijden. Figuur 3 laat zien dat het aantal doden ten gevolge van ongelukken of luchtvervuiling per eenheid elektriciteit het laagst is bij windenergie (0,04 doden/TWh), nucleaire energie (0,03 doden/TWh) en zonne-energie (0,02 doden/TWh). De meeste doden per eenheid energie zijn toe te schrijven aan bruinkool (32,72 doden/TWh), kolen (24,62 doden/TWh) en olie (28,43 doden/TWh).

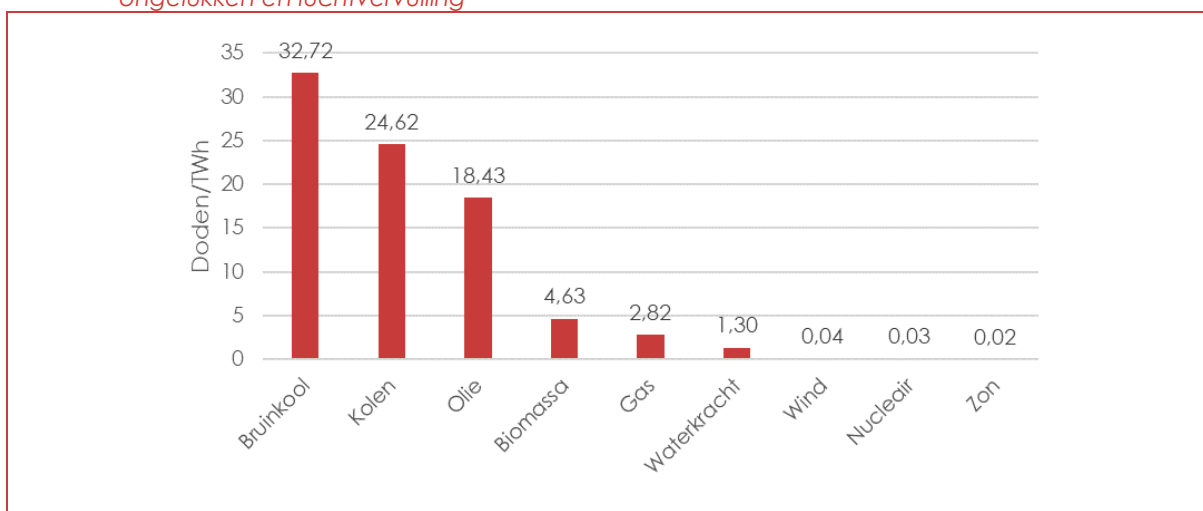
---

<sup>24</sup> B.M. Elsheikh (2013). *Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors*. Journal of radiation research and applied sciences, 6, pp. 63-70.

<sup>25</sup> Dat omvat ook dodelijke slachtoffers die op termijn ontstaan bijv. door de gevolgen van straling.

**Een meltdown is bij een MSR niet mogelijk.** Bij een te hoge temperatuur in de reactorkern zet de vloeistof uit, waardoor minder brandstof in de kern achterblijft, en de neutronenproductie afneemt.<sup>26</sup> Hierdoor dalen de temperatuur en het vermogen van de reactor (zonder dat daarvoor externe actie hoeft te worden ondernomen). Het smeltpunt van de vloeistof is bovendien erg hoog. Mocht de temperatuur alsnog te hoog oplopen, dan hebben sommige MSR-ontwerpen smeltpluggen die smelten en beland de vloeistof in passief gekoelde opslagtanks.<sup>27</sup> Andere ontwerpen werken met pompen die de brandstof omhoog pompen, wanneer de pompen uitvallen zakt de vloeistof omlaag en stopt de nucleaire reactie. **Door deze oplossingen is een MSR passief veilig.** Actieve koeling met water, zoals bij een conventionele reactor, is dan ook niet nodig, wat stoomexplosies in de reactor onmogelijk maakt.<sup>28</sup>

*Figuur 3 Veiligheid van diverse energiebronnen: aantal doden per eenheid energie ten gevolge van ongelukken en luchtvervuiling*



Bron: H. Ritchie (2020). *What are the safest and cleanest sources of energy?* Our World in Data. <https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy>

**Daarnaast is in het kader van non-proliferatie een MSR ook gunstig.** Doordat de brandstof zich in een gesmolten zout bevindt, is deze lastig oneigenlijk te gebruiken voor nucleaire wapens. Daarnaast zijn er vaak technische barrières aangebracht waardoor het onttrekken van splijtbare elementen verder wordt bemoeilijkt. De elementen in de thoriumcyclus zijn niet goed geschikt voor nucleaire wapens: deze bevatten relatief weinig plutonium, en het splijtbare uranium-233 in de vloeistof is moeilijk te scheiden van het niet-splijtbare, maar wel radioactieve, uranium-232.<sup>29</sup> Bovendien kan het plutonium volledig opgebrand worden in de reactor.<sup>30</sup> Door

<sup>26</sup> G. LeCroy (2021). *Safety Challenges of Molten Salt Reactors*. Stanford University. <http://large.stanford.edu/courses/2021/ph241/lecroy1/>

<sup>27</sup> J. Emblemsvåg (2022). *Safe, clean, proliferation resistant and cost-effective Thorium-based Molten Salt Reactors for sustainable development*. International Journal of Sustainable Energy, 41:6, 514-537, doi: 10.1080/14786451.2021.1928130

<sup>28</sup> J. Serp et al. (2014). *The Molten salt reactor MSR in generation IV: Overview and perspectives*. Progress in Nuclear Energy, 77, pp. 308-319, doi: 10.1016/j.pnucene.2014.02.014.

<sup>29</sup> M.S. Kazimi (2003). *Thorium Fuel for Nuclear Energy. An unconventional tactic might one day ease concerns that spent fuel could be used to make a bomb*. American Scientist, 91 (5).

<sup>30</sup> U. Gat and J.R. Engel (2000). *Non-proliferation attributes of molten salt reactors*. Nuclear Engineering and Design, 201 (2-3), doi: 10.1016/S0029-5493(00)00276-4.

het aanbrengen van een kleine hoeveelheid uranium-238 in het zout kan militaire toepassing uitgesloten worden. Mede daarom stelt men dat een thorium-MSR inherent resistent is tegen proliferatie.<sup>31</sup>

## 4.3 Impacts

### 4.3.1 Betrouwbare lokale energievoorziening

De behoefte aan flexibel vermogen neemt toe met een groter aandeel variabele productie uit wind- en zonne-energie. Een MSR kan bijdragen aan het verminderen van de behoefte aan flexibiliteitsvoorzieningen in Nederland.

**MSR's kunnen betrouwbare, continue elektriciteitsproductie bieden zonder afhankelijk te zijn van externe factoren zoals weersomstandigheden.** Hierdoor kunnen ze een stabiele basisleverancier zijn in het elektriciteitssysteem. Bovendien hebben MSR's lage variabele productiekosten, waardoor ze een groot deel van de tijd hun vaste kosten kunnen dekken uit het verschil tussen de marktprijs en variabele kosten. Bovendien kunnen MSR's betrouwbaardere en stabielere energie leveren in vergelijking met gascentrales. Gascentrales zijn afhankelijk van een continue aanvoer van aardgas en de prijs van dit gas is gevoelig voor schommelingen op de internationale markten. Dit kan leiden tot onvoorspelbare prijsschommelingen voor de consumenten en kan de energievoorziening in gevaar brengen. In tegenstelling tot gascentrales, kunnen MSR's opereren met weinig onderbrekingen en hun energie-output is beter voorspelbaar en kan worden afgestemd op de behoefte van de consument.

In de context van de energietransitie is het belangrijk om de juiste mix van energiebronnen te hebben om de netbalans en de leveringszekerheid te handhaven. **MSR's kunnen hieraan bijdragen door hun flexibiliteit en hun mogelijkheid om snel te reageren op veranderingen in de vraag naar elektriciteit. Ze kunnen vraaggedreven energie produceren.** De inzet van MSR's kan helpen om de behoefte aan regel- en reservevermogen, stroomuitwisseling met het buitenland, energieopslag en piekcentrales te verminderen. Ook biedt het een voordeel in bespaarde kosten van bijv. netverzwaringen zowel op lokaal niveau als op het niveau van het aansluiten van een groot offshore windpark. Dit kan leiden tot lagere kosten voor het onderhoud en de uitbreiding van het elektriciteitssysteem en kan ook de integratie van meer hernieuwbare en intermitterende energiebronnen vergemakkelijken.

Dankzij bovenstaande eigenschappen kunnen MSR's een rol spelen bij het leveren van betrouwbare en duurzame energie voor lokale energievoorziening in Nederland.

### 4.3.2 Minder internationale afhankelijkheid voor energieproductie en nucleaire technologie van o.a. politiek instabiele landen

Nederland is netto een importeur van energie: in 2020 kwam 68% van onze energie uit het buitenland.<sup>32</sup> Dat geldt ook voor elektriciteit. Nederland importeerde in 2021 meer elektriciteit dan het exporteerde. De import van elektriciteit komt voornamelijk uit Duitsland, België en Noorwegen.<sup>33</sup> Nederland beschikt over weinig energiedragers voor de eigen elektriciteits-

---

<sup>31</sup> J. Emblemståg (2022). *Safe, clean, proliferation resistant and cost-effective Thorium-based Molten Salt Reactors for sustainable development*. *International Journal of Sustainable Energy*, 41:6, 514-537, doi: 10.1080/14786451.2021.1928130

<sup>32</sup> Zie: <https://www.consilium.europa.eu/nl/infographics/how-dependent-are-eu-member-states-on-energy-imports/>

<sup>33</sup> CLO (2022). *Interconnectiecapaciteit elektriciteit, 2015 – 2021*. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0595-interconnectiecapaciteit-elektriciteit>

productie: gas, olie, kolen en uranium worden allemaal geïmporteerd.<sup>34</sup> Nederland is sinds enkele jaren een importeur van gas, doordat onze nationale gaswinning sterk is gereduceerd vanwege de aardbevingsproblematiek in Groningen.

Het vergroten van de eigen opwek van CO<sub>2</sub>-arme elektriciteit zal Nederland minder afhankelijk maken van de import van elektriciteit. **Een MSR kan bijdragen aan het beperken van die internationale afhankelijkheid voor elektriciteit.** Dat geldt echter ook voor andere CO<sub>2</sub>-arme of -vrije energiebronnen, zoals hernieuwbare energie en kernenergie met conventionele kerncentrales.

Thorium is drie tot vier keer meer voorradig dan uranium en wereldwijd beschikbaar, maar wordt vooral buiten Europa gewonnen. Dat gebeurt in relatief kleine hoeveelheden omdat er momenteel niet veel vraag is naar thorium. De hoeveelheid tegen acceptabele kosten winbare thorium is **ruim voldoende om in de vraag naar thorium voor meerdere eeuwen te voorzien.**<sup>35</sup> Momenteel wordt thorium vooral verkregen als bijproduct van de winning van zeldzame aardelementen.<sup>36</sup> Die markt is tegenwoordig voor een groot deel in handen van China.<sup>37</sup> In Frankrijk beschikken Orano, CEA en Solvay over substantiële hoeveelheden thorium die vrijgekomen zijn bij de voormalige winning van uranium en zeldzame aardelementen in Frankrijk.<sup>38</sup>

De markt voor thorium moet zich nog ontwikkelen. Vele tientallen landen beschikken over thorium in hun ondergrond. Thorium zit ook in de Europese bodem, o.a. in Scandinavië, maar niet in Nederland.

Het gebruik van thorium in MSR's biedt wel voordelen op de lange termijn, omdat **thorium overvloediger aanwezig is in de aardkorst dan uranium en kan worden gewonnen uit landen die politiek en economisch stabiel zijn.** Dit vermindert de afhankelijkheid van import van fossiele brandstoffen, zoals Russisch gas, en verhoogt de energiezekerheid van Nederland op de lange termijn.

**Door de ontwikkeling van een MSR in Nederland kan in de toekomst de internationale afhankelijkheid voor nucleaire energietechnologie van Nederland verminderen.** Door in Nederland te werken aan een nieuw reactorconcept en daaromheen een ecosysteem te vormen wordt er kennis over nucleaire technologie en MSR's in het bijzonder opgebouwd. Daarmee kan er een sterkere kennis- en industriële basis in Nederland ontstaan. Op dit moment bevindt de technische ervaring met kernenergie zich vooral in de VS, Korea, Argentinië, Rusland, China en Japan, omdat daar nog kerncentrales gebouwd worden. De kennis over MSR's bevindt zich vooral in Frankrijk, China, Canada en de VS, maar ook in Nederland.

#### 4.3.3 Bijdrage aan klimaatdoelen: Significante reductie CO<sub>2</sub>- uitstoot

MSR's kunnen een rol spelen in het verminderen van CO<sub>2</sub>-uitstoot, het handhaven van de netbalans en de leveringszekerheid van elektriciteit. Het effect hangt daarbij af van de energiebron die met een MSR vervangen wordt. Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te verminderen, zullen MSR's in de plaats moeten komen van fossiele energiebronnen. Het grootste deel van de

---

<sup>34</sup> Brief Regering over Strategische afhankelijkheden in het energie-domein (2021):

[https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven\\_regering/detail?id=2021Z02711&did=2021D05919](https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2021Z02711&did=2021D05919)

<sup>36</sup> U.S. Geological Survey (2023). *Thorium*. Mineral Commodity Summaries,

<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-thorium.pdf>

<sup>37</sup> Technopolis Group (2023). *Analyse waardeketens en grondstoffen voor medische isotopen*.

<sup>38</sup> Zie: <https://fissionliquide.fr/2013/06/08/la-reserve-francaise-de-thorium/> en <https://www.solvay.fr/communiqués-de-presse/solvay-et-areva-unissent-leurs-savoir-faire-pour-valoriser-le-thorium>.

fossiele energie wordt in Nederland opgewekt met gascentrales. Daarom beoordelen we de potentiële bijdrage aan de reductie van de CO<sub>2</sub>-uitstoot door de MSR te vergelijken met gasgestookte energiecentrales.

In tegenstelling tot gasgestookte centrales, stoten MSR's geen broeikasgassen uit tijdens hun operatie, waardoor ze een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot in de energiemix. Om een inschatting te maken hoe groot dit effect is van de vermeden CO<sub>2</sub>-emissies, vergelijken we de opwek van MSR's met het alternatieve scenario dat deze elektriciteit werd geproduceerd door gasturbines.

Een gasturbinecentrale kan aardgas, biogas of synthetisch gas verbranden om elektriciteit op te wekken. Bij de verbranding van deze brandstoffen komt CO<sub>2</sub> vrij, evenals andere schadelijke stoffen zoals stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) en zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>). De hoeveelheid CO<sub>2</sub>-uitstoot per geproduceerde eenheid elektriciteit hangt af van de energie-inhoud en de herkomst van de brandstof en de efficiëntie van de centrale. MSR's stoten indirect CO<sub>2</sub> uit tijdens de bouw van de centrale en de winning van het uranium of thorium. Om een ruwe schatting te maken, kunnen we uitgaan van een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 450 g/kWh voor een gasturbinecentrale en 10 g/kWh voor een MSR-centrale. We werken met de aanname van 2,5 GW geïnstalleerd vermogen aan MSR in 2050 en de eerder gebruikte aanname van 5540 vollasturen<sup>39</sup>. Dit geeft een besparing van zo'n 6 Megaton CO<sub>2</sub><sup>40</sup>. De werkelijk vermeden CO<sub>2</sub>-uitstoot kan echter afwijken van deze ruwe schatting en is afhankelijk van verschillende factoren, zoals de specifieke efficiëntie van de gasturbine- en MSR-centrales en de hoeveelheid elektriciteit die ze produceren.

Om te voldoen aan de doelstelling van een 95% reductie in CO<sub>2</sub>-uitstoot in Nederland tegen 2050 ten opzichte van 1990, moet Nederland de uitstoot verminderen van ongeveer 213 megaton CO<sub>2</sub> in 1990 naar 10,7 megaton CO<sub>2</sub> in 2050. Dit betekent dat er in totaal 202,3 megaton CO<sub>2</sub> moet worden vermeden. De bijdrage van MSR aan het CO<sub>2</sub>-reductiedoel kan dus grofweg zo'n 3% zijn, wat zeer significant is.

