provincie limburg

Provinciale Staten
van Limburg

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Cluster** | SC | **Behandeld** | B.J.H.W. Wetzelaer |
| **Ons kenmerk** | DOC-00320747 | **Telefoon** | +31 6 21 13 02 96 |
| **Uw kenmerk** | - | **Maastricht** | 23 augustus 2022 |
| **Bijlage(n)** | 3 | **Verzonden** | 26 augustus 2022 |

**Onderwerp**
Informerend stuk inzake resultaten oriënterend onderzoek naar kernenergie in Limburg

Geachte Staten,

Hierbij informeren wij u over de resultaten van het oriënterend onderzoek naar kernenergie in Limburg. In bijlage 1 vindt u de eindrapportage van het onderzoeksconsortium onder leiding van Nuclear21.

We zien uit naar het gesprek over de resultaten met uw Staten tijdens de commissievergadering Mobiliteit en Duurzaamheid van 16 september 2022. Nuclear21 verzorgt dan een inleidende presentatie welke is bijgevoegd aan dit stuk. Daarnaast hebben wij een video met nadere uitleg over het oriënterend onderzoek voor u beschikbaar gesteld op de provinciale website (www.limburg.nl/onderwerpen/energie-duurzaamheid)

In de commissievergadering willen we met u van gedachten wisselen over de resultaten van het oriënterend onderzoek alsook over de gekozen vervolgstap 1 van het College van Gedeputeerde Staten.

In het informerend stuk staan we stil bij elk van deze vervolgstappen.

We zien uit naar een constructieve dialoog op 16 september a.s.

Gedeputeerde Staten van Limburg

voorzitter

secretaris

Limburglaan 10
6229 GA Maastricht

Postbus 5700
6202 MA Maastricht

+ 31 43 389 99 99
www.limburg.nl

provincie limburg

# Informerend stuk

1. **Onderwerp**
   Resultaten oriënterend onderzoek naar kernenergie in Limburg

2. **Inleiding/aanleiding incl. beoogd resultaat**
   De afgelopen maanden is het onderzoeksconsortium onder leiding van het Belgische Nuclear 21 met Franse en Nederlandse partners (Ecovati, DNV en STORK) aan de slag gegaan met de gestelde onderzoeksvragen (vanuit onze aanbesteding) die mede met een klein comité van Statenleden zijn opgesteld.[1] In dit informerend stuk presenteren wij uw Staten de resultaten van dit oriënterend onderzoek naar de technische kansrijkheid van kernenergie in Limburg met als hoofdvraag:

   | |
   |---|
   | *Kan kernenergie, en meer specifiek in de vorm van kleine modulaire reactoren (SMR's), als een mogelijke optie worden beschouwd als onderdeel van de Provinciale Energie Strategie voor de Provincie Limburg (PES)?* |

   Onderstaande ontwikkelingen hebben de urgentie nog groter gemaakt om bovenstaande hoofdvraag van het onderzoek te beantwoorden:
   - De recent toenemende druk op betaalbare beschikbaarheid van voornamelijk gas;
   - De toenemende druk op beschikbare $CO_2$-arme alternatieven voor gas. Zo vallen wind op land (a.g.v. Einstein Telescoop kandidatuur) en diepe geothermie (a.g.v. seismische risico's) voorlopig af. Bovendien kent met name Noord- en Midden-Limburg weinig grootschalige bovengemeentelijke restwarmtebronnen. In de zoektocht naar een passende energie-mix voor Limburg zijn daarmee méér in plaats van minder oplossingen nodig;
   - De aankondiging van transportschaarste in onze Provincie door Tennet. Ondanks de huidige en voorgenomen investeringen in het transportnetwerk (zoals de uitbreiding van de 380kV kabel naar Chemelot en de Deltacorridor), blijft Limburg erg afhankelijk van transportcapaciteit en voldoende regelbaar vermogen elders om in de toenemende elektriciteitsbehoefte te voorzien. Het is conform KPI 1 van de PES wenselijk binnen Limburg regelbaar flexibel vermogen beschikbaar te hebben en daarmee ook de transportcapaciteit te kunnen ontlasten. Zeker met het oog op de verhoogde ambities van weersafhankelijke energiebronnen als zon en wind in de energie-mix, die meer flexibiliteit zullen vragen van het energiesysteem. Zo richtte het Klimaatakkoord zich in eerste instantie op de doelstelling van 11,5 gigawatt (GW) wind op zee in 2030. Dit jaar heeft het kabinet besloten om circa 21 GW te willen realiseren.

[1] In de Statencommissie Mobiliteit en Duurzaamheid van 15 oktober jl. heeft gedeputeerde Van Gaans-Gijbels een onderzoek toegezegd (toezegging 8995) naar de technische kansrijkheid van kernenergie voor Limburg. Gedeputeerde Staten hebben vervolgens, conform toezegging, een klein comité van Statenleden betrokken bij de nadere omlijning en verduidelijking van de vraagstelling en bijbehorende deelvragen.

Beantwoording hoofdvraag

Het onderzoeksconsortium concludeert dat de energiebehoeften in Provincie Limburg vanaf 2030-2035 technisch gezien deels zouden kunnen worden beantwoord door de volgende 2 opties van kleine modulaire reactoren (SMR's)[2] welke flexibel verschillende combinaties van zowel regelbare elektriciteit als warmte aanbieden:

- ***Optie 1***:
  SMR's (200 – 300 MWe) welke meestal oppervlaktewater voor koeling nodig hebben (langs de Maas), dat het aantal mogelijke locaties voor Provincie Limburg daarmee beperkt.
- ***Optie 2:***
  Mini-SMR's (20 – 50 MWe) welke minder noodzaak voor oppervlaktewater koeling hebben dankzij de mogelijkheid van actieve luchtkoeling. Dit maakt ruimere locatiekeuzes mogelijk die tevens dichter bij eindgebruikers kunnen worden geïntegreerd.

Grote reactoren met eenheidsvermogen van (meer dan) 1000 MWe zijn schier onmogelijk naar de tijdsperiode 2030-2035 toe mede aangezien de geotechnische voorwaarden qua koelwater capaciteit te beperkt aanwezig zijn in de Provincie Limburg.

Het aantal mini-SMR's/ SMR's wordt naast de aard van de koelbehoefte voornamelijk bepaald door de behoeften van de energie-intensieve industrie. Zo vraagt de energie-intensieve industrie om een betrouwbare, continue (lees: redundante) energievoorziening. Meerdere mini-SMR's (optie 2) zouden qua uitbating/productie een meer continue energievoorziening kunnen opleveren ten opzichte van de (twee)jaarlijkse stilstand voor een grotere centrale.

Vanwege deze gevraagde redundantie in energie-aanbod, hint het onderzoeksconsortium naar een gefaseerde aanpak startend met bovengenoemde mini-SMR's vanaf 2030. Mini-SMR's zouden daarbij een sneller antwoord kunnen bieden aan een dringende vraag naar beschikbaar regelbaar vermogen (zie ook KPI 1 van de PES) en eveneens geschaald zijn voor de verschillende energiebehoeften in Provincie Limburg voor grote industriële clusters als, meer verspreid, kleinere industriële clusters van bedrijven. Op termijn (vanaf 2035) zijn SMR's (optie 1) tevens een mogelijkheid, gezien de sterk groeiende elektrificatie welke reeds meer dan 1 GWe regelbaar vermogen vraagt in industriële clusters vanaf circa 2040.

Tot slot wat betreft de hoofdvraag, de mogelijke SMR-realisatie (optie 1 dan wel optie 2) dient in relatie gezien te worden met de mogelijke realisatie van grote LWR-kerncentrales (circa 1000

---

[2] 'Klein' verwijst naar de eenheidsgrootte qua vermogen-capaciteit. Volgens de IAEA beschouwen we kerncentrales als

- Klein bij eenheidvermogens van 200 – 300 MWe;
- Mini bij eenheidsvermogens van 20 – 50 MWe;
- Micro voor eenheidsvermogens van < 5 MWe.

'Modulair' verwijst naar verschillende aspecten zoals dat de kleinere schaalgrootte per kerncentrale een modulaire opbouw kan betekenen waarbij de geleidelijke inzet van meerdere SMR's zowel de energiemarkt behoeften beter kan volgen als ook de investeringsbehoeften spreidt (zie pagina 11 van bijlage 2; modulariteit naar zowel uitbating als investering)) De benaming "SMR" kan dus verschillende aspecten van "klein" en "modulair" omvatten naast nog de reactorontwerp keuzes zoals de gangbare licht-watergekoelde (LWR) SMR's of meer geavanceerdere (vanaf circa 2040) technologieën als gesmolten zout reactoren.

MWe) elders in Nederland en het beschikbaar komen van de 380 kV HS-lijn naar Graetheide. Zo valt de mogelijke realisatie van een mini-SMR in 2030 – 2035 vrijwel samen met de voorziene realisatie van deze grote LWR-kerncentrales op het Nederlandse HS-net. Dit vraagt nog nadere analyse wat de optimale balans tussen deze regionale SMR-realisatie en nationale grote LWR-centrales zal worden (als onderdeel van een fase 0-onderzoek; zie ook onderstaand *mogelijke vervolgstappen* op pagina 4).

Aanleiding

Vanuit Provinciale Staten is voor het thema kernenergie onder andere aandacht gevraagd via motie 2625 Bastiaans c.s. inzake onderzoek naar kernenergie in Limburg (aangenomen, 25-9-2020).

In de Provinciale Energie Strategie (PES) is vervolgens de ambitie gesteld om samen met inwoners, instellingen en bedrijfsleven te werken aan een passende energiemix en infrastructuur voor Limburg. De Limburgse energiemix bestaat richting 2030 en verder uit steeds meer verschillende bronnen en energiedragers.

Zoals de PES omschrijft zal de zoektocht naar een passende energiemix bestaan uit verschillende ontwikkelings- en toepassingssnelheden. In deze zoektocht kennen we niet de luxe om op voorhand technologieën en/of energiebronnen uit te sluiten, zeker niet in het licht van de nieuwe geopolitieke realiteit. De PES kent geen taboes, een hele waaier aan oplossingsrichtingen moet worden overwogen. Wet- en regelgeving, de snelheid van innovaties en opschaling evenals de kracht van regionale en euregionale/nationale samenwerkingsverbanden en draagvlak in de regio zijn daarin belangrijke factoren.

Tot slot, de Limburgse systeemstudie uit 2020 concludeerde reeds dat: “in geval van een tekort aan productiecapaciteit door toenemende elektriciteitsvraag zal ook gekozen moeten worden voor realisatie van aanvullend productievermogen in Limburg. Op langere termijn zal dit in verband met de klimaatdoelstellingen om $CO_2$-vrij vermogen moeten gaan. Dit vermogen moet bovendien regelbaar zijn om altijd, ook als er geen zon (van Limburgse parken) of wind (vanaf land en vanaf de Noordzee), de vraag te kunnen bedienen. Daarbij kan gedacht worden aan elektriciteitsproductie uit biomassa, groengas en in de toekomst blauwe/groene waterstof “.

Onderzoeksconclusies van het oriënterend onderzoek naar kernenergie in Limburg

Het onderzoeksconsortium benadrukt voor de Provincie Limburg vele belangwekkende inzichten in het kernenergievraagstuk zoals:

- Focus op mini-SMR’s als mogelijke bron voor extra $CO_2$-vrij regelbaar vermogen. Dergelijk regionaal regelbaar vermogen is noodzakelijk om een robuust competitief en betrouwbaar energie-aanbod te garanderen in complementariteit aan een versterking van het 380 kV-netwerk naar Limburg en de uitbouw van energieproductie infrastructuur in de rest van Nederland.
- De infrastructurele en geotechnische voorwaarden van een SMR centrale is op dit moment alleen op een hoog niveau te beschrijven. Wanneer op basis van vervolgonderzoek er specifiekere technieken en modellen zijn uitgekozen met daarbij behorende parameters) zal een nieuwe uitgebreidere analyse gemaakt moeten worden. Met name de benutting van restwarmte en het lozen van resterend koelwater zal nader

onderzocht moeten worden en de risico's die daaraan verbonden zijn. Deze belangrijke geotechnische randvoorwaarde is het gunstigst voor mini-SMR's welke nog meer dan de SMR's gebruik kunnen maken van actieve luchtkoelingssystemen, in plaats van waterkoelingssystemen.

- De factor 'urgentie' voor de Nederlandse overheid en die van de Provincie Limburg om de energietransitie te versterken in de huidige geopolitieke als wel dringende ecologische context. Met betrekking tot de optie kernenergie vertaalt zich dit in de noodzaak om:
    - in eerste instantie de bedrijfsduurverlenging van de Borssele kerncentrale te faciliteren;
    - ten tweede de publiek-private context voor nieuwbouw van kerncentrales, groot en klein, te bekrachtigen door een initiatief-nemende rol in te vullen;
    - ten derde, en dit is structureel op lange termijn, om het nucleaire ecosysteem, reeds aanwezig in Nederland te versterken en een sterk nieuw nucleair programma uit te tekenen

Deze en andere aspecten leiden tot het advies van het onderzoeksconsortium om via een routekaart in te zetten op de volgende stappen die op elkaar voortbouwen c.q. elkaar versterken (zie pagina 13 van Bijlage 1):

| ***Te zetten stappen:*** | ***Toelichting:*** |
|---|---|
| "*Provincie Limburg verbonden met $H_2$ backbone en uitgebreid 380KV Graetheide* [3] | Provincie Limburg zet zich reeds maximaal in voor 1) goede verbindingen met hoogspanningskabels tussen de elektriciteitscentrales aan de kust (waaronder Borssele) en Limburg, middels een uitbreiding van de 380kV verbinding tussen Maasbracht, Chemelot en Zuid-Limburg vóór 2030.<br>2) de komst van Deltacorridor met o.a. waterstofleiding die uiterlijk in 2026 operationeel moet zijn. |
| *"Provincie Limburg draagt bij aan versterkt NL nucleair programma "* | Uitbouw van kernenergie-capaciteit beogen met de bedrijfsduurverlenging van Borssele en de realisatie van twee LWR kerncentrales met een bijkomende 2-3 GWe vermogen, en daarnaast het nucleaire programma versterken via een 'BV Nederland' inzet op de ontwikkeling en realisatie van (mini)-SMR's. |
| *"Provincie Limburg zet in op een versneld Mini-SMR's traject"* | Uiteindelijk dienen bovenstaande stappen tot een traject te leiden waarbij Mini-SMR's in Provincie Limburg zo vroeg mogelijk gerealiseerd kunnen worden (vanaf 2030) |

[3] Zie voor achtergrond de 1) Schriftelijke inbreng Gedeputeerde van Gaans-Gijbels tijdens het rondetafelgesprek elektriciteitsnet (Vaste Kamer Commissie Economische Zaken en Klimaat van de Tweede Kamer van 22 februari 2022 jl.): Deel 1: Limburg wil elektrificeren Deel 2: Vier garanties die Limburg van het Rijk nodig heeft 2)

Om recht te doen aan de complexiteit van bovenstaande adviezen en tegelijkertijd te zorgen dat duidelijk is wat Provincie Limburg kan doen, zal Nuclear21 hierbij uitvoerig stil staan gedurende de presentatie op 16 september a.s. voor de Statencommissie Mobiliteit en Duurzaamheid.

*Mogelijke vervolgstappen*

Over de resultaten van het onderzoek vindt een presentatie plaats op 16 september a.s. in de Statencommissie Mobiliteit en Duurzaamheid. Daaropvolgend zal ook expliciet worden ingegaan op de volgende drie mogelijke vervolgstappen:
1. Provincie Limburg **vervolgt** het onderzoek naar kernenergie in Limburg;
2. Provincie Limburg **sluit aan** bij definitieve besluitvorming Rijksoverheid gepland in najaar 2023, alvorens zelf vervolgstappen te zetten;
3. Provincie Limburg **stopt met** het onderzoek naar kernenergie in Limburg.

Gezien de resultaten van het oriënterend onderzoek heeft het College van Gedeputeerde Staten besloten tot een vervolgonderzoek (vervolgstap 1).

Onderstaand volgt een uitgebreide beschrijving inclusief de overwegingen van elke vervolgstap:

Ad 1 Provincie Limburg **vervolgt** het onderzoek naar kernenergie in Limburg, waaronder alliantievorming met stakeholders, start fase 0-onderzoek én verbinding leggen met het Rijk voor de versterking van de nationale nucleaire kennisinfrastructuur.

Het oriënterend onderzoek benadrukt zoals gezegd het belang van (mini)-SMR's als mogelijke bron voor extra $CO_2$-vrij regelbaar vermogen. Dergelijk regionaal regelbaar vermogen is noodzakelijk om een robuust competitief en betrouwbaar energie-aanbod te garanderen (zie KPI 1 van de PES) in aanvulling op een versterking van het 380 kV-netwerk naar Limburg. De mogelijke bouw van een (mini)-SMR in gebieden waar lokaal een grote vraag is naar elektriciteit, kan immers het netwerk verlichten omdat er minder elektriciteit over een grote afstand verplaatst hoeft te worden. Dat maakt ons tevens minder afhankelijk van (duurzame) energie uit andere delen van het land dat dus niet altijd naar Limburg getransporteerd kan worden.

Provincie Limburg blijft daarbij in alle scenario's volledig inzetten op de gewenste oplevering van het 380kV station Graetheide in 2028/29. Mochten (mini)-SMR's namelijk op termijn haalbaar zijn (technisch-economisch en politiek-maatschappelijk) zal er óók voor deze ontwikkeling in Limburg transportuitbreiding moeten komen, meer dan al gepland is. Om het risico (netwerkuitbreiding noodzakelijk bij bouw (mini)-SMR) ten opzichte van de kans (netwerkverlichting deels mogelijk) goed te kunnen wegen dient in een fase 0-onderzoek, zie onderstaand voor uitleg van de verschikkende faseringen, onderzocht te worden in hoeverre (mini)-SMR's nu daadwerkelijk bijdragen aan het oplossen van de transportschaarste problematiek. Hierbij worden ook alternatieve opties voor netwerkuitbreidingen bekeken zoals een directe lijn met afnemers, of het aansluiten van electrolyzers om waterstof te maken van de opgewekte elektriciteit uit (mini)-SMR's.

Kortom, het mogelijk verlichten van het netwerk past in de aangekondigde Limburgse aanpak zoals tevens benoemd in de mededeling portefeuillehouder van 8 juni 2022 inzake transportschaarste (GS-DOC-00284724). Met het direct vervolgen van het onderzoek, via de onderstaand beschreven acties, zetten we de boodschap in deze mededeling portefeuillehouder namelijk "*Provincie Limburg en haar partners zitten niet stil"* het meest kracht bij (in tegenstelling tot de andere 2 vervolgstappen). In het kader van deze boodschap worden trouwens ook andere oplossingen onderzocht zoals toepassingen van batterijen en elektrolyse als oplossing voor netcongestie en de (on)mogelijkheden voor achter-de-meter oplossingen op bedrijventerreinen.

Tot slot dient Motie 2625 (Bastiaans) in herinnering te worden gebracht welke het College van Gedeputeerde Staten oproept om samen met het Rijk te onderzoeken of er in Limburg plaats is voor één of meerdere veilige en duurzame kerncentrale(s). Een vervolgstap van dit oriënterend onderzoek is in deze optiek voor de hand liggend.

*Welke acties zijn dan precies verbonden aan deze vervolgstap 1?*

Provincie Limburg **vervolgt** in Q4 2022 het onderzoek naar kernenergie in Limburg middels de volgende opeenvolgende en samenhangende acties, waarbij a en b opeenvolgende stappen zijn en stap c een continu proces. Een Limburgse "Alleingang" is hierbij vrijwel uitgesloten.

a) Alliantievorming met stakeholders (gepland tussen Q4 2022- Q1 2023);
b) Bij succesvolle alliantievorming kan gestart worden met fase 0-onderzoek (gepland tussen Q1 2023 en Q4 2023);
c) verbinding leggen met het Rijk voor de versterking van de nationale nucleaire kennisinfrastructuur.

*a. Alliantievorming met stakeholders*

Het voorliggende oriënterend onderzoek beschrijft belangrijke randvoorwaarden voor de mogelijke realisatie van (mini-)SMR's zoals het creëren van een (publiek-private) alliantie van stakeholders die aan de slag gaat met de business case (zie ook onder b). In lijn met de aanbevelingen van het oriënterend onderzoek voorziet deze vervolgstap een initiatief-nemende rol voor de Provincie Limburg, namelijk om in samenwerking met zo veel mogelijk andere Provincies deze alliantie te vormen[4]. Andere stakeholders zijn: energie-intensieve sectoren/ industriële clusters, het Ministerie van EZK, Nucleaire operator (bijv. Elektriciteit Productiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ)), toeleveringsketen en regelgevende instanties als de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

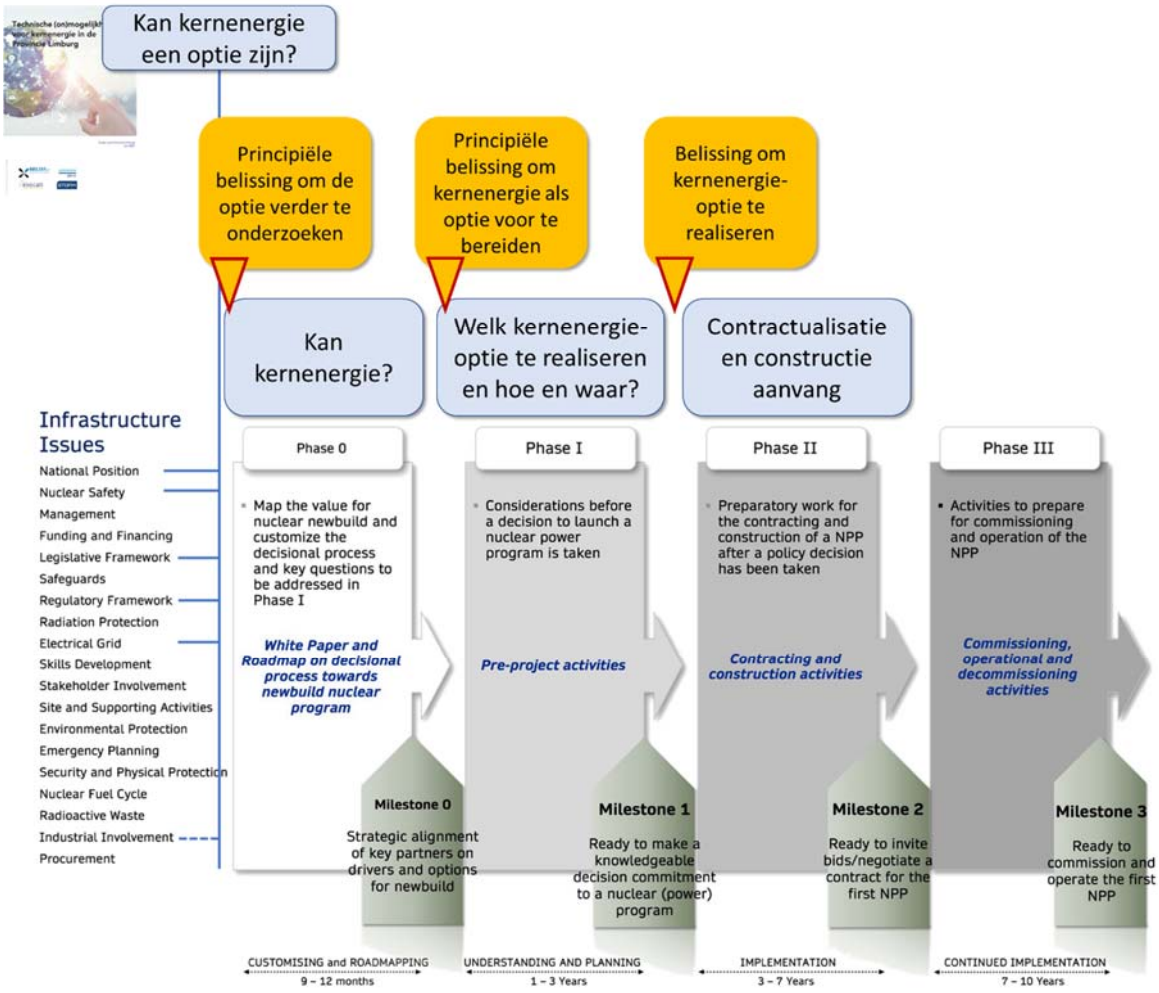
[4] "…De toekomst voor een gedecarboniseerde en verzekerde energie-bevoorrading in de Provincie Limburg kan dus met mini-SMR's en SMR's verzekerd worden en dit in synergie met hernieuwbare bronnen en geïntegreerd in de algehele Nederlandse energie-infrastructuur. Technisch-economische mogelijkheden tot realisatie van een dergelijke optie vanaf 2030 zijn voorhanden en vragen essentieel een initiatief-nemende organisatie, welke de verschillende partijen, met oog op een regionale energie strategie met geïntegreerde energie-systeem aanpak, coördineert naar een effectief programma, ingebed in het nationaal nucleair programma.." (zie pagina 88 van Bijlage 1, het onderzoeksrapport)

*b. Start fase 0-onderzoek*

Nu het technisch oriënterend onderzoek is afgerond, is een goede basis gelegd voor de start van een zogenaamd fase 0-onderzoek wat in alliantie met bovenstaande stakeholders vormgegeven kan worden.

**Wat is een fase 0-onderzoek?**
Het fase 0-onderzoek (in uitvoering te brengen door verschillende stakeholders waaronder dus de Provincie, zie “a. alliantievorming met stakeholders”) dient er allereerst toe om de financierbaarheid/ economische haalbaarheid van (mini)-SMR verder te onderzoeken. Daarnaast dient het om de verschillende (mini)-SMR opties in kaart te brengen en het verder verfijnen van de verschillende mogelijk te zetten stappen, (zie pagina 13 van Bijlage 1, het onderzoeksrapport), als voorloper van een meer gedetailleerde MER in fase 1 (zie ook pagina 116 van Bijlage 1 voor nadere informatie en geschatte tijdslijnen).