#### 4.3.4 Publiek draagvlak

Bij de ontwikkeling én adoptie van nieuwe technologische oplossingen voor het opwekken van kernenergie speelt de publieke opinie een belangrijke rol. In een democratie kan een overheid immers alleen bij voldoende maatschappelijk draagvlak een degelijk langetermijn kernenergieprogramma ontwikkelen en implementeren. Onderzoeken naar maatschappelijk draagvlak met betrekking tot kernenergie kijken doorgaans naar factoren als vertrouwen, kennis, risico en baten<sup>41,42,43</sup>. Vertrouwen is nodig en bepalend voor de acceptatie van kernenergie<sup>44</sup>. Vertrouwen lijkt volgens literatuur op het gebied van sociale psychologie onder andere te bestaan uit geloofwaardigheid, oprechtheid en geloof in de competenties van een

<sup>39</sup>

[https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten\\_van\\_nucleaire\\_centrales\\_in\\_klimaatneutrale\\_energies\\_cenario\\_s\\_2050.pdf](https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten_van_nucleaire_centrales_in_klimaatneutrale_energies_cenario_s_2050.pdf)

<sup>40</sup> Berekening:  $2.500.000 \times 5540 \times (450 - 10) = 6.094 \cdot 10^{12} \approx 6$  Megaton CO<sub>2</sub>

<sup>41</sup> Kim et al. (2014). *An international comparative analysis of public acceptance of nuclear energy*. Energy Policy, vol. 66, p. 475-483.

<sup>42</sup> Qi et al. (2020). *The effect path of public communication on public acceptance of nuclear energy*. Energy Policy, vol. 144, issue C.

<sup>43</sup> Siegrist, M. & Visschers, V. (2012). *Acceptance of nuclear power: The Fukushima Effect*. Energy Policy, vol. 59, p. 112-119.

<sup>44</sup> Visschers et al. (2011). *Climate change benefits and energy supply benefits as determinants of acceptance of nuclear power stations: investigating an explanatory model*. Energy Policy, vol. 39-6, p. 3621-3629.



team of organisatie<sup>45</sup>. Op nationaal niveau werden de effecten van gebrek aan vertrouwen in de overheid zichtbaar met betrekking tot bijv. de vaccinatiebereidheid tijdens de Covid-19 pandemie<sup>46</sup>. Op lokaal niveau, waar een reactor gebouwd zou kunnen worden, is dit in het bijzonder relevant daar men simpelweg zoiets niet in de buurt wil hebben van huis of werk<sup>47</sup>. Met betrekking tot de baten wordt onderscheid gemaakt tussen baten met betrekking tot het klimaat en baten met betrekking tot energiezekerheid<sup>48</sup>. Met betrekking tot het klimaat zijn met het Klimaatakkoord van Parijs ook in Nederland, middels het nationale Klimaatakkoord (2019), duidelijke doelen en stappen geformuleerd om daaraan te kunnen voldoen. Het is voor iedereen duidelijk dat verandering nodig is om deze klimaatdoelen te kunnen halen. Gezien de CO<sub>2</sub>-vrije uitstoot bij het opwekken van kernenergie is de publieke opinie rondom kernenergie de laatste jaren positiever geworden. Dat is nog eens versterkt door de oorlog in Oekraïne, waardoor de buitenlandse afhankelijkheid van gas en -prijzen duidelijk werd.

Het realiseren en implementeren van infrastructuur voor kernenergie is een proces van de lange adem, het is generatieoverstijgend. Hoe kijkt de toekomstige generatie hiernaar? Uit een position paper van de Nederlandse Jonge Klimaatbeweging<sup>49</sup> blijkt dat de jongeren de 1.5-graadsamenleving als het hoofddoel zien waarbij vanuit een systeemperspectief de beste energiemix samengesteld moet worden. Deze kan met of zonder kernenergie zijn. De belangrijkste uitgangspunten zijn daarbij: duurzaamheid, veiligheid en betaalbaarheid. Met betrekking tot dit laatste punt zouden dan voor alle energiebronnen alle kosten meegenomen moeten worden, zoals kosten voor ecologische voetafdruk, energiedistributie, grondstoffen, veiligheid, ontmanteling, verzekering en afval.

Ook de Raad voor de Leefomgeving en Infrastructuur (RLI) heeft zich in 2022 gebogen over de besluitvorming rond kernenergie. De vraag hierbij was om in kaart te brengen wat “nodig is om over het wel of niet inzetten van kernenergie een gedragen, goed onderbouwd besluit te kunnen nemen”<sup>50</sup>. In het advies van de RLI aan het Kabinet wordt het belang van stabiel energiebeleid onderstreept en moet in lijn daarmee de besluitvorming rondom kernenergie minder grillig verlopen dan voorheen. Daarnaast stelt de RLI dat het perspectief van burgers, een integraal onderdeel van de besluitvorming moet vormen, naast de wetenschappelijke kennis (waar het kabinet extra middelen voor heeft uitgetrokken, zie hoofdstuk 6). In het maatschappelijke en politieke debat zijn de meningen over kernenergie (sterk) verdeeld, terwijl uit analyse van de RLI ook blijkt dat vier van de tien mensen geen uitgesproken opvatting heeft over kernenergie. Het wordt daarom belangrijk bevonden om het perspectief van burgers op kernenergie serieus mee te nemen in het integrale besluitvormingstraject over mogelijke nieuwe kerncentrales, als onderdeel van het beoogde energiesysteem. Uit onderzoek van de RLI blijken bij Nederlanders vijf waarden een centrale rol te spelen met

---

<sup>45</sup> Blomqvist, K (1997). *The many faces of trust*. *Scandinavian Journal of Management*, vol. 13 – 3, p. 271-286.

<sup>46</sup> Engbersen et al. (2021). *De laag-vertrouwsamenleving: de maatschappelijke impact van Covid-19 in Amsterdam, Den Haag, Rotterdam en Nederland, vijfde meting*. Erasmus school of social and behavioural sciences & kenniswerkplaats leefbare wijken. ISBN: 978-90-75289-58-9.

<sup>47</sup> Xiao, Q, Liu, H. & Feldman, M. (2017). *How does trust affect acceptance of a nuclear powerplant (NPP): a survey among people living with Qinshan NPP in China*. PLoS ONE, vol. 12-11.

<sup>48</sup> Visschers, V. & Siegrist, M. (2011). *Climate change benefits and energy supply benefits as determinants of acceptance of nuclear power stations: investigating an explanatory model*.

<sup>49</sup> De Jonge Klimaatbeweging is een onafhankelijke stichting waarin de stem van jongeren in het klimaatdebat namens meer dan vijftig diverse jongerenorganisaties verenigd is ([www.jongeklimaatbeweging.nl](http://www.jongeklimaatbeweging.nl))

<sup>50</sup> Raad voor de Leefomgeving en Infrastructuur (2022). *Splijtstof? Besluiten over kernenergie vanuit waarden*, [https://www.ri.nl/sites/default/files/advies\\_splijtstof\\_-\\_besluiten\\_over\\_kernenergie\\_vanuit\\_waarden\\_-\\_def.pdf](https://www.ri.nl/sites/default/files/advies_splijtstof_-_besluiten_over_kernenergie_vanuit_waarden_-_def.pdf)

betrekking tot het beoogde energiesysteem: (1) energiezekerheid, (2) betaalbaarheid, (3) veiligheid, (4) duurzaamheid en (5) rechtvaardigheid.

Hoewel in de periode direct na de Fukushima ramp verschillende overheden besloten kerncentrales te sluiten, worden die beslissingen in het kader van energiezekerheid herzien<sup>51</sup>. Ook lijkt er geen Fukushima-effect meer te zijn ten aanzien van het aantal nationale kernenergieprogramma's; meer landen willen kernenergie gaan produceren.

Duidelijke en transparante communicatie hierover zou het draagvlak voor de nieuwe generatie reactoren kunnen vergroten.

---

<sup>51</sup> Taebi, B. & Van de Poel, I. (2015). *The socio-technical challenges of nuclear power production and waste management in the post-Fukushima era: editors' overview*. *Journal of Risk Research*, vol. 18-3, p. 267-272.

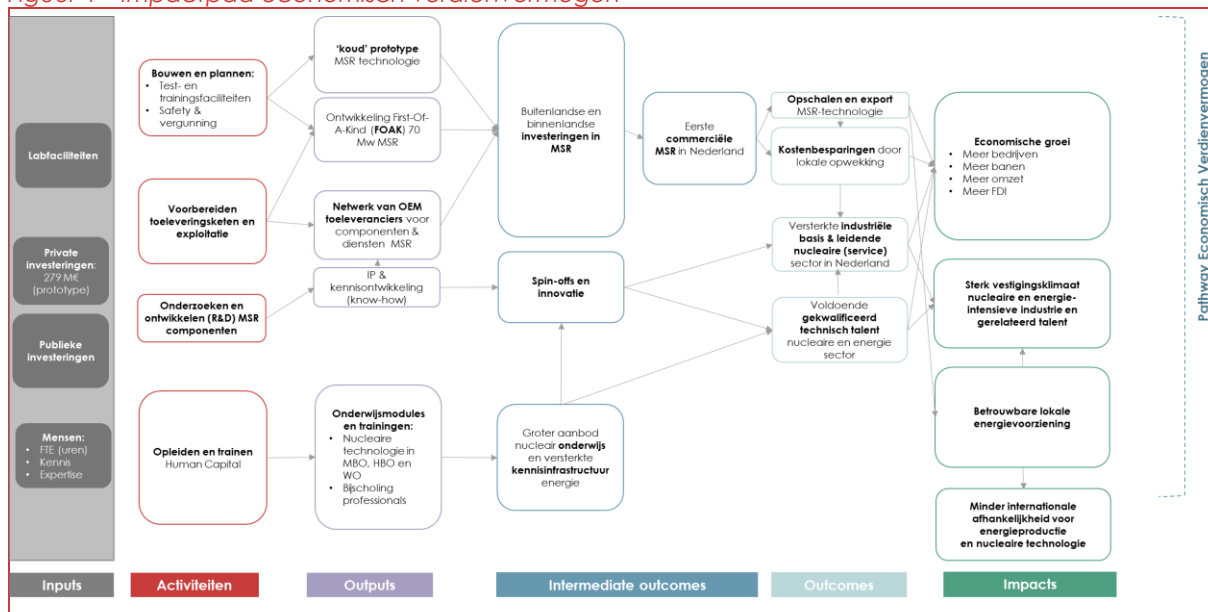
## 5 Bijdrage MSR-ontwikkeling aan economisch verdienvermogen

### 5.1 Beschrijving impactpad economisch verdienvermogen

Bij de realisatie van één of meerdere Molten Salt Reactors voorzien we (economische) effecten op de elektriciteitsmarkt, voor de nucleaire sector en de energie-intensieve industrie en op het innovatie- en concurrerend vermogen van Nederland (Figuur 4).

Allereerst bespreken we de impact die het zal hebben op de elektriciteitsmarkt; met name op de leveringszekerheid, de groothandelsprijs en de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-vrije elektriciteit. Daarna bespreken we de effecten binnen de Nederlandse industriële clusters, de rol van innovatie hierin en het concurrentievermogen van de nucleaire sector.

Figuur 4 Impactpad economisch verdienvermogen



Technopolis Group & Strategy Unit, 2023

### 5.2 Outcomes

#### 5.2.1 Directe effecten met betrekking tot elektriciteit, warmte en waterstof

Eén van de kenmerkende eigenschappen van een MSR is de hoge temperatuur waarop de reactor werkzaam is. Daardoor kan een MSR stoom genereren met een temperatuur van tussen de 500-600 °C. Deze stoom kan voor de productie van elektrische energie gebruikt worden, maar ook voor processen in de chemische industrie of voor de productie van waterstof (High Temperature Steam Electrolysis).

Het zowel produceren van elektriciteit als warmte in een hoge-temperatuurreactor (HTR, zoals een MSR) wordt nucleaire cogeneratie genoemd. Op basis van een studie naar nucleaire cogeneratie uit 2015<sup>52</sup>, stelt NRG<sup>53</sup> dat tussen 2025-2045 het aantal HTR's in Europa naar

<sup>52</sup> R. Stahl (2015). *Deployment Scenarios. NC2I-R Deliverable D4.31.*

<sup>53</sup> F. Roelofs, S. Knol en R. Schram (2015). *Roadmap towards Demonstrator. NC2I-R deliverable D4.51.*

verwachting 10-20 zal bedragen. **Vanuit het perspectief van cogeneratie is er in Europa dus de potentie om minimaal 10-20 MSR's op de markt te brengen tot 2045.**

In de rest van deze paragraaf nemen we de kenmerken van de MSR die Thorizon ontwikkelt als voorbeeld om de omvang van een typische MSR te illustreren.

De FOAK van Thorizon zal naar verwachting een elektrisch vermogen hebben van 100 MW<sub>e</sub>. Het thermisch vermogen van deze reactor is een factor 2,5 hoger<sup>54</sup>: 250 MW<sub>th</sub>. De latere commerciële versie (NOAK) van deze reactor zal naar verwachting een elektrisch vermogen hebben van 250-300 MW<sub>e</sub>, waarvan we het thermisch vermogen schatten op 500-750 MW<sub>th</sub>. Dit wordt mogelijk bereikt door meerdere kleinere (identieke) reactoren van max. 250 MW<sub>th</sub> bij elkaar te plaatsen om productiekosten laag te houden en continue energieproductie te borgen. De meeste concurrerende MSR's richten zich op vergelijkbare vermogens.

We schetsen in de volgende secties twee scenario's: een MSR als (grotere) centrale met aansluiting op het elektriciteitsnet en een MSR als lokale (modulaire) voorziener in energie- of warmtevraag bij industriële parken. Bij beide functies zou een MSR ook een deel van de tijd waterstof kunnen produceren.

#### 5.2.1.1 Elektriciteit

Vanwege de hoge temperatuur waarop een MSR werkzaam is, is de omzettingsefficiëntie naar elektriciteit zeer hoog. De opgewekte elektriciteit kan lokaal gebruikt worden of verspreid worden via het elektriciteitsnet. Hoeveel elektriciteit de centrale opwekt, is uiteindelijk afhankelijk van de beoogde functie, d.w.z. of de energie gebruikt wordt voor elektriciteit, warmte en/of waterstof.

Voor het aantal vollast-uren per jaar gebruiken we 5540 uur, wat overeenkomt met een capaciteitsfactor van ongeveer 63%. Dit aantal is gebaseerd op het onderzoek van Berenschot<sup>55</sup> naar nucleaire systeemeffecten in het scenario waarin de kernreactor wordt gebruikt voor als piekcentrale met waterstofproductie.<sup>56</sup> Met 5540 vollasturen zal de **FOAK van Thorizon per jaar theoretisch bijna 0,6 TWh opwekken en de NOAK 1,4 TWh** – in werkelijkheid zal dit waarschijnlijk minder zijn vanwege inefficiënties (in het algemeen in de operatie en in het bijzonder met betrekking tot het leertraject dat gepaard gaat met een FOAK).

Als er tegen 2045-2050 **20 reactoren in Europa** zijn gebouwd met een gemiddeld vermogen van **250 MW<sub>e</sub> (NOAK)**, dan zou dit per jaar leiden tot een opwekking van **27,8 TWh**. Ter vergelijking, de **finale elektriciteitsconsumptie in Nederland in 2020 was 116 TWh<sup>57</sup> en groeit naar verwachting naar ruim 300 TWh tot mogelijk meer dan 500 TWh in 2050<sup>58</sup>**. Deze sterke toename in de elektriciteitsvraag komt met name door de elektrificatie van processen, zoals voor warmtegeneratie, in de industrie.

---

<sup>54</sup> Berekend op basis van gegevens in de bron van voetnoot 53. In feite zegt dit iets over de thermisch rendement van de reactor: 1 MW<sub>th</sub> wordt omgezet in 0,4 MW<sub>e</sub>, dus een rendement van 40%.

<sup>55</sup> Zie:

[https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten\\_van\\_nucleaire\\_centrales\\_in\\_klimaatneutrale\\_energiescenario\\_s\\_2050.pdf](https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten_van_nucleaire_centrales_in_klimaatneutrale_energiescenario_s_2050.pdf)

<sup>56</sup> Ter referentie, in scenario 3 – het "must-run" scenario van Berenschot – is het maximale aantal vollasturen 7800. Het totaal aantal uren in een jaar is 8760.

<sup>57</sup> Zie: <https://www.iea.org/countries/the-netherlands>

<sup>58</sup> TNO (2022). *Een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland. Nieuwe Verkenning toont grenzen en mogelijkheden*. Whitepaper.

Tabel 2 Vergelijking scenario's voor jaarlijkse energieopwek met FOAK en NOAK MSR's t.o.v. Kerncentrale Borssele (KCB)

Scenario	Vollast uren (uur/jaar)	Energieopwek FOAK (100 MW <sub>e</sub> , in TWh)	Energieopwek NOAK (250 MW <sub>e</sub> , in TWh)	Energieopwek KCB (485 Mwe, in TWh)
Piekcentrale en waterstofproductie	5540	0,55	1,39	2,69
Must-run	7800	0,78	1,95	3,78

Technopolis B.V. op basis van scenario's van Berenschot

### Elektriciteitsmarkt: groothandelsprijs en marginale kosten

Na realisatie van een energiecentrale is de keuze om wel of niet te produceren afhankelijk van de groothandelsprijs voor elektriciteit en de marginale kosten van opwek. Deze marginale kosten worden bepaald door de brandstofkosten, het omzettingsrendement, de variabele onderhoudskosten, op- en afschakelkosten en eventuele kosten voor CO<sub>2</sub>.

De marginale productiekosten van piekcentrales bepalen uiteindelijk ook de elektriciteitsprijs in de markt. De piekcentrale is de installatie die het laatst gevraagde kilowattuur levert. Opwek met de laagste marginale kosten zal in principe het grootste deel van de tijd in productie zijn (en kan daarmee de meeste opbrengsten realiseren). De elektriciteitsvraag varieert gedurende de dag en over de tijd. Ook varieert het aanbod wind- en zonne-energie. Hierdoor verandert ook steeds het productiemiddel dat het laatste (gevraagde) kilowattuur produceert. Ook betekent dit dat een deel van de installaties niet continu wordt ingezet.

De variabele kosten van kerncentrales liggen volgens TNO momenteel tussen 0,8 tot 2,6 cent per kWh<sup>59</sup>. De variabele kosten voor wind- en zonne-energie (variabele onderhoudskosten) liggen ruim onder de 1 cent per kWh en zijn lager dan die voor kerncentrales. De variabele kosten van kolen- en gascentrales en piekunits (gasturbines die snel kunnen worden opgestart om op korte termijn in de piekvraag te voorzien) zijn het hoogst door de kosten van de brandstof en de kosten van CO<sub>2</sub>-uitstoot.

Omdat de marginale kosten van de MSR erg laag zijn t.o.v. fossiele bronnen en we aannemen dat de productie van een MSR constant zal zijn, is het **aannemelijk dat de groothandelsprijs van elektriciteit gemiddeld genomen kan dalen indien MSR's de rol van fossiele energiecentrales gedeeltelijk zouden overnemen** (dit is wel afhankelijk van veel factoren, zoals de totale vraag, temporale effecten -zomer vs. winter, dag vs. nacht-, huidige brandstofprijzen en CO<sub>2</sub>-prijzen etc.) **De lagere elektriciteitsprijs kan leiden tot een verstevigde concurrentiepositie van bedrijven in energie-intensieve sectoren.**

In een toekomstige energiemix, waarvan hernieuwbare energie een groter deel zal gaan uitmaken, kan een MSR gebruikt worden om flexibel elektriciteit te genereren terwijl het continu energie opwekt. Dan zou, op momenten dat er minder vraag is naar of te veel aanbod van andere elektriciteit, minder elektriciteit geproduceerd kunnen worden en meer warmte worden opgeslagen in het gesmolten zout (een secundair circuit). Ook zou de warmte aangewend kunnen worden voor andere doeleinden, zoals (in theorie) de productie van waterstof. Daarmee kan de MSR dienen als energiebuffer en netstabiliteit leveren.

<sup>59</sup> TNO (2021). *De rol van kernenergie in de energietransitie van Noord-Brabant*.

### 5.2.1.2 Warmtegeneratie voor industriële clusters

Binnen het zogenaamde NC2I\_R onderzoek<sup>60</sup> is een inventarisatie gemaakt van warmte-intensieve industriële locaties in Europa die mogelijk baat kunnen hebben bij een HTR, zoals een MSR. De meeste van deze locaties betreffen vestigingen van chemische fabrieken, olieraffinaderijen, staal/aluminiumproductie en farmaceutische bedrijven.

Tabel 3 Nederlandse industriële locaties die potentieel baat hebben bij cogeneratie van warmte en elektriciteit in een MSR

#	Naam industriële locatie	Plaats
1	Chemelot	Geleen
2	Chemical Cluster Delfzijl	Delfzijl
3	Eemshaven	Eemshaven
4	EMMTEC Industry & Business Park	Emmen
5	Port of Amsterdam	Amsterdam
6	Port of Rotterdam	Rotterdam
7	Valuepark Terneuzen	Terneuzen

NC2I-R Deliverable 4.21

In Nederland gaat het om de locaties in Tabel 3. **Er zouden dus zeven locaties in Nederland zijn die op basis van HTR-cogeneratie op de lange termijn potentieel interessant zijn voor bouw van een MSR.**

Volgens het NC2I-R onderzoek<sup>61</sup> hebben de meeste locaties in Europa vraag naar een thermisch vermogen van minder dan 500 MW<sub>th</sub> en elektrisch vermogen van minder dan 200 MW<sub>e</sub>. Een commerciële MSR – met een thermisch vermogen van naar verwachting 500-750 MW<sub>th</sub> (zie 5.2.1) – zou dus (naar verwachting) aan de vraag naar elektrisch en/of thermisch vermogen op de meeste van deze locaties kunnen voldoen. In de praktijk zal er naar verwachting op dergelijke sites, vanuit het oogpunt van redundantie en continuïteit van de (chemische) productie, snel gekozen worden voor twee kleinere MSR-units. Dat biedt meer zekerheid voor de continue energie en warmteproductie indien een van de units uitvalt.

Naast de locaties die in de NC2I-R-studie geïdentificeerd zijn, zijn er waarschijnlijk ook andere industriële locaties in Nederland die baat kunnen hebben bij een MSR voor warmtegeneratie. Zo werd door geraadpleegde personen ook enkele locaties in Zeeland genoemd als kansrijk, zoals het Havengebied Vlissingen en de Kanaalzone Terneuzen-Sluiskil, twee locaties die zich ook dicht bij de huidige kerncentrale van EPZ in Borssele bevinden.

### 5.2.1.3 Waterstofproductie

Ook het potentieel om MSR's te gebruiken voor het produceren van waterstof maakt het een aantrekkelijke optie. Door het gebruik van met kernenergie opgewekte, dus vrijwel CO<sub>2</sub>-vrije, zogenaamde paarse waterstof, wordt een aanzienlijke vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot (of opslag) bereikt. Hierdoor kan de Nederlandse energieproductie worden verduurzaamd, wat (indien tijdig ingezet) bijdraagt aan het beperken van de effecten van klimaatverandering.

<sup>60</sup> M. Gradecka, A. Kiss en C. Auriault (2015). *European Sites Mapping*. NC2I-R Deliverable D4.21.

<sup>61</sup> Ibid

In Nederland zijn er diverse sectoren die grote afnemers van waterstof (zullen) zijn. Denk hierbij bijvoorbeeld aan:

- Transportsector: Waterstof wordt steeds vaker gebruikt als brandstof voor voertuigen, zoals bussen en vrachtwagens.
- Chemische industrie: Waterstof wordt in de chemische industrie gebruikt als grondstof voor de productie van chemicaliën en brandstoffen.
- Energieopwekking: Waterstof kan worden gebruikt als brandstof voor elektriciteitscentrales of als opslagmiddel voor excessieve energie.
- Scheepvaart: Waterstof is een aantrekkelijke optie voor verduurzaming van de scheepvaart.

De waterstof kan ook worden geëxporteerd, naar Duitsland (dat naar verwachting een enorme waterstofbehoefte heeft)<sup>62</sup>, of verkocht worden op de wereldmarkt (als dit tegen kostendekkende prijzen kan).

De IAEA heeft al in 2013 uitgebreid onderzoek gedaan naar de productie van waterstof met gebruik van kernenergie.<sup>63</sup> Daarbij gaat de IAEA ervan uit dat in de toekomst kerncentrales niet alleen ingezet worden voor de productie van elektrische energie, maar ook voor de productie van waterstof. Een kerncentrale kan volledig aangewend worden voor de productie van waterstof, maar zou ook waterstof kunnen produceren op die momenten dat hernieuwbare energiebronnen een overschot aan elektriciteit aan het net leveren.<sup>64</sup> Deze dynamische productie van waterstof vormt nog wel een R&D-uitdaging: een niet-continue operatie van electrolyzers verkort momenteel nog de levensduur van de electrolyser. Er zijn dan ook diverse studies die onderzoek doen naar de dynamisch productie van waterstof of voor deze uitdaging aandacht vragen.<sup>65</sup>

Op basis van aannames van de IAEA<sup>66</sup> zou een **FOAK MSR**, met een elektrisch vermogen van 100 MW<sub>e</sub> en een vermogen van 250 MW<sub>th</sub>, zo'n **22,5 kiloton waterstof per jaar** kunnen produceren. Een **commerciële MSR** met een elektrisch vermogen van 250-300 MW<sub>e</sub> en een geschat thermisch vermogen van 500-750 MW<sub>th</sub>, zou dan zo'n **45,0-67,5 kiloton waterstof per jaar** kunnen produceren. Voor **10-20 reactoren** van dit vermogen in Europa is dat dus **450 - 1.350 kiloton waterstof per jaar**. De Europese Commissie wil in 2024 1 miljoen ton waterstof produceren en in 2030 10 miljoen ton waterstof.<sup>67</sup>

Bovenstaande kan wellicht het beste worden beschouwd als de **maximale hoeveelheid waterstofproductie door een MSR**, omdat een MSR mogelijk niet exclusief voor de productie

---

<sup>62</sup> Zie: <https://www.north2.eu/blog/waterstof-duitsland/>

<sup>63</sup> IAEA (2013). *Hydrogen Production Using Nuclear Energy*. Vienna: IAEA.

<sup>64</sup> Datzelfde principe kan overigens ook voor overschotten uit andere energiebronnen, zoals wind- of zonne-energie, worden toegepast.

<sup>65</sup> Zie bijvoorbeeld: <https://link.springer.com/article/10.1140/epip/s13360-021-01445-5> en <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acscenergylett.2c02897>

<sup>66</sup>Productie van 90 ton waterstof (ton bij HHV (higher heating value) van waterstof) per megawatt thermisch vermogen per jaar, met een rendement van 45%. Daarbij gaat men uit van productie van waterstof via de zwavel-jodiumcyclus waarbij warmte van 400-900 °C uit een nucleaire reactor wordt gebruikt om waterstof te produceren. De aanname is dat de reactor volledig wordt ingezet voor de productie van waterstof en dus geen elektriciteit aan het net levert. Er zijn andere methoden voor een MSR waarbij de efficiëntie hoger ligt (zie bijvoorbeeld: <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses.aspx>), zoals Hoge Temperatuur Elektrolyse (HET). Daarbij gaat het rendement omhoog naar 50-70% (KernVisie (2022). *Waterstof uit kernenergie*. <https://www.kernvisie.com/energie/waterstof-uit-kernenergie.html>).

<sup>67</sup> Ibid.

van waterstof wordt ingezet. Daarnaast liggen wellicht andere (groene) productieroutes voor waterstof meer voor de hand dan een MSR, waarvan sommigen ook nog in ontwikkeling zijn.

*Tabel 4 Overzichtstabel directe effecten elektriciteit, warmte, waterstof*

Jaar	Middellange termijn (tot ~2030)	Lange termijn (tot ~2050)
Verwacht opgesteld vermogen	100 MW <sub>e</sub> (FOAK)	2.5-5 GW <sub>e</sub> (NOAK)
Maximale jaarlijkse opwek elektriciteit	0,55 TWh	13,9-27,8 TWh
% Warmtevraagvoorziening industriële parken	60-70%	100% (met meerdere kleinere MSR's voor betrouwbaarheid/redundantie)
Totale productie waterstof (kt/j)	22,5	450-1.350

Technopolis Group, 2023

Diverse onderzoeken uit binnen- en buitenland laten zien dat de productie van waterstof door een kerncentrale middels elektrolyse tegen concurrerende kosten kan. De kosten voor groene waterstof uit wind blijken uit de ene studie duurder (4-6 €/kg vs. 3 €/kg) en de andere studie vergelijkbaar (3,50 \$/kg vs. max. 3,6 \$/kg) met de kosten voor paarse waterstof uit kernenergie.<sup>68</sup>

### 5.2.2 Effecten met betrekking tot spin-offs & innovatie

Gezien de hoge opstartkosten voor het realiseren van een kernreactor werd bij kernreactoren doorgaans het 'economy of scale' model toegepast (hoe groter hoe goedkoper). Vanwege het modulaire ontwerp geldt voor de MSR echter het principe van 'economy of multiples'<sup>69</sup>. Bij het realiseren van meerdere reactoren op dezelfde locatie ontstaan er innovatie-efficiëntievoordelen, die naar schatting een financieel voordeel van 15% opleveren<sup>70</sup>. Bijvoorbeeld in termen van locatieontwikkeling en infrastructuur. Daarnaast levert de 'economy of multiples' ook tijdens de bouw efficiëntie op.

Het modulaire ontwerp van de MSR biedt daarnaast kansen voor gebundelde of gecentraliseerde R&D-activiteiten en een daarmee opgelijnde supply-chain, ongeacht waar de reactoren uiteindelijk gebouwd worden. Wanneer het zwaartepunt van de R&D-activiteiten rondom de MSR-technologie in één gebied georganiseerd zouden worden, ontstaan ook ecosystemische voordelen in termen van versterkte innovatiekracht en spin-offs. Dat heeft niet alleen betrekking op de ontwikkeling van nucleaire technologie, maar ook op technologieën, systemen en onderdelen die nodig zijn in het niet-nucleaire deel van een MSR. Daarbij gaat het bijvoorbeeld om nieuwe materialen, containers, warmtewisselaars, pompen, regelsystemen, sensoren etc. Hier liggen kansen voor zowel bestaande als nieuwe bedrijvigheid.

Om de omvang van de mogelijke bijdrage van de ontwikkeling van de MSR-technologie aan spin-offs en innovatie in te kunnen schatten, hebben we gekeken naar de spill-over effecten

<sup>68</sup> KernVisie (2022). Waterstof uit kernenergie. <https://www.kernvisie.com/energie/waterstof-uit-kernenergie.html>

<sup>69</sup> Mignacca, B. & Locatelli, G. (2020). *Economics and finance of Molten Salt Reactors*. Progress in Nuclear Energy, Volume 129 – 103503.

<sup>70</sup> IAEA Country Nuclear Power Profiles (2005) in Mignacca & Locatelli (2020)



van eerdere complexe nucleaire technologieën zoals fusietechnologie. Bruns et al. (2012)<sup>71</sup> bestudeerden in het kader hiervan patentinformatie, om te kunnen duiden in welke vakgebieden spill-over effecten zichtbaar waren. Uit hun analyse komt naar voren dat materiaalkunde (toegewezen aan 14% van de gevonden documenten) en deeltjesfysica (6%) de belangrijkste gebieden zijn met relevantie voor de MSR-technologie. Uit interviews blijkt men in Nederland vooral spill-over effecten te verwachten vanuit de materiaalkennis, in het bijzonder op het terrein van bestendigheid tegen extreme corrosieve omstandigheden.

Daarnaast kunnen de toegenomen investeringen in wetenschappelijke-technisch onderzoek op gebieden als materiaalkunde ook leiden tot spin-outs en startende bedrijven. In termen van arbeidsproductiviteit lijken academische spin-outs (startende bedrijven) qua bruto toegevoegde waarde per werkzame persoon ca. het dubbele te realiseren van het gemiddelde bedrijf in Nederland<sup>72</sup>. In welke mate investeringen in het ontwikkelen van kennis met betrekking tot de MSR tot deze arbeidsproductiviteit zullen leiden, hangt af van de wijze waarop kennisdeling plaatsvindt tussen de bedrijven en nabijgelegen universiteiten. Hoe breder het netwerk hoe breder het toepassingsgebied waarin spin-offs kunnen ontstaan<sup>73</sup>.

#### Box 2 *Investeringen in innovatie in de VS om een sterke nationale nucleaire industrie te ontwikkelen*

In de Verenigde Staten wordt de ontwikkeling van nucleaire energie-innovatie beleidsmatig gestimuleerd middels cofinanciering van onderzoek met betrekking tot geavanceerde nucleaire technologie (GAIN-programma: Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) om een sterke nationale nucleaire industrie te ontwikkelen. Activiteiten richten zich hierbij op testen en validatie, demonstratie, 3D-printing van componenten en kennisontwikkeling om het vergunningsproces voor te bereiden op toekomstige ontwikkelingen. Essentieel onderdeel van het programma is dat deelnemers kennis uitwisselen en bijv. elkaars lab-faciliteiten delen.