Zoals uit figuur 1 (hieronder) volgt kan enkel na een fase 0-onderzoek een weloverwogen en geïnformeerd standpunt/principiële beslissing worden genomen door Provinciale Staten om kernenergie al dan niet als optie voor te bereiden. Een eventuele vervolgstap (fase 1) dient er tot slot toe een beslissing te nemen welke kernenergie optie precies al dan niet te realiseren (welke technologie en specifieke locatie?) Ter voorbereiding van die beslissing dient ook expliciet de maatschappelijke haalbaarheid onder de Limburgse bevolking onderzocht te worden.




*Figuur 1 Positionering oriënterend onderzoek volgens een methodologische aanpak vervat in IAEA's "Milestones Approach"*

### *c. Versterking nationale nucleaire kennisinfrastructuur*

Een verdere aanbeveling van het oriënterend onderzoek is dat de mogelijke alliantievorming van stakeholders ondersteund en versterkt dient te worden door een nationaal nucleair programma "Nucleair Nederland BV". Dit programma dient ertoe om de nucleaire kennisinfrastructuur, reeds aanwezig in Nederland, te versterken en een sterk nieuw nucleair programma uit te tekenen voor een versterkte kenniscreatie, kennistransfer en kennisopbouw in alle nucleaire sectoren. Een goede kennisinfrastructuur is onmisbaar om goed in te kunnen spelen op ontwikkelingen in bijvoorbeeld energieproductie, zorg voor radioactief afval, medische isotopen en stralingsbescherming. De versterking van de nationale nucleaire kennis zullen wij agenderen bij het Rijk en kan zich bijvoorbeeld richten op een dergelijk nationaal nucleair programma (versneld) op te starten. Ook kan gedacht worden aan de voorbereiding van een mogelijke groeifondsaanvraag voor (mini-)SMR('s) door de op te zetten alliantie.

Ad 2. Provincie **sluit aan** bij definitieve besluitvorming van Rijksoverheid alvorens zelf vervolgstappen te zetten.

In deze vervolgstap wachten we besluitvorming van het Rijk af alvorens zelf proactief vervolgstappen te ondernemen. Precieze vervolgstappen (zoals onder vervolgstap 1 omschreven) komen pas in beeld wanneer meer zicht is op de definitieve besluitvorming van het Rijk.

Het nationale besluitvormingstraject ziet er volgens laatst bekende berichten als volgt uit:

- In het najaar van 2022 (november of december) volgt een kamerbrief met de resultaten van een breed omvattende scenariostudie betreffende de mogelijke rol van kernenergie in de nationale energiemix. Hierbij rekening houdend met de vraag welke problemen kernenergie mogelijk kan oplossen in de transitie naar een schone, betaalbare, veilige en zekere energievoorziening. Hierbij worden ook de perspectieven van kernenergie voor de productie van waterstof in ogenschouw genomen én gaat de studie in op de economische haalbaarheid. Bij dit laatste punt geeft de scenariostudie straks inzicht in de wijze waarop de overheid invulling kan geven aan de te hanteren financieringsstructuren voor de kosten van kernenergie (o.a. subsidies, garanties, overheidsdeelname). Deze financieringsstructuren zijn nodig om een gelijk speelveld voor kernenergie binnen het gehele energiesysteem te garanderen. Tot slot zal de studie een voorstel doen voor een voorkeurslocatie voor, zover nu bekend, de bouw van grote LWR-kerncentrales.
- De definitieve besluitvorming over onder andere de financierbaarheid/ economische haalbaarheid van nieuwe grote LWR-kerncentrales wordt op z’n vroegst in najaar 2023 verwacht.

Of in deze nationale besluitvorming dan ook de financierbaarheid/ economische haalbaarheid van (mini)-SMR’s aan bod komt is nog onduidelijk. Het kan dus een risico vormen dat wanneer alliantievorming en fase 0-onderzoek succesvol doorlopen zijn er uiteindelijk nog geen heldere keuzes voorliggen omdat de Rijksoverheid nog onvoldoende (financiële) mogelijkheden ziet voor de tijdige realisatie van (mini)-SMR’s. Deze omstandigheid zou reden kunnen zijn om als Provincie Limburg te temporiseren en pas werk maken van eventuele alliantievorming (en vervolgens fase 0-onderzoek) zodra het Rijk duidelijkheid verschaft in hoeverre (mini)-SMR’s financieel ondersteunt gaan worden.

Aan de andere kant dient bij deze vervolgstap meegewogen te worden dat indien Provincie Limburg pas aansluit bij een eventueel positief besluit van het Rijk inzake de financierbaarheid van mini-SMR’s in najaar 2023 (of later), we mogelijk niet meer vooruitlopen op andere (te vormen) regionale allianties in zowel binnen- als buitenland. Bij vervolgstap 2 dreigen we dan als Provincie Limburg te moeten concurreren met regio’s die mogelijk allemaal dezelfde startpositie hebben, terwijl met vervolgstap 1 we mogelijk net wat meer als koploper kunnen fungeren (en sneller tot resultaten komen).

Ad 3. Provincie Limburg **stopt** direct met verdere verkenningen en ziet daarmee momenteel geen rol weggelegd voor kernenergie binnen onze provinciegrenzen.

In deze vervolgstap ondernemen we op het gebied van kernenergie op dit moment geen vervolgstappen. Niet op het gebied van alliantievorming, de verbinding met het Rijk voor de versterking van de nationale nucleaire kennisinfrastructuur of verdere haalbaarheid als in een fase 0- onderzoek. Hoewel de resultaten van het onderzoek geen aanleiding geven tot het stoppen met verdere verkenningen, kunnen andere overwegingen een rol spelen in deze vervolgstap:

- Het beheer van de gebruikte splijtstof en radioactief afval van kernenergie, alhoewel heel beperkt qua volumes, blijft een socio-politieke uitdaging naar de wenselijkheid van kernenergie.
- Blijvende gevoeligheden met betrekking tot de veiligheid van kernenergie.
- Budgettaire ontsporingen voor grote, LWR-reactoren, in zowel Europa als de Verenigde Staten, hebben kernenergie in een slecht daglicht geplaatst. Er dienen nog (veel) risico-reducerende acties ondernomen te worden (óók na het fase 0-onderzoek) met het oog op een verbeterde investeerbaarheid en tijdige realisatie van kerncentrales.

## 3. Bevoegdheid

Het Ministerie van EZK is verantwoordelijk voor het energiebeleid en de positionering van kernenergie daarin. De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) verleent in Nederland vergunningen op grond van de Kernenergiewet en ziet als onafhankelijke autoriteit toe op de veiligheid.

Het Nederlandse energiebeleid biedt ruimte aan kernenergie als onderdeel van de energiemix. Het staat private partijen, energiebedrijven, vrij om een voorstel in te dienen voor de bouw van een kerncentrale. Nationaal ruimtelijk beleid voorziet in drie zogeheten waarborglocaties voor nieuwe centrales: Borssele, Maasvlakte I, Eemshaven[5]. Maar ook buiten deze locaties bestaat een mogelijkheid om kerncentrales te bouwen, mits wordt voldaan aan te stellen vergunningsvoorwaarden en milieu(veiligheid)- en planologische eisen.
Daarbij spelen nog wel de volgende regionale bevoegdheden:

– Ontheffing onder besluit natuurbescherming (provincie)
– Bestemmingsplan/Inpassingsplan (gemeente/ provincie)
– Plan-MER (gemeente/ provincie)[6]
– Onttrekken oppervlaktewater (provincie)
– Bouwvergunning (gemeente)
– Mogelijke lozingsvergunning (Rijkswaterstaat)

[5] In 2021 nam de Tweede Kamer een motie aan om de Eemshaven te schrappen uit het Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III, en tevens verankerd in het Besluit algemene regels ruimtelijke ordening (Barro) art. 2.8.4) als mogelijke locatie voor een kerncentrale.

[6] De ANVS heeft overigens momenteel een vraag uitstaan bij het Ministerie van EZK of SMR's (met een lager vermogen) onder de Rijkscoördinatieregeling vallen voor wat betreft de Plan-MER. Een vergunning onder de KernenergieWet valt niet onder de Rijkscoördinatieregeling (zie sectie V.1.5 van het rapport).

**4. Risico's**

- De infrastructurele en geotechnische voorwaarden van de (mini)-SMR's zijn op dit moment alleen op een hoog niveau te beschrijven. Wanneer er specifiekere technieken en modellen zijn uitgekozen welke geschikt zijn voor de provincie Limburg en pas als de mogelijk passende locaties zijn geselecteerd, zal een nieuwe uitgebreidere analyse gemaakt moeten worden. Het overstromingsrisico van een locatie dichtbij bijvoorbeeld de Maas is een aspect om mee te nemen in deze beslissing. Daarnaast zal de manier van koeling en een eventuele koelwaterlozing nader onderzocht moeten worden, ook in het licht van toenemende oppervlaktewater temperaturen en lage waterafvoeren gedurende langere perioden in het jaar, en de risico's die daaraan verbonden zijn wanneer een aantal geschikte technieken zijn geïdentificeerd. Deze belangrijke geotechnische randvoorwaarden zijn het gunstigst voor mini-SMR's welke nog meer dan de SMR's kunnen gebruik maken van actieve luchtkoelings-systemen, in plaats van waterkoelings-systemen.
- De transportschaarste problematiek in relatie tot kernenergie is een belangrijk onderdeel van het onderzoekrapport (zie pagina 100 van Bijlage 1). Mochten (mini)-SMR's immers op termijn haalbaar zijn (technisch-economisch en politiek-maatschappelijk) zal er in Limburg transportuitbreiding moeten komen, meer dan al gepland is. Tegelijkertijd worden SMR's als een kans gezien om structurele congestie (deels) op te lossen. De mogelijke bouw van een SMR in gebieden waar lokaal een grote vraag is naar elektriciteit, kan immers het netwerk verlichten omdat er minder elektriciteit over een grote afstand verplaatst hoeft te worden. Een SMR of (mini)-SMR is hier geschikt voor aangezien deze kunnen matchen met de lokale vraag en kan dus het elektriciteitsnet verlichten op andere plekken. Om het risico (netwerkuitbreiding noodzakelijk bij bouw SMR) ten opzichte van de kans (netwerkverlichting mogelijk) goed te kunnen wegen dient in de fase 0-onderzoek onderzocht te worden in hoeverre SMR's nu daadwerkelijk bijdragen aan het oplossen van de transportschaarste problematiek.

**5. Periodieke informatie/sturingsinformatie**

☐ **Via Jaarstukken en Begroting**
- ☐ Paragraaf Projecten
- ☐ Paragraaf Financieringen
- ☐ Paragraaf Verbonden Partijen
- ☐ Paragraaf Bedrijfsvoering
- **X** Programmaverantwoording

☐ **Voortgangsrapportages Regeling Grote Projecten**

**6. Relatie met Programmabegroting – financiële aspecten**

De Provinciale Energie Strategie (PES), van waaruit dit onderzoek wordt uitgevoerd, valt onder begrotingsprogramma 3.7. Energie, circulaire economie en milieu, en specifiek onder product 3.7.1. Energie van de Programmabegroting 2022.

**7. Meegezonden bijlagen**

Bijlage 1 Onderzoeksrapport inclusief samenvatting
Bijlage 2 Toelichtende presentatie van het onderzoeksrapport

# Technische (on)mogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg

Studie voor Provincie Limburg
Juli 2022

Nuclear-21 / Provincie Limburg - R -2022.001

NUCLEAR 21®
PERSPECTIVE FOR YOUR DECISIONS

DNV

evocati
CONSULTING ALLIANCE

STORK

# DISCLAIMER

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van de Provincie Limburg en het consortium onder leiding van Nuclear-21.
Het ter inzage geven van dit rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Nuclear-21, juli 2022

| Naam | Handtekening | |
|---|---|---|
| Luc Van Den Durpel | | |
| Jim Kuijper | | |
| Martijn Duvoort | | |
| Jean-Jacques Gautrot | | |
| Joris Grimbergen | | |

# VOORWOORD

Dit rapport omvat het geheel aan informatie en de uitkomst van de studie omtrent de mogelijkheden en onmogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg, met meer specifieke aandacht voor kleine modulaire reactoren of 'Small Modular Reactors' (SMRs).

Deze studie werd uitgevoerd tijdens de periode april - juli 2022, in antwoord op de hoofd- en deelvragen gesteld door de Provincie Limburg in hun studieopdracht "Onderzoek naar technische haalbaarheid kernenergie in Limburg", met referentie T13443 van 31 maart 2022.

Deze studie werd uitgevoerd door een consortium (zie Addendum E), bestaande uit Nuclear-21, EVOCATI Consulting Alliance, DNV en STORK, met een expert team van 12 experts in verschillende vakgebieden en domeinen, onder andere de energiemix uitdagingen voor Nederland en specifiek Provincie Limburg, de kernenergie-opties alswel de planologische, geotechnische en (nucleaire) regelgeving en randvoorwaarden voor vergunningen.

Deze studie is oriënterend van aard en geenszins een algehele haalbaarheidsstudie, aangezien enkele aspecten niet of onvolledig in deze studie konden worden behartigd binnen de grenzen van beschikbare tijd en budget. Een dergelijke algehele haalbaarheidsstudie kan deel uitmaken van een eventuele volgende stap in het proces naar implementatie van kernenergie in de Provincie Limburg.

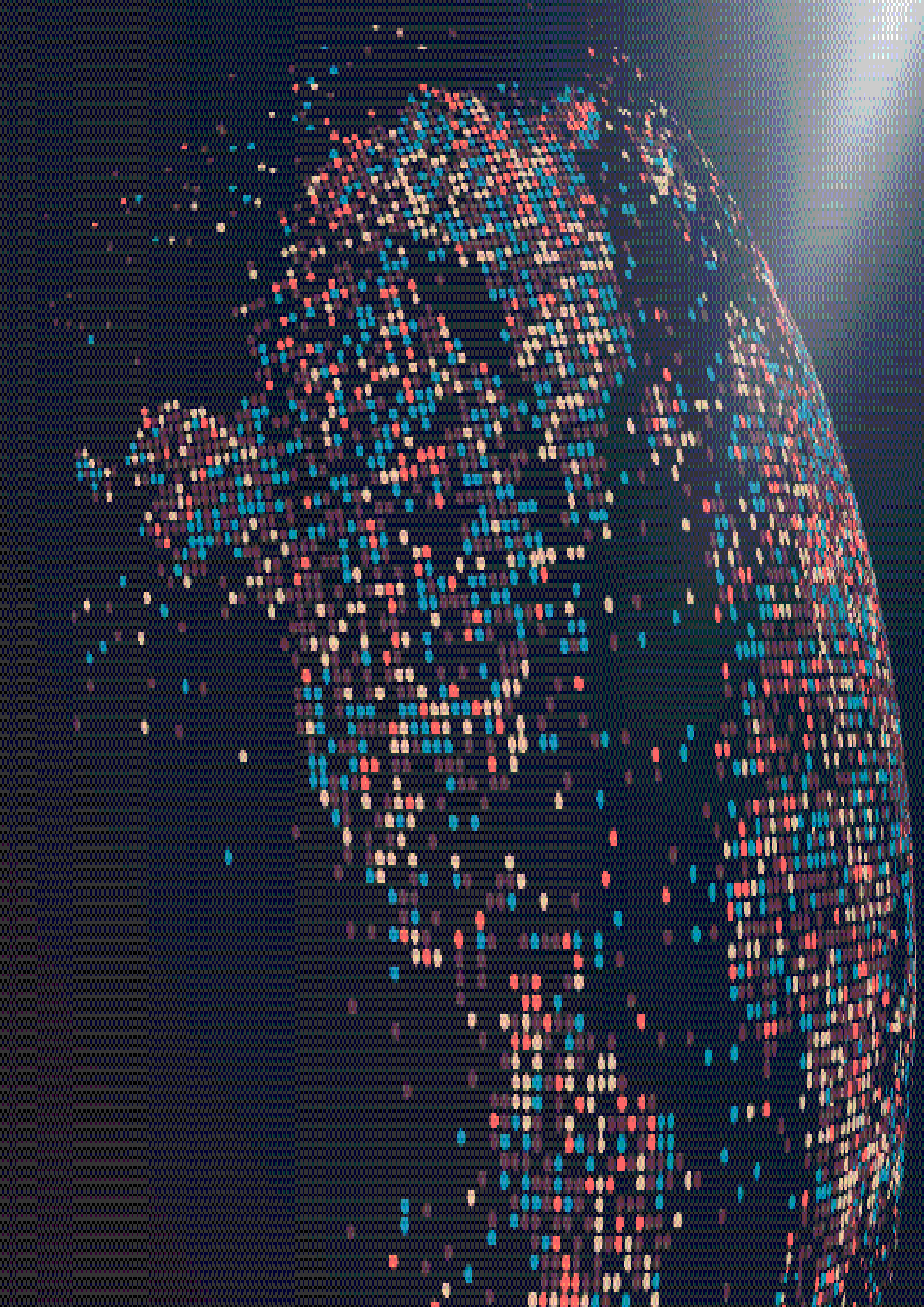
Deze studie beoogt, zoals bepaald door de studieopdracht (zie Addendum A), het in kaart brengen van de (on-)mogelijkheden voor kernenergie en de te beschouwen kernenergie-opties naar de tijdsperiode 2030-2035 toe. In deze voornamelijk technische, beleids-informerende studie worden socio-politieke en economische aspecten slechts oppervlakkig vermeld, aangezien deze slechts ten volle kunnen worden geanalyseerd in een haalbaarheidsstudie op basis van een principiële beslissing, indien kernenergie inderdaad een technische optie zou kunnen zijn.

De positionering van deze studie in het geheel van een methodologische aanpak naar de keuze van een duurzame energiemix en, indien aldus beslist, de uitbouw van een kernenergieprogramma met risico-mitigatie naar de realisatie van geselecteerde kernenergie-opties, wordt verduidelijkt zodat de toepasbaarheid alswel de beperkingen van deze studie duidelijk worden gesteld.

Een aanzienlijke hoeveelheid extra informatie is opgenomen in dit rapport, welke we nodig achten om het complexe vraagstuk naar de rol voor alsook (on-)mogelijkheden van kernenergie te kaderen en te documenteren. Deze extra informatie is vervat in informatieve tekstvakken en in addenda.

*De Provincie Limburg werkt samen met haar inwoners, instellingen en bedrijfsleven aan een innovatieve en structuurversterkende energietransitie en passende energiemix en infrastructuur voor Limburg op weg naar 2030, met daarin oog voor leveringszekerheid, draagvlak en eigenaarschap, in een realistisch tempo met betaalbare en haalbare investeringen.*

*Referentie: Provinciale Energie Strategie - Deel 2, Provincie Limburg, 2021*



# SAMENVATTING

De duurzame voorziening aan gedecarboniseerde ($CO_2$-arme) energie is een essentiële doelstelling voor maatschappij en overheden en deze wordt recent nog versterkt door de geo-politieke omstandigheden, welke de waarde van een robuust en competitief energie-aanbod nogmaals belicht. **Nederland, en de Provincie Limburg, ontsnappen in hun energietransitie-strategie ook niet aan deze ontwikkelingen welke heden, meer dan ooit, een dringende gestructureerde strategie dient aan te reiken betreffende de energie-infrastructuur voor de komende decennia. Daar bovenop is er een dringende behoefte aan structurele oplossingen voor strikt nopende onbalansen tussen energie aanbod en vraag**.

Een energie-transitie die al te zeer gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen heeft aangewezen fragiel te zijn, in het licht van de groeiende dringende behoefte aan regelbaar vermogen, welke momenteel voornamelijk via fossiele brandstof-gestookte elektriciteitscentrales wordt geleverd[i,ii]. De lang verwachte elektriciteitsopslag is in de nabije toekomst geen optie, aangezien geen enkele beschikbare technologie voldoende energie kan opslaan op een technisch-economisch aanvaardbare manier en waarbij de grote opslagmogelijkheden, i.e. gepompte waterbekkens, onvoldoende (groei-)capaciteit kennen in Nederland en omliggende landen. De productie van waterstof op basis van elektrolyse en synthetische brandstoffen is een optie, doch is eveneens qua technisch-economische haalbaarheid grotendeels beperkt voor wat betreft het energetisch rendement van dergelijke waterstof-productie en de gevraagde schaalgrootte, indien hierbij gebruik zou worden gemaakt van de intermitterende hernieuwbare elektriciteits-bronnen, zoals windturbines en zonnepanelen.

**De essentiële component voor een duurzame en robuuste elektriciteitsproductie is dus de uitbouw van op afroep beschikbaar en regelbaar vermogen, welke tevens maximaal gedecarboniseerd dient te zijn, met oog op het behalen van de 'Fit voor 2050'-doelstellingen**[iii]. Kolen- en gascentrales, gecombineerd met $CO_2$-opvang en opslag, zijn technisch-economisch niet de interessantste optie, tevens met het oog op de toenemende afhankelijkheid van een betrouwbare import aan dergelijke fossiele brandstoffen, en biomassa-verbranding als laagwaardige toepassing wordt eveneens niet geopteerd om valide redenen.

**Kernenergie presenteert zich als de gedecarboniseerde, regelbare en vooral robuuste elektriciteits-bron welke, in synergie met de hernieuwbare elektriciteits-bronnen, een dergelijke energie-transitie geheel kan ondersteunen en effectief maken**. De recente studie van het OESO Internationaal Energie Agentschap (IEA) "Nuclear Power and Secure Energy Transitions"[iv] wijst op deze belangrijke complementariteit waarbij kernenergie een versnelde decarbonisatie kan bestendigen. **Tevens kan kernenergie, naast elektriciteit, ook warmte leveren, zowel voor (hoge temperatuur industriële) proces-warmte als in de vorm van (lage temperatuur) restwarmte voor bijvoorbeeld warmtenetten. Dit is een belangrijke complementariteit ten opzichte van de elektriciteits-producerende hernieuwbare opties, zoals windturbines en zonnepanelen**. Tevens laat de inzet van regelbaar vermogen in casu kerncentrales, toe om de investeringen in het elektriciteitsnetwerk te herschalen aangezien deze momenteel voornamelijk substantiële systeem-kosten dienen te dekken omwille van (regionale) onbalans tussen aanbod en vraag, welke momenteel resulteert in kritische netcongestie met potentieel desastreuze economische impact.

De Nederlandse rijksoverheid beschouwt kernenergie recentelijk wederom als een echt onderdeel van de energie-transitie[v], waarbij bedrijfsduurverlenging van de huidige kerncentrale te Borssele alsook de bouw van twee grote kerncentrales van het licht-water reactor type (LWR) worden beschouwd. De recente brief van Minister Jetten[vi] voorziet tevens de integratie van kleine modulaire reactoren (of kerncentrales) (SMRs) teneinde verder in een verhoogde graad aan afroepbaar en regelbaar vermogen te kunnen voorzien

i Wereld Economisch Forum, 'Fostering Effective Energy Transition 2021 edition ', 20 april 2021
ii Wereld Economisch Forum, 'Urgent Action Needed to Ensure a Resilient Energy Transition Amid Severe Global Challenges ', 11 mei 2022
iii Europese Commissie, 'De Europese Green Deal: Commissie stelt transformatie van economie en samenleving van de EU voor om aan klimaatambities te voldoen', 14 juli 2021
iv OESO Internationaal Energieagentschap, 'Nuclear Power and Secure Energy Transitions', Parijs, juni 2022
v Rijksoverheid, Coalitieakkoord 'Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst', 10 januari 2022
vi Rijksoverheid, 'Kamerbrief over acties die zijn ingezet op het gebied van kernenergie', 1 Juli 2022

Een KPMG Marktconsultatie[i], in opdracht van de Rijksoverheid, bracht een schets, op basis van interviews, van de mogelijkheden voor kernenergie vanuit diverse invalshoeken namelijk de provincies, (inter)nationale nucleaire marktpartijen, zoals aannemers, kerntechnologie leveranciers, exploitanten en ook vanuit potentiële financiers waarbij specifiek volgende kernpunten werden geconcludeerd[ii], nl.:

- *"Een overgroot deel van de marktpartijen het belang benadrukt om te kiezen voor een bewezen technologie die voldoet aan de geldende veiligheidseisen. Daarbij is er brede consensus om voor een generatie III+ reactor te kiezen. Daarnaast worden Small Modular Reactors (SMRs) als een interessante optie voor de toekomst gezien, maar laat commerciële beschikbaarheid van SMRs nog op zich wachten;*
- *Een generatie III+ reactor gerealiseerd kan worden 11-15 jaar vanaf de start van het vergunningentraject. Voor een SMR op basis van gen III+ reactor ontwerp duurt dat naar verwachting 10 jaar, maar een bewezen ontwerp zal pas op zijn vroegst in 2027-2035 beschikbaar worden"*

De Provincie Limburg' Provinciale Energie Strategie (PES)[iii] houdt de optie van kernenergie inherent open, cfr. *"De Limburgse energiemix bestaat richting 2030 en verder uit steeds meer verschillende bronnen en energiedragers. We kunnen ons nu niet veroorloven slechts op enkele paarden te wedden noch uitgaan van de huidige energiemix. Het zal een zoektocht zijn met verschillende ontwikkelings- en toepassingssnelheden. Wet- en regelgeving, de snelheid van innovaties en opschaling evenals de kracht van regionale en euregionale/nationale samenwerkingsverbanden en draagvlak in de regio zijn daarin belangrijke factoren"*.