Bron: Website Amerikaans federaal overheidsprogramma Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) – U.S. Department of Energy <https://gain.inl.gov/SitePages/Home.aspx>

Onderzoeksprojecten waarin meerdere kennisinstellingen en bedrijven samenwerken kunnen een belangrijke katalysator vormen voor het bevorderen van innovatie en spin-offs. Belangrijke voorwaarde hiervoor is dat stakeholders zicht hebben op welke kennis en vaardigheden door welke organisatie ontwikkeld worden. In Nederland is daarin een belangrijke stap gezet middels het opzetten en uitbreiden van een kennisnetwerk als onderdeel van het Molten Salt Innovation Ecosystem (MOSAIEC). Binnen het Nederlandse MSR-domein zijn eerste samenwerkingen gestart, maar is het aantal gezamenlijke onderzoeksprojecten (vooralsnog) beperkt. Er zijn investeringen en financiële middelen nodig om gezamenlijk onderzoek en innovatie te laten toenemen. In het bijzonder voor bedrijven, die bijvoorbeeld een rol in de toeleveringsketen kunnen spelen, is het van belang om orders in het verschiet te hebben, of om anderszins hun risico's te beperken, alvorens zij aan gezamenlijke onderzoeksprojecten deelnemen.

<sup>71</sup> Bruns, P. et al (2012). *Spillover benefits from controlled nuclear fusion technology – a patent analysis*. World Patent Information, vol. 34-4, p. 271-278.

<sup>72</sup> CBS (2021). *Het Nederlandse midden- en kleinbedrijf Europees vergeleken*, <https://www.cbs.nl/nl-nl/longread/diversen/2021/het-nederlandse-midden-en-kleinbedrijf-europees-vergeleken/4-nederland-heeft-een-relatief-hoge-bruto-toegevoegde-waarde-per-werkzame-persoon>

<sup>73</sup> Caputo, A., Charles, D. en Fiorentino, R. (2022). *University spin-offs: entrepreneurship, growth and regional development*. Studies in higher education, vol. 47, Nr. 10, p.1999-2006.

### 5.2.3 Opschalen en export MSR Technologie

Als Nederlandse partijen er sneller of beter dan andere partijen in slagen kennis en technologie voor een MSR te ontwikkelen en liefst ook een MSR te realiseren, dan biedt dit kansen om deze technologie internationaal te vermarkten, onder meer door export van (deel)producten, via licentiering of verkoop van intellectueel eigendom en via (technische) consultancy over bijvoorbeeld de vergunningaanvraag en bouw van een MSR. Dit kan ook betrekking hebben op onderdelen van een MSR: systemen, materialen en componenten die voor de MSR ontwikkeld worden. In sectie 5.2.1 werd gesteld dat er vanuit het perspectief van cogeneratie in Europa de potentie is om 10-20 MSR's op de markt te brengen tot 2045.

Dankzij de modulaire opzet van de beoogde MSR ontstaan in verhouding tot de huidige generatie reactoren aanzienlijk meer kansen om gedurende de levensduur van de reactor technologische verbeteringen te ontwikkelen en te implementeren (upgrades) zodat over een langere periode producten voor de MSR ontwikkeld, gefabriceerd en geëxporteerd kunnen worden.

### 5.2.4 Kostenbesparingen door lokale opwekking, geen netverzwaring nodig

De verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem zet grote druk op het energienet. In de energietransitie worden grote hoeveelheden fossiele energie vervangen door elektrische energie uit hernieuwbare bronnen als zon en wind. Het energiesysteem moet daarom voorbereid worden op een forse elektrificatie van de samenleving in combinatie met een verandering naar een duurzamer, maar ook sterk weersafhankelijke elektriciteitsproductie<sup>74</sup>.

Deze ontwikkeling stelt netbeheerders voor grote uitdagingen om reeds aanwezige infrastructuur zo goed mogelijk te benutten en te verbeteren. Hogere pieken en dalen in opwek (door fluctuaties in aanbod van zon en wind) én grootschalige decentrale opwek leiden tot lokale congestieproblemen in het elektriciteitsnetwerk, die verzwaring van het netwerk nodig maken. Netverzwaringen vergen lange doorlooptijden en brengen hoge kosten met zich mee<sup>75</sup>. De verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem heeft daarom baat bij alternatieven voor netverzwaring.

Een MSR zou in de toekomst een bijdrage kunnen leveren aan het voorkomen van netverzwaring. Dat kan alleen indien een MSR voldoende regelbaar en flexibel is om, bij overbelasting (overaanbod van elektriciteit) van het net, **minder vermogen** aan het net aan te bieden. Een recente modelstudie laat zien dat MSR's flexibel zijn en in staat zijn om het vermogen op het net te volgen.<sup>76</sup> Het Nederlandse Thorizon, en ook andere bronnen, stellen dat MSR's voldoende flexibel zijn om ingezet te kunnen worden voor het borgen van netbalans.<sup>77</sup> Het is echter onduidelijk of een MSR ook voldoende snel regelbaar is voor netbalans op de korte termijn (enkele uren of minder). Dat zou mogelijk kunnen zijn door op

---

<sup>74</sup> Overlegtafel Energievoorziening (2018). *Afwegingskader verzwaren tenzij*,

[https://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/OTE\\_Rapport\\_Afwegingskader\\_verzwaren\\_tenzij\\_128.pdf](https://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/OTE_Rapport_Afwegingskader_verzwaren_tenzij_128.pdf)

<sup>75</sup> TNO (2022). *Waterstof uit elektrolyse voor maatschappelijk verantwoord netbeheer - Businessmodel en businesscase*, beschikbaar via <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A70d1b3e8-7c17-41b3-98d6-8a6a093f2da3>

<sup>76</sup> A. Ho, M. Memmott, J. Hedengren and K.M. Powell (2023). *Exploring the benefits of molten salt reactors: An analysis of flexibility and safety features using dynamic simulation*. Digital Chemical Engineering, Volume 7, 100091, June 2023.

<sup>77</sup> M. Fisher (2020). *Spotlight on Innovation: Molten Salt Reactors for a Sustainable Clean Energy Transition*. IAEA: <https://www.iaea.org/newscenter/news/spotlight-on-innovation-molten-salt-reactors-for-a-sustainable-clean-energy-transition>; Power Generation LinkedIn Community (2023). *How can molten salt reactors support the integration of renewable energy sources and grid stability?* LinkedIn: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-molten-salt-reactors-support-integration>

momenten van onbalans de warmte uit de kernreactor op te slaan in het gesmolten zout in een secundair circuit of door om te schakelen naar de productie van paarse waterstof. Dat laatste hangt echter wel af van het primaire doel van de MSR op een locatie: bij inzet van een MSR voor het leveren van continue warmte en elektriciteit aan een industriële site, kan het omschakelen van processen een nadelig effect hebben op de continuïteit en efficiëntie van industriële processen en de levensduur en veiligheid van installaties. Omschakelen naar waterstofproductie is dus alleen interessant indien de businesscase voor de MSR bij dergelijk gebruik overeind blijft.

Ook het lokaal gebruik van een MSR voor bijvoorbeeld een locatie met veel chemische of energie-intensieve industrie zou kunnen bijdragen aan het voorkomen van netverzwaring. In dat geval kan een MSR direct warmte, waterstof en/of elektriciteit leveren, afgestemd op de vraag van de lokale industrie via een lokaal netwerk, zoals voor de productie van chemische en/of biotechnologische producten in bijvoorbeeld Zeeland (havengebied Vlissingen-Terneuzen met bedrijven binnen het Smart Delta Resources cluster zoals Dow, Yara, Zeeland Refinery en Ørsted), Zuid-Holland (havengebied Rotterdam) of Zuid-Limburg (Chemelot). Hierbij is het belangrijk dat ook hier de MSR flexibel kan leveren en schakelen tussen verschillende vormen van energie (warmte, waterstof en elektriciteit). Daardoor hoeft er centraal geen grote hoeveelheden energie opgewerkt te worden en getransporteerd te worden via het net naar deze industriële sites.

Netverzwaring op het hoofdnet kan ook voorkomen worden door eigen lokale netten voor industriële sites. Zo'n net kan dan gekoppeld zijn aan een of meerdere MSR's en de site van stabiele en betrouwbare energie (elektriciteit, warmte, waterstof) voorzien. Daarmee hebben bedrijven die een grote elektriciteitsvraag hebben voor hun processen geen last van netfluctuaties. De kosten van netverzwaring betreffen dan alleen het lokale net en liggen niet bij de maatschappij maar de energie-intensieve industrie zelf.

Lokale opwek en gebruik en flexibiliteit hebben een direct effect op investeringen in transportcapaciteit van het energienet (deze worden lager). Verlichting van de noodzaak hierin te investeren geeft netbeheerders bovendien keuzevrijheid om de meest maatschappelijk doelmatige investeringen prioriteit te geven.<sup>78</sup>

### 5.2.5 Versterkte industriële basis & nucleaire (service) sector in Nederland

Realisatie van een commerciële MSR voor bijv. de energie-intensieve industrie in combinatie met spin-offs en innovatie (nieuwe componenten en productietechnieken waaruit Nederland nieuw economisch verdienvermogen kan onttelen), kan de industriële basis en nucleaire sector in Nederland (en daarbuiten) versterken.

Om kansen voor een versterkte industriebasis te beschrijven, kijken we naar enkele relevante aspecten aan de vraag- en aanbodzijde van de markt.

#### **Aan de vraagzijde:**

- *Total adressable market (TAM) nucleaire sector (internationaal):* de marktomvang van de internationale nucleaire energiemarkt waarop met realisatie van MSR(-technologie) via export en licensing theoretisch ingespeeld kan worden.

---

<sup>78</sup> Netbeheer Nederland (2021). *Het Energiesysteem van de Toekomst*. Samenvatting. [https://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/Samenvatting\\_rapport\\_Het\\_Energiesysteem\\_van\\_de\\_toekomst\\_1\\_28.pdf](https://www.netbeheernederland.nl/upload/Files/Samenvatting_rapport_Het_Energiesysteem_van_de_toekomst_1_28.pdf)

De mondiale elektriciteitsconsumptie is op dit moment circa 176.000 TWh, goed voor een marktomvang van circa €7 biljoen per jaar.<sup>79</sup> Tot 2040 wordt – vanwege bevolkingsgroei en elektrificatie van economische sectoren – een stijging van de totale elektriciteitsvraag verwacht van circa 30%. Van de mondiale elektriciteitsconsumptie is ca. 7.031 TWh (= 4%) afkomstig uit nucleaire energiebronnen. Volgens verschillende scenario's van de International Energy Agency (IEA) ligt een verdere groei van de nucleaire elektriciteitsproductie in lijn der verwachting. Op dit moment worden er ca. 60 kernreactoren gebouwd in 15 landen (voornamelijk in China, India en Rusland), zijn er ca. 100 besteld of gepland en worden er nog eens 300 kernreactoren voorgesteld.<sup>80</sup> Mogelijk valt de daadwerkelijke bouw van deze 300 reactoren lager uit (zie ook sectie 4.3.4).

- Serviceable adressable market (SAM) nucleaire sector (nationaal): de marktomvang van de nationale nucleaire energiemarkt waarop met realisatie van MSR(-technologie) via export en licencing theoretisch ingespeeld kan worden.

De Nederlandse energieconsumptie is op dit moment – peiljaar 2021 – 3.024 PJ. Daarvan is 1,2% afkomstig uit kernenergie, 11,3% is afkomstig uit hernieuwbare bronnen.<sup>81</sup> Via uitvoering van het Klimaatakkoord zal de eigen opwek van duurzame energie toenemen. In 2050 kan dat duurzame aandeel in de totale energieopwek, op basis van het zogenaamde Onafhankelijke Groei scenario<sup>82</sup> met een maximale inzet op duurzame energie en kernenergie voor de basislastvraag (ruim 3.500 PJ), groeien tot bijna 53%, waarvan 7% kernenergie.

#### Aan de aanbodzijde:

- Sectorspecificaties nucleaire sector direct<sup>83</sup>: aantal bedrijven en omzet van de nucleaire sector in Nederland

In Nederland vallen er 8 organisaties onder de zogeheten smalle definitie van de nucleaire sector. Dit zijn de organisaties die nucleaire kennis benutten voor hun hoofdactiviteit. Zij zijn vertegenwoordigd in Nucleair Nederland. Ook de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) hoort hierbij.<sup>84</sup> De nucleaire sector in Nederland genereert een geschatte omzet van ongeveer €1 miljard.<sup>85</sup> Vooralsnog richt het leeuwendeel van de nucleaire sector in Nederland zich op medische isotopen en meer traditionele nucleaire technologie voor elektriciteitsproductie. De vraagkant lijkt zich op mondiaal niveau sterk te ontwikkelen wat ook voldoende kansen zou kunnen bieden voor Nederlandse bedrijven die zich bezig houden met alternatieve nucleaire technologie als MSR's.

Op basis van de ORNL 1000 MW<sub>e</sub> MSR schat MIT de totale directe kosten voor een MSR van 250 MW<sub>e</sub> (NOAK) op zo'n 650 miljoen euro voor (omgerekend naar euro's in 2023).<sup>86</sup> Uit de literatuur blijkt dat van de totale directe kosten van een MSR zo'n 35% gemoeid is met de reactor zelf –

<sup>79</sup> Zie: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

<sup>80</sup> World Nuclear Association (2023): <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx> (update mei 2023)

<sup>81</sup> Zie: <https://www.energieinnederland.nl/cijfers/2021>

<sup>82</sup> eRisk Group (2020). *De rol van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem*. [https://www.kivi.nl/uploads/media/5fdb546e6a6f7/eRisk-Group\\_rapport\\_De-rol-van-kernenergie\\_20201202-1.pdf](https://www.kivi.nl/uploads/media/5fdb546e6a6f7/eRisk-Group_rapport_De-rol-van-kernenergie_20201202-1.pdf)

<sup>83</sup> Een inschatting van de daarmee gepaard gaande banen is verder uitgewerkt in hoofdstuk 6.

<sup>84</sup> Technopolis Group (2022). *De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector*.

<sup>85</sup> eRisk Group (2020). *De rol van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem*. [https://www.kivi.nl/uploads/media/5fdb546e6a6f7/eRisk-Group\\_rapport\\_De-rol-van-kernenergie\\_20201202-1.pdf](https://www.kivi.nl/uploads/media/5fdb546e6a6f7/eRisk-Group_rapport_De-rol-van-kernenergie_20201202-1.pdf)

<sup>86</sup> MIT (2018). *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. An interdisciplinary MIT study*. Appendix K.

het nucleaire deel van de installatie.<sup>87</sup> Dat betekent dat er per MSR voor de nucleaire sector een omzet in de orde van zo'n 200 miljoen euro te verwachten valt. Dit is een grove inschatting: de werkelijke kosten en omzet zullen afhangen van het te bouwen ontwerp, maar ook van o.a. de locatie en de licentiering.

- Sectorspecificaties niet-nucleaire sector direct<sup>88</sup>: type bedrijven en mogelijke omzet

Voor de toeleverende bedrijven (dat kunnen ook buitenlandse bedrijven zijn) kunnen in de breedte kansen benut worden. Zij spelen een rol bij de levering van componenten en systemen en bij de bouw en constructie van een MSR. Dit zijn vooral technische bedrijven in engineering, elektro-, meet- en regeltechniek, bouw en civiele sector en ICT. Daarnaast spelen zij tijdens de operationele fase ook een rol in onderhoud en het implementeren van upgrades. Per MSR is voor de niet-nucleaire sector een omzet in de orde van zo'n 400 miljoen euro te verwachten

Van de directe kosten van een MSR is zo'n 27% gemoeid is met constructie en materialen, 18% met systemen en apparatuur voor de turbine, 11% voor de elektrische systemen, 2% voor het warmteafvoersysteem en 6% voor overige systemen en apparatuur.<sup>89</sup>

#### 5.2.6 Voldoende gekwalificeerd en technisch talent nucleaire en energiesector

Voor de bredere ambities van het kabinet Rutte IV op gebied van kernenergie en in het kader van de versterking van de nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland is voldoende gekwalificeerd technisch talent in de nucleaire en energiesector noodzakelijk.

Door de ontwikkeling van de MSR in Nederland verwachten we de volgende effecten:

- Onderzoek en innovatie wordt veelal in samenwerking met universiteiten uitgevoerd. Dat betekent dat er financiering bij onderzoeksgroepen terechtkomt die daarvoor doorgaans promovendi aanstellen om het onderzoek uit te voeren. Deze jonge onderzoekers worden enerzijds zelf opgeleid in een promotietraject, maar spelen vaak ook een rol in het onderwijs. Zo dragen de investeringen in onderzoek en innovatie bij aan het opleiden van gekwalificeerd en technisch talent in de nucleaire en energiesector en het versterken van de kennisinfrastructuur.
- Bijzondere nucleaire projecten, die technisch interessant en uitdagend zijn, (zoals bijv. PALLAS) trekken doorgaans ook internationaal technisch talent. Dit draagt dus bij aan het vergroten van de voldoende gekwalificeerd technisch talent.
- Het opbouwen van een ecosysteem en kennisbasis omtrent de MSR voegt een nieuw element (namelijk nucleaire engineering) toe aan de nucleaire sector in Nederland en verbreedt de kennisbasis.
- Daarnaast neemt de arbeidsvraag uit de sector toe door de ontwikkeling van de MSR in Nederland. Dat maakt het voor studenten een kansrijke opleidingsrichting. Het vraagt eveneens van de sector (kennisinstellingen, overheid en bedrijven) om te investeren in onderwijs op relevante technische (en nucleaire) domeinen.

**Een sterke relatie tussen onderzoek, innovatie (nieuwe componenten en productietechnieken) en spin-offs en de groei van talent in de nucleaire en energiesector is op basis van interviews**

<sup>87</sup> B. Mignacca and G. Locatelli (2020). *Economics and finance of Molten Salt Reactors*. Progress in Nuclear Energy, Volume 12, 103503.

<sup>88</sup> Een inschatting van de daarmee gepaard gaande banen is verder uitgewerkt in hoofdstuk 6.

<sup>89</sup> B. Mignacca and G. Locatelli (2020). *Economics and finance of Molten Salt Reactors*. Progress in Nuclear Energy, Volume 12, 103503.

**aannemelijk.** Voorwaarde is wel dat er een groter aanbod aan nucleair onderwijs en een versterkte nucleaire kennisinfrastructuur ontstaat.

### 5.3 Impacts

#### 5.3.1 Economische groei

De ontwikkeling van de MSR in Nederland kan bijdragen aan economische groei in termen van bedrijven, omzet, banen en investeringen.

Een lokaal stabiele beschikbaarheid van energie (zie ook 4.3.3) zal de kosten voor bedrijven verlagen en daarmee hun competitiviteit verhogen. In een context waar de energiebehoefte toeneemt leveren lagere energiekosten een competitief voordeel op die groei van bestaande en nieuwe bedrijven zal stimuleren.

In meer algemene economische termen wordt doorgaans naar de totale factorproductiviteit (TFP) gekeken om te beoordelen dan wel schatten hoe productief kapitaal en arbeid wordt ingezet om toegevoegde waarde te creëren. Belangrijke factoren hierbij zijn onder andere R&D, human capital, competitieve positie in binnen- en buitenland, stand van de technologie en ondernemerschap<sup>90</sup>. Voor het huidige decennium wordt geschat dat de groei van het Bruto Binnenlandse Product (BBP) voor een groot deel (0.7 procentpunt per jaar) afhangt van de TFP-groei<sup>91</sup>, waarbij de groei voornamelijk na 2025 verwacht wordt. De TFP-groei hangt onder andere af van in welke mate er in kennis en innovatie geïnvesteerd wordt, zoals bijv. middels WBSO, specifiek innovatiebeleid, onderwijs, publiek en privaat gefinancierde R&D. Deze aspecten zijn ook relevant met betrekking tot de ontwikkeling van de MSR in Nederland.

In hoofdstuk 6 gaan we in detail in op human capital. Daarin komen ook banen aan bod die voortkomen uit de ontwikkeling, realisatie en bedrijfsvoering van een MSR in Nederland. We vatten die uitkomsten als volgt samen:

- **In de onderzoeks- en ontwikkelfase van een MSR kan het aantal banen naar schatting (op basis van interviews) oplopen tot 225 FTE, waarvan zo'n 175 FTE in Nederland.** Indirect kunnen daar nog enkele tientallen FTE's bij engineering partners bijkomen.
- **In de bouwfase van een MSR zal het aantal banen naar verwachting oplopen tot 1.100 FTE, waarvan een deel ingevuld zal worden door Nederlandse arbeidskrachten.** Welk aandeel is niet bekend, dat hangt af van de bouwlocatie en welke partijen uiteindelijk gecontracteerd worden voor de bouw van de MSR. Dit aantal FTE's is gebaseerd op een vergelijking met de bouw van een small modular reactor.
- **In de operationele fase van een MSR zal het aantal banen naar schatting ongeveer 50 FTE zijn per MSR.** Indien er daadwerkelijk 10-20 MSR's worden gerealiseerd in Europa zal het dus gaan om zo'n 500-1.000 FTE in Europa tot 2045. In Nederland zal het om een lager aantal gaan. Ervan uitgaande dat er zo'n 7 locaties in Nederland zijn die potentieel baat zouden hebben bij een MSR op de lange termijn (cogeneratie), dan is de potentie voor het totale aantal FTE in Nederland naar schatting maximaal 350 FTE. Het zou echter goed kunnen dat het aantal MSR's in Nederland lager zal zijn en dus ook het aantal mensen dat direct werk vindt bij een van deze MSR's.

---

<sup>90</sup> Erken, H. Donselaar, P. En Thurik, R. (2016). *Total factor productivity and the role of entrepreneurship*. The Journal of Technology Transfer, vol. 43, p. 1493-1521.

<sup>91</sup> Erken, H., van Es, F. en Groenewegen, J. (2019). *Het groeipotentieel van de Nederlandse economie tot 2030*. Raboresearch – Economisch Onderzoek.

In het geval van de MSR-ontwikkeling gaat het om nieuwe economische activiteiten die in Nederland worden uitgevoerd en dus om nieuwe banen – het is geen vervanging van bestaande activiteiten.

*Box 3 Het perspectief van Thorizon: Extra FTE's door het produceren van cartridges*

Het Nederlandse Thorizon ontwikkelt een modulaire MSR met gestandaardiseerde cartridges waarin zich het gesmolten zout bevindt dat dient als brandstof en koelmiddel. Het produceren van de cartridges zelf is een niet-nucleaire activiteit. Thorizon schat in dat in 2060 bij het proces van het produceren van cartridges uiteindelijk zo'n 2.500 FTE werkzaam kan zijn. Dat aantal zal in de praktijk echter afhangen van het aantal MSR's dat tegen die tijd operationeel is.

Bron: informatie gedeeld door Thorizon

### 5.3.2 Sterk vestigingsklimaat nucleaire en energie-intensieve industrie

Nederland kent een sterk vestigingsklimaat, mede door de aantrekkelijke fysieke, digitale en fiscale infrastructuur. In The Global Competitiveness Report van de World Economic Forum staat Nederland de laatste jaren in de top tien en vaak in de top drie<sup>92</sup>. Recent is in Nederland meer aandacht voor de punten die het vestigingsklimaat negatief beïnvloeden, waarbij de ontbrekende infrastructuur voor de energietransitie een punt van zorg is<sup>93</sup>. Een MSR kan ten dele invulling geven aan het versterken van deze infrastructuur en bijdragen aan het verduurzamen van industrieclusters. Dat is ook nodig vanwege strengere regelgeving over de uitstoot van broeikasgassen (waaronder CO<sub>2</sub>) en het gebruik van schone energie in de industrie.

Concreet kan een MSR het vestigingsklimaat voor de (energie-intensieve) industrie versterken door:

- **Rechtstreeks continue elektriciteit te leveren aan een industrieel cluster via een eigen netwerk.** Op sommige plekken in Nederland zijn er momenteel beperkingen in netcapaciteit waardoor bedrijven niet op korte termijn aangesloten kunnen worden op het elektriciteitsnet of niet kunnen worden voorzien in hun groeiende elektriciteitsvraag. Dat beïnvloedt het vestigingsklimaat negatief en zet een rem op de groei en verduurzaming (d.w.z. elektrificatie) van bedrijven. Voor energie-intensieve bedrijven, die behoefte hebben aan constante elektriciteitsvoorziening, kan een lokale MSR het aantrekkelijk maken om zich te vestigen en te produceren zonder CO<sub>2</sub>-uitstoot in hun elektriciteitsvoorziening.
- **De (lokale) beschikbaarheid van waterstof in Nederland te vergroten.** Voor bedrijven in de chemie of industrie met processen die veel warmte nodig hebben is waterstof in de toekomst belangrijk voor verduurzaming van hun processen. De lokale productie van waterstof door een MSR kan het voor deze bedrijven aantrekkelijker te maken om zich te vestigen. Voor zwaar transport (op weg en water) zal naar verwachting in de toekomst de vraag naar waterstof ook toenemen. Een MSR kan bijdragen aan een efficiënte continue (bijvoorbeeld lokale) productie van waterstof in Nederland zonder CO<sub>2</sub>-uitstoot.
- **De lokale beschikbaarheid van hoge temperatuur warmte vergroten.** Een MSR kan ook hoge temperatuur warmte leveren aan de lokale industrie die rechtstreeks gebruikt kan

<sup>92</sup> The Global Competitiveness Report 2020:

[https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_TheGlobalCompetitivenessReport2020.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2020.pdf)

<sup>93</sup> VNO-NCW (2021) *Toenemende zorgen over Nederlands vestigingsklimaat*

worden in productieprocessen. Dat maakt het aantrekkelijk voor deze bedrijven om zich dicht bij een MSR te vestigen, aangezien zelf hoge temperatuur warmte genereren (bijv. met gas) duur en vervuilend kan zijn. Lagere temperatuur restwarmte van deze processen kan eventueel (her)gebruikt worden voor verwarming.

### 5.3.3 Betrouwbare duurzame energievoorziening

Een MSR kan zowel aan betrouwbaarheid als aan duurzaamheid van de energievoorziening bijdragen. Dit is reeds in hoofdstuk 4.3 uiteengezet. Betrouwbaarheid betekent dat de energievoorziening voor de afnemer zo veel mogelijk gegarandeerd is. Hiervoor is een goed energienetwerk nodig. Daarnaast is een goede energiemix belangrijk om ervoor zorgen dat in alle omstandigheden de energielevering gegarandeerd is. Een duurzame energiemix bevat energiebronnen die hernieuwbaar zijn, zoals uit zon, wind en water, eventueel aangevuld met CO<sub>2</sub>-arme energiebronnen.

Een MSR kan hieraan bijdragen doordat:

- **Het een betrouwbare, continue elektriciteitsproductie kan bieden zonder afhankelijk te zijn van externe factoren zoals weersomstandigheden.** Hierdoor kunnen ze een stabiele basisleverancier zijn in het elektriciteitssysteem.
- **De benodigde brandstof voor een MSR, thorium, drie tot vier keer meer voorradig is dan uranium en wereldwijd beschikbaar is.** De hoeveelheid tegen acceptabele kosten winbare thorium is ruim voldoende om in de vraag naar thorium voor meerdere eeuwen te voorzien.<sup>94</sup>
- **Een MSR relatief weinig brandstof verbruikt.** Gas- en kolencentrales vereisen een continue aanvoer van brandstof, terwijl dat voor een kerncentrale niet nodig is. Dat maakt deze energiebron **minder afhankelijk van prijsschommelingen** van brand- en grondstoffen op de wereldmarkt.
- **Het kan bijdragen aan stabiliteit op het energienet.** Een MSR kan zowel volcontinu als flexibel elektriciteit produceren. Daarnaast kan een MSR ook ingezet worden om waterstof te produceren. In theorie biedt het daarmee de mogelijkheid om onbalans op het net tegen te gaan en **bij te dragen aan de levering van waterstof.**

Hierbij moet opgemerkt worden dat **de leveringsketen voor brandstof voor een MSR nog wel opgebouwd moet worden.** Daar wordt ook al wel aan gewerkt: het Nederlandse Thorizon werkt hieraan samen met Orano. Desalniettemin is die leveringsketen een belangrijk aspect voor betrouwbaarheid. Bovenstaande geldt dan ook onder de voorwaarde dat deze toeleverende keten voldoende stabiel is, en bij voorkeur in alle segmenten gediversifieerd om te voorkomen dat er monopolievorming ontstaat en MSR's afhankelijk zijn van één leverancier (of land). Dat laatste brengt namelijk risico's met zich mee voor de stabiele levering van de brandstof. Diverse andere soorten *small modular reactors* maken gebruik van zgn. HALEU-brandstof waarvoor wel zorgen zijn over de stabiele levering door sterke afhankelijkheid van de VS en Rusland voor deze (beperkt voorradige) brandstof.<sup>95</sup>

---

<sup>95</sup> Technopolis Group (2023). *Analyse waardeketens en grondstoffen voor medische isotopen.*



## 6 Belang van een human capital strategie/roadmap

---

De laatste vijf jaar staat nucleaire technologie, kernenergie en de Nederlandse nucleaire kennisinfrastructuur weer op de beleidsagenda. Daarbij gaat enerzijds de aandacht uit naar de productie van medische isotopen en anderzijds de productie van kernenergie. Op het gebied van medische isotopen zijn er twee nieuwe initiatieven in Nederland: de bouw van onderzoeksreactor Pallas en de bouw van de productiefaciliteit Shine. Op het gebied van kernenergie heeft het Kabinet Rutte IV de ambitie om twee nieuwe kerncentrales te bouwen en de huidige kerncentrale in Borssele langer open te houden. Op beide terreinen kan 2022 als een kantelpunt worden beschouwd: de overheid heeft besloten de realisatie van Pallas mede te financieren en ervoor gekozen om twee kerncentrales in Borssele te plaatsen. Daarnaast is er onlangs geld toegezegd voor de versterking van de nucleaire kennisinfrastructuur.<sup>96</sup>

Met al deze ontwikkelingen moet de nucleaire sector een flinke groei doormaken. In de decennia hiervoor was er weinig ontwikkeling in de nucleaire sector en was er ook weinig perspectief op groei. Ook in onderzoek en onderwijs was er beperkte aandacht voor nucleaire kennis en technologie. Het beleid was er vooral op gericht om een nucleaire basisinfrastructuur in stand te houden. Dat bood ook weinig perspectief voor het kiezen van een opleiding en carrière in de nucleaire sector. Een inhaalslag is nu noodzakelijk.

De huidige ontwikkelingen in de nucleaire sector vragen dan ook om investeringen in human capital. In dit hoofdstuk vertalen we recente bevindingen van onze studie naar de arbeidsmarkt in de nucleaire sector<sup>97</sup>, uitgevoerd in opdracht van Nucleair Nederland, naar impacts van en kansen voor een human capital strategie/roadmap bij de ontwikkeling van een Molten Salt Reactor.

### 6.1 Brede & smalle nucleaire sector

We maken onderscheid tussen de smalle en de brede nucleaire sector in Nederland. De smalle nucleaire sector omvat organisaties die voor hun hoofdactiviteiten nucleaire kennis benutten. Hieronder vallen de huidige leden van Nucleair Nederland, de ANVS, maar ook nieuwe kerncentrales en organisaties als Thorizon zouden hieronder vallen. De brede nucleaire sector omvat alle overige organisaties in Nederland die een vergunning hebben onder de Kernenergiewet omdat zij voor een deel van hun werkzaamheden werken met radioactieve materialen en ioniserende straling. Beide sectoren vissen gedeeltelijk in dezelfde vijver wat betreft human capital. In de context van de MSR is echter vooral de smalle nucleaire sector relevant.

Er zijn in Nederland zo'n vierduizend organisaties die een vergunning hebben onder de Kernenergiewet. Slechts een tiental daarvan valt onder de smalle nucleaire sector. Binnen de smalle nucleaire sector werkt momenteel zo'n 1.800 FTE. Daarvan heeft 20% een formele nucleaire opleiding gevolgd, dat is een technische opleiding waarin vaardigheden worden bijgebracht die ook in andere technische sectoren gewild zijn. Ongeveer 60% van de werknemers binnen de smalle nucleaire sector heeft echter een andere opleiding gevolgd en vaardigheden geleerd die relevant zijn voor de nucleaire sector. Dit zijn voornamelijk mensen

---

<sup>96</sup> Zie: <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2022/11/18/versterking-nucleaire-kennis-en-innovatiestructuur/versterking-nucleaire-kennis-en-innovatiestructuur.pdf>

<sup>97</sup> Zie: <https://www.nucleairnederland.nl/bibliotheek/technopolis-group-2022-de-arbeidsmarkt-in-de-nederlandse-nucleaire-sector-eindrapportage-kopie.pdf>

met een technische of bèta opleidingsachtergrond. De overige 20% van de werknemers in de smalle nucleaire sector is zich bewust van de nucleaire context waarin ze werken, maar heeft geen specifieke nucleaire vaardigheden.