In de Limburgse Energiesysteem studie[iv] zelf wordt ook uitvoerig ingegaan op de energie uitdagingen en knelpunten waarbij de belangrijkste en robuuste knelpunten zich voorstellen als (cfr. Bijlage F van Energiesysteem studie):

1. Onvoldoende capaciteit van de huidige elektriciteitsnetten (hoog- én laagspanning) voor het voorziene aanbod van vooral zonneparken alsook voor de energievraag van gebouwde omgeving, elektrisch vervoer en industrie;
2. Vooralsnog geen transportcapaciteit van waterstof naar industrie en elektriciteitscentrales;
3. Onvoldoende elektriciteitsproductie en het beschikken over voldoende vrij regelbaar vermogen;
4. Afhankelijk van politieke en maatschappelijke ontwikkelingen is behoefte aan meer warmtetransportnetten, waterstofdistributie en $CO_2$-infrastructuur;
5. Oplossingen vanuit Duitsland en België niet realistisch gezien hun eigen knelpunten.

Nemen we met name het derde knelpunt in aanmerking, dan wordt de optie van kernenergie in en door de Provincie Limburg als een structurerende, regionale energiebron beschouwd. Dit leidde finaal de Provinciale Staten van de Provincie Limburg ertoe in oktober 2021 te besluiten om een studie uit te laten voeren welke, gezien de voorheen geschetste context, *"de technische mogelijkheden én onmogelijkheden van SMRs op Limburgs grondgebied" in kaart moest brengen waarbij "Hierbij spelen zowel juridische en planologische eisen (zoals omtrent conventionele milieuaspecten, natuurbescherming, stralingsbescherming en nucleaire veiligheid) een rol als praktische overwegingen (zoals beschikbaarheid van voldoende koelwater)"* een rol spelen.

i Rijksoverheid, Marktconsultatie Kernenergie, 1 juli 2021
ii Rijksoverheid, Aanbieding rapport marktconsultatie kernenergie, 7 juli 2021
iii Provincie Limburg, Provinciale Energie Strategie (PES)
iv CE Delft, Systeemstudie energie-infrastructuur Limburg, Oktober 2020

Dit rapport is het resultaat van deze in-kaart-brenging en voorziet de lezer van een onafhankelijk overzicht van de uitdagingen voor de Limburgse energie mix waaronder:

- inleiding met verduidelijking van studie-aanpak alsook limieten is bevat in hoofdstuk I;
- de geprojecteerde energie-behoeften (hoofdstuk II);
- de mogelijke rol alsook uitdagingen voor kernenergie en de verschillende kernenergie-opties (hoofdstuk III);
- een verduidelijking van de SMR-opties welke voor de Provincie Limburg te beschouwen zijn en de randvoorwaarden voor hun eventuele inzet (hoofdstuk IV);
- alsook de planologische en geo-technische randvoorwaarden voor dergelijke SMRs (hoofdstuk V);
- de voorgestelde SMR Roadmap voor Nederland en Provincie Limburg wordt beschreven in hoofdstuk VI.

## KERNENERGIE EEN OPTIE VOOR PROVINCIE LIMBURG ?

De essentiële hoofdvraag van de Provincie Limburg is dus of kernenergie, en meer specifiek in de vorm van kleine modulaire reactoren (SMRs), als een mogelijk optie kan worden beschouwd als onderdeel van de Provinciale Energie Strategie voor de Provincie Limburg?

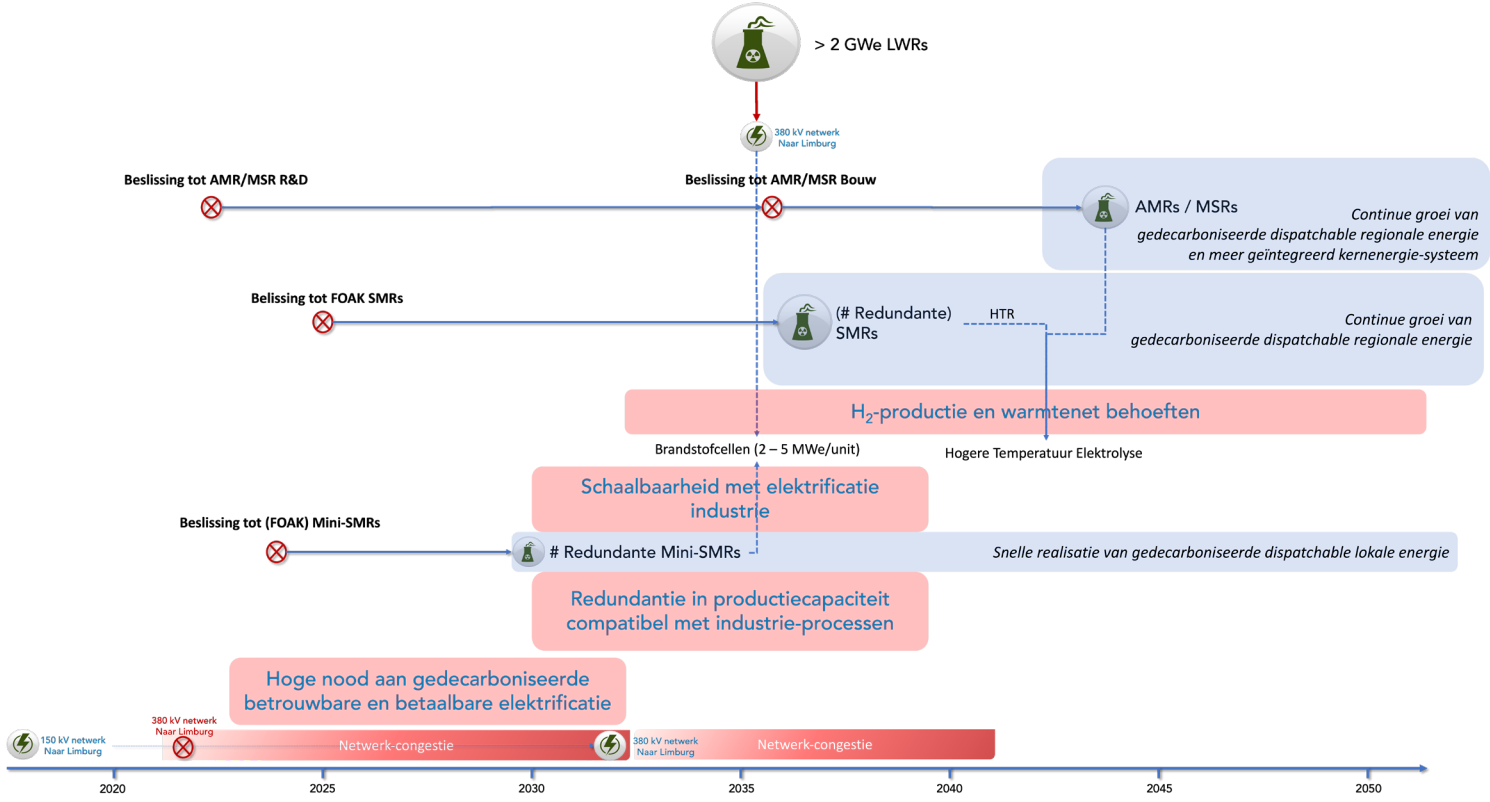
Deze studie beantwoordt bevestigend dat:

- Kernenergie inderdaad één van de, zoniet dè, optie(s) is om op afroep beschikbaar ("dispatchable") regelbaar vermogen aan te bieden in de Provincie Limburg waarbij dergelijk regionaal regelbaar vermogen inderdaad een meer en meer dringende noodzaak wordt om een robuust competitief en betrouwbaar energie-aanbod te garanderen in complementariteit met een versterking van het 380 kV HS-netwerk naar Limburg en de uitbouw van energieproductie infrastructuur, waaronder windturbines en zonnepanelen, zowel in de Provincie Limburg als in de rest van Nederland;
- Drie opties voor kerncentrales worden beschouwd als haalbaar, doch met verschillen in tijdslijn naar haalbaarheid en hun respectievelijke randvoorwaarden:
  - Vooreerst bevestigd deze studie dat een tijdslijn naar integratie van kernenergie in de energiemix naar de tijdsperiode 2030-2035 slechts realistisch is voor kerncentrales, groot en klein, op basis van mature licht-water gekoelde (LWR) technologie zoals o.a. in Borssele wordt toegepast. Andere meer geavanceerde kerncentrale-technologieën vergen nog technologische ontwikkeling en kwalificatie alsook soms de uitbouw van een industriële toeleveringsketen (voor componenten en/of splijtstof);
  - Grote kerncentrales met eenheidsvermogen van (meer dan) 1000 MWe zijn schier onmogelijk naar de tijdsperiode 2030-2035 toe mede aangezien de geo-technische voorwaarden qua koelwater capaciteit te beperkt aanwezig zijn in de Provincie Limburg. Evenwel kunnen dergelijke grote kerncentrales niet als geheel onmogelijk worden beschouwd op de langere termijn indien dergelijke kerncentrales worden geïntegreerd in een energie-systeem met maximale waardering van de gegenereerde elektriciteit, proceswarmte en restwarmte. In dergelijke energie-systemen kan de netto af te voeren warmte gereduceerd worden tot enkele honderden MWth wat geheel vergelijkbaar is met de bestaande fossiele-brandstof centrales zoals moderne STEG-centrales. Dus een dergelijke optie voor een grote kerncentrale in de Provincie Limburg, eventueel eerder na 2040, is in strikte zin niet uitsluitbaar, onder voorwaarde van integratie van deze in optimale energiesystemen met elektriciteit en warmte valorisatie en uiteraard beperkt tot slechts één of enkele te beschouwen sites in de Provincie Limburg.
  - De studie wijst aan dat er voor de Provincie Limburg essentieel twee types van SMRs, beiden op basis van LWR-technologie, tot de mogelijkheden behoren, nl.:
    - Indien de urgentie aan dergelijk regelbaar vermogen überhaupt de ideale condities kan scheppen zowel naar investering, vergunningen als naar realisatie traject voor kernenergie in Provincie Limburg toe, dan zijn Mini-SMRs een aangewezen en haalbare optie naar 2030 toe:
      - Dergelijke Mini-SMRs hebben een eenheidsvermogen van 20-50 MWe[i], welke gedurende reeds de jaren 2030-2040 correct aansluiten aan de energie-behoeften van de industriële cluster(s) en energie-intensieve industrie in de Provincie Limburg alsook een combinatie van elektriciteit en (proces/rest)warmte aanbieden voor meer geïntegreerde energiesystemen door dergelijke gebruikers naast tevens mogelijkheid tot levering aan warmte-netten ten behoeve van de gebouwde omgeving;
      - SMRs met eenheidsvermogen van 200 – 300 MWe, tevens uitbaatbaar in warmtekoppeling zoals de Mini-SMRs, zijn eerder haalbaar vanaf 2035 (met terug eventueel in ideale omstandigheden een tweetal jaren winst te behalen op planning). De toenemende elektrificatie en ook warmte-vraag maken deze SMRs een meer haalbare optie eens voldoende energie-vraag zich voorstelt alsook eventueel de vraag naar redundantie meerdere SMRs vraagt alswel back-up via het dan beschikbare 380 kV HS-lijn:
        - De realisatie van dergelijke SMRs hangt meer af van de ontwikkeling van de internationale toeleveringsketen. Verder treden dergelijke SMRs meer in competitie met eventuele grote kerncentrales, zoals die naar verwachting zullen worden gerealiseerd op andere locaties in Nederland, met elektriciteits-aanbod via het dan beschikbare 380 kv HS-netwerk naar en in de Provincie Limburg, met daarnaast de optie om dergelijke grotere kerncentrales in meer geïntegreerde energie-systemen in te zetten.

i De lagere en hogere waarden in het bereik van eenheidsvermogen dienen als 'soft' limieten beschouwd zijn geenszins te interpreteren als harde grenzen van het eenheidsvermogen. Andere criteria naast eenheidsvermogen bepalen immers de classificatie van SMRs (zie hoofdstuk IV).

De geprojecteerde energie-behoeften (zie rechter figuur met meer details in Hoofdstuk II) in de Provincie Limburg tijdens de periode 2030-2050 alsook de objectieven vervat in de Provinciale Energie Strategie nopen ons ertoe de optie voor kernenergie niet los te zien van een visie op een meer geïntegreerd energie-systeem met voornaamste kritische doelstellingen om:

- De robuustheid van het energienetwerk in de Provincie Limburg te versterken met competitief regelbaar vermogen geschaald naar de energie-behoeften van de belangrijkste gebruikers;
  - Dit omvat zowel de toenemende elektrificatie in de gebouwde omgeving als, zeer belangrijk, de enorme elektrificatie-transitie, welke de industrie dient te ondergaan om de decarbonisatie-uitdagingen te beheersen en bovenal competitief en dus levensvatbaar in de Provincie Limburg te blijven;
- Een passende en duurzame warmte-mix aan te bieden, zowel aan de industrie als aan de gebouwde omgeving, waar de inefficiënties in de huidige historische praktijken – zoals zowat overal ter wereld – het hoofd dienen te worden geboden om te komen tot een meer energie-efficiënte en bewust(er) gebruik van duurzame energievoorzieningen;
- De mogelijkheid te creëren om zwoel nieuwe energie-vectoren zoals waterstof en synthetische brandstoffen naast tevens een hoogwaardige feedstock aan materialen voor de industrie competitief mogelijk te maken vanaf 2030. Het (nationale) waterstof-netwerk ("back-bone") is één optie, doch een regionale/ lokale productie van waterstof, op de benodigde schaalgrootte gevraagd door de industrie, brengt een bijkomende garantie van de continuïteit van productie en dus robuustheid voor de eindgebruikers van dergelijke waterstof alswel andere hoogwaardige producten door conversie van energie naar producten;
- Een regionale toegevoegde waarde te garanderen door een robuust en competitief energie-aanbod met kernenergie, dat het gehele socio-economische weefsel in Provincie Limburg versterkt doch bovenal ook nieuwe hoogwaardige ontwikkelingen met een lokale alsook Nederlandse toeleveringsketen en met dus een aanzienlijke netto bijdrage aan het regionale alswel nationale product.



Deze linker figuur vat de situatie voor de Provincie Limburg samen, waarbij gehint wordt naar een gefaseerde aanpak waarbij:

- Mini-SMRs een versnelde mogelijkheid zouden kunnen bieden vanaf 2030, met SMRs vanaf 2035, doch waarbij deze laatste tevens in directere concurrentie kunnen treden met grotere LWR-kerncentrales elders in Nederland, zodra de 380 kV HS-lijn (met een verwachte transfereerbaar vermogen van 4 GWe) het geheel van de Provincie Limburg bedient (heden voorzien vanaf 2031 doch met gewenste realisatie vanaf 2028/2029).

- De tijdslijn voor SMRs immers vrijwel samenvalt met de voorziene realisatie van de grote LWR-kerncentrales op het Nederlandse HS-net, alswel met de uitrol van het 380 kV HS netwerk in de Provincie Limburg, met dus een nader te analyseren vraag wat de optimale balancering tussen regionale SMR-realisatie en nationale grote LWR-centrales zal worden.

- De mini-SMR in een eerste fase dus een sneller antwoord zou kunnen bieden aan een dringende vraag naar op afroep beschikbaar regelbaar vermogen, zowel voor elektrificatie als voor warmte-behoeften.

# URGENTIE NAAR 2030 IS CRUCIAAL VOOR KEUZE SMR

Indien de Provincie Limburg en alle stakeholders inderdaad dergelijke visie naar een meer geïntegreerde energie-system met een gedeelte kernenergie kunnen onderschrijven, dan kan de optie kernenergie volgende mogelijkheden aanbieden welke, volgens deze studie, geen harde technisch-economische-planologische beperkingen kent, i.e.:

- Zowel Mini-SMRs alswel SMRs op basis van LWR-technologie zijn een oplossing voor de energie-behoeften vanaf 2030 waar Mini-SMRs vanaf 2030 een aangewezen optie kunnen zijn.
  a. De huidige analyse duidt op een mogelijkheid om vanaf 2030, 3 à 5 dergelijke Mini-SMRs in of nabij de industriële clusters en LEA-bedrijven te realiseren om de toenemende elektrificatie alsook warmte-behoeften te dekken gedurende de periode 2030-2040 (uiteraard ook langer gezien de minimale levensduur van 30+ jaren);
  b. Verschillende opties voor dergelijke Mini-SMRs zijn in ontwikkeling waarbij, op basis van deze studie, een maturiteit en investbaarheid in Nederland naar eind jaren 2020, met dus verzekerde realisatie vanaf 2030 kan worden onderschreven;
  c. Gezien de heel beperkte netto af te voeren warmte van dergelijke Mini-SMRs zijn deze op meerdere sites inzetbaar aangezien actieve luchtkoeling met heel lage ecologisch en planologische impact mogelijk is. De site-grootte van ca. één voetbalveld (0,5 ha) maakt de realisatie in of nabij industriële sites mogelijk waar tevens deze nabijheid tot dergelijke sites vanuit vergunningsperspectief mogelijk is;
- SMRs worden een optie vanaf 2035 doch zijn deze mogelijk in een andere energie-markt context te evalueren, i.e. de 380 kV HS-lijn is dan immers verwacht doorheen Provincie Limburg de nodige connectiviteit met Nederlandse elektriciteits-aanbod – waaronder vanaf 2035 tevens twee bijkomende grote LWR-kerncentrales – aan te bieden waar tevens het waterstofnet reeds een aanbod garandeert. Aldus kunnen dergelijke SMRs in competitie treden met grote kerncentrales (welke finaal nog steeds een nog meer competitieve elektriciteitsproductie kunnen garanderen) en eventueel, vanaf 2045, in competitie treden met meer geavanceerde kerncentrales welke nog beter aansluiten aan de dan verwachte geïntegreerde energie-systemen waaronder eventueel hogere temperatuur warmte noden voor o.a. waterstofproductie of andere industriële processen.

De gevraagde redundantie in energie-aanbod, compatibel met de vereisten van voornamelijk industriële gebruikers, wat zich mogelijkerwijs vertaald in redundantie via multi-units realisaties, hint naar een gefaseerde aanpak startend met bovengenoemde Mini-SMRs welke zowel in multi-unit/single site alswel als single-unit/multi-sites configuraties het nodige energie-aanbod en de continuïteit kan garanderen, zowel voor beperkte industriële noden, in de grootte-orde van (enkele) 10 MWe/MWth als voor, via 150 kV netwerk-geconnecteerde single-unit/multi-sites tot enkele honderden MWe/MWth, industriële clusters, met dus een multi-unit single site aanpak.

- Dergelijke (Mini-)SMRs kunnen flexibel verschillende combinaties van zowel regelbare elektriciteit als warmte aanbieden zoals reeds gerealiseerd in warmte-kracht-koppeling centrales op basis van (meestal) gas-verbranding.
- Op termijn zijn vergelijkbare configuraties met SMRs tevens een mogelijkheid, gezien de sterk groeiende elektrificatie welke reeds meer dan 1 GWe regelbaar vermogen vraagt in industriële clusters vanaf ca 2040.

Een dergelijke gefaseerde aanpak via Mini-SMRs naar SMRs is een optie welke tevens een gefaseerde en risico-mitigerende ontwikkeling van de toeleveringsketen, alsook de transities in energie-systemen, kan omvatten. Evenwel kan tevens geopteerd worden om direct een SMR-ontwikkeling te beogen, welke dan dient te worden gekaderd in de verzekerde 380 kV HS-lijn naar Midden- en Zuid-Limburg teneinde voldoende back-up vermogen te kunnen garanderen indien het aantal gerealiseerde SMRs onvoldoende redundantie t.b.v. continue productie zouden opleveren i.v.m. 18-24 maanden onderhouds-cycli voor SMRs (t.o.v. een 5-6 jaar onderhoudscyclus voor de industriële cluster Chemelot).

Bijkomende redenen waarom in deze studie de LWR-technologie de voorkeur heeft voor zowel grote als kleinere kerncentrales, zijn tevens:

- Er is reeds een aanzienlijke kennis en ervaring in Nederland voor de bouw en uitbating van dergelijke LWRs, cfr. Borssele en EPZ, waarbij een continuïteit belangrijke risico-reducties betekent naar nieuwbouw programma's en de uitwisseling van dergelijke kennis en ervaring over het Nederlands nucleair programma;
- Daarnaast is de bestaande internationale toeleveringsketen voornamelijk op LWR-technologie gericht en zijn heel wat kritische ontwikkelingen en investeringen, meestal ook in niet-Europese landen, te beschouwen voor niet LWR-technologieën zoals meer bepaald de te gebruiken splijtstof, bijvoorbeeld HTGR-reactoren gebruiken geheel andere splijtstofvorm dan LWRs waarvoor heden enkel R&D/prototype/kleine-schaal fabricatie-plants bestaan in o.a. VS en China en een ontwikkeling ervan in Europa geenszins in de tijdslijn naar 2030-2035 wordt voorzien;
- Een belangrijk punt betreft tevens de algehele compatibiliteit met de bestaande Nederlandse splijtstofcyclus en het beheer van radioactief afval.

**De vraag dringt zich op indien bij realisatie van de 380 kV HS-lijn eerder vanaf 2028/2029, alsook het waterstofnet vanaf 2027/2028, er finaal nog behoefte is aan een dergelijk versnelde introductie van Mini-SMRs en SMRs nadien?**

Nederland heeft een groeiende uitdaging om ervoor te zorgen dat er voldoende op afroep beschikbare en regelbare opwekking (zoals bijv. (Mini-)SMRs) beschikbaar is om op alle tijdsschalen (maar vooral van zeg maar uren tot weken - seconde/ minutenschaal kan waarschijnlijk makkelijk vanuit grote hoeveelheid batterijcapaciteit en vraag-respons gedekt worden) – ervoor te zorgen dat tekorten in de opwek van wind en zon te allen tijde kunnen worden opgevangen. Dit vergt tevens beduidende investeringen in netwerkcapaciteit.

Teveel 'leunen' op reserves in buurlanden is daarin een enorm risico voor 'de BV Nederland', en dus ook voor Provincie Limburg, want ook in die buurlanden nemen de capaciteitsmarges af, en zijn de problemen wellicht nog groter. De Provincie Limburg kan dus wel voldoende importcapaciteit vanuit de rest van het Nederlandse net hebben, maar als daar onvoldoende opwek in kan voeden, is er ook een probleem. Daarnaast is - in internationale context - de redelijk centrale ligging van Limburg in de regio Noordwest-Europa/PLEF-regio eveneens gunstig voor eventuele export van elektriciteit, en ook voor de balans binnen het Nederlandse net. Veel van de elektriciteit van offshore wind zal al grotendeels in de 'kustclusters' worden geconsumeerd. Blijft er dan, te allen tijde, voldoende opgewekte elektriciteit over om ook Limburg nog te voorzien en wat zouden de prijs-effecten kunnen worden?

Daarnaast kunnen (Mini-)SMRs natuurlijk de Limburgse energietransitie een 'boost' geven, waarbij de Provincie Limburg als een 'batterij' van het Nederlandse net fungeert en daarbij ook nog extra werkgelegenheid genereert, welke een verzekerde energie-opwek garandeert.

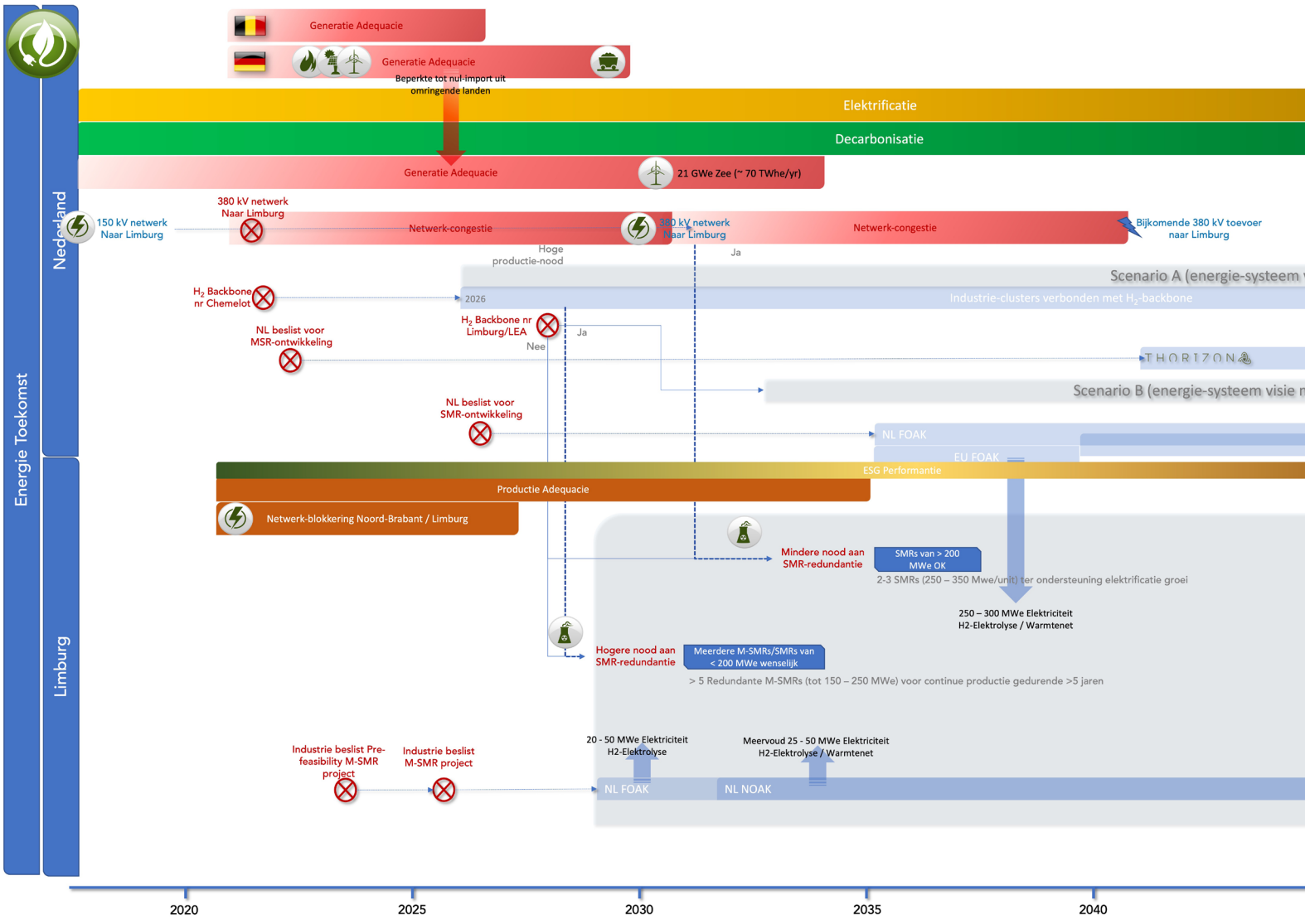
i Rijksoverheid, Financiering regionale netwerkbedrijven, 13 juli 2022

Mini-SMRs en SMRs sluiten elkaar niet uit en kunnen, via Mini-SMRs, een versnelde toelevering van regelbaar vermogen garanderen en via, op vergelijkbare (LWR ) technologie gebaseerde, SMRs in de toekomst verder bouwen, in het kader van de groeiende energie-behoeften. Nieuwe technisch-economische overwegingen betreffende de waterstofproductie-eenheden zijn te voorzien met vraag naar een hoger eenheidsvermogen, welke dan eerder SMRs rechtvaardigen. Een dergelijke gefaseerde aanpak laat een gestage kennisopbouw toe, met daarbij economische waarde-creatie voor Nederlandse en Limburgse bedrijven.