Binnen de smalle nucleaire sector werken ongeveer evenveel mensen met een MBO-, HBO- en WO-opleidingsachtergrond. Wel zien we dat er bij organisaties die meer op onderzoek en innovatie gericht zijn, of die nog in de planfase zitten van een nieuw initiatief, relatief meer HBO- en WO-opgeleiden in dienst hebben. Dat zal ook gelden voor organisaties die betrokken zijn bij de vroege fase (ontwerp- en testfase) van de ontwikkeling van de MSR.

De gemiddelde leeftijd binnen de smalle nucleaire sector is hoog, gemiddeld 46 jaar. Meer dan de helft van het personeel is ouder dan 45 jaar. Er zijn dus relatief weinig jonge mensen in dienst. Tot 2035 gaat er naar verwachting zo'n 500 FTE met pensioen in de smalle nucleaire sector.

Sinds 2018 is de personeelsomvang binnen de smalle nucleaire sector met 7% gegroeid. De instroom in de nucleaire sector is veel groter geweest dan de uitstroom. Rekeninghoudend met de krapte op de huidige arbeidsmarkt is de uitstroom van minder dan 10% in deze sector niet heel hoog.

De aankomende jaren wordt een flinke groei van de smalle nucleaire sector verwacht, vooral door de bouw van Pallas en Shine en de bouw van twee nieuwe kerncentrales. Tot 2030 gaat het naar verwachting om een groei in FTE's van +40% (t.o.v. nu) en tot 2035 om +65% (t.o.v. nu). Dat komt neer op honderden vacatures per jaar. Daarnaast zijn er ook andere ontwikkelingen, zoals de ontwikkeling van een MSR, die kunnen leiden tot een verdere groei van de smalle nucleaire sector.

## 6.2 Vraag naar arbeid tijdens de ontwikkeling, bouw en operationele fase van een MSR

De vraag naar arbeid tijdens de ontwikkeling, bouw en operationele fase van een MSR zal anders zijn dan bij de huidige generatie kerncentrales. Dat komt omdat het gaat om een kleinschaliger systeem dat modulair is en waarvan de componenten al gecertificeerd en ontwikkeld zijn tijdens de bouwfase op een externe gecentraliseerde locatie. De vraag naar arbeid voor de ontwikkeling, bouw en operationele fase van een MSR zal naar verwachting meer vergelijkbaar zijn met de vraag naar arbeid tijdens deze fasen van een Small Modular Reactor (SMR). Hierover is nog maar beperkt informatie beschikbaar, maar de inzichten daaruit zijn bruikbaar voor het maken van een schatting.

### 6.2.1 Voorbereidingsfase/Ontwikkelfase

Op dit moment bevindt de ontwikkeling van de MSR zich nog in een R&D-fase. Er zijn nog veel technische en fundamentele vraagstukken die onderzocht moeten worden. Ook moet er nog veel technische ontwikkeling plaatsvinden voordat er een FOAK MSR gerealiseerd kan worden. In deze fase is het lastig inschatten hoeveel mensen er nodig zijn. Op basis van interviews met organisaties betrokken bij deze ontwikkelingsfase maken we een grove schatting.

Tabel 5 geeft een overzicht van de schattingen die we uit interviews hebben opgehaald. Op dit moment werken er naar schatting zo'n 47 FTE aan vraagstukken voor MSR-technologie bij de verschillende organisatie, met name bij Thorizon, Orano (Frankrijk) en NRG. **In deze voorbereidings-/ontwikkelfase zal dat naar verwachting groeien tot meer dan 225 FTE.** Daarin is nog geen schatting meegenomen voor het aantal FTE's nodig voor de ontwikkeling van diverse onderdelen van de MSR bij engineering partners. Dat kan ook oplopen tot enkele tientallen FTE's.

Niet al deze FTE's zullen in Nederland gerealiseerd worden. Dat hangt mede af hoe internationaal de samenwerkingspartners van het uiteindelijke consortium zullen zijn in deze fase. Vooral nog zal in ieder geval een deel van deze FTE's in Frankrijk gerealiseerd worden. **In Nederland zal het in deze fase naar schatting in ieder geval gaan om zo'n 175 FTE.**

*Tabel 5 Schattingen van het aantal FTE in de voorbereidings-/ontwikkelfase o.b.v. interviews*

Activiteit	Nu (FTE)	Max in deze fase (FTE)
Ontwikkeling MSR (o.a. Thorizon)	17	50
Ontwikkeling brandstof (o.a. Orano)	10	50
Ontwikkeling onderdelen	-	?
Technisch onderzoek (o.a. NRG)	15	45
Fundamenteel onderzoek (o.a. TUD, DIFFER, ...)	5	75
Vergunningen en onderbouwingsveiligheid	-	7
<b>Totaal</b>	<b>47</b>	<b>227</b>

Bron: diverse interviews

Voor deze voorbereidende fase kunnen we ook een vergelijking trekken met de Stichting Voorbereiding Pallas-reactor. Pallas is een projectorganisatie die zich bezighoudt met de voorbereiding en realisatie van de voorziene nieuwe Pallas-reactor die bedoeld is voor het produceren van medische isotopen. Dit is weliswaar een heel ander soort reactor: niet voor energieproductie, een bestaand type reactor, veel groter en niet modulair, en met al een duidelijke locatie. De vergelijking gaat dus niet helemaal op, maar schetst wel een eerste beeld. Op basis van eerdere rapportages<sup>98</sup> en publieke informatie schatten we dat Pallas de afgelopen 10 jaar gegroeid is van een organisatie van zo'n 10 FTE naar een organisatie met zo'n 100 FTE. Daar komt nog bij dat het ontwerp van de reactor door een extern consortium wordt uitgevoerd. Gezien de omvang van het consortium en de waarde van het contract, zal het hierbij ook gaan om enkele tientallen FTE's gedurende de looptijd van het contract, voor een groot deel in het buitenland.

De eerdere inschatting van ruim 225 FTE (175 FTE in Nederland) voor de voorbereidende/ontwikkelfase van de MSR ligt dus in lijn met Pallas, mede gezien er ook nog meer ontwikkeling nodig is. Om te groeien van de huidige ~30 FTE in Nederland, ontstaat er in deze fase dus een vraag van zo'n 150 FTE in Nederland (waarbij FTE's op het gebied van de ontwikkeling van diverse onderdelen van de MSR niet zijn meegenomen). **De vraag naar arbeid binnen de kleine nucleaire sector in Nederland zal in deze fase dus naar verwachting toenemen met minimaal 150 FTE.**

In deze fase bestaat de vraag voornamelijk om hoogopgeleid technisch personeel. Voor de onderzoeksfuncties gaat het doorgaans om mensen met een wo-opleiding op het gebied van natuurkunde, scheikunde, materiaalkunde en werktuigbouwkunde. Voor de meer engineeringvraagstukken gaat het om hbo- en wo-opgeleiden met een vergelijkbare technische opleidingsachtergrond, inclusief elektrotechniek en meet- en regeltechniek.

<sup>98</sup> Technopolis Group (2016). *Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland.*; Technopolis Group (2019). *Analyse arbeidsmarkt en onderwijs Energy & Health Campus.*; Technopolis Group (2022). *De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector.*

### 6.2.2 Bouwfase

De MSR is een modulaire reactor die qua bouw minder complex zal zijn dan de huidige, conventionele kernenergiereactoren. Bij een conventionele kernenergiecentrale gaat de JRC<sup>99</sup> uit van een bouwduur van gemiddeld 6 jaar in welke periode er gemiddeld zo'n 1.400 FTE werkzaam is aan de bouw en gerelateerde werkzaamheden. Na 4 jaar is er een piek in het aantal FTE dat betrokken is bij deze werkzaamheden en gaat het om zo'n 2.500 FTE. Hoewel nog niet bekend is hoe lang de bouwduur van een MSR is, schatten wij dat vanwege de eenvoudigere bouw van een MSR het aantal betrokken FTE's tijdens de bouw minder zullen zijn.

Om een inschatting te maken van de vraag naar arbeid in de smalle nucleaire sector tijdens de bouw van een MSR, maken we een vergelijking met een Small Modular Reactor (SMR) van HE Hitachi in Canada, de FOAK-reactor BWRX-300 (geen gesmolten zout).<sup>100</sup> PwC heeft hiervan in 2021 de socio-economische impact onderzocht en becijferde dat er in de bouwfase 1.100 FTE directe werkgelegenheid gecreëerd werd en indirect nog eens 600 FTE, bijvoorbeeld bij toeleveranciers. Dit betreffen FTE's per jaar gespreid over een periode van zeven jaar.

**De vraag naar arbeid binnen de smalle nucleaire sector zal in deze fase dus naar verwachting oplopen met 1.100 FTE per jaar.** Hierbij zal het niet alleen gaan om Nederlandse arbeidskrachten, aangezien er weinig expertise in Nederland is op het gebied van het bouwen van nucleaire installaties. Een deel van de werkzaamheden zal natuurlijk wel door Nederlandse bouw- en installatiebedrijven worden gedaan. Diverse bedrijven kunnen met de bouw van Pallas en twee voorziene nieuwe kerncentrales in Nederland kennis opdoen van het bouwen van nucleaire installaties.

Tabel 6 Arbeidsvraag tijdens de bouwfase (en fabricage)

Type	FTE/jaar	Bron
Small Modular Reactor (BWRX-300 FOAK, boiling water reactor) <i>Bouwduur 7 jaar</i>	1.100 (direct) 1.700 (incl. indirect)	PwC (2021). <i>Transforming Canada's energy future: The socio-economic impact of GE Hitachi SMRs.</i>
Conventional nuclear power plants <i>Gemiddelde bouwduur 6 jaar</i>	2.500 (in piekjaar) 1.400 (gemiddeld)	JRC (2014). <i>Top down workforce demand from energy scenarios: influence of long term operation.</i>

In deze fase zal er vooral vraag zijn naar niet-nucleair geschoolde vaklieden op mbo- en hbo-niveau. Het gaat om beroepen als civiel ingenieur, bouwtoezichthouders, monteurs, elektriciens, lassers, constructeurs, projectplanners en projectmanagers.

### 6.2.3 Operationele fase

Bij een conventionele kerncentrale schaaft het aantal medewerkers tijdens de operationele fase met het vermogen van de centrale. Bij een MSR zal het aantal medewerkers naar verwachting afwijken omdat de technologie en opzet van de reactor anders is. Het modulaire concept en de beoogde kleine omvang (in vermogen) zijn beter vergelijkbaar met een Small Modular Reactor (SMR). In de literatuur zijn in beperkte mate cijfers te vinden over het aantal medewerkers tijdens de operationele fase van SMR's en van kleine conventionele reactoren.

<sup>99</sup> JRC (2014). *Top down workforce demand from energy scenarios: influence of long term operation.*

Tabel 7 geeft hiervan een overzicht. Uit de tabel volgt dat SMR's gemiddeld 0,27 FTE/MW in dienst hebben, terwijl kleinere conventionele reactoren gemiddeld 0,59 FTE/MW in dienst hebben. Er is echter wel een minimum aantal FTE dat altijd nodig zal zijn, hoewel sommige leveranciers van kleine SMR's claimen dat er weinig on-site personeel nodig is.

*Tabel 7 Aantal medewerkers in de operationele fase van verschillende typen kleine kerncentrales*

Type	MW	FTE	FTE/MW	Bron
Small Modular Reactor (integral pressurized water reactor)	1.920	360	0,19	Pacific Northwest National Laboratory (2018). <i>Deployability of Small Modular Nuclear Reactors for Alberta Applications – Phase II.</i>
Small Modular Reactor (high temperature gas cooled reactor)	625	166	0,27	
Small Modular Reactor (BWRX-300 FOAK, boiling water reactor)	300	101	0,34	PWC (2021). <i>Transforming Canada's energy future: The socio-economic impact of GE Hitachi SMRs.</i>
Small and Medium Sized conventional Reactors (AP600)	600-650	282	0,31	IAEA (2001). <i>Staffing requirements for future small and medium reactors (SMRs) based on operating experience and projections.</i>
Small and Medium Sized conventional Reactors (PBMR, 1 module)	110	53	0,48	
Small and Medium Sized conventional Reactors (GT-MGR)	262	166	0,63	
Small and Medium Sized conventional Reactors (CANDU-6, 1 <sup>st</sup> unit)	668	467	0,70	
Small and Medium Sized conventional Reactors (GT-MHR)	285	230	0,81	
Conventional nuclear power plants	50-100	100	0,5-1	JRC (2014). <i>Top down workforce demand from energy scenarios: influence of long term operation.</i>

Bij een kleine MSR van 250 MW<sub>e</sub> zal de vraag naar personeel tijdens de operationele fase minimaal 50 FTE zal zijn (laagste waarde in Tabel 7). **De vraag naar arbeid binnen de smalle nucleaire sector in deze fase neemt per MSR dus naar verwachting toe met minimaal 50 FTE.**

### 6.3 Aanbod van arbeid vanuit opleidingen met komst MSR

Uit interviews en eerdere studies naar de Nederlandse arbeidsmarkt voor de nucleaire sector<sup>101</sup> blijkt dat de markt voor technisch en nucleair geschoold talent krap is. Desondanks geven diverse geïnterviewden aan dat **het vooral nog lukt om talent aan te trekken** voor dit soort interessante en unieke projecten. Het gaat daarbij met name om **mensen in R&D-functies die**

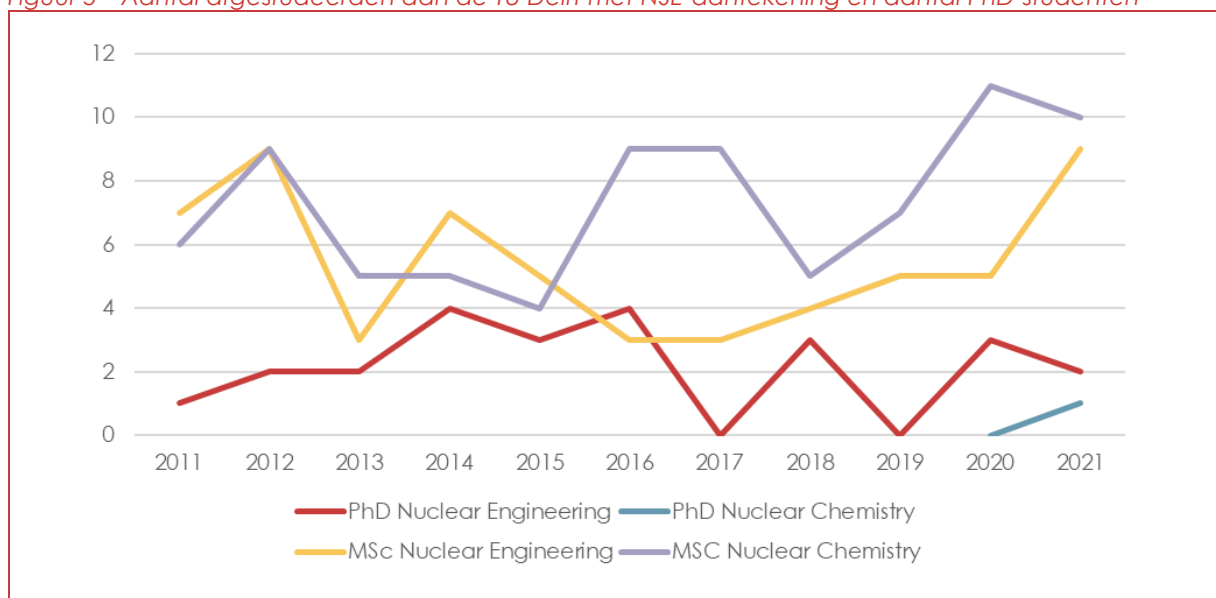
<sup>101</sup> Technopolis Group (2022). *De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector.*

**internationaal geworven worden**, ook gaat het vooral om **jonge mensen** (recent afgestudeerden of mensen die net hun PhD behaald hebben).

**Mensen met ervaring zijn lastiger te vinden.** NRG geeft aan dat het vinden van ervaren mensen met een nucleaire achtergrond altijd lastig is en dat men daarom vaak jonge, nieuwe engineers binnenhaalt die binnen de organisatie ervaring opdoen met nucleaire technologie om zo na 2-3 jaar het wenste niveau te bereiken. Zo worden zij van nucleair-bewust personeel (bewust van de nucleaire context) uiteindelijk genucleariseerd personeel (nucleaire kennis opgedaan voor hun werkzaamheden).

Alleen aan de TU Delft worden opleidingen op het gebied van nucleaire technologie verzorgd. **Jaarlijks studeren 10-20 masterstudenten af met de aantekening Nuclear Science and Engineering (NSE) op hun diploma** (zie Figuur 5). Deze studenten hebben een specialisatie op het gebied van nucleaire technologie gevolgd binnen de masteropleidingen Applied Physics, Chemical Engineering of Sustainable Energy Technology. **Gemiddeld ronden er jaarlijks zo'n 3 promovendi hun promotietraject af met een doctorstitel (PhD)**. Dat is zeer beperkt gezien de toenemende vraag naar mensen met een nucleaire opleiding en onderzoekservaring binnen de smalle nucleaire sector in Nederland.

Figuur 5 Aantal afgestudeerden aan de TU Delft met NSE-aantekening en aantal PhD-studenten



Technopolis Group (2022). De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector.

Uit interviews blijkt wel dat **het onderzoeksaanbod op het gebied van nucleaire technologie bij de TU Delft wel toeneemt**. Men is ook curricula aan het herzien op dit gebied om mede aan de groeiende kennisvraag te voldoen. Zo wordt er een vak opgezet over nucleaire materialen en stralingsschade aan materialen binnen de masteropleiding materiaalkunde.

Uit eerder onderzoek naar de arbeidsmarkt in de Nucleaire sector in Nederland blijkt dat er **een tekort van 30% is bij veel relevante beroepsgroepen voor de nucleaire sector**. Dat betekent dat er sprake is van een **zeer krappe arbeidsmarkt** voor deze beroepsgroepen. Dat geldt met name voor technisch personeel op alle opleidingsniveaus. Deze krapte blijft naar verwachting ook op de lange termijn bestaan door beperkte uitstroom vanuit opleidingen. **Er is vanuit verschillende technische sectoren concurrentie op deze arbeidsmarkt.**

In interviews geeft men ook aan dat bij het op de markt zetten van de MSR de concurrentie op de arbeidsmarkt het grootst zal zijn. Dan is er sprake van opschaling en is er meer directe concurrentie met technische functies in andere industriële sectoren. **Geïnterviewden verwachten dat er meer uitstroom aan relevante opleidingen nodig is.**

#### 6.4 Afhankelijkheden en randvoorwaarden

Voor de ontwikkeling van de MSR is het aantrekken van de juiste mensen essentieel en een grote uitdaging. Gezien de krapte op de arbeidsmarkt, andere ontwikkelingen in de nucleaire sector (o.a. PALLAS, SHINE en het bouwen van twee nieuwe kernenergiereactoren) en de groeiende vraag naar mensen bij succesvol verloop van de ontwikkeling van de MSR, is aandacht voor de human capital onontbeerlijk. Het is een belangrijke randvoorwaarde voor succes.

De juiste mensen kunnen zowel uit Nederland als uit het buitenland komen. **Voor het opzetten van een goedwerkend Nederlands MSR-ecosysteem is het belangrijk om ook human capital in Nederland goed geregeld te hebben.** Daarin spelen onderwijs- en kennisinstellingen een belangrijke rol.

Als Nederland een nationaal MSR-ecosysteem wil opbouwen om deze risicovolle innovatie vanaf een vroege fase te ontwikkelen, dan **is o.a. op het gebied van human capital steun vanuit de overheid belangrijk.** Die steun is niet alleen relevant voor de ontwikkeling van de MSR, maar ook voor de nucleaire sector als geheel. Recentelijk heeft het Ministerie van EZK wel 5 miljoen euro toegezegd voor o.a. versterking van onderwijs en opleiding in de nucleaire sector.<sup>102</sup>

---

<sup>102</sup> Brief van minister Jetten aan de Tweede Kamer d.d. 18 november 2022 over Versterking nucleaire kennis- en innovatiestructuur n.a.v. de motie Erkens en Dassen

## 7 Conclusies

---

MSR's zijn innovatieve kernenergiereactoren die nog volop in ontwikkeling zijn. Er zijn nog veel R&D-vraagstukken die opgelost moeten worden en waaraan verschillende partijen in binnen- en buitenland in concurrentie werken. De ontwikkelingstijd van de MSR hangt af van diverse versnellende en vertragende factoren, zoals financiering, human capital, technische uitdagingen en licentiering. In deze impact beoordeling gaan we er vanuit dat MSR's gerealiseerd worden, dat de ontwikkeling (deels) in Nederland plaatsvindt en er in Nederland een MSR gerealiseerd zal worden.

In dit hoofdstuk zoomen we uit en geven we onze overkoepelende beoordeling van de maatschappelijke en economische impact van de ontwikkeling en implementatie van een MSR in Nederland. Dat doen we op basis van de meer gedetailleerde informatie en kritische reflecties in de voorgaande hoofdstukken.

### 7.1 Maatschappelijke impact

#### 7.1.1 Duurzaamheid

**De impact van een MSR op duurzaamheid beoordelen we als positief**, omdat:

- **MSR's kunnen bijdragen aan de levering van CO<sub>2</sub>-arme elektriciteit, warmte en waterstof.** Bij elektriciteitsproductie in een MSR komt (net als in andere kerncentrales) geen CO<sub>2</sub> vrij. Wel wordt in de keten een beperkte hoeveelheid CO<sub>2</sub> geproduceerd. Een MSR kan, naast de productie van elektriciteit, ook hogetemperatuur warmte leveren aan lokale industrie en 'paarse' waterstof produceren. Door de hogere temperatuur in een MSR ligt het rendement voor de productie van waterstof naar verwachting hoger dan bij een conventionele kerncentrale. Er zijn onderzoeken die becijferen dat 'paarse' waterstofproductie concurrerend kan zijn met andere wijzen van waterstofproductie (o.a. uit hernieuwbare bronnen). Daarmee kan het tegemoetkomen aan een groeiende waterstofvraag, bijdragen aan duurzaam vervoer en zorgen voor minder afhankelijkheid van waterstofimport.
- **MSR's kunnen bijdragen aan een stabiele CO<sub>2</sub>-vrije energieproductie naast de wisselende energieproductie van hernieuwbare energiebronnen.** Hernieuwbare energiebronnen leveren op wisselende momenten elektriciteit aan het net, waardoor er onbalans kan ontstaan in vraag en aanbod. Een MSR kan continu elektriciteit leveren, maar lijkt ook voldoende flexibel de vraag op het net te kunnen volgen en daarmee bij te kunnen dragen aan netbalans. Tevens kan het lokale industriële sites een stabiele energievoorziening bieden. Daarmee kunnen mogelijk kosten voor netverzwaring vermeden worden.
- **De inzet van MSR's kan – mits tijdig beschikbaar en ingezet – bijdragen aan het bereiken van klimaatdoelstellingen.** Het kan de CO<sub>2</sub>-uitstoot in Nederland verlagen. Een MSR komt naar verwachting te laat op de markt om bij te dragen aan de doelstelling in 2030 een CO<sub>2</sub>-reductie van 60% te bereiken. Een MSR zou mogelijk wel een bijdrage kunnen leveren aan de doelstelling om in 2050 klimaatneutraal te zijn. Dat hangt qua inpassing echter ook af van de keuze die in de periode daarvoor zijn gemaakt in het Nederlandse energiesysteem.

We willen wel opmerken dat alle bovenstaande duurzaamheidsimpacts ook bereikt kunnen worden met (een combinatie van) andere energiebronnen. Vooralsnog zet het Kabinet Rutte IV in op conventionele kernenergiereactoren en hernieuwbare energiebronnen. Er zijn ook middelen voor de ontwikkeling van Small Modular Reactors (SMR's) vrijgemaakt door het



Kabinet.<sup>103</sup> Deze SMR's kunnen op bovenstaande aspecten gaan concurreren met een MSR en – gezien hun verdere mate van ontwikkeling – al eerder bijdragen aan duurzaamheid in termen van reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot. Het inzetten van kernenergie, ook een MSR, is niet op het aspect radioactieve afval niet duurzaam.

### 7.1.2 Sociaal-ethisch

**De impact van een MSR op sociaal-ethisch vlak beoordelen we als positief**, omdat:

- **MSR's kunnen bijdragen aan het minder afhankelijk maken van de import van elektriciteit uit het buitenland.** Andere (o.a. hernieuwbare) energiebronnen kunnen eveneens dit effect bereiken. De afhankelijkheid van een brandstof die uit het buitenland geïmporteerd moet worden blijft echter wel (wat bij hernieuwbare energiebronnen inherent niet het geval is). De vraag is of tegen de tijd dat een MSR commercieel beschikbaar is, deze afhankelijkheden niet al op een andere manier zijn opgelost en nog steeds relevant zijn.
- **In vergelijking tot conventionele kerncentrales komen MSR's meer tegemoet aan maatschappelijke zorgen rondom radioactief afval.** Een MSR met thorium als brandstof produceert minder langlevend afval, waardoor volgende generaties minder lang belast zijn met ons radioactief afval. Dat is zeker op ethisch vlak winst. Daarnaast kan een MSR ook toekomstig radioactief afval verminderen door gebruikte splijtstof uit conventionele kernenergiecentrales als brandstof te gebruiken. **Desalniettemin zal een MSR altijd radioactief afval opleveren, zij het met een kortere levensduur.** Er zitten nog wel wat haken en ogen aan het radioactieve en chemische afval dat een MSR zal opleveren. Volumes (minder langlevend radioactief afval) kunnen wellicht groter zijn en passende afvalverwerkings-processen moeten ontwikkeld worden – dat zal ook impact hebben op eindberging. De maatschappelijke kosten voor radioactief afval zullen waarschijnlijk niet veel veranderen.
- **Een MSR is veiliger dan een conventionele kerncentrale en statistisch gezien ongeveer net zo veilig als wind- en zonne-energie.** De inherente veiligheid van een MSR is een sterk aspect dat tegemoetkomt aan maatschappelijke zorgen rondom kernenergie. Bovendien draagt een thorium-MSR bij aan non-proliferatie: het radioactieve materiaal in de reactor is niet geschikt of zeer moeilijk te gebruiken voor een kernwapens.
- **Maatschappelijk draagvlak voor MSR's en kernenergie is belangrijk voor de realisatie ervan. De laatste jaren is de politieke en publieke opinie ten aanzien van kernenergie positiever.** Dat blijkt ook uit de interesse van meerdere provincies in *small modular reactors* en de middelen die het Kabinet Rutte IV hier recentelijk voor heeft vrijgemaakt in het Aanvullend Klimaatpakket.<sup>104</sup>

## 7.2 Economische impact

**De impact van een MSR op het economisch verdienvermogen beoordelen we als positief**, omdat:

- Vanuit het perspectief van cogeneratie is er in Europa de potentie om 10-20 MSR's op de markt te brengen tot 2045. In Nederland zouden op basis van HTR-cogeneratie

---

<sup>103</sup> Zie: <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/04/26/extra-pakket-maatregelen-dicht-gat-tot-klimaatdoel-2030>

<sup>104</sup> Zie: <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/04/26/extra-pakket-maatregelen-dicht-gat-tot-klimaatdoel-2030>

perspectief zo'n zeven locaties potentieel interessant zijn voor een MSR op de lange termijn.

- De meeste van deze locaties in Europa hebben een vraag naar een thermisch vermogen van minder dan 500 MW<sub>th</sub> en elektrisch vermogen van minder dan 200 MW<sub>e</sub>. Een commerciële Thorizon MSR – met een thermisch vermogen van naar verwachting 500-750 MW<sub>th</sub> – zou (naar verwachting) aan de vraag naar elektrisch en/of thermisch vermogen op de meeste van deze locaties kunnen voldoen.
- Wanneer een commerciële MSR ingezet zou worden om alleen waterstof te produceren zou deze **45-68 kiloton waterstof per jaar** opleveren. Dat is ongeveer een kwart van de vraag naar waterstof van een grote industriële site zoals Chemelot.<sup>105</sup> Voor **10-20 reactoren** met bovengenoemd vermogen in Europa is dat dus **450-1.350 kiloton waterstof per jaar**. Het doel van de Europese Commissie om per 2030 10 miljoen ton waterstof te produceren in de EU.
- Omdat de marginale kosten van de MSR erg laag zijn t.o.v. fossiele bronnen en we aannemen dat de productie van een MSR constant zal zijn, is het **aannemelijk dat de groothandelsprijs van elektriciteit gemiddeld genomen kan dalen indien MSR's de rol van fossiele energiecentrales gedeeltelijk zouden overnemen**. De lagere elektriciteitsprijs kan leiden tot een verstevigde concurrentiepositie van bedrijven in energie-intensieve sectoren.
- Het modulaire ontwerp van de MSR biedt kansen voor gebundelde of gecentraliseerde R&D-activiteiten en een daarmee opgelijnde supply-chain, ongeacht waar de reactoren uiteindelijk gebouwd worden. Bij het realiseren van meerdere reactoren op dezelfde locatie ontstaan er innovatie efficiëntievoordelen, die naar schatting een financieel voordeel van 15% opleveren. De modulaire aanpak biedt daarnaast de mogelijkheid om over een lange periode producten en diensten voor de MSR te ontwikkelen, te fabriceren en te exporteren en daarmee ook een (mogelijk innovatieve) exporterende industrie in Nederland op te bouwen.
- Lokale opwek en gebruik en flexibiliteit hebben een direct effect op het uitsparen van benodigde investeringen in transportcapaciteit van het energienet.
- Een betrouwbare en duurzame energievoorziening vraagt enerzijds om energiebronnen die betrouwbaar zijn en anderzijds om energiebronnen die duurzaam zijn. Een MSR kan aan beide bijdragen.

Bovenstaande economische impacts zijn gebaseerd op assumpties rondom de ontwikkeling en implementatie van MSRs zoals de realisatie van een commerciële MSR rond 2030 met een thermisch vermogen van naar verwachting 500-750 MW<sub>th</sub>.

De bouw van een MSR in Nederland per 2030 lijkt echter onwaarschijnlijk omdat het Kabinet Rutte IV nu op de realisatie van twee conventionele kerncentrales (generatie III+) inzet en verlenging van de levensduur van de Kerncentrale Borssele.

Ook zijn wij uitgegaan van investeringen in de nucleaire kennisinfrastructuur en clustervorming rondom de R&D van de MSR en toeleveringsketen daarvan. Hier zijn echter in de praktijk grote onzekerheden aan verbonden en bij het vervolgen van het huidige niveau van investering niet reëel.

---

<sup>105</sup> Brightsite (2021). *Groene waterstofproductie cruciaal voor transitie naar circulaire chemie*.

### 7.3 Human Capital

De verwachte groei van de sector zonder de ontwikkeling van de MSR wordt al als zeer uitdagend gezien vanwege de krapte op de arbeidsmarkt voor relevant technisch opgeleid personeel. Talent en mensen met ervaring op het gebied van nucleaire technologie worden daarom voor een belangrijk deel in het buitenland geworven.

Er zijn weinig opleidingen waar aandacht is voor nucleaire technologie in curricula in Nederland. Dat geldt al helemaal op hbo- en mbo-niveau dat voor de ontwikkeling van de MSR pas op latere termijn relevant zal zijn.

Door de ontwikkeling van de MSR zal de vraag naar arbeid in de smalle nucleaire sector alleen maar verder toenemen. In de voorbereidingsfase/ontwikkelfase zal het naar verwachting gaan om minimaal 150 FTE in Nederland. In de bouwfase kan de vraag mogelijk toenemen tot 1.100 FTE. In de operationele fase zal er voor een kleine MSR naar verwachting zo'n 50 FTE nodig zijn.

Gezien de uitdaging waar de sector voor staat, en de specifieke behoeften van het Mosaec-consortium voor kennis en talent op het gebied van MSR-technologie, is aandacht voor human capital belangrijk. In de verdere ontwikkelplannen ligt het dan ook voor de hand om human capital te adresseren in de vorm van een strategie en roadmap met acties die het consortium onderneemt om verzekerd te zijn van voldoende human capital om de gestelde ambities waar te maken. Dat gaat verder dan een recruitmentplan: er moeten ook acties zijn i.s.m. kennis- en onderwijsinstellingen om de instroom op benodigde onderwerpen te vergroten.