Tevens laat een dergelijke gefaseerd aanpak de volgende fasering in investeringen toe, met mogelijkheid tot minimalisatie van het investerings-risico:

- De eerste 3 – 5 Mini-SMRs (bijvoorbeeld op basis van een 30 MWe/eenheid), verwacht geplaatst te worden in nabijheid van industriële cluster(s), benodigen een investering van ca. 250 M€ voor FOAK en geleidelijk naar 150 M€ voor NOAK, voor multi-unit realisaties;
- Single-unit Mini-SMRs voor andere sites zouden dan op basis van NOAK een investering in de grootte-orde van 150 M€ vragen;
- Nadien, voor SMRs van ca 250 Mwe eenheidsvermogen worden investeringen van > 1 miljard € gevergd doch met mogelijkheid om tegen lagere kosten €/MWhe te produceren.

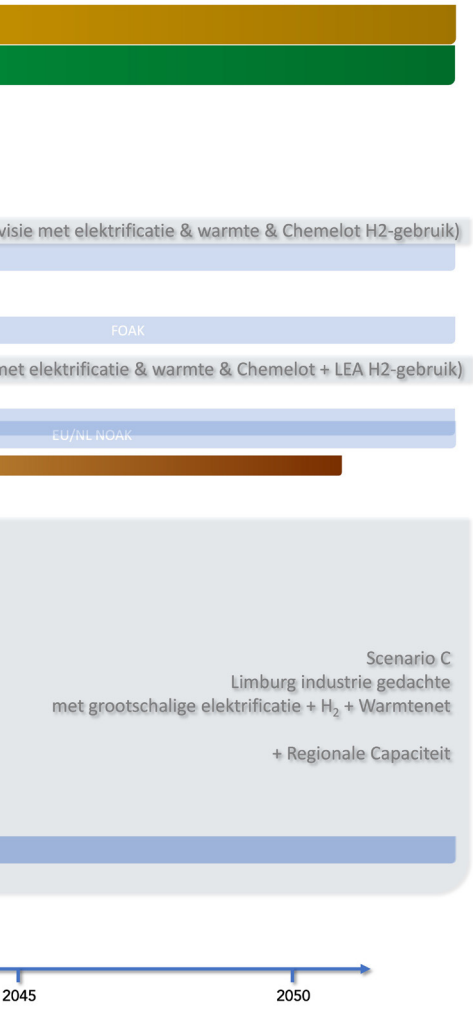
Tot slot, de inpassing van dergelijke Mini-SMRs en SMRs wordt op verschillende sites mogelijk geacht aangezien aan de geotechnische (o.a. seismische) randvoorwaarden in de Provincie Limburg op verschillende van dergelijke sites wordt voldaan. Een meer gedetailleerde haalbaarheidsstudie dient ertoe om de karakteristieken van dergelijke sites, zeker met oog op de gewenste energie-systeem integratie, nader te analyseren en eventueel site-opties uit te sluiten om planologische, geotechnische en/of sociaal-economische redenen. Evenwel kan deze berkenning naar een meer gedetailleerde haalbaarheidsstudie besluiten dat diverse sites binnen Limburg in aanmerking komen ten behoeve van de verschillende types van energie-verbruikers met gebruik van Mini-SMRs en, voor grotere industriële clusters en/ of gebouwde omgevingen, tevens voor SMRs. Gezien de heel beperkte land-oppervlakte benodigd voor dergelijke Mini-SMRs (voetbalveld grootte; 0.5 ha) en voor SMRs (4-5 voetbelvelden; ca. 5 ha) kan de integratie in de omgeving aanmerkelijk eenvoudiger worden gerealiseerd, terwijl tevens de visuele impact, door het ontbreken van de klassieke koeltorens, als aanvaardbaarder kan worden beschouwd.




Een overkoepelende samenvatting van deze roadmap is in bovenstaande figuur weergegeven, d.w.z.:

- Er is een groeiende elektrificatie in Nederland, wat zoal een gegeven is in alle landen, uit het oogpunt van uitfasering van fossiele verbranding in vele industriële en residentiële processen, en voor het verhogen van het gebruiksgemak voor diverse wijzen van eindgebruik;
- Tevens vraagt de decarbonisatie om tevens bij de elektriciteits-opwekking, en bij uitbreiding de energie-opwekking, versneld gebruik te laten maken van lage-emissie opwekkings-technologieën;
- De voorziene 21 GWe aan off-shore wind capaciteit (resulterend in zo'n geprojecteerde 70 TWhe/jaar elektriciteitsproductie) is onderdeel van het Nederlandse energie-beleid waar tevens de uitbreiding van het 380 kV HS-netwerk tegen 2030 wordt voorzien, tevens naar en in de Provincie Limburg. Waar dit heden in het investeringsplan van Tennet voorzien is naar 2031 toe wordt dit door Provincie Limburg verwacht in 2028/2029 gerealiseerd te worden[i];
- Niettemin en ondanks dergelijke investeringen in zowel opwek als transmissie netwerk, en heden "hard" gemaakt door de netcongestie welke enkel een toenemend probleem zal worden gezien het toenemend aandeel aan intermitterende hernieuwbare energie in de energiemix, blijft er een netto vraag naar op afroep beschikbaar en regelbaar vermogen, welke in een gegarandeerde alswel competitieve energie-opwek voorziet;
- Het uitrol van het waterstofnetwerk naar de industriële cluster Chemelot vanaf ca. 2026 en nadien naar de LEA-bedrijven en andere delen van Limburg, zal bijdragen aan de mogelijkheden om over te schakelen naar waterstof (doch tegen welke prijs?) en de schaarsere gas-aanvoer voor meer hoogwaardige toepassingen te reserveren.

i Provincie Limburg, '[Limburg ziet mogelijkheden versnelling maatregelen tegen stroomcongestie](#)', 7 juli 2022




Een eerste ontwikkelingsrichting (Scenario A) waar de Provincie Limburg zich reeds maximaal voor inzet en gericht op, enerzijds, goede verbindingen met hoogspanningskabels tussen de elektriciteitscentrales aan de kust (waaronder Borssele) en Limburg en dit middels een uitbreiding van de 380kV verbinding tussen Maasbracht, Chemelot en Zuid-Limburg vóór 2030; anderzijds, de komst van Deltacorridor met o.a. een waterstofleiding die uiterlijk in 2026 operationeel moet zijn. We beschouwen hierin wel enkele blijvende risico's:

- Vooreerst is de timing naar realisatie gewenst doch nog niet verzekerd wat dus onduidelijkheid tot de vroege jaren 2030 kan betekenen. Eveneens nadien verwachten we netcongestie risicos aangezien "Limburg aan het einde van de lijn ligt", i.e. verschillende andere Provincies en o.a. hun industriële clusters hebben gelijkaardige energiebehoeften zoals de situatie in Limburg en dus een competitie naar beleverbare energie zal zich opwerpen;
- De geprojecteerde > 100 miljard € investering voor dergelijke elektriciteits-netwerk uitbreiding kan verder geoptimaliseerd door regionale regelbare energie-opwekking capaciteit welke het intermitterend karakter van hernieuwbare energie mitigeert alsook bijkomende systeem-functies als netwerk-stabiliteit, reactief vermogen en bijdrage aan redundantie in dergelijke netwerken aanbrengt.
- De regionale/lokale productie van waterstof kan tevens de afhankelijkheid van het netwerk verminderen zeker daar waar kritische processen afhankelijk zijn van continue belevering.

Nederland kan de uitbouw van een kernenergie-capaciteit beogen met de bedrijfsduurverlenging van Borssele en de realisatie van twee LWR-kerncentrales met een bijkomende 2-3 GWe vermogen, en daarnaast het nucleaire programma versterken via een 'Nucleair Nederland BV' inzet op de ontwikkeling en realisatie van SMRs. Hierbij kan tevens de realisatie, met internationale partners, van een FOAK SMR worden voorzien, en wij verwachten dat een dergelijke realisatie van FOAK SMR vanaf de vroege jaren 2030 realistisch is met een verzekerde energie-productie door dergelijke SMR m.i.v. ca. 2035. Noteer reeds dat enige elementen van dergelijke Nederlands nucleair programma vorm beginnen te krijgen, waaronder de nakende investering in PALLAS als nieuwe onderzoeksfaciliteit (en meer bepaald radioisotopen productie voor de belangrijke nucleaire geneeskunde bevoorrading, waarin Nederland reeds een sterke plaats inneemt) naast de interesse voor geavanceerde kernenergie-opties, zoals gesmolten zout reactoren (MSRs), d.w.z. de THORIZON start-up[i]. Een dergelijk "Nuclear Nederland BV" (Scenario B) voorziet dus een beduidende toename aan kernenergie vanaf ongeveer2035 door de grote LWR-kerncentrales alswel regionale 'ver-Nederlandse' (Mini-)SMRs waarbij Nederland een leidende rol heeft genomen in de ontwikkeling en uitbouw van een bepaald (Mini-)SMR-type.

Uiteindelijk leidt dit tot een vroegste introductie van Mini-SMRs als regional/lokaal regelbaar vermogen (Scenario C), welke verder de risico's naar de periode 2030 mitigeert door Mini-SMRs vroeger te realiseren voor de nakende existentiële behoeften van industriële clusters en energie-intensieve bedrijven zowel voor elektriciteit als warmte, en dus met de mogelijkheid tot regionale waterstof-productie. In ideale omstandigheden kan dit vanaf eind jaren 2020, doch zeker vanaf 2030, een regionaal regelbaar vermogen aanbieden in de Provincie Limburg. Zeker indien de 380 kV HS-lijn op zich zou laten wachten en/of onvoldoende energie zou kunnen toeleveren wordt de realisatie van regionaal regelbaar vermogen een grote toegevoegde zoniet essentiële keuze voor de Provincie Limburg. Meerdere Mini-SMRs laten toe de nodige redundantie op regionaal niveau te realiseren, gekoppeld via het 150 kV net, alsook voor industriële gebruikers de nodige continuïteit in belevering van kritische en hoog-toegevoegde waarde creërende processen te garanderen naast tevens de transitie naar waterstof-gebruik en warmtenetten te bevorderen. Aldus voorziet Limburg zich in z'n eigen "batterij-capaciteit", indien het nationale netwerk onvoldoende toelevering kan garanderen bovenal nog tegen competitieve voorwaarden.

i THORIZON

# ANTWOORDEN OP HOOFD EN DEELVRAGEN

## Technische (on)mogelijkheden van SMRs op Limburgs grondgebied?

*Welke praktische en fysieke beperkingen dan wel mogelijkheden kent de Provincie Limburg die bij voorbaat leiden tot het ondersteunen van één spécifiek SMR-ontwerp?*

- De studie concludeert dat energie-behoeften in Provincie Limburg vanaf 2030-2035 zouden kunnen worden beantwoord met licht-water gekoelde (LWR) (Mini-)SMRs
- Er zijn heden geen praktische en/of fysieke beperkingen welke het gebruik van dergelijke LWR (Mini-)SMRs in de Provincie Limburg uitsluiten.
- Er zijn wel verschillen in de mogelijkheden en wensen qua plaatsing met betrekking tot de energie-behoeften en de beschikbare koelcapaciteit.

*In hoeverre is het technisch haalbaar dat SMR-ontwerpen, naast basislast elektriciteitsproductie, kunnen worden ingezet voor flexibel regelbaar vermogen, productie van waterstof en andere (energetische) toepassingen?*

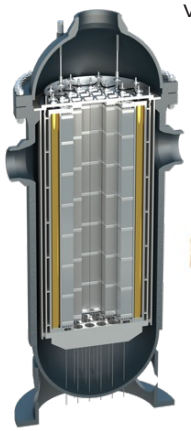
- De energie-intensieve industrie heeft in eerste instantie behoeften uitgedrukt naar elektrificatie van hun processen.
- Daarnaast zijn warmtenetten een interessante mogelijkheid waar hogere-temperatuur proces-warmte op dit moment echter niet als kritisch wordt gezien.
- De beschouwde LWR (Mini-)SMRs kunnen allen deze energie-behoeften flexibel beleveren.
- Op langere termijn, waarbij hogere temperatuur processen van interesse zouden zijn, kunnen meer geavanceerde SMRs (HTGRS, MSRs) worden ingezet.

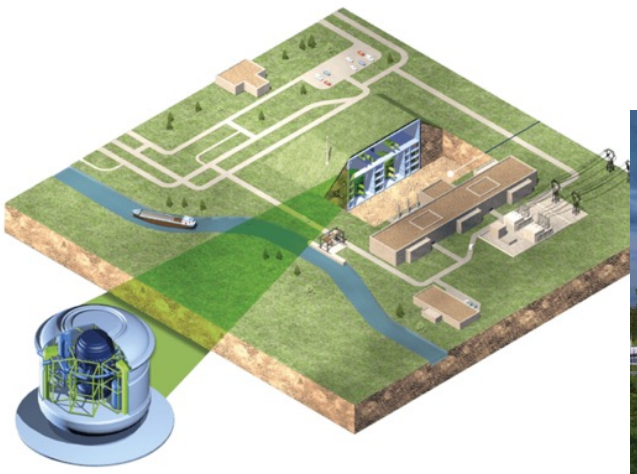
*Wat zijn voor Limburg, mede gelet op de uitdagingen qua netcongestie en het benodigde flexibele vermogen tussen 2030-2050, de meest logische varianten voor het aantal te plaatsen SMRs? Met andere woorden wat past op realistische wijze op Limburgse schaal?*

- Energie-intensieve industrie vraagt om een betrouwbare en redundante energie-belevering compatibel met het uitbatings-regime van hun processen (tijdsschaal 6-7 jaar). Dit kan door meerdere SMRs worden verwezenlijkt, waarbij de beschikbaarheid van een 380 kV HS-aansluiting bijkomende redundantie kan verzekeren.
- Het aantal te plaatsen SMRs hangt af van de integratie met voornamelijk deze industriële noden en met de keuze tussen Mini-SMR of SMR.
- Er zijn geen directe geo-technische beperkingen qua inplanting van dergelijke SMRs en nog minder voor Mini-SMRs gezien de kleine koelnoden en heel kleine implantatie oppervlakte benodigd tevens met compatibiliteit met industriële sites en/of nabij elektriciteit en voornamelijk (proces/rest)warmte verbruikers.

*Welke SMR-ontwerpen hebben de gunstigste randvoorwaarden vanuit het vergunningsperspectief?*

- Zolang het gekozen SMR-ontwerp zich baseert op beschikbare kennis en ervaring vanuit bestaande reactor-ontwerpen, is er geen significant onderscheid qua vergunningsperspectief.
- Aldus is er een voorkeur voor LWR (Mini-)SMRs waarbij vanuit vergunningsperspectief tevens geen kritisch onderscheid gemaakt wordt tussen FOAK of NOAK en dit essentieel als een project-risico wordt beschouwd voor de investeerders.





Kernenergie vraagt een langere termijn visie omtrent de gewenste energiemix en de rol welke kernenergie in geïntegreerde energiesystemen kan betekenen.

De behoefte aan gedecarboniseerde elektrificatie en warmte laat minder en minder opties over om op een betaalbare en verzekerde manier in onze maatschappelijke behoeften te kunnen voldoen.

Een toenemend aantal landen en internationale (energie-) organisaties herkennen - wederom - de structurerende rol welke kernenergie in deze toekomst kan en zelfs dient te vervullen.

Uiteraard dient kernenergie zichzelf hierbij ook als aanvaardbare en goed presterende oplossing aan te bieden. Mini-SMRs en SMRs vormen hierbij één van de opties.

# Inhoud


Technische (on)mogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg 1

I. Inleiding 20
I.1 De uitdagingen voor de toekomst en de essentiële rol voor een duurzame energiemix 21
I.2 De energie context voor de Provincie Limburg 22
I.3 De uitdagingen voor de Provincie Limburg 24
I.4 De positionering van deze studie 28

II. De energie-uitdagingen 32
II.1 Internationale ontwikkelingen met impact op NL's energie-strategie 32
II.2 Energie-transitie uitdagingen - Energie-systeem denken noodzakelijk 36
II.3 Toekomstige veranderingen in energie systemen 38
II.4 Verwachte toekomstige energie systemen 2030-2040-2050 40
II.5 Energie-behoeften 41
II.5.1 Limburgse en Nederlandse Energievraag en aanbod 41
II.5.1.1 Energievraag Chemelot 41
Elektriciteits-vraag Chemelot 43
Waterstof-vraag (projectie) Chemelot 43
Restwarmte-vraag 43
II.5.1.2 Energievraag overige industrie 45
Regio Venlo (glastuinbouw) 45
Maastricht Aachen Airport 45
Resterende overige industrie 45
II.5.1.3 Energievraag rest van Limburg 46
Huishoudens, dienstverlening en overige landbouw 46
Mobiliteit 46
II.5.1.4 Energievraag rest van Nederland 46
2030 46
Industrie 46
Huishoudens, dienstverlening en landbouw 46
Mobiliteit 46
Waterstof/Power-to-X 46
II.5.2 Duurzame energieproductie in Limburg 47
II.5.2.1 Zonnepanelen 47
II.5.2.2 Wind op land 47
II.5.3 Duurzame energieproductie in de rest van Nederland 47
II.5.3.1 Wind op zee 47
II.5.3.2 Zonnepanelen 47
II.5.3.3 Wind op land 47
II.6 Referenties 49

III. Kernenergie-opties en uitdagingen 50
III.1 Uitdagingen en doelstellingen voor kernenergie in energie-transitie 50
III.2 Motivaties voor de evolutie naar kleine(re) modulaire reactoren (SMR) 54
III.3 Beschrijving van SMR technologische opties 55
III.3.1 Wanneer kan een SMR worden gerealiseerd? 57
III.3.1.1 Technologische maturiteit van SMRs 57
Coherentie en synergieën betreffende splijtstof en radioactief afval beheer 64
III.3.1.2 Toeleveringsketen en mogelijke rol voor Nederlandse en Limburgse industrie 66
SMR en nieuwbouw toeleveringsketen in Europa 66
Ketelsystemen en componenten en apparatuur belangrijk voor de veiligheid 66
Turbine 67
Brandstof 67
Security control-command en simulator 68
III.3.1.3 SMR Markt-dynamiek 69

III.3.1.4 Vergunnings traject 70
III.4 Hoe risico's voor SMR-projecten te minimaliseren? 71
III.4.1 Regulering, vergunningverlening en vergunningverlening 71
Maturiteit van het ontwerp – Normen en standaarden 72
Gereedheid van de toeleveringsketen 72
Project-/programmamanagement 72
III.5 EU-Taxonomie en vooruitzichten voor kernenergie 73
III.5.1 Enige info omtrent de EU-Taxonomie 73
III.5.2 EU-Taxonomie en kernenergie 73
III.6 Referenties 74

IV. SMR-opties voor de Provincie Limburg 76
IV.1 (Mini-)SMRs versus behoeften en specificiteit van de Provincie Limburg 76
IV.2 Kan een SMR aansluiten aan de energie-behoeften voor de Provincie Limburg 78
Hoe het traject naar SMR in Provincie Limburg naar 2030 te 'de-risken'? 79
IV.3 Kan een SMR geïmplementeerd in de Provincie Limburg 82
IV.3 Welke (Mini-)SMR keuzes voor Provincie Limburg? 84
Welke tijdslijn kan als realistisch en haalbaar worden voorgesteld? 84

V. Juridische, planologische en geo-technische randvoorwaarden 90
V.1 Nucleaire regelgeving en vergunning 90
V.1.1 Nucleaire veiligheid in Nederland – Kernenergiewet en Veiligheidsrichtlijnen
V.1.2 Invoering van SMR's in de provincie Limburg 92
V.1.2.1 De kleine modulaire reactoren – SMR – Algemeen 92
V.1.2.2 SMR ontwerpen de wereld rond 93
V.1.2.3 SMR's en de 3S-aanpak: veiligheid, beveiliging, waarborgen 93
V.1.2.4 Harmonisatie van het regelgevingskader en paradigmaverschuiving
V.1.2.5 Veiligheidseisen voor SMR's 94
V.1.2.6 "Nucleair Security by Design" 94
V.1.2.7 Specifieke uitdagingen op het gebied van Safeguards 94
V.1.3 Internationale ontwikkelingen in (harmonisatie van) regelgeving 95
V.1.4 Europese regelgeving en (on)mogelijkheden voor FOAK/NOAK SMR's 95
V.1.5 Nederlandse context - Bespreking met ANVS, 23 juni 2022 96
V.1.6 Context van de regelgeving: voorlopige conclusies 96
V.2 Geo-technische en infrastructuur randvoorwaarden van SMRs 97
V.2.1 Restwarmte levering 97
V.2.2 Grootte (capaciteit) 97
V.2.3 Grootte (ruimtebehoefte) 97
V.2.4 Waterbehoefte 98
V.2.5 Conclusie en aanbeveling 98
V.3 Geo-technische en infrastructuur karakterisatie van Provincie Limburg 99
V.3.1 Elektriciteitsnetwerk (on-)mogelijkheden (bestaand en toekomstig) 99
V.3.1.1 Netcapaciteit Limburg 99
Investeringsplannen Enexis 99
Investeringsplannen TenneT Limburg 99
Netaansluiting Limburg 100
V.3.1.3 Andere mogelijkheden 100
V.3.1.4 Conclusie en aanbeveling 101
V.3.2 Niet-elektriciteit behoeften 101
V.3.2.1 Veiligheid (evacuatie mogelijkheden) 101
V.3.2.2 Veiligheid (veilige afstand) 102
V.3.2.3 Beschikbare ruimte 102
V.3.2.4 Bodem stabiliteit 102
V.3.2.5 Overstromingsrisico 103
V.3.2.6 Aardbevingsrisico 103
V.3.2.7 Restwarmtelevering mogelijkheden in de buurt 103

V.3.2.8 Beschikbaarheid oppervlaktewater 104
V.3.2.9 Bereikbaarheid (nooddiensten, aanvoer en afvoer van stoffen) 105
V.3.2.10 Geluidszonering 105
V.3.2.11 Natuurgebieden 105
V.3.2.12 Flora en fauna 105
V.3.2.13 Archeologische en cultuurhistorische waarden 106
V.3.2.14 Overig 106
V.3.2.15 Conclusie en aanbeveling 106
V.4 Huidige locatie-opties kernenergie in Nederland 107
V.5 Wat zijn de noodzakelijke ontwikkelingen naar SMR-implementatie 107
V.5.1 Wijzigen bestemmingsplan 107
V.5.2 Stakeholder management 108
V.6 Referenties 109

VI. SMR Roadmap 110
VI.1 Antwoorden op hoofd en deelvragen 115
Technische (on)mogelijkheden van SMRs op Limburgs grondgebied? 115
Welke praktische en fysieke beperkingen dan wel mogelijkheden ... 115
In hoeverre is het technisch haalbaar dat SMR-ontwerpen ... 115
Wat zijn voor Limburg, mede gelet op de uitdagingen qua netcongestie .... 115
Welke SMR-ontwerpen hebben de gunstigste randvoorwaarden ... 115
Wat omtrent de volgende stappen ...? 116

Lijst van Afkortingen en Begrippen 118

Addendum A Studie-opdracht Provincie Limburg 124

Addendum B Samenvatting van enkele bestaande energie- strategiestudies voor Nederland 126

Addendum C Levenscyclusanalyse kernenergie 136

Addendum D Regelgevende context voor SMRs 144

Addendum E Ons Consortium - Experten Team 166

# I. Inleiding

Duurzame energievoorziening is een essentiële noodzaak om onze maatschappij eveneens een duurzame toekomst aan te bieden. Voor warmte of koeling, voor transport, industriële productie alswel dagdagelijks comfort om dan nog niet te spreken omtrent kritische behoeften in onze zekerheid en medische voorzieningen ... overal dient in energie te worden voorzien. De industriële revolutie gedurende de voorbije 150 jaar heeft ons vele voordelen gebracht, doch heeft tevens een onhoudbare ecologische druk op onze omgeving veroorzaakt. De toenemende emissie van "Green-House Gases" (GHG), meestal vereenzelvigd met $CO_2$-emissies, heeft recordhoogtes bereikt en dient heden sterk gereduceerd te worden indien we ons huis, planeet Aarde, wensen te behoeden voor al te catastrofale gevolgen van klimaatveranderingen.

Iedereen in zijn/haar directe omgeving ervaart dat een toenemende elektrificatie één van de voornaamste aanpassingen is mede door het gebruiksgemak, de meestal hogere energetische efficiëntie alsook de vervanging van meer vervuilende technologieën door een lokaal 'propere' energie-voorziening 'vanuit het stopcontact'. Evenwel dient uiteraard de bron voor deze elektriciteit eveneens duurzaam te zijn, i.e.:

- minimaal gebruik van (kritische) natuurlijke bronnen;
- minimale ecologische impact, vertaald in minimale emissies en een beheerste afval oplossing;
- veilig;
- betaalbaar, en
- robuust naar leverings zekerheid en hoge graad van onafhankelijkheid van kritische toeleveringsketens.

De voorbije twintig jaren hebben we een transitie naar meer zogenoemd 'hernieuwbare' energiebronnen gekend, met voornamelijk wind- en zonne-energie als voornaamste bijdrage tot de groei in nieuwe elektriciteits-capaciteit in tal van landen. Dergelijke hernieuwbare energiebronnen zijn meer dan welkom en kunnen zeker bijdragen tot een algemene vermindering van de GHG-emissies vanuit de elektriciteits-sector (zie tevens Addendum C omtrent levenscyclus-analyse van kernenergie en andere energie-technologieën).

Evenwel heeft een, veelal dogmatisch-gedreven, al te voortvarende uitbouw van dergelijke hernieuwbare energiebronnen geleid tot een groeiende uitdaging om hun potentiële voordelen daadwerkelijk werkelijkheid te laten worden. Een al te snelle en/of al te uitgebreide transitie naar dergelijke 'hernieuwbare' energiebronnen leidt immers tot een groeiende impact van hun inherent intermitterende productie, welke een gehele aanpassing van de elektriciteits-netwerk vergt en bovenal tot een sterk groeiende behoefte aan op afroep beschikbaar regelbaar vermogen, essentieel ingezet/uitgebaat als back-up vermogen. Aangezien dit heden meestal geschiedt via fossiel-gestookte elektriciteitscentrales verliezen deze 'hernieuwbare' energiebronnen een groot deel van hun predicaat 'hernieuwbaar'.

Internationaal worden de excessen van dergelijke al te snelle of suboptimale uitbouw van hernieuwbare energiebronnen meer en meer duidelijk en meer recent nog geaccentueerd door de geopolitieke situatie, waar de Europese afhankelijkheid van internationale energie-markten al te meer de uitdagingen voor dergelijke energie-transities naar meer duurzame energie bloot legt.

Nederland en de Provincie Limburg hebben, zoals alle landen, vergelijkbare uitdagingen voor een dergelijke energie-transitie naar meer duurzame energie-voorzieningen welke inderdaad een ontkoppeling realiseert tussen onze socio-economische ontwikkeling en de onhoudbare ecologische impact op onze omgeving.

Een toenemend aantal energie-markt studies duiden op de behoefte aan een meer gestructureerde en gebalanceerde energie-markt visie, essentieel gebaseerd op technische-economische feiten en minder gekleurd door (veelal dogmatische) ideologische wensen. Een evenwichtiger energie-infrastructuur, omvattende generatie, transmissie/distributie en verbruik, mede mogelijk gemaakt door nieuwe (energie-)technologie ontwikkelingen, laat immers toe de doelstelling naar een verregaande decarbonisatie te combineren met een veilige, robuuste en betaalbare energie-voorziening in de toekomst. Enkel indien alle van deze criteria worden behartigd kunnen we over een duurzame energiemix spreken en hebben we onze taak vervuld voor onszelf, onze toekomstige generaties en de medebewoners van ons huis, de Aarde.

De Provinciale Energie Strategie van de Provincie Limburg onderschrijft deze dringende behoefte aan "*een innovatieve en structuurversterkende energietransitie en passende energiemix en infrastructuur voor Limburg op weg naar 2030*" waarbij de studie-opdracht vanwege de Provincie Limburg (zie Addendum A) zich inschrijft in dergelijke wens om de Limburgse energie-transitie aan alle criteria te toetsen en navenant opties voor te stellen welke, indien socio-maatschappelijk aanvaardbaar, deel kunnen uitmaken van dergelijke duurzame energiemix.

# I.1 DE UITDAGINGEN VOOR DE TOEKOMST EN DE ESSENTIËLE ROL VOOR EEN DUURZAME ENERGIEMIX

Europa, Nederland en de Provincie Limburg beleven momenteel een nieuwe fase in de reeds lang gewenste energie-transitie. De recente geo-politieke gebeurtenissen tonen nogmaals het strategische belang van een gedegen energie-politiek aan. De voorbije decennia werd de energietransitie grotendeels getekend door de wens om in toenemende mate onze energie-behoeften te decarboniseren met tevens een groeiende decentralisatie en liberalisatie van dit energie-systeem als bijkomend objectief. Zogenoemd 'hernieuwbare' energie-bronnen werden als het nieuwe normaal naar voor geschoven, waarbij het intermitterend karakter uiteindelijk gecompenseerd dient te worden door een groeiende back-up capaciteit aan voornamelijk fossiele brandstof, in casu veelal gas, verbruikende energieproductie-eenheden.

De systeemkosten, gepaard gaande met dergelijke decentralisatie van productie-eenheden en daar bovenop nog het intermitterende karakter van de veelal zon- en wind-energie bronnen, worden in groeiende mate zichtbaar en in toenemende mate beschouwd als een niet-duurzame aanpak, gezien vanuit voornamelijk de algehele sociaal-economische kosten, welke deze aanpak vergt. Het ontbreken van voldoend grote capaciteit aan flexibele elektriciteits-opslag leidt tot de vraag naar back-up capaciteit, welke finaal de algehele systeemkosten verhoogt, naast nog de noodzaak tot aangepaste netwerk-voorzieningen.

Veelal betrof de voornaamste focus in de energie-transitie de voorziening in elektriciteit gezien de toenemende elektrificatie zowel in residentiële-, transport- alswel industriële sectoren. Doch de gevraagde decarbonisatie van onze algehele energie-behoefte vraagt niet alleen een toenemende elektrificatie, doch tevens een herziening van onze energie-systemen voor warmte-voorziening in industriële processen, warmtenetten in urbanisatie context, alswel het algeheel maximaliseren van energie-efficiëntie met minimalisatie van de restwarmte-lozingen in de omgeving.

Recent wordt voornamelijk Europa (wederom) wakker geschud met betrekking tot het strategisch karakter van een degelijke energievoorziening. De legitieme wens naar een gedecarboniseerde energie-voorziening is niet langer compatibel met een al te doordrongen wens om deze voornamelijk via hernieuwbare energiebronnen te verwezenlijken. De daartoe toenemende afhankelijkheid van gas-import van buiten de EU heeft recent de broosheid geëtaleerd van een dergelijke energietransitie geschoeid op al te veel hernieuwbare energie. De macro-economische impact van een competitieve en robuuste energievoorziening is al te meer duidelijk gezien de toenemende sociaal-economische impact van groeiende energieprijzen voor iedereen en, niet in het minst, tevens de afkalving van het competitief vermogen van gehele industrie-sectoren.

De recente studie van het Internationaal Energie Agentschap "Nuclear Power and Secure Energy Transitions"[i] concludeert dat een effectieve energie-transitie naar een gehele decarbonisatie inderdaad nood heeft aan grootschalige, gedecarboniseerde energie-bronnen vereist, waarvoor kernenergie een belangrijke optie is. Andere opties betreffen immers geothermische- en waterkracht-centrales naast kolen of gas-gestookte elektriciteits-centrales of, in de verre toekomst, kernfusie. De beschikbare resterende opties voor geothermie en waterkracht zijn in Nederland/Limburg veelal geheel afwezig of te beperkt, waar kolen en gas-centrales de decarbonisatie doelstellingen teniet doen.

Vanuit een energie-systeem visie zijn hernieuwbare energiebronnen tevens enigzins beperkend, aangezien uitsluitend productie van elektriciteit wordt beoogd. Echter, de gedecarboniseerde energie-systemen van morgen vragen, naast een toenemende hoeveelheid elektriciteit, tevens de voorziening in warmte voor tal van toepassingen, niet in het minst tevens om de algehele thermodynamische efficiëntie van het gehele energie-systeem te optimaliseren.

Niettemin dient kernenergie zichzelf eveneens zich te positioneren als een krachtige, haalbare en wenselijke energiebron. De goedkoopste decarbonisatie aanpak voor de elektriciteitssector betreft vooreerst het langer openhouden van bestaande kerncentrales, waarbij een maximale, uiteraard veilige, uitbatingsperiode alsook uitbatingsefficiëntie wordt nagestreefd. Daarnaast zijn er duidelijk verbeteringen nodig in de projectaanpak van de bouw van kerncentrales, waar de recentste ervaringen in West-Europa veelal grote onzekerheden qua project-planning en project-budget overschrijdingen laten zien.

i OESO International Energie Agentschap (IEA) "Nuclear Power and Secure Energy Transitions"

# I.2 DE ENERGIE CONTEXT VOOR DE PROVINCIE LIMBURG

De Provincie Limburg vervat in de Provinciale Energie Strategie[i] de inzichten en doelstellingen voor Limburg voor een innovatief energiebeleid naar 2030. Correct wordt geopperd dat dergelijk innovatief energiebeleid een proces is van de komende 10-20 jaar waarbij tevens het belang en de noodzaak van een toekomstbestendige energie-infrastructuur meer en meer centraal staat. Geheel verantwoordelijk wordt correct gerefereerd dat "*Dit betekent dat de energietransitie en de plannen de energie-infrastructuur niet als externe randvoorwaarde kunnen blijven zien, maar juist als cruciaal onderdeel van de planvorming. De balans tussen draagvlak van en voor initiatieven, de (technische en wenselijke) haalbaarheid in de regionale context en de betaalbaarheid om de ambitie en het plan ook te realiseren, zijn allemaal met elkaar verbonden.*"

De recente netcongestie voor de provincies Noord-Brabant en Limburg heeft nogmaals bevestigd dat een dergelijke geïntegreerde aanpak over voldoende lange termijn een noodzaak is om onevenwichtigheden tussen de wens qua energietransitie en de mogelijkheden qua energie-infrastructuur te vermijden. Een Limburgse systeemstudie door CE-Delft[ii] (2018) bevestigt de structurerende rol om een energie-infrastructuur voor de Provincie Limburg te beschouwen als belangrijke ruggengraat welke de uitdagingen van de energietransitie aankan.

Dit is te meer zo vanwege enerzijds de geografische ligging van Limburg, en anderzijds de relatief hoge industrialisatiegraad met één van de grootste chemieclusters van Nederland en Europa binnen het grondgebied. De industrie in Provincie Limburg betekent een bijdrage van zo'n 25% aan het bruto regionaal product, waarbij de industrie het grootste aandeel heeft in het totale energieverbruik (43%, 72,4 PJ per jaar), alsook in de $CO_2$-uitstoot (43,5 % ; 5,18 Mton per jaar) voor de Provincie in 2020. Deze industriële uitstoot van $CO_2$ betekent zo'n 13% van de totale industriële emissies in Nederland waarbij tevens 2 van de 12 industriële bedrijven met gezamenlijk in totaal > 65% van alle $CO_{2\text{-eq.}}$-uitstoot in Nederland in de provincie Limburg gevestigd zijn. Naast dit chemische cluster betekenen de landbouw en voedsel-industrie meer in het noorden van de provincie nog een belangrijke energievraag van 11,8 PJ en zo'n 0,77 Mton $CO_2$-uitstoot per jaar. De grotere Limburgse bedrijven, met recent tevens 12 bedrijven uit de bouwkeramische industrie, hebben sinds 2018 een samenwerking in het Limburgs Energie Akkoord (LEA) met de gezamenlijke bedoeling om een verduurzaming van hun industrie alsook een $CO_2$-uitstoot reductie van 0,7 Mton per jaar tegen 2030 te realiseren. Daarnaast heeft Chemelot als doel om de meest competitieve, veilige en duurzame chemie- en materialensite van West-Europa te zijn tegen 2025 en met een "Strategisch Visie Chemelot 2050" tevens tegen 2050 klimaatneutraal te worden.

De circa 520.000 woningen en 80.000 utiliteitsgebouwen in Limburg vragen zo'n 46,4 PJ per jaar aan energie en deze hebben dus na de industrie de belangrijkste energie-behoefte in Limburg. Transport vraagt om zo'n 32,6 PJ in 2018.

Limburg voorziet binnen het Klimaatakkoord om zo'n 1,2 TWh (Noord- en Midden-Limburg) en 1,1-1,9 TWh (Zuid-Limburg) per jaar aan opwekking van grootschalige (> 15 kWp) duurzame energie te realiseren tegen 2030. In 2020 betrof het opgesteld vermogen aan windenergie zo'n 21,5 MW en zo'n 574 MW aan geregistreerde zonne-energie.

De CE Delft studie van 2018 concludeert dat voor 123 van de 888 buurten in Limburg een warmtenet het meest kosten-optimale alternatief is voor aardgas met nog eens 294 buurten waar een warmtenet de tweede beste keuze betreft. Met warmte als zo'n 50% van de gehele energievraag alsook met de afbouw van Groninger gas en de internationale geopolitieke ontwikkelingen betreffende de beschikbaarheid van betaalbaar gas zijn dergelijke warmtenetten dus een te beschouwen optie. De beschikbare infrastructuur voor gas kan hierbij gebruikt blijven worden indien bijvoorbeeld bijmenging van groengas wordt voorzien of op langere termijn tevens waterstof. Heden is er nog geen kant-en-klare blauwdruk voor de warmtetransitie voor Limburg beschikbaar. Aangezien de gebouwde omgeving zowat evenveel aardgasverbruik voor warmte betekent als de industrie en hierbij zo'n 68% afhankelijk is van dergelijk gas, met de landbouw zelfs 87% afhankelijk van gas, is het duidelijk dat hier aanzienlijke uitdagingen liggen, waar regionale warmtenetten een beduidende waarde kunnen brengen.

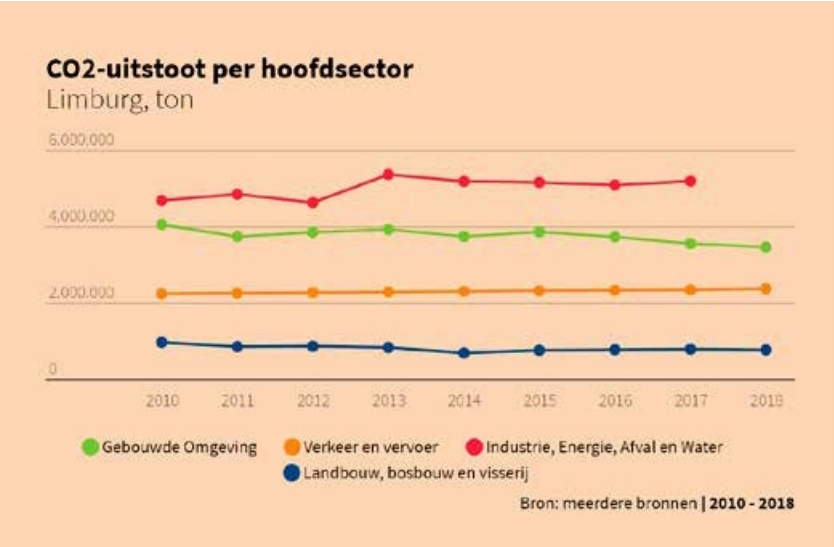
Recente initiatieven betreffende het gebruik van restwarmte van o.a. Chemelot welke hierbij een warmtevoorziening voor zo'n 150.000 woningen kan inbrengen. Ook de toekomstige energiebesparingen op de Chemelot site laten een uitgebreider gebruik van de restwarmte toe, waarbij het overschakelen naar een duurzamere energie- en grondstoffenstroom door Chemelot tevens de verduurzaming van dergelijke restwarmte inhoudt.

Het verleden van de mijnindustrie brengt tevens Limburg de mogelijkheid om de techniek van Mijnwater toe te passen door een koude/warmte oplossing op een laag-temperatuur netwerk uit te bouwen welke voor zo'n 30.000 woningen in de regio Parkstad een duurzame oplossing kan bieden.

i Provincie Limburg, Provinciale Energie Strategie
ii CE Delt, Systeemstudie energie-infrastructuur Limburg

De provinciale Warmtevisie laat tevens toe te concluderen dat:

- *"de potentie van geothermie, geconcentreerd in Noord Limburg, niet voldoende is om het totale gasverbruik van de glastuinbouw af te dekken. Hierbij is nog geen rekening gehouden met door het rijk opgelegde beperkingen met betrekking tot seismische risico's, waarmee een gezond ondernemersperspectief inmiddels vrijwel is weggevallen;*
- *bodemenergie (warmte/koude opslag in de bodem) en zonthermie een potentie hebben, die per saldo grotendeels overeenkomt met de warmtevraag in de gebouwde omgeving. Echter, vraag en aanbod liggen, zeker in geval van bodemthermie, niet altijd bij elkaar. Dat betekent dat deze energiebronnen ook buiten de gebouwde omgeving, zoals in de glastuinbouw, moeten worden toegepast, anders blijven ze onbenut;*
- *industriële restwarmte de grootste potentie heeft van de onderzochte bronnen, met name in Zuid-Limburg;*
- *de potentie van de diverse vormen van aquathermie (thermische energie uit oppervlaktewater, afvalwater en drinkwater) nog niet in kaart is gebracht. In de recent gehonoreerde nationale proeftuin voor aardgasvrije wijken zal in Venlo de wijk Hagerhof-Oost een proefproject starten waarin aquathermie uit de Maas een belangrijke energiebron zal zijn voor duurzame verwarming van de woningen. Op basis van deze ervaringen, evenals op grond van de expertise van het Waterschap Limburg en Waterleidingbedrijf Limburg, kan de toepassing van aquathermie nader verkend worden op verschillende plekken in Limburg."*
    - De mogelijkheden qua biomassa worden tevens niet meer in de domeinen van 'laagwaardige' warmtebenutting voorzien, doch, gezien verschillende technologische ontwikkelingen, meer georiënteerd naar de inzet ervan als hoogwaardige toepassing in chemie, materialen en gezondheid. Aldus voorziet Limburg in:
    - Afbouw inzet (houtige) biomassa voor louter elektriciteitsopwekking, tevens conform de lijn van het SER-advies;
    - Afbouw van biomassa voor lage temperatuurwarmte in de gebouwde omgeving.
    - Terughoudendheid bij gebruik biomassa voor collectieve warmtebron in warmtenetten. De eerste verkenning van de provinciale warmtevisie biedt daarvoor de handvatten;
- De inzet op productie van groengas zal worden versterkt waar dat mogelijk is. Mest, slib, de niet vloeibare fracties uit de voedings- en genotmiddelenindustrie en in mindere mate GFT en grassen zijn geschikte materialen voor vergisting, tenzij deze via genoemde sleuteltechnologieën tot betere verdienmodellen leiden.
- De conclusie luidt dan ook dat de beschikbare duurzame warmtebronnen in de Provincie Limburg niet kunnen voorzien in de totale warmtebehoefte van de provincie, doch een interessante bijdrage kunnen leveren aan lage temperatuur toepassingen in de gebouwde omgeving en de glastuinbouw. De uitbouw van een warmtenet betekent dan ook de noodzakelijke uitbouw van aanzienlijke hoeveelheden aan duurzame warmtebronnen.



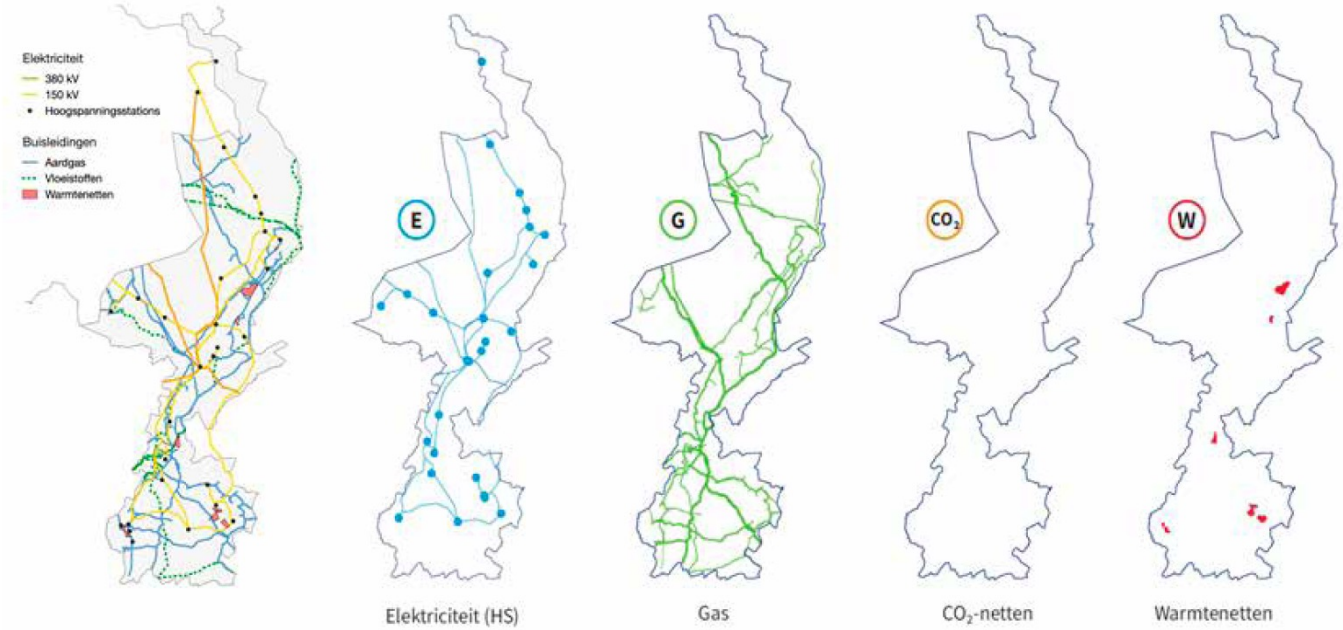

Figuur I.1 Jaarlijkse $CO_2$-uitstoot in Provincie Limburg per hoofdsector gedurende de periode 2010-2018

## I.3 DE UITDAGINGEN VOOR DE PROVINCIE LIMBURG

Het Limburgs Energie Akkoord (LEA) duidde reeds in 2019 aan dat vrijwel alle bedrijven massaal inzetten op een toenemende elektrificatie met een verwachte vervijfvoudiging van elektriciteitsvraag naar 2050 toe. Aanzienlijke knelpunten hierbij betreffen:

- Onvoldoende capaciteit van de huidige elektriciteitsnetten (hoog en laagspanning) voor het voorziene aanbod van vooral zonneparken alsook voor de energievraag van gebouwde omgeving, elektrisch transport en industrie;
    - De beschikbare/beperkte net-aansluitingsmogelijkheden door Tennet welke recent terug een beperking naar nieuwe aansluitingen inhoudt en dit tot wel ca. 2030:
    - De verklaring van schaarste voor aansluitingen door Enexis van nieuwe grootschalige projecten van duurzaam opgewekte elektriciteit was reeds bekend;
    - De door TenneT voorziene 380 kV hoogspanningskabel naar het Chemelot industriële cluster wordt slechts vanaf 2032 verwacht doch recent werd een tijdslijn naar 2028/2029 verwacht;
    - Onvoldoende elektriciteitsproductie en meer specifieke tekort aan vrij regelbaar vermogen;
- Waterstofnet met een eerste voldoende capaciteit wordt vanaf 2028 verwacht naar Noord-Limburg met verdere aansluiting van de industriële cluster Chemelot vanaf ca. 2030;
- Tevens is de uitbouw van warmtenetten door verschillende gemeenten en partners aan aanzienlijke vertraging onderhevig en is de toekomst voornamelijk afhankelijk van politieke en maatschappelijke ontwikkelingen en wensen teneinde de noodzakelijke infrastructuur uit te bouwen;
- Naast tevens nog regionale knelpunten met België en Duitsland, waar beide landen een toenemende vraag hebben naar gegarandeerde elektriciteitslevering, tot welke zij zichzelf niet meer in staat achten. Hierdoor bestaat bij hen de vraag naar exclusieve verbinding van de Maasbracht centrale met hun elektriciteitsnet.

Figuur I.2 Infrastructuur netten in Provincie Limburg (2019)



De CE Delft studie concludeert dan ook geheel correct: "*Om de kosten en tariefstijgingen in de hand te houden zal een verregaande systeemintegratie tussen de verschillende dragers, zoals elektriciteit, waterstof, groen gas, warmte en CO2 moeten plaatsvinden. Zo'n systeemintegratie, onder andere met gebruikmaking van opslagmogelijkheden, moet leiden tot optimalisatie van de maatschappelijke kosten en de doelmatige inzet van middelen.*"

De recente geo-politieke ontwikkelingen hebben deze situatie en nood tot meer systeemintegratie nogmaals versterkt, waarbij tevens volgende lessen meer en meer duidelijk worden:

- Een energiesysteem overmatig gebaseerd op hernieuwbare bronnen is niet haalbaar en onvoldoende robuust om in continue competitieve en verzekerde energie-bevoorrading te voorzien;
- Bovendien leveren dergelijke hernieuwbare bronnen vrijwel uitsluitend elektriciteit en worden belangrijke systeem-integraties met o.a. warmtenetten niet mogelijk;
- Voldoende op afroep beschikbaar en regelbaar vermogen is essentieel, wat voor Provincie Limburg tevens voldoende regionaal beschikbaar regelbaar vermogen betekent gezien de knelpunten betreffende de hoogspannings netaansluiting alsook knelpunten vanuit nabije regio's;

**De Provinciale Energie Strategie (zie tevens de perspectieven in volgende pagina) besloot reeds dat regionaal regelbaar vermogen een noodzaak is om een robuuste energie-transitie in de Provincie Limburg haalbaar en betaalbaar te houden.** De recente geo-politieke ontwikkelingen, resulterend in een toenemende druk op betaalbare beschikbaarheid van voornamelijk gas, alsook nationale ontwikkelingen betreffende netwerk-congestie, hebben deze noodzaak nog groter gemaakt.