Dit human capital probleem wordt ook door de sector en de overheid onderkent. Recentelijk is er 5 miljoen euro vrijgemaakt voor het versterken van de kennis- en innovatiestructuur op het gebied van nucleaire technologie.<sup>106</sup> Daarmee wordt o.a. een leerstoel Stralingsbescherming en een Nuclear Academy bij de TU Delft opgezet dat zich zal richten op de versterking van de nucleaire kennis en vaardigheden binnen Nederland door ook in het hbo- en mbo-curricula te ontwikkelen. Bij hogescholen worden drie lectoren aangesteld die toegepast onderzoek gaan doen op het gebied van nucleaire technologie.

---

<sup>106</sup> Brief van Minister Jetten aan de Tweede Kamer d.d. 18 november 2022 over Versterking nucleaire kennis- en innovatiestructuur n.a.v. de motie Erkens en Dassen.

## Appendices A Bronnenlijst

---

- J. Emblemsvåg (2022). Safe, clean, proliferation resistant and cost-effective Thorium-based Molten Salt Reactors for sustainable development. *International Journal of Sustainable Energy*, 41:6, 514-537, doi: 10.1080/14786451.2021.1928130
- Ho, M. Memmott, J. Hedengren and K.M. Powell (2023). Exploring the benefits of molten salt reactors: An analysis of flexibility and safety features using dynamic simulation. *Digital Chemical Engineering*, Volume 7, 100091, June 2023.
- B.M. Elsheikh (2013). Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors. *Journal of radiation research and applied sciences*, 6, pp. 63-70.
- B.W. Jordan, R.G. Eggert, B.W. Dixon and B.W. Carlsen (2015). Thorium: Crustal abundance, joint production, and economic availability. *Resources Policy*, 44, pp 81-93.
- Biggar economics (2022). Economic impact of 4TU. 4TU federation.
- Blomqvist, K (1997). The many faces of trust. *Scandinavian Journal of Management*, vol. 13 – 3, p. 271-286.
- Brief Regering over Strategische afhankelijkheden in het energie-domein (2021): [https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven\\_regering/detail?id=2021Z02711&did=2021D05919](https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/brieven_regering/detail?id=2021Z02711&did=2021D05919)
- Brief van minister Jetten aan de Tweede Kamer d.d. 18 november 2022 over Versterking nucleaire kennis- en innovatiestructuur n.a.v. de motie Erkens en Dassen
- Brief van Minister Jetten aan de Tweede Kamer d.d. 18 november 2022 over Versterking nucleaire kennis- en innovatiestructuur n.a.v. de motie Erkens en Dassen.
- Bruns, P. et al (2012). Spillover benefits from controlled nuclear fusion technology – a patent analysis. *World Patent Information*, vol. 34-4, p. 271-278.
- Denbow, N. Le Brun, N. Dowell, N. Shah, C. Markides (2020). The Potential Impact of Molten Salt Reactors on the UK Electricity Grid. *Journal of Cleaner Production*, 276 (122873).
- Caputo, A., Charles, D. en Fiorentino, R. (2022). University spin-offs: entrepreneurship, growth and regional development. *Studies in higher education*, vol. 47, Nr. 10, p.1999-2006.
- Carelli, M.D., Ingersoll, D.T., 2014. *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*. Woodhead Publishing, Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857098535.2.149>.
- CBS (2021) Het Nederlandse midden- en kleinbedrijf Europees vergeleken.
- CLO (2022). Interconnectiecapaciteit elektriciteit, 2015 – 2021. <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0595-interconnectiecapaciteit-elektriciteit>
- Committee on Radioactive Waste Management (2022). Written evidence from the Committee on Radioactive Waste Management (NCL0053). <https://committees.parliament.uk/writtenevidence/112075/pdf/>
- De Jonge Klimaatbeweging is een onafhankelijke stichting waarin de stem van jongeren in het klimaatdebat namens meer dan vijftig diverse jongerenorganisaties verenigd is ([www.jongeklimaatbeweging.nl](http://www.jongeklimaatbeweging.nl))

- Energie Beheer Nederland (2023) Energy in figures – sustainability and security of supply in Europe.
- Engbersen et al. (2021). De laag-vertrouwensamenleving: de maatschappelijke impact van Covid-19 in Amsterdam, Den Haag, Rotterdam en Nederland, vijfde meting. Erasmus school of social and behavioural sciences & kenniswerkplaats leefbare wijken. ISBN: 978-90-75289-58-9.
- Environmental impact of MSR's (2018), beschikbaar op <http://www.afaqscientific.com/jnpr/v14n003.pdf>
- eRisk Group, De rol van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem (2020) [https://www.kivi.nl/uploads/media/5fdb546e6a6f7/eRisk-Group\\_rapport\\_De-rol-van-kernenergie\\_20201202-1.pdf](https://www.kivi.nl/uploads/media/5fdb546e6a6f7/eRisk-Group_rapport_De-rol-van-kernenergie_20201202-1.pdf)
- Erken, H. Donselaar, P. En Thurik, R. (2016). Total factor productivity and the role of entrepreneurship. The Journal of Technology Transfer, vol. 43, p. 1493-1521.
- Erken, H., van Es, F. en Groenewegen, J. (2019). Het groeipotentieel van de Nederlandse economie tot 2030. Raboresearch – Economisch Onderzoek.
- F. Roelofs (2022). MOSAIEC Info voor Technopolis. Internationaal Speelveld.
- F. Roelofs, S. Knol en R. Schram (2015). Roadmap towards Demonstrator. NC2I-R deliverable D4.51.
- G. LeCroy (2021). Safety Challenges of Molten Salt Reactors. Stanford University. <http://large.stanford.edu/courses/2021/ph241/lecroy1/>
- GBCN. Net. 2013. Talk with US: The LFTR Guild
- GridReserve van MoltexFLEX: <https://www.moltexflex.com/blog/gridreserve-the-future-of-energy-storage/>
- <https://gain.inl.gov/SitePages/Home.aspx>
- <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/hydrogen-production-and-uses.aspx>
- [https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten\\_van\\_nucleaire\\_centrales\\_in\\_klimaatneutrale\\_energiescenario\\_s\\_2050.pdf](https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten_van_nucleaire_centrales_in_klimaatneutrale_energiescenario_s_2050.pdf)
- [https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten\\_van\\_nucleaire\\_centrales\\_in\\_klimaatneutrale\\_energiescenario\\_s\\_2050.pdf](https://www.berenschot.nl/media/so0fvuic/systeemeffecten_van_nucleaire_centrales_in_klimaatneutrale_energiescenario_s_2050.pdf)
- <https://www.consilium.europa.eu/nl/infographics/how-dependent-are-eu-member-states-on-energy-imports/>
- <https://www.energieinnederland.nl/cijfers/2021>
- <https://www.iea.org/countries/the-netherlands>
- <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- <https://www.kernvisie.com/energie/waterstof-uit-kernenergie.html>
- <https://www.north2.eu/blog/waterstof-duitsland/>
- <https://www.nucleairnederland.nl/bibliotheek/technopolis-group-2022-de-arbeidsmarkt-in-de-nederlandse-nucleaire-sector-eindrapportage-kopie.pdf>

- <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/04/26/extra-pakket-maatregelen-dicht-gat-tot-klimaatdoel-2030>
- <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2022/11/18/versterking-nucleaire-kennis-en-innovatiestructuur/versterking-nucleaire-kennis-en-innovatiestructuur.pdf>
- <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/opwekking-kernenergie>
- <https://www.tno.nl/nl/newsroom/2021/10/routekaart-tenminste-60-energievraag/#:~:text=Tussen%202030%20en%202050%20gaat,Een%20forse%2C%20m%20haalbare%20opgave.>
- IAEA (2013). Hydrogen Production Using Nuclear Energy. Vienna: IAEA.
- IAEA Country Nuclear Power Profiles (2005) in Mignacca & Locatelli (2020)
- IAEA, 2018. Economic Assessment of the Long Term Operation of Nuclear Power Plants: Approaches and Experience.
- J. Emblemsvåg (2022). Safe, clean, proliferation resistant and cost-effective Thorium-based Molten Salt Reactors for sustainable development. International Journal of Sustainable Energy, 41:6, 514-537, doi: 10.1080/14786451.2021.1928130
- J. Serp et al. (2014). The Molten salt reactor MSR) in generation IV: Overview and perspectives. Progress in Nuclear Energy, 77, pp. 308-319, doi: 10.1016/j.pnucene.2014.02.014.
- JRC (2014). Top down workforce demand from energy scenarios: influence of long term operation.
- Kamerbrief over voorjaarsbesluitvorming Klimaat, 26 april 2023
- Kim et al. (2014). An international comparative analysis of public acceptance of nuclear energy. Energy Policy, vol. 66, p. 475-483.
- Koelemeijer, R., H. van der Weijde, S. Hers & M. Goossens (2022), Reflectie op Cluster Energiestrategieën 2022 (CES)
- Koelemeijer, R., H. van der Weijde, S. Hers & M. Goossens (2022), Reflectie op Cluster Energiestrategieën 2022 (CES)
- L.M. Krall, A.M. Macfarlane and R.C. Ewing (2022). Nuclear Waste from small modular reactors. PNAS. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>
- M. Fisher (2020). Spotlight on Innovation: Molten Salt Reactors for a Sustainable Clean Energy Transition. IAEA: <https://www.iaea.org/newscenter/news/spotlight-on-innovation-molten-salt-reactors-for-a-sustainable-clean-energy-transition>; Power Generation LinkedIn Community (2023). How can molten salt reactors support the integration of renewable energy sources and grid stability?. LinkedIn: <https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-molten-salt-reactors-support-integration>
- M. Gradecka, A. Kiss en C. Auriault (2015). European Sites Mapping. NC2I-R Deliverable D4.21.
- M.S. Kazimi (2003). Thorium Fuel for Nuclear Energy. An unconventional tactic might one day ease concerns that spent fuel could be used to make a bomb. American Scientist, 91 (5).

- Mignacca, B. & Locatelli, G. (2020). Economics and finance of Molten Salt Reactors. Progress in Nuclear Energy, Volume 129 – 103503.
- Mignacca, B., Locatelli, G., 2020. Economics and finance of Small Modular Reactors : a systematic review and research agenda. Renew. Sustain. Energy Rev. 118, 109519
- Moir, R.W., 2008. Recommendations for a restart of molten salt reactor development. Energy Convers. Manag. 49,
- Nederlandse Emissieautoriteit (2022), Daling CO2-uitstoot grote bedrijven komt tot stilstand in 2021, steenkool terug van weggeweest, <https://www.emissieautoriteit.nl/actueel/nieuws/2022/04/14/daling-co2-uitstoot-grote-bedrijven-komt-tot-stilstand-in-2021-steenkool-terug-van-weggeweest#:~:text=In%20totaal%20stootten%20de%20kolencentrales,bleef%20ten%20opzichte%20van%202020>.
- Netbeheer Nederland, Samenvatting Het Energiesysteem van de Toekomst (2021) [https://www.netbeheernederland.nl/\\_upload/Files/Samenvatting\\_rapport\\_Het\\_Energiesysteem\\_van\\_de\\_toekomst\\_198.pdf](https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Samenvatting_rapport_Het_Energiesysteem_van_de_toekomst_198.pdf)
- Nuclear-21 (2022). Technische (on)mogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg.
- OECD & Nuclear Energy Agency (2023) The NEA Small Modular Reactor Dashboard. NEA No. 7650
- Overlegtafel Energievoorziening (2018). Afwegingskader verzwaren tenzij, [https://www.netbeheernederland.nl/\\_upload/Files/OTE\\_Rapport\\_Afwegingskader\\_verzwaren\\_tenzij\\_128.pdf](https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/OTE_Rapport_Afwegingskader_verzwaren_tenzij_128.pdf)
- PBL rapport 'Monitoring van energie en emissies in Nederland van het PBL: <https://www.pbl.nl/publicaties/monitoring-van-energie-en-emissies-in-nederland-2021>
- Planbureau voor de Leefomgeving, Nederlandse Organisatie voor toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.
- PWC (2021). Transforming Canada's energy future: The socio-economic impact of GE Hitachi SMRs.
- Qi et al. (2020). The effect path of public communication on public acceptance of nuclear energy. Energy Policy, vol. 144, issue C.
- R. Stahl (2015). Deployment Scenarios. NC21-R Deliverable D4.31.
- Raad voor de Leefomgeving en Infrastructuur (2022). Splijtstof? Besluiten over kernenergie vanuit waarden.
- Richards, J., Sabharwall, P., Memmott, M., 2017. Economic comparison of current electricity generating technologies and advanced nuclear options
- Robert Hargraves & Ralph Moir, "Liquid Fluoride Thorium Reactors: An old idea in nuclear power gets reexamined" in American Scientist. Vol. 98, 304 -313 (2010)
- Samalova, L., Chvala, O., Maldonado, G.I., 2017. Comparative economic analysis of the Integral Molten Salt Reactor and an advanced PWR using the G4-ECONS methodology. Ann. Nucl. Energy 99, 258–265.
- Siegrist, M. & Visschers, V. (2012). Acceptance of nuclear power: The Fukushima Effect. Energy Policy, vol. 59, p. 112-119.

- Taebi, B. & Van de Poel, I. (2015). The socio-technical challenges of nuclear power production and waste management in the post-Fukushima era: editors' overview. *Journal of Risk Research*, vol. 18-3, p. 267-272.
- Technopolis Group (2016). *Nucleaire kennisinfrastructuur in Nederland*.
- Technopolis Group (2019). *Analyse arbeidsmarkt en onderwijs Energy & Health Campus*.
- Technopolis Group (2023). *Analyse waardeketens en grondstoffen voor medische isotopen*.
- Technopolis Group, *De arbeidsmarkt in de Nederlandse nucleaire sector, 2022*
- Terrestrial Energy, 2017a. *How it Works*. <https://www.terrestrialenergy.com/technology/molten-salt-reactor/> (accessed 6.15.20).
- The Global Competitiveness Report 2020: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_TheGlobalCompetitivenessReport2020.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2020.pdf)
- TNO (2021). *De rol van kernenergie in de energietransitie van Noord-Brabant*.
- TNO (2022). *Waterstof uit elektrolyse voor maatschappelijk verantwoord netbeheer - Businessmodel en businesscase*, beschikbaar via <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A70d1b3e8-7c17-41b3-98d6-8a6a093f2da3>
- U. Gat and J.R. Engel (2000). Non-proliferation attributes of molten salt reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 201 (2-3), doi: 10.1016/S0029-5493(00)00276-4.
- U.S. Geological Survey (2023). *Thorium. Mineral Commodity Summaries*, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-thorium.pdf>
- Visschers et al. (2011). Climate change benefits and energy supply benefits as determinants of acceptance of nuclear power stations: investigating an explanatory model. *Energy Policy*, vol. 39-6, p. 3621-3629.
- Visschers, V. & Siegrist, M. (2011). Climate change benefits and energy supply benefits as determinants of acceptance of nuclear power stations: investigating an explanatory model.
- VNO-NCW (2021) *Toenemende zorgen over Nederlands vestigingsklimaat*
- World Nuclear Association (2022). *Carbon Dioxide Emissions From Electricity*. <https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx>
- Xiao, Q, Liu, H. & Feldman, M. (2017). How does trust affect acceptance of a nuclear powerplant (NPP): a survey among people living with Qinshan NPP in China. *PLoS ONE*, vol. 12-11.



## Appendices B Geraadpleegde personen

---

#	Organisatie	Naam
1	NRG	Ferry Roelofs
2	NRG	Jan Meulenbrugge
3	Thorizon	Sander de Groot
4	Thorizon	Lucas Pool
5	Thorizon	Titus Tielens
6	Demcon	Ingo Verhaak
7	Orano	Isabelle Morlaes
8	Royal Haskoning DHV	Lynn Hoendervanger
9	Royal Haskoning DHV	Patrick Ramaker
10	TU Delft	Jan Leen Kloosterman
11	TU Delft	Martin Rohde
12	TU Delft / 3ME	Erik Offerman
13	JRC/TU Delft	Rudy Konings
14	Rathenau	Vincent Lagendijk
15	Rathenau	Romy Dekker
16	DIFFER	Beata Tyburska-Pueschel
17	DIFFER	Marco de Baar
18	Impuls Zeeland	Laurens Meijering
19	BOM	Paul Gosselink
20	Provincie Noord-Brabant	Antoon van de Ven
21	Provincie Noord-Brabant	Onno Huiskamp
22	Ministerie van Economische Zaken	Lennart Goemans
23	Ministerie van Economische Zaken	Jurrian Boom
24	PNB (business development kernenergie Noord-Brabant)	Ben Engel