Regelbaar vermogen voor elektriciteitsproductie kan finaal in de Provincie Limburg op basis van vier bronnen beschouwd, waarbij finaal er slechts twee in voldoende mate ter beschikking zou kunnen worden gesteld, d.w.z.:

- Kolen waren tot in de jaren 1970 een belangrijke bron voor energie-voorzieningen en elektriciteit, doch het sluiten van de mijnen, alsook de ontoelaatbare $CO_2$-emissie, zelfs met de modernste technologieën, maken deze optie niet aanvaardbaar;
- Gas is heden een voorname bron voor de gas-gestookte centrales en veelal als back-up voorzien voor de hernieuwbare elektriciteitsproductie. Evenwel heeft de recente geschiedenis aangetoond, tevens versterkt door de geo-politieke context, dat een te grote afhankelijkheid van hernieuwbare energie, en daarmee van gas, een duurzame noch robuuste oplossing is;
- Biomassa is heden niet meer te beschouwen voor laagwaardige warmteopwekking, noch voor elektriciteitsproductie. Het Klimaatakkoord, alsook de inherente beperkingen in beschikbaarheid van voldoende biomassa binnen Nederland en meer bepaald de Provincie Limburg, maakt dergelijke biomassa geen gedegen basis voor regelbaar vermogen;
- Kernenergie is een bewezen regelbare vermogensbron voor elektriciteitsopwekking naast tevens, in sommige landen reeds toegepast, voor regionale warmtenetten en waterstofproductie. De optie voor kernenergie was heden nooit beschouwd gezien de socio-politieke context voor kernenergie, alsook de technisch-economische uitdagingen voor grote kerncentrales in de Provincie Limburg. Evenwel worden recent kleinere kerncentrales terug in ontwikkeling geplaatst, welke eventueel een dergelijke oplossing tot regelbaar vermogen aanbrengen.

**De Provincie Limburg vraagt zich daarom af, omtrent deze nieuwe ontwikkelingen in kernenergie, wat deze zouden kunnen betekenen voor de energie-behoeften voor de Provincie Limburg naar de periode 2030 en nadien toe.**

De Limburgse Provinciale Energie Strategie besluit met perspectieven, i.e.:

- Een toekomstige infrastructuur resulterend in een energienetwerk dat robuust en toekomstbestendig is voor de energietransitie richting 2030 en nadien met volgende doelstellingen (KPI =Key Performance Indicators):
    - KPI 1: een vrij regelbaar vermogen van 1,3 – 1,6 GW foor de Limburgse elektriciteitsinfrastructuur uiterlijk in 2030 voor momenten van lage hernieuwbare productie;
    - KPI 2: 2,3 – 3,1 TWh per jaar duurzame opwekking in 2030 voor grootschalige installaties (> 15 kWp);
    - KPI 3: uiterlijk in 2030 op 70% van de geschikte daken voorzien in kleinschalige duurzame energie-opwekking (< 15 kWp);
    - KPI 4: 13.000 laadpalen in uiterlijk 2030 om het verwachte aantal van 130.000 elektrische auto's te kunnen voorzien;
    - KPI 5: het inrichten van een passende overlegstructuur om samen met de betrokken partners de integrale afwegingen te maken op regionale schaalniveau voor de infrastructuur-keuzes richting 2030.

- Ruimte voor innovatie, techniek en vakmanschap
    - Het Limburgse Energiefonds (LEF) investeert mede met kennisinstellingen, ondernemers en overheden in innovaties en technieken voor de energietransitie. Met een pijplijn van 2,7 miljard € staat LEF voor een krachtige economische impuls.
    - Dit vertaalt zich in de volgende doelstellingen, te realiseren in de periode 2020-2030:
        - KPI 6: een CO2-reductie van 2,5 Mton/jaar via LEF-investeringen uiterlijk in 2030;
        - KPI 7: een CO2/N2O reductie van 3,05 Mton door specifiek Chemelot uiterlijk in 2030;
        - KPI 8: een CO2-reductie van 0,7 Mton door de grote Limburgse bedrijven (LEA) uiterlijk in 2030;
        - KPI 9: het realiseren van een werkgelegenheidsimpuls van 10.000 FTE jaren uiterlijk in 2030;
        - KPI 10: het creëren van een kennis-, leer- en toepassingsomgeving voor innovatie en techniek, onderwijs en scholing rondom de energietransitie, waarin "triple helix" partners binnen en buiten Limburg samen werken en nationale en internationale ontwikkelingen duiden voor toepassing in Limburg.

- Kansen voor Limburgse warmte
    - Hierin wordt een passende en duurzame warmte-mix voor de Limburgse gebouwde omgeving in 2030 beoogd met gebruik van restwarmte, aardwarmte en aquathermie.
    - Dit vertaalt zich in de volgende doelstellingen, te realiseren in de periode 2020-2030:
        - KPI 11: door energiebesparing en kleinschalige opwek in de gebouwde omgeving wordt er een CO2-reductie van 25% in 2030 (t.o.v. 2015) in Limburg;
        - KPI 12: het realiseren van 60.000 aardgasvrije woningen of woonequivalenten (20%) in 2030 voor de gebouwde omgeving in Zuid-Limburg;
        - KPI 13: in periode 2021-2023 toewerken naar definitieve besluitvorming rondom de warmtenetten Het Groene Net Zuid, Slim Energienet Roermond en eventueel andere warmtenetten op basis van gedegen businesscases waar meerdere co-financiers bij betrokken zijn De Provincie Limburg ondersteunt de doorgroei van de Mijnwater-techniek binnen Parkstad.
        - KPI 14: een actieve lobby om de randvoorwaarden voor geothermie verder te bevorderen, het invulling geven aan de kansen en randvoorwaarden waaronder biomassa toegepast kan worden en het verkennen van de potenties van aquathermie.
        - KPI 15: het actief inspelen op nieuwe wet- en regelgeving rondom de nieuwe Warmtewet en het verder versterken en uitbouwen van de kennis en expertise op het gebied van warmte en koude binnen Limburg.

- Sociaal en eerlijk door participatie en lokaal profijt
    - Om te werken aan een breder draagvlak voor ontwikkelingen in de energietransitie ligt de sleutel daarbij bij het creëren van lokaal eigenaarschap, hetzij door directe en indirecte participatie (bijv. via uitgifte van eigenaars-certificaten) of vormen van 'lokaal profijt' waarmee ook omwonenden of betrokken gemeenschappen hetzij direct kunnen profiteren of gecompenseerd kunnen worden voor ervaren overlast (een 'profijtplan').
    - Dit vertalen de Provincie Limburg in de volgende doelstellingen te realiseren in de periode 2020-2030:
        - KPI 16: het stimuleren van 50% eigenaarschap in de periode 2020-2030 bij het realiseren van energieprojecten in Limburg en gemeenten maximaal te stimuleren en te ondersteunen zodat zij zelf projecten kunnen opstarten met lokale participatie en lokaal profijt als basisbeginsel;
        - KPI 17: het ondersteunen van energiecoöperaties en initiatieven van onderop waarin inwoners uitgenodigd worden om een bijdrage te leveren aan de energietransitie;
        - KPI 18: het samen met de gemeenten realiseren van een naar tevredenheid werkende infrastructuur van publieke en onafhankelijke informatievoorziening en voorlichting voor Limburgers, maar ook voor instellingen met maatschappelijk vastgoed over de mogelijkheden van participatie in de energietransitie.

- Het goede voorbeeld
    - In dit laatste perspectief geeft de Provincie Limburg als middenbestuur en grote organisatie zelf het goede voorbeeld. Dit kan zij doen door haar rol als inkoper van diensten en leveringen, vergunningverlener en toezichthouder, aandeelhouder en, als mede-overheid, verantwoordelijke voor de fysieke leefomgeving.
    - Dit vertalen de Provincie Limburg in de volgende doelstellingen te realiseren in de periode 2020-2030:
        - KPI 19: de Provincie Limburg realiseert een inhaalslag ten aanzien van de aanpassing van vergunningen met voorschriften voor wettelijk verplichte energiebesparing voor energierelevante vergunningplichtige bedrijven waarvoor wij bevoegd gezag zijn (ongeveer 210), en voeren toezicht en handhaving uit op de implementatie daarvan.
        - KPI 20: wij stimuleren meervoudig en verantwoord ruimtegebruik en energieopwekking in Limburg via onze wettelijke taken (o.a. regionale stortplaatsen) en ruimtelijk instrumentarium (zoek- en uitsluitingsgebieden wind, zonneladder en verplichting zon-op-dak bij logistieke hallen en bedrijfsgebouwen);
        - KPI 21: wij geven invulling aan de verduurzaming van de provinciale gebouwen en duurzame opwek op bijbehorende parkeerplaatsen, evenals duurzame inkoop van producten en diensten;
        - KPI 22: Conform de OV-concessie is met Arriva afgesproken dat in 2026 alle busvervoer met zero emissie elektrisch rijdt.

De hoofdvraag van de studie betreft het "in kaart brengen van de technische mogelijkheden en onmogelijkheden van SMRs op Limburgs grondgebied", met deelvragen luidend:

- "Welke praktische en fysieke beperkingen dan wel mogelijkheden kent de provincie Limburg die bij voorbaat leiden tot het ondersteunen van één specifiek SMR-ontwerp?
- In hoeverre is het technisch haalbaar dat SMR-ontwerpen, naast basislast elektriciteitsproductie, kunnen worden ingezet voor flexibel regelbaar vermogen, productie van waterstof en andere (energetische) toepassingen?
- Wat zijn voor Limburg, mede gelet op de uitdagingen qua netcongestie en het benodigd flexibele vermogen tussen 2030-2050, de meest logische varianten voor het aantal te plaatsen SMRs? Met andere woorden wat past op realistische wijze op Limburgse schaal?
- Welke SMR-ontwerpen hebben de gunstigste randvoorwaarden vanuit het vergunningsperspectief?"

Ons studie-consortium is verder van mening dat het, naast het beantwoorden van bovengenoemde hoofd- en deelvragen, van belang is om volgende verduidelijkingen aan te brengen, vertaald in een studie-aanpak zoals hierna beschreven:

- De keuze voor kernenergie is een strategische keuze, welke integraal deel uitmaakt van een geïntegreerde visie omtrent de energie-infrastructuur en zelfs tot het geheel van wat een regionale infrastructuur visie behelst. Kernenergie vereist een lange-termijn visie, gezien de typische minimale 60+ jaren levensduur van dergelijke kerncentrales en de mogelijkheid om naast elektriciteit tevens warmte aan te leveren voor industriële processen, zoals waterstofproductie, alsook voor de valorisatie van restwarmte via warmtenetten;
- Verduidelijking is benodigd betreffende de zogenoemde kleine modulaire reactoren of SMRs, welke in de recente jaren heel wat aandacht krijgen en veelal als de toekomst worden geprojecteerd. Er zijn verschillende types van dergelijke SMR's, met verschillende technologische en industriële maturiteit en derhalve een mogelijke realisatie in verschillende tijdsperiodes. Tevens laten technologische opties meer of minder niet-elektrische toepassingen van dergelijke SMRs toe en ze kunnen dan ook niet los gezien van de beoogde energie-systemen;
- Gezien de socio-politieke gevoeligheden betreffende kernenergie en meer bepaald omtrent radioactief afval, wensen we tevens de intra-nucleaire synergieën tussen verschillende kernenergie-opties te verduidelijken, zodat tevens een mogelijke tijdslijn voor een geïntegreerd Nederlands nucleair programma met minimalisatie van dergelijk radioactief afval beoogd kan worden;
- De keuze voor kernenergie kan tevens een brede sociaal-technologische-economische impact hebben, gezien de mogelijkheden tot nationale en regionale waarde creatie via hoogtechnologische ontwikkelingen en de daarmee gepaard gaande hoogwaardige werkgelegenheid, zowel tijdens de voorbereiding, realisatie en uitbating alswel op langere termijn de ontmanteling van dergelijke kerncentrales. Tevens is hier een nucleaire infrastructuur te beschouwen, welke tevens voor Nederland en Provincie Limburg toegevoegde waarde in Europa en op internationale schaal kan brengen;
- Tenslotte, de impact op het bruno nationaal en regionaal product van kernenergie is niet te onderschatten, gezien de hoge graad aan energie-onafhankelijkheid en stabiele energie-productiekosten, waarop industrie en de maatschappij als geheel kunnen bouwen, met dus een beduidende bijdrage tot competitiviteit voor gehele industrie-sectoren en de gemeenschap als geheel.

Gezien de noodzaak aan een energie-infrastructuur visie, zoals bepaald door de Regionale Energie Strategie, alsook de tijdslijn benodigd ter realisatie van kernenergie in Limburg en de lange tijdsperiode waarover dergelijke kernenergie operationeel blijft, werd het cruciaal beschouwd om de hoofd en deelvragen dan ook in een dergelijke infrastructuur visie te kaderen. Vandaar dat de studie-aanpak niet niet los kan worden gezien van het grotere plaatje omtrent de (on-)mogelijkheden van kernenergie in Limburg en dus tevens de verschillende kernenergie-opties te reflecteren naar mogelijke infrastructuur projecties met gebruik van toenemende elektrificatie, warmte voor verschillende industriële processen alsook restwarmte voor warmtenetten.

Deze studie resulteert uiteindelijk dan ook in een indicatief routeplan ("Roadmap"), welke de voornaamste mogelijkheden en randvoorwaarden voor kernenergie in Provincie Limburg verduidelijkt, de verschillende kernenergie opties beschrijft en finaal de (on-)mogelijkheden voor kernenergie in Limburg concretiseert met beantwoording van genoemde hoofd- en deelvragen.

## I.4 DE POSITIONERING VAN DEZE STUDIE

De hoofdvraag van de Provincie is het "*In kaart brengen van de technische mogelijkheden en onmogelijkheden van SMR's op Limburgs grondgebied*" (zie Addendum A) en beschrijft de beoogde informatie welke beleids-informerende antwoorden dient aan te reiken aan de Provincie Limburg betreffende de mogelijke rol die markt-compatibele kernenergie, in casu SMRs, voor, door en in de Provincie Limburg kan aanbrengen. De hoofdvraag is nader gepreciseerd in vier deelvragen.

Onze studieaanpak is gebaseerd op onze onafhankelijkheid en ervaring en verzekert voor de Provincie Limburg:

- Een kritische analyse van het markt-potentieel alsook de technologische en regelgevende volwassenheid van dergelijke SMR's. Onze onafhankelijkheid en tevens indirecte betrokkenheid bij vele van de SMR-initiatieven wereldwijd staat toe dat de Provincie Limburg up-to-date informatie omtrent deze SMR's verkrijgt doch zonder de marketing-conditionering welke door specifieke SMR-ontwikkelaars worden aangeboden;
- Tevens behartigen wij het heel belangrijke technologische ontwikkelingspad alswel het industrialisatie pad welke deze SMR's soms nog voor de boeg hebben naar een eerste First-of-a-Kind (FOAK) realisatie alsook hoe dergelijke ontwikkeling te "ont-risken". Het meest kritische element in de nucleaire markt is immers de technologische kwalificatie teneinde een investeerbaar SMR-project te presenteren welke door energie-intensieve bedrijven en/of energiemarkten als voldoende bewezen kan worden beschouwd en die dus een optie wordt voor de nabije toekomst is. Dit bepaalt in heel sterke mate de tijdslijn naar dergelijke SMR-realisatie en dus een belangrijk informatie-element naar de Provincie Limburg toe.
- Dit staat altijd in directe relatie met de regelgeving zowel betreffende de energiemarkt, de implementeerbaarheid van kernenergie op nieuwe sites, alswel de keuze van SMR-technologie en project in dergelijke (evoluerende) regelgeving.
- Tot slot is het heel belangrijk te melden dat de hoofd- en deelvragen tevens dienen beantwoordt met een visie omtrent de toekomstige energie(transitie)-strategie voor de Provincie Limburg en uiteraard in een evoluerend national en internationaal kader. Immers is tevens de tijdsdimensie van cruciaal belang betreffende de marktmaturiteit voor dergelijke SMR's en de te verwachten synergieën tussen dergelijke SMR-opties en de toekomstige energie-vraag. De voornaamste markt voor SMR's bevindt zich immers in dergelijke meer geïntegreerde visie omtrent duurzame energiebehoeftes meer dan voor grote kernreactoren, in de interactie met energie-intensieve en te decarboniseren energiebehoeftes van de grotere industrie. Maar ook in de steeds wijzigende maatschappelijke, e.g. urbanisatie en transport vraag. Bovendien dient dit geheel in een geopolitiek kader te worden gezien, waar een verzekerde competitieve en duurzame energie-bevoorrading juist nu een sterk toenemend en cruciaal gegeven wordt.

Deze studie is echter beperkt in scope en beweegt zich binnen onderstaande begrenzingen:

- De studie beoogt niet een gedetailleerde energiemix-analyse uit te voeren voor het Nederlandse en Limburgse energie-systeem, temeer daar een dergelijke studie momenteel wordt ondernomen door Economische Zaken en Klimaat[i];
- Wij baseren ons voor deze studie op voorgaande studies welke de mogelijke energiemarkt scenario's beschriiven en als representatief kunnen worden beschouwd voor deze studie;
- De studie is **geen** zogenoemde pre-haalbaarheids studie van specifieke kernenergie-opties t.a.v. specifieke sites en/of toepassingen. Aldus kan deze studie niet concluderen omtrent optimale kerncentrale keuzes qua eenheids-grootte en hun respectievelijke financiering-condities;
- Evenwel duidt de studie de voornaamste pistes aan voor verdere analyse, indien door verschillende aandeelhouders hiertoe interesse wordt betuigd en waarbij deze studie de voorbode elementen brengt om een dergelijke pre-haalbaarheids studie te kaderen;
- De studie beoogt **evenmin** een specifieke kerncentrale-optie, d.w.z. een specifiek ontwerp, naar voren te brengen, aangezien heel technisch-economisch overleg omtrent specifieke ontwerpen heden nog niet noodzakelijk en wenselijk werd geacht. Tevens dienen hiertoe reeds meer site-specifieke analyses uitgevoerd te worden, wat tevens heden te voorbarig is.
- Evenwel brengt deze studie een 'short-list' van kerncentrale-types met tevens aanduiding welke specifieke kerncentrale projecten tot deze types behoren en dus kandidaat zijn voor verdere studie of overleg.
- De studie beoogt ook **geen** socio-politieke discussie omtrent de wenselijkheid van kernenergie te behartigen. Evenwel brengt deze studie de verschillende elementen betreffende de te beschouwen kerncentrale-types voor Limburg en hoe deze vele, zoniet alle, argumenten tegen de kernenergie-optie kunnen adresseren.
- De socio-politieke discussie omtrent de wenselijkheid van kernenergie te behartigen. Evenwel brengt deze studie de verschillende elementen betreffende de te beschouwen kerncentrale-types voor Limburg en hoe deze vele, zoniet alle, argumenten tegen kernenergie-optie kunnen adresseren.
- Verschillende aspecten omtrent kernenergie, zoals de levenscyclus analyse alsook de competitiviteit van kernenergie, worden **niet** expliciet in detail uitgewerkt voor de Provincie Limburg, aangezien geen energie-scenario studie werd uitgevoerd. Echter, de lezer kan informatie omtrent deze aspecten vinden in de daartoe informerende addenda aan deze studie.
- Sowieso vergt een dergelijk proces naar een eventueel gebruik van kernenergie een methodologische aanpak conform de Europese richtlijnen betreffende Strategic Environmental Assessment (SEA) als onderdeel van een MER welke voorschrijft dat alle stakeholders betrokken worden in het beslissingsproces.

i Ministerie Economische Zaken en Klimaat, , Staatssecretaris Yeşilgöz-Zegerius gaat toekomstige rol kernenergie onderzoeken, 7 juli 2021

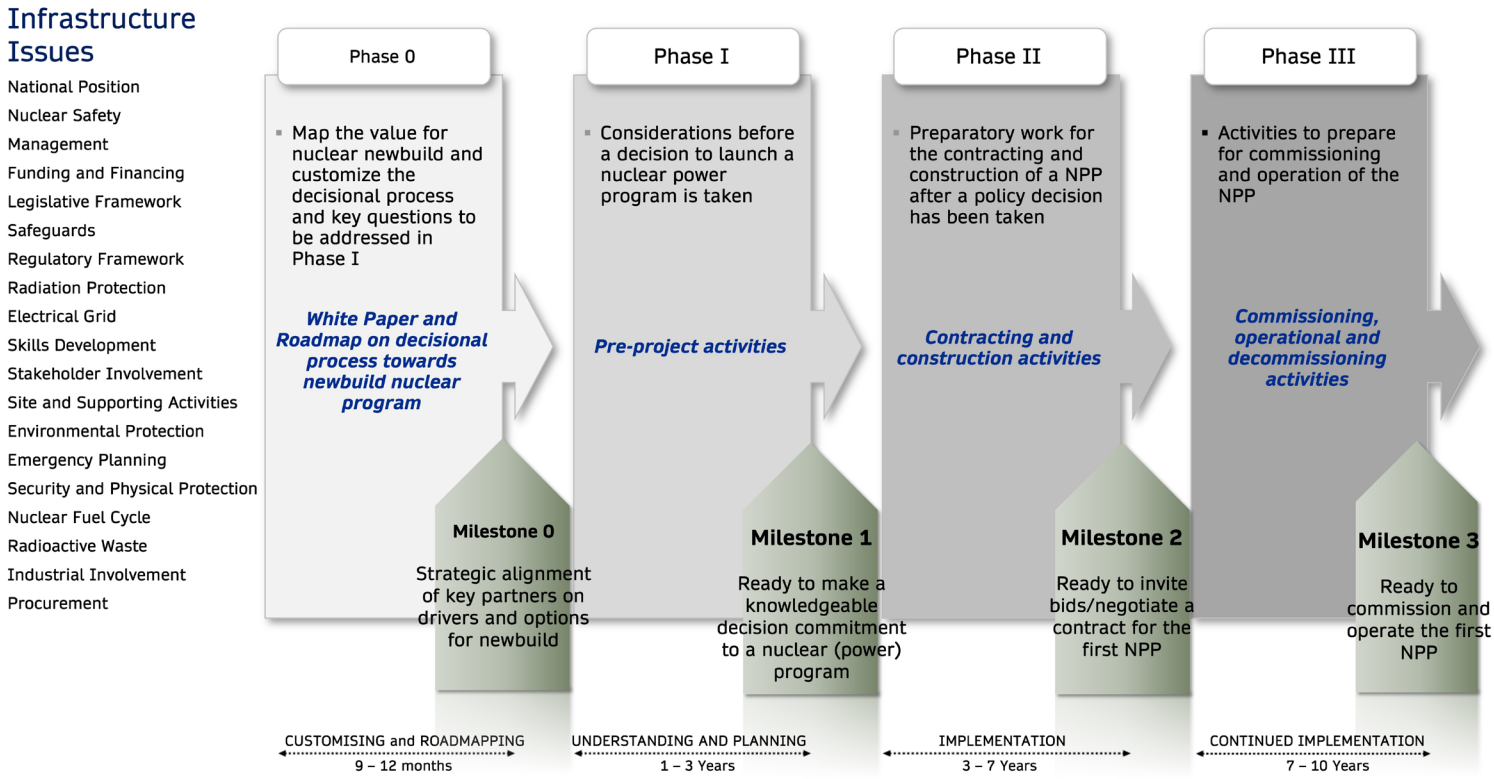
Wij voorzien deze studie aldus als een verkenning naar een "Phase 0" of pre-haalbaarheidsstudie volgens een methodologische aanpak vervat in IAEA's "Milestones Approach" (zie tevens onderstaande figuur I.3) voor een nucleair programma inclusief de nieuwbouw van kerncentrales.

Deze verkennende studie dient te leiden tot een beslissings-informerende, technische basis indien kernenergie wel of niet als een optie te beschouwen is in de toekomstige energiemix, doch waar een "Phase 0" studie de voorgestelde opties uit deze verkennende studie naar technisch-economische alsook socio-maatschappelijke context toetst en detailleert. Enkel na een "Phase 0" kan er een complete analyse voor beslissingsondersteuning worden aangebracht, waarbij tevens scenario's worden gedefinieerd welke, in "Phase I", leiden naar de definitie van het nieuwbouw programma en finaal toelaten om een markt-consultatie met SMR technologie-ontwikkelaars alsook alle andere stakeholders op te starten.

Deze huidige studie voor de Provincie Limburg zal dus enkele van de belangrijke "Infrastructure Issues" analyseren, en meer bepaald :

- "National Position": de nationale alsook de Provinciale positie omtrent energie-strategie en aanvaardbaarheid van kernenergie als optie;
- "Legislative Framework" en "Regulatory Framework": de energiemarkt organisatie en regelgeving alsook de regelgeving en licentie-aanpak voor nucleaire installaties;
- "Electrical Grid" waarbij we in deze studie dit uitbreiden naar "energie-infrastructuur" met dus de vragen omtrent het gehele energie-systeem en de (on)mogelijkheden voor kernenergie en meer bepaald SMRs;
- "Site and Supporting Activities" betreffen de geo-technische en planologische randvoorwaarden;
- "Industrial Involvement" relateren we in deze studie zowel naar de energie-intensieve noden alswel de rol voor Nederlandse/Limburgse industrie in te toeleveringsketen voor kerncentrales/SMRs;
- "Nuclear Fuel Cycle" en "Waste Management" worden in deze studie kort behandeld aangezien deze eventueel een meer specifieke rol hebben voor bepaalde SMR-technologieën doch deze studie blijft geheel beperkt in diepgang daaromtrent.

Figuur I.3 Gefaseerde aanpak volgens IAEA's "Milestones Approach"



## *Welke SMRs kunnen een beduidende waarde brengen voor Provincie Limburg?*

*Wat zijn de markt-mogelijkheden voor SMRs?*

2 3

Geo-technische voorwaarden voor SMRs

1 2

*Welke SMRs hebben meest markt-waarde voor Provincie Limburg ?*

Energie-markt verwachting(en) voor SMRs

Synthetische brandstoffen

Waterstof

Elektriciteit

**Indicatieve SMR-Roadmap**

Tijd

MSR SMRs

FR SMRs

HTGR SMRs

LWR SMRs

Technologische SMR-opties voor Provincie Limburg

*Hoe passen SMRs in de energie-markt regelgeving?*

3 4

Regelgevende context voor SMRs

4

*Welke SMRs hebben gunstigste vergunningen-perspectief ?*

De gehanteerde studie-aanpak is weergegeven in linker schema waar:

- Deze inleiding alswel volgend hoofdstuk II de energie-markt verwachtingen voor kernenergie, in casu SMRs, verduidelijkt in Nederland en meer bepaald de Provincie Limburg;
- Hoofdstuk III beschrijft de technologische opties binnen kernenergie, met een verduidelijking omtrent de SMR-opties ;
- De planologische en geo-technische randvoorwaarden voor kernenergie in de Provincie Limburg zijn het onderwerp van hoofdstuk IV;
- De regelgevende en vergunnings mogelijkheden en uitdagingen voor nieuwbouw kerncentrales en de vereisten om dit in Provincie Limburg te voorzien zijn tevens vervat in hoofdstuk V;
- Een algeheel overzicht van de opties wordt in een indicatieve roadmap of routekaart gegoten in hoofdstuk VI en deze vormt dan ook de essentiële uitkomst van deze studie, integrerend beantwoordende aan de hoofd en deelvragen.

Verschillende addenda alsook informatieve tekstvakken in dit rapport vervolledigen een informatieve functie teneinde de vrij complexe materie in dit rapport bevattelijke te maken alsook om specifieke informatie aan te bieden ondersteunend aan onze studie-uitkomst.

# II. De energie-uitdagingen

Dit hoofdstuk behartigt het eerste niveau van de roadmap betreffende de energie- en infrastructuur politiek welke internationaal en in Nederland en welke tevens het beslissingskader voor de Provincie Limburg mede bepalen. De internationale geo-politiek, de competitiviteit alsook elementen van energie-systeemdenken en de effectiviteit en efficientie m.b.t. decarbonisatie en de potentiele rol voor kernenergie worden in deze sectie besproken. Tevens wordt de evoluerende context van en de doelstellingen voor kernenergie toegelicht.

Deze sectie beschrijft dan ook vrijwel alle elementen welke niet Limburg-specifiek zijn, doch in de evaluatie van de (on-)mogelijkheden voor kernenergie in Limburg in gedachten dienen te worden gehouden.

## II.1 INTERNATIONALE ONTWIKKELINGEN MET IMPACT OP NL'S ENERGIE-STRATEGIE

Onze maatschappij wordt gedreven door een steeds toenemende vraag naar primaire energie, vanwege de continue demografische groei en de algemeen stijgende graad aan welzijn, welke in de meeste groeilanden tevens een stijgende energievraag per eenheid van bruto nationaal product betekent. Elektrificatie is de sterkst groeiende energievraag, welke heden zo'n 20% van de globale finale energievraag uitmaakt. Bijna 80% van de geprojecteerde toename aan elektrificatie is in ontluikende (energie) markten en in ontwikkelingslanden, waarbij China op zichzelf reeds bijna 50% van deze globale toename vertegenwoordigt. In 2021 was de wereldwijde electriciteitsvraag toegenomen met 4.5%, ofwel het equivalent van 1000 TWhe toename in één jaar. Hernieuwbare energie blijft een sterke groei tonen met bijna 3% groei in 2020 voor alle domeinen van dergelijke hernieuwbare energie, waarbij echter de elektriciteits-sector een toename met zo'n 8% kende in de bijdrage van hernieuwbare energie. Hernieuwbare energie wordt verwacht bijna de helft van de netto toename in elektriciteits-vraag 2021 uit te maken, met zonnepanelen en windenergie zowaar twee-derde hiervan.

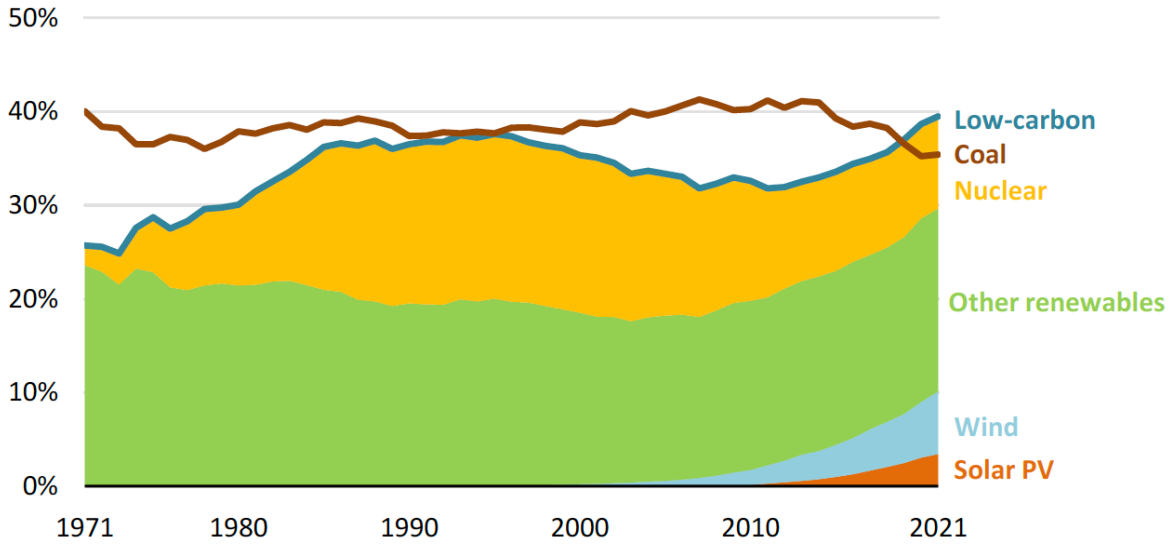
Figuur II.1 geeft een overzicht van de evolutie in elektriciteitsproductie-technologieën sinds de jaren 1970, waarbij sinds 2020 het totaal aan hernieuwbare en kernenergie het geheel aan kolen-gebaseerde elektriciteitsproductie oversteeg. Binnen het segment van hernieuwbare energie nemen heden waterkracht, alsook biomassa (inclusief afvalverbranding) een belangrijk aandeel in, doch de toename in hernieuwbare energie komt voornamelijk van nieuwe zonnepanelen en wind-energie projecten.

Ondanks deze toename in hernieuwbare energieproductie is er heden nog geen equivalente afname in de energie-gerelateerde CO2-emissies te bemerken (zie bijvoorbeeld figuur II.2), temeer daar de toename in zonnepanelen en windenergie tevens een toename vraagt in back-up productie via voornamelijk fossiele brandstof-gedreven elektriciteits-productie.

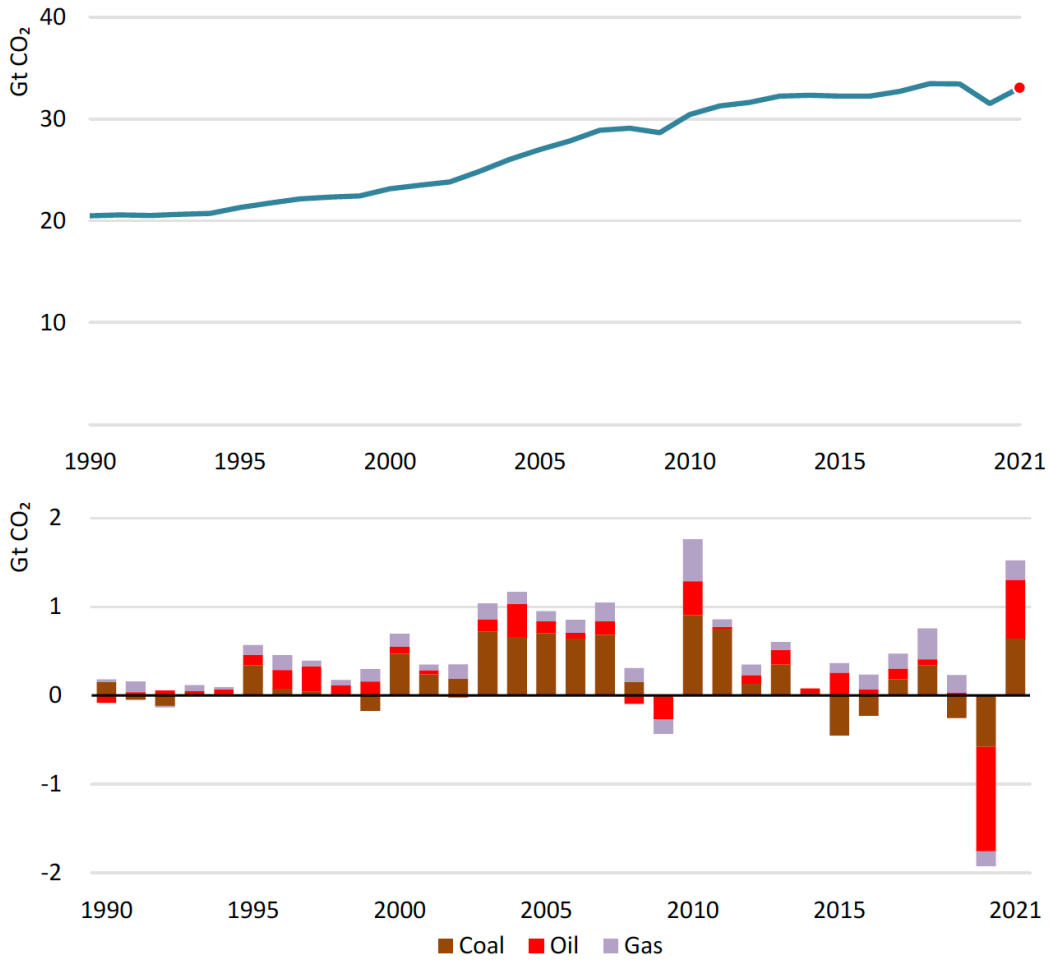
Een recente studie van IEA omtrent de rol welke kernenergie kan spelen in een effectieve decarbonisatie van de energie-sector [1] concludeert:

- Kernenergie kan het traject naar een gedecarboniseerde energie-productie sneller en robuuster maken. Heden is kernenergie reeds de tweede belangrijkste lage-emissie productietechnologie na waterkracht-centrales, doch is de enige energie-productie capaciteit welke schaalbaar blijft met de groeiende vraag aan energie en meer bepaald elektrificatie. De 413 GWe aan kernenergie-capaciteit in 32 landen vermijdt momenteel jaarlijks zo'n 1.5 Gton aan globale CO2-equivalente emissies en tevens 180 miljard m3 aan gas-vraag.
- Kernenergie zal een meer belangrijkere rol spelen in zogenoemde 'Net Zero Emission' scenario naar 2050 toe en dit in algehele complementariteit met hernieuwbare energiebronnen. Een eerste belangrijke en laagste kosten aanpak is hierbij het verzekeren van de continue werking, alsook de verlenging van de bedrijfslevensduur, van de bestaande kerncentrales. Dergelijke centrales kunnen elektriciteit produceren met een gemiddelde kostprijs van minder dan 40 €/MWhe, wat hen extreem competititief maakt en bovenal een directe bijdrage levert tot de decarbonisatie doelstellingen;
- De IEA projecteert een groeiende rol voor kernenergie van momenteel 413 GW capaciteit naar zo'n 812 GWe in 2050 in het zogenoemde 'Net Zero Emission' scenario, wat op zichzelf een 90% aandeel aan hernieuwbare energie beschouwt. Met een beduidend lagere groei aan kernenergie zou de investeringsvraag ten behoeve van op fossiele brandstof gebaseerde elektriciteitsproductie met koolstof opvang en opslag (CCS) zo'n 500 miljard USD meer vragen.

Figuur II.1 IEA's overzicht van elektriciteits-productie technologieën sinds 1970




Figuur II.2 Globale energie-gerelateerde CO2 emissies 1990-2021 en wijziging in CO2-emissies per type brandstof



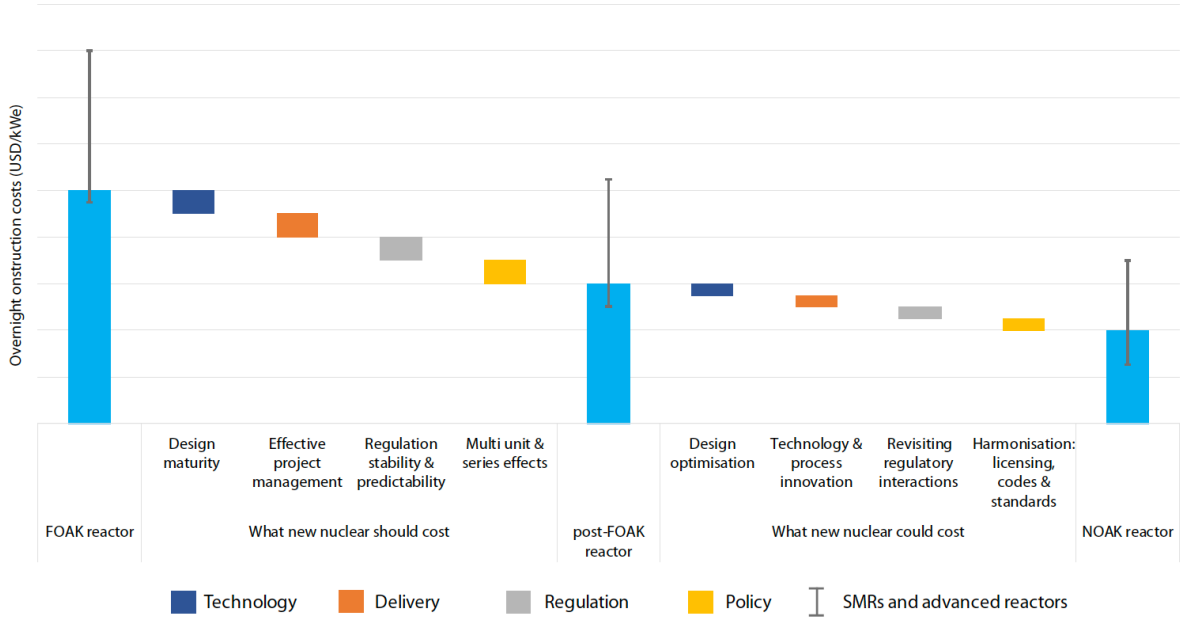
Verschillende landen voorzien een gestaag gebruik en zelfs toename aan kernenergie, aangezien het heden de meest aangewezen optie om de groeiende energiebehoeften op een gedecarboniseerde manier te blijven beantwoorden. Het Verenigd Koninkrijk, Frankrijk, China, India, Polen, Tsjechië, Roemenië, Canada alsook de Russiche Federatie voorzien een verdere uitbouw van kernenergie, waarbij de Verenigde Staten tevens weer wensen aan te sluiten met geavanceerde kerncentrale-ontwerpen. Japan voorziet in een versnelde herstart van de bestaande kerncentrales, terwijl Zuid Korea de uitfaseringsplannen heeft teruggeschroefd.

Desondanks dient kernenergie eveneens op een performante manier doelstellingen te behalen, d.w.z.:

- Bestaande kerncentrales behoren reeds tot de meest competitieve elektriciteitsproductie middelen, doch ook deze bestaande kerncentrales ondervinden de consequenties van de huidige marktregels met een gebrek aan doorrekening van systeem-effecten in de finale elektriciteitsprijs. De huidige prioritering van hernieuwbare elektriciteitsbronnen op de aanbodcurve kan resulteren in negatieve marktprijzen voor elektriciteit, waarbij regelbaar vermogen finaal dient uitgeschakeld te worden met dus aanmerkelijke degradatie van hun competitiviteit. De recente ontwikkelingen betreffende netcongestie, alsook internationale studies leidend tot zogenoemd "value-adjusted levelised costing" [2] van elektriciteit, kunnen deze situatie evenwel wijzigen in de nabije toekomst.
- Voor nieuwe kerncentrales wordt de situatie geheel bepaald door de kwaliteit van het nieuwbouw programma, zowel naar maturiteit van design en kostenschatting, als naar de uitvoering van het nieuwbouw programma. Heel wat budgettaire ontsporingen voor grote, licht-water gekoelde reactoren, in zowel Europa als de Verenigde Staten, hebben hier kernenergie in een slecht daglicht geplaatst. Evenwel zien we een betere performantie in en door China, Russische Federatie en Zuid-Korea voor zowel interne markt- als internationale markt nieuwbouw projecten.
    - De ervaring met Hinkley Point C, met twee EPRs in aanbouw in serie, toont reeds een 30% kosten-reductie voor de tweede EPR door mutualisering van de benodigde constructie-capaciteit en leereffecten. Dergelijke leereffecten en project optimalisatie wordt tevens voorzien in Franrijk voor de bouw van de EPR2's vanaf midden 2030's.
    - Het belang van dergelijke leereffecten in de uitvoering van nieuwbouw kerncentrales is uitvoerig gedocumenteerd in OESO Nuclear Energy Agency's rapport "Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: a practical guide for Stakeholders" [3], samengevat in Figuur III.3.
- Om bestaande en nieuwe energie-markten aan te boren worden sinds een tiental jaren de zogenoemde kleine modulaire reactoren (Small Modular Reactors SMRs) ontwikkeld met het oog op meerdere voordelen, nl.:
    - Een schaalgrootte aangepast aan de verwachte energie-markt behoeften waaronder de vervanging van fossiele brandstof-gestookte elektriciteitscentrales;
    - Een verbeterde economie door een serieproductie in fabricage-faciliteiten in plaats van case-by-case fabricage op de toekomstige site van de kerncentrale zelf;
    - Een bijhorende modulariteit in constructie alsook, door meerdere SMRs te koppelen, een modulariteit in uitbating;
    - En finaal tevens een modulariteit in design welke bevorderend is voor onderhoud en vervanging van kritische elementen tijdens de levensduur alsook tijdens de finale ontmanteling van de kerncentrale.
    - Een uitgebreider overzicht van dergelijke SMRs wordt gegeven in hoofdstuk IV.
- Het beheer van de gebruikte kernsplijtstof en radioactief afval is omderwerp van een socio-politieke bezorgdheid, ondanks dat het huidige beheer als dusdanig geen veiligheidsrisico's inhoudt en, zeker in Nederland, een matuur en performant beheer van dergelijke kernsplijtstof en radioactief afval gegarandeerd is.
    - Dit beheer steunt op de heropwerking en hergebruik van de kernsplijtstof, alsook op een veilige interim opslag van het resterende radioactief afval zodat een verdere geoptimaliseerde eindberging op termijn vereenvoudigd wordt. De voortzetting van huidig beheer-aanpak of zelfs de verbetering ervan met innovatieve kerncentrales, waarvoor kennis in Nederland aanwezig is en wordt versterkt, is een optie welke we kort zullen bespreken in de sectie 'Splijtstofcyclus en radioactief afval beheer'.
    - De focus van deze studie is evenwel niet dergelijke, meer geavanceerde, kerncentrales en splijtstofcycli, doch hun potentieel wordt besproken aangezien de mogelijkheden een belang hebben voor de opties voor nieuwbouw kerncentrales in Nederland en in casu voor dergelijke SMRs.

Een overzicht van de algehele levenscyclus analyse voor kernenergie als gedecarboniseerde energiebron wordt samengevat in Addendum C. Alle in dit rapport aangehaalde kerntechnologieën, in casu SMRs, beantwoorden aan een vergelijkbare performantie qua levenscyclus impact. Eventuele verschillen zullen waar toepasselijk worden verduidelijkt.

Figuur II.3 Kosten voor nieuwbouw kernenergie en mogelijkheden tot kosten-reductie




Note: $kW_e$ = kilowatt electrical capacity.

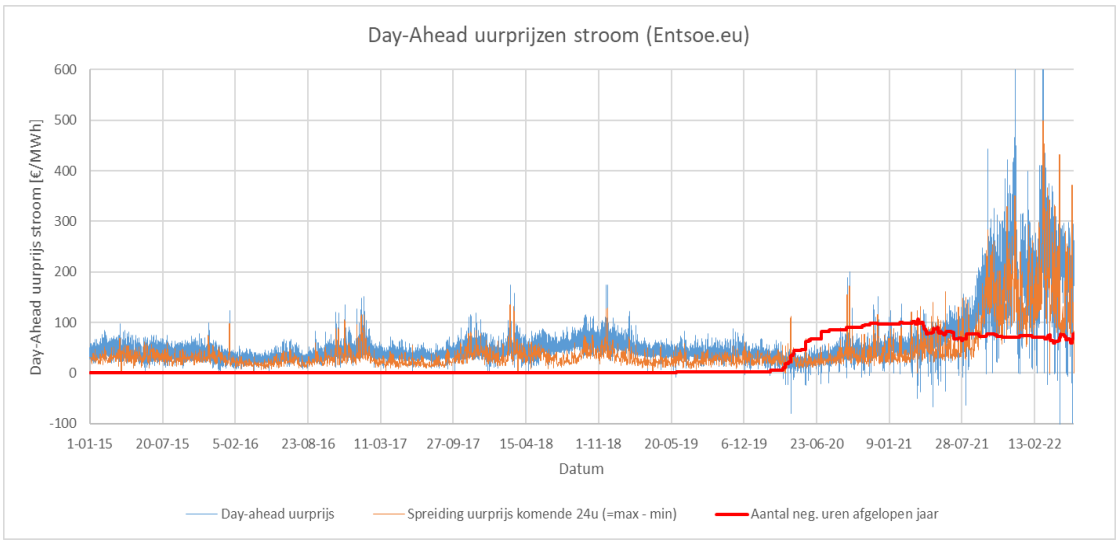
## II.2 ENERGIE-TRANSITIE UITDAGINGEN - ENERGIE-SYSTEEM DENKEN NOODZAKELIJK

De Nederlandse energie-markt ondergaat een snelle transitie naar $CO_2$-vrije/arme bronnen en een zo-snel-als-mogelijke elektrificering op vlak van zowel kracht als warmte opwekking. Hierbij zien we in praktische zin de volgende verschuivingen zich ontwikkelen in de markt en het productiepark:

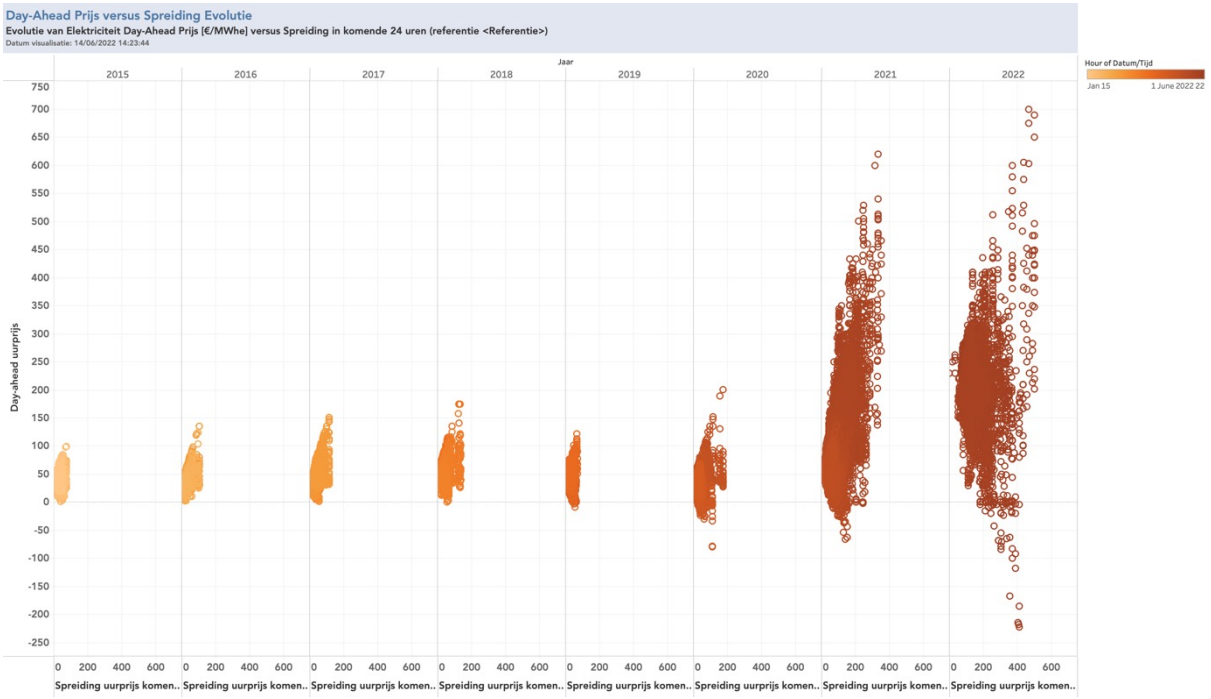
- Opgesteld vermogen wind en zon nemen toe. Als gevolg hiervan nemen variaties in elektriciteitsaanbod toe.
- Vraag om snel regelbare elektrische warmte opwekking (vaak stoom) neemt toe door de volgende marktomstandigheden:
  - Stroom wordt steeds goedkoper ten opzichte van gas
  - De variatie in stroomprijzen wordt steeds groter en sneller
  - Momenten waarop de stroomprijs onder de gasprijs (en zelfs onder nul) duikt worden steeds normaler (voor deze laatste twee punten, zie bijvoorbeeld figuur II.4)
- Bedrijven die $CO_2$ willen besparen kiezen steeds minder voor warmte-kracht koppelingen. Bestaande WKC's gaan steeds meer van het net en/of worden steeds meer uitgekleed (bijvoorbeeld door uitfasering van stoomturbines)
- Steeds meer "stoom sanerings projecten" vinden plaats op chemieparken, waarbij proces efficiëntieslagen gemaakt worden en daarnaast stoomgedreven werktuigen vervangen worden door elektrische. Dit verlaagt naast de $CO_2$-uitstoot van deze parken ook de vraag naar (eventuele emissie vrije) stoom.
- Netcongestie speelt een steeds grotere rol en vormt een steeds grotere rem op elektrificatie.
- Door steeds groeiende hoeveelheid en kwaliteit warmtepompen voor gebouwverwarming verslechtert de businesscase voor warmtenetten onder de huidige commerciële marktmodellen. In deze modellen wordt de warmte geleverd tegen een prijs die gerelateerd is aan de geldende gasprijzen. Een warmtepomp levert warmte fors goedkoper, waardoor voor warmtenetten een nieuw business model nodig is om voldoende klanten te houden.
- De oorlog in Oekraïne drijft nu op korte termijn prijzen op. Steeds meer uitwijking wegbewegen van Russisch aardgas drijft Europese landen richting andere opties, zoals bijvoorbeeld LNG tankers. Bij deze optie liggen de kosten rond de 90 euro/MWh (gas). Als zich in de komende jaren een nieuwe stabiele leveringsketen opbouwt waarmee Europa weg blijft van Russisch gas, zal de basisprijs van aardgas meer rond het niveau van 90 euro/MWh gaan blijven schommelen.
- Naast $CO_2$-uitstoot is ook stikstof uitstoot (NOx) in veel gebieden problematisch. De druk op emissie reductie zal hierdoor vergroot worden. Gezocht wordt nu reeds naar elektrificatie van warmte opwekking, gebruik van elders opgewekte warmte alsmede naar het verkleinen van reeds opgestelde uitstoot.
- Er is (en blijft voorlopig) een groot tekort aan technici om de benodigde netverzwaringen uit te voeren om alle nieuwe aanbod van opwekkers en/of elektrificatie van warmtevraag bij te benen. Instroom op technische opleidingen is momenteel laag en niet duidelijk stijgend. Na instroom in de opleiding duurt het nog jaren voordat iemand op de arbeidsmarkt beschikbaar is.
- De publieke opinie omtrent veiligheid van kernenergie zal in positieve richting kantelen, waarmee de kans toeneemt dat er op meer inlandse locaties (kleine) kerncentrales geplaatst zouden kunnen worden.
- Bijstook van biomassa is - voornamelijk door het met schepen ophalen van biomassa van ver - in een kwader daglicht komen te staan. Veel kleinere biomassacentrales stoken lokaal sloophout en/of lokaal gesnoeid snoeihout. Biomassa kent bij stoken voor elektriciteitsopwekking een laag rendement (typisch 20-30%) terwijl uit gas voor pure e-opwekking circa 60% rendement gehaald wordt. Voor warmte-opwekking ligt het rendement typisch rond de 85% waardoor een biomassa-naar-warmte (met eventueel een kleine component kracht) nog steeds wel veel aardgasverbruik kan verdringen.

Figuren III.4 en III.5 tonen de 'day-ahead' prijzen voor elektriciteit in Nederland sinds 2015 [4]. Vooreerst bemerken we een toenemende prijs-niveau doch tevens, en zelfs belangrijker, een toenemende spreiding van deze elektriciteitsprijzen, met zelfs een aanmerkelijke toename van het aantal momenten met negatieve elektriciteits-prijzen. Figuur III.5 toont dit tevens duidelijker door de elektriciteitsprijzen en hun spreiding per jaar weer te geven met dus sinds 2020 een toenemende 'instabiliteit' van deze elektriciteitsmarkt.

Figuur II.4 Historie Day-Ahead uurprijzen voor elektriciteit in NL




Figuur II.5 Evolutie van day-ahead elektriciteitsprijzen met duidelijk een toenemende spreiding van de prijzen




De oorzaken liggen in de toename aan 'mismatch' tussen het beschikbare regelbaar vermogen welke ter beschikking dient gesteld te worden om het intermitterend karakter van de hernieuwbare energie, welke prioritair wordt behandeld in de aanbodcurve, te compenseren.

Een recente studie van de Universiteit Groningen, "Economic Value of Nuclear Power in Future Energy Systems - Required subsidy in various scenarios regarding future renewable generation and electricity demand" [5], gaat onder andere in op de vraag in hoeverre kernenergie hierbij in het midden latend of the gaat om grote (> 1000MWe) centrales of (mini ) SMRs past binnen elektriciteitsmarkten, die worden gekenmerkt door een hoog aandeel van intermitterende opwekking. In de gehanteerde methode wordt gekeken welke mate van subsidie (hieronder vallen ook de niet aan de eindgebruiker doorberekende (infrastructuur ) uitgaven door de overheid, zoals bijvoorbeeld bij de huidige offshore wind) nodig is voor een niet-negatieve Net Present Value voor de investeerder in een nieuw te bouwen installatie voor electriciteitsproductie (al dan niet nucleair) in een markt met reeds een groot aandeel aan (intermitterende) hernieuwbare electriciteitsbronnen (wind en zon PV). Hun conclusie is dat, onder de huidige marktregels voor 'dispatch', onder bepaalde voorwaarden de keuze voor een nucleaire opwekking als $CO_2$-vrije electriciteitsbron economisch interessanter kan zijn dan verder investeren in wind of zon PV, d.w.z. de benodigde "subsidie" voor nucleair is in dat geval lager dan voor hernieuwbare bronnen. Daarnaast kan nucleair ook een economisch gunstigere manier zijn dan wind en zon PV om de $CO_2$-uitstoot te verminderen (uitgedrukt in kosten per vermeden ton $CO_2$). TNO [6] komt, via het OPERA (Options Portfolio for Emissions Reduction Assessment) model met uitgebreide technisch-economische optimalisatie van het geïntegreerde energiesysteem, tot soortgelijke conclusies. In het bijzonder concludeert de studie dat de totale systeemkosten met meer kernenergie lager zijn dan met minder (of geen).

Uitgebreidere informatie over bovengenoemde studies, en over de bij deze analyses gehanteerde scenario's (tot 2030 en van 2030 tot 2050), is te vinden in Addendum B, "Samenvatting enkele bestaande strategiestudies voor Nederland - de mogelijke impact van nucleaire energie op de kosten van het energiesysteem van Nederland".

## II.3 TOEKOMSTIGE VERANDERINGEN IN ENERGIE SYSTEMEN

De meest zekere verandering in de toekomst lijkt dat flexibiliteit in zowel opwek als consumptie vergroot zal worden. Dit zal deels gerealiseerd worden door sneller regelbaar op- en afregelend opwekkend vermogen en deels door sneller op- en afregelbare vraag (E-opslag, Power to heat, al dan niet in combinatie met warmte opslag, flexibilisering van processen, power to products ($H_2$),…)

Tennet zal de vraag naar netverzwaringen zeker tot 2030 niet bij kunnen benen. Aanvullende wegen zullen gezocht gaan worden om de bestaande netcapaciteit te gaan benutten. Er zal op nieuwe manieren naar de berekende belasting van het net aangekeken gaan worden. Mogelijk ontstaan er verdienmodellen voor "lokaal congestie management" naast de mogelijkheden die er nu al zijn om op land niveau te helpen het net te stabiliseren (day ahead markt, aFRR  automatic Frequency Restoration Reserve, etc.). Te verwachten valt dat met het toenemende opgesteld vermogen duurzaam (hoge piek ten opzichte van gemiddelde last) er meer moeite zal zijn aanvullend leverend vermogen aan te sluiten dan vragend vermogen te accepteren.

In de winter zal al rond 2030 door een lagere hoeveelheid inkomende zonne-energie en een hogere vraag van warmtepompen een sterke vraag naar elektriciteit door gebouwde omgeving zijn ontstaan. Druk om gasbuffers eerder in het jaar tot hoger niveau gevuld te hebben zal de komende jaren hoog blijven.

Op gebied van warmtelevering tot circa 100 °C niveau (o.a. stadswarmte, tuinders, industrie met lage temperatuur vraag) is onduidelijk hoe de situatie zich gaat ontwikkelen. Energetisch is warmte uitkoppeling uit een elektriciteitscentrale tegen een kleine vermindering van de stroomproductie nog altijd energetisch efficiënter dan maximale stroom uit de centrale en daarmee vervolgens warmtepompen voeden. Warmtepompen vormen daarbij een aanvullende last op het elektriciteitsnet. Duidelijk is dat deze verbruikers weg zullen bewegen van gas. Indien een kosten-/marktmodel gevonden wordt waarmee een warmtenet qua variabele kosten concurrerend is met een warmtepomp en/of er ook voor consumenten beperkingen op gaan treden in de hoeveelheid stroom die ze mogen verbruiken (bijvoorbeeld door congestie) kunnen warmtenetten hun plek in het energielandschap houden en/of uitbreiden. Met een nabije toekomst waarin CV ketels uit gefaseerd worden zal "stadswarmte tegen warmtepomp kosten" tegen 2030-2040 het nieuwe normaal kunnen worden.

De beweging weg van kolen in elektriciteitsopwekking zet momenteel door, hoewel de oorlog in Oekraïne er voor zou kunnen zorgen dat een bepaalde mate van "strategische diversiteit" in stand gehouden gaat worden (wellicht zelfs opnieuw opgebouwd) zodat men bij problemen niet meer door 1 aanbieder in problemen gebracht kan worden. Het is mogelijk denkbaar dat indien die filosofie gevolgd wordt in 2030-2050 nog steeds kolen centrales op het net aangesloten blijven waarbij ze (veel) minder draai uren maken dan nu en deels bestaan op een tegemoetkoming voor het beschikbaar zijn in geval van nood. Inzet van extra $CO_2$-vrije kernenergie in plaats hiervan kan economisch gunstig zijn.

Biomassa stoken zal verhoudingsgewijs klein blijven en voornamelijk ingezet om met hulp van lokaal sloop- en snoeihout gebruik van hoogwaardig aardgas voor warmte te verdringen. Toepassingen zullen vooral lokale warmte opwekking worden al dan niet gecombineerd met een fractie elektriciteitsopwekking.

Op chemieparken en raffinaderijen is als eerder omschreven een transitie gaande naar steeds minder warmteverbruik en elektrificatie van werktuigen. Daarnaast blijft in alle industrieën de trend doorzetten om rest- en biologische moleculen nuttig in te zetten doorgaan. Waar industrieparken nu nog snel tot honderden MW's aan warmte vragen zal dit afnemen. De afname zal deels geremd worden door kleiner aanbod van te verbranden reststromen volgend uit steeds beter gebruik van ingaande moleculen voor producten. Het streven nu bij elk chemiepark naar "net zero" zal in/rond 2030 bij de meesten een streven worden om energie in de vorm van restwarmte te gaan exporteren.

## Is een 100% Zon + Wind (+ Geothermie + Waterkracht) energie-mix mogelijk?

In theorie is "alles" mogelijk maar het is de vraag welke offers men wenst te brengen met betrekking tot:

- Noodzakelijke overdimensionering van het geïnstalleerd vermogen en dus ook de bijhorende 'over'-investering in veelal stilstaande productie-eenheden.
    - De lage haalbare belastingsfactor voor heel wat zon en wind productie-eenheden vraagt een over-dimensionering van het aantal eenheden en, voor wind, tevens de geografische spreiding over meerdere duizenden vierkante kilometers teneinde maximale windvang te realiseren.
    - Tevens dient in andere back-up productie-capaciteit voorzien, heden veelal gas-gestookte centrales, om de noodzakelijke basisfuncties voor het elektriciteits-systeem zelf alsook voor kritische energievraag activiteiten te garanderen.
    - Elektriciteits opslag is heden nog onvoldoende in zowel vermogen als energie-opslagcapaciteit om dergelijke intermitterende productie uit te vlakken.
- De energetische balans is onvoldoende positief om het gehele elektriciteitsproductie systeem verder uit te bouwen, d.w.z. de energie geproduceerd over de energie geïnvesteerd is te laag (EROEI < 7 (Energy Demand on Energy Invested)) wat zich zowel vertaalt in een beperkter investerings-rendement (zonder subsidies) en een verspilling van netto energie voor maatschappij en industrie
- Het elektriciteits-grid dient geheel herschaald en her-ontworpen naar intelligente grids (smart grids), teneinde het intermitterend karakter te kunnen beheersen. Deze systeemkosten worden immens bij hoge marktaandelen voor te sterk variabele hernieuwbare energie productie.
- Wind en photovoltaïsche zonne-energie leveren heden enkel elektriciteit als product waarbij de omzetting van elektriciteit naar andere energie-vectoren (bvb waterstof) energetisch minder interessant of niet haalbaar is.
    - Zonne-warmte is hierbij wel een interessante optie zoals in geconcentreerde zonne-warmte centrales (doch slechts in beperkte regio's toepasbaar).
- Het is noodzakelijk dat er back-up en 'emergency' capaciteit beschikbaar is, wat noch wind- noch zonne-energie kan zijn. Deze deze namelijk niet regelbaar en op afroep beschikbaar. Bij het ontbreken van één van deze of beiden, is er vrij snel geen elektriciteits-productie meer mogelijk, zodat o.a. het eigen verbruik van elektriciteits-net niet meer kan worden gedragen en dus de robuustheid en betrouwbaarheid van de gehele energie-productie risicovol wordt
    - Heden wordt dit voorzien door gas-gestookte centrales en gasturbines doch is de investering in dergelijke 'back-up'-capaciteit zonder specifieke overheids-inmenging niet interessant.
- De gevraagde sociale en industriële aanpassingen zijn immens en niet te overzien qua investeringsbehoeftes welke bovendien energetisch niet altijd optimaal zijn qua netto energie-vraag.
- Een effectieve, efficiënte en reële gedecarboniseerde energie-mix(transitie) omvat een case-by-case aangepaste mix van hernieuwbare energie en regelbare gedecarboniseerde energie. Kernenergie is hierbij de meest robuuste optie.
- Tevens vragen dergelijke energie-transities de noodzakelijke tijd om het gehele energie-systeem van productie-transmissie-distributie-verbruik te optimaliseren zonder onnuttige en ongewenste 'excessen'.

## II.4 VERWACHTE TOEKOMSTIGE ENERGIE SYSTEMEN 2030-2040-2050

Op elektriciteitsgebied zal het concept van het net zoals het er nu ligt, in grote lijnen blijven zoals het is, waarbij waarschijnlijk stukken "smart" grid zullen ontstaan in de zin van dat gebruikers en opwekkers, van wie de processen dat toelaten, in een congestie gebied opwek en vraag onderling kunnen balanceren. Dit kan van heel klein (power to heat, auto's die laden op momenten dat het huis van de eigenaar zonne-energie exporteert) tot industrieterrein schaal (bijvoorbeeld koelhuizen die koeling meer aanzetten als het lokale industrie park veel zonnestroom produceert of kortstondig koeling pauzeren als een naburig bedrijf veel vraagt).

Lokale elektriciteitsnetten zoals op grote industrie- en chemie parken zullen meer elektriciteitsverbruik te verwerken krijgen en mogelijk ontstaat als gevolg hiervan vraag naar lokale regelbare ($CO_2$-vrije) opwek al dan niet gecombineerd met warmte uitkoppeling.

Warmtenetten kunnen indien er marktmodellen gevonden worden waarbij de klant "warmte tegen warmtepomp kosten" kan ontvangen succesvol zijn en uitbreiden. Naast dat grote netten aanbod van restwarmte van meerdere aanbieders kansrijk maken (marktwerking) bieden ze door de grote massa water ook mogelijkheid tot absorberen van overschotten duurzame energie (e-boilers).

Als deze modellen niet gevonden worden zal het voortbestaan van warmtenetten voor gebouwde omgeving en tuinders onder druk komen te staan door gebrek aan afnemers. Het wel vinden van deze modellen zal leiden tot een stevige afname van elektriciteitsvraag ten behoeve van lagere temperatuur warmte.

Lokale energie systemen, zoals chemieparken, raffinaderijen, papierindustrie, enzovoorts zullen steeds meer ingericht raken op laag energie verbruik, flexibilisering van elektriciteitsopwekking en consumptie en elektrificatie van de energievraag.

De markt voor overschot-gestuurde productie zal groeien. Op korte termijn zijn "power to heat" en elektrolyse ($H_2$ productie) laaghangend fruit en snelle verwachte stijgers. Richting 2030 en verder zullen meer creatieve mogelijkheden ontwikkeld worden. Opstelling van deze markt gestuurde vraag zal veelal in de buurt van grotere E-opwekkers plaats vinden zodat van dezelfde elektrische infrastructuur gebruik gemaakt kan worden. Voor nieuwbouw opwek (wind, zon, nucleair, …) wordt veel promotie gemaakt in combinatie met duurzame initiatieven als synthetische brandstof, waterstof productie, etc. Deze soorten productie zullen echter altijd in separate entiteiten ondergebracht worden en daardoor markt gestuurd werken. Met andere woorden: Een elektrolyse fabriek naast een nieuwbouw centrale zal -eventuele leveringsverplichting daargelaten- bijvoorbeeld alleen inschakelen op momenten dat de vraag naar stroom (en dus de prijs) voldoende laag is om op dat moment winstgevend waterstof te produceren.

Stroom opslag in batterijen zal vooral gebeuren via "vehicle to grid" (slim laden) en mogelijke groei van thuis batterijen [7]. Grootschalige batterij opslag van elektriciteit (puur voor dat doel geïnstalleerd op industrie schaal) wordt in [8] niet genoemd. Wel zijn inmiddels de eerste groene energie parken uitgerust met MWh schaal batterijen (o.a. Vattenfall/Haringvliet, Greenchoice/Hartelkanaal, Eneco/Giga Buffalo).

# II.5 ENERGIE-BEHOEFTEN

## II.5.1 LIMBURGSE EN NEDERLANDSE ENERGIEVRAAG EN AANBOD

Deze sectie geeft een overzicht van de (verwachte) energievraag (per soort: elektriciteit, industriële warmte, waterstof als energiedrager en feedstock, synthetische brandstoffen en warmte voor residentiële warmtenetten) en -aanbod (Tennet netwerk, gas netwerk en het waterstof netwerk), met nadruk op de Provincie Limburg. Figuur II.6 geeft een overzicht van de onderzochte regio's en vraag-/aanbodgroepen.

### II.5.1.1 Energievraag Chemelot

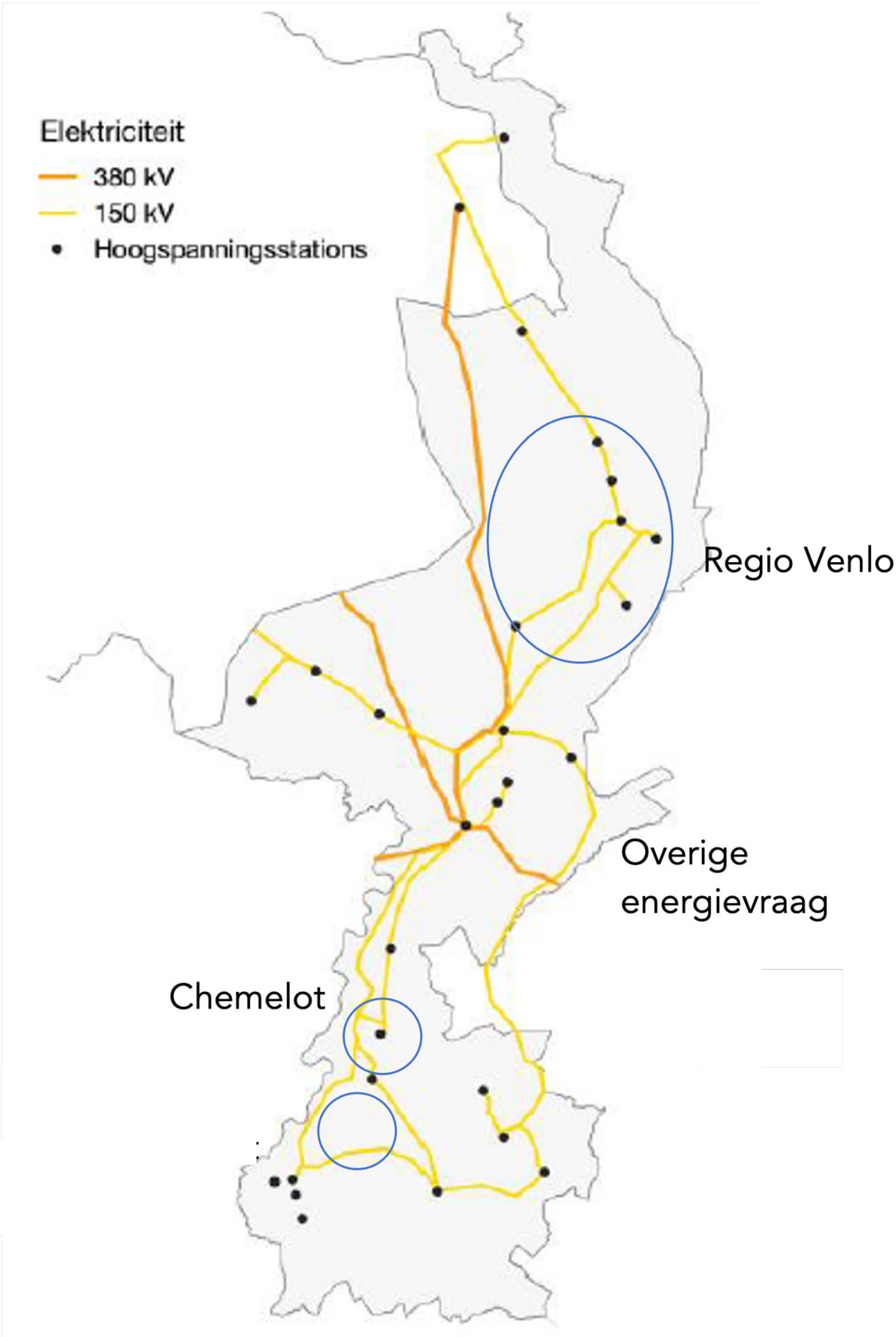
Chemiecluster Chemelot is een van de vijf grote industrieclusters in Nederland. Een groot deel van Limburgs de finale energiebehoefte wordt hier gebruikt (zie figuur II.6). CES 2021 [9] geeft een gedetailleerd beeld van de (intern en extern) gebruikte energie. Zowel voor huidige als 2030 verwachting maar ook de grenzen waar het in 2050 in een klimaatneutraal energiesysteem kan toegroeien. De CES is dan ook leidend in onze data voor Chemelot ook al kan dit op een aantal punten afwijken van de trend in het II3050 rapport voor heel Nederland [7, 10] en CE Delft systeemstudie Limburg [8]. De CES heeft hierin ook nieuwere en specifiekere inzichten voor Chemelot en andere (grote) industrie in Limburg.

De CES Chemelot [11] geeft een analyse weer van de vraag, beschikbaarheid en benodigde ontwikkeling van de infrastructuur voor de chemiecluster Chemelot en de (ETS-)bedrijven aangesloten bij het Limburgs Energie Akkoord (LEA). Deze bedrijven komen samen in de zogenaamde Chemelottafel. De chemiecluster heeft een ambitie uitgesproken om in 2050 $CO_2$-neutraal te zijn en kwantificeert in de CES hoe dat behaald zou kunnen worden en welke infrastructuur daarvoor nodig is.

De kwantificatie is opgesplitst in de verschillende energievormen en producten (elektriciteit, waterstof, (aard)gas, $CO_2$, circulaire grondstoffen en restwarmte) voor Chemelot en de aangesloten LEA op de korte termijn (2020-2030) en de lange termijn tot 2050, aldus:

- "*In de verduurzamingsplannen van Chemelot en de LEA-bedrijven speelt elektrificatie een grote rol. Voor een deel gaat het om bestaande technieken zoals elektrische boilers en vervanging stoomturbines door elektrische aandrijving. Deels gaat het over nieuwe technieken die technologisch en economisch nog verder moeten worden ontwikkeld en opgeschaald, zoals elektrificatie van ovens en fornuizen en plasmatechnologie. In elk scenario is een forse groei van de elektriciteitsbehoefte voorzien. Daarbij behoeft de mogelijke elektrificatie van de kraakfornuizen vanwege de grote impact speciale aandacht.*" De kwantificatie van de elektriciteitsvraag:
  1. "*Uiteindelijk zal de elektriciteitsbehoefte van de Chemelot-site groeien van 250 MW in 2020 naar 700 – 1.700 MW in 2050. De elektriciteitsbehoefte van de LEA-bedrijven zal bij 100% elektrificatie op basis van het aardgasverbruik van 2019 groeien van 106 MW naar 550 – 600 MW in 2050 en bestaan uit een mix van al redelijk concrete technieken en zaken waarvoor nog innovatie nodig is*";
  2. De verwachte additionele capaciteit per processoort is ook ingeschat:
     - Voor de LEA-bedrijven met smelt-, oven- en droogprocessen en hoge-temperatuurprocessen is nog niet duidelijk of elektriciteit op termijn de vereiste procescondities kunnen realiseren. Voor deze processen wordt meer gekeken naar gassen of biomassa;
     - Voor de geschetste elektrificatie is de ombouw van de huidige 150 kV Maasbracht-Graetheide naar een 380 kV verbinding en een nieuw 380 kV-station Graetheide essentieel. Deze ombouw is opgenomen in het Investeringsplan Net op Land 2022-2031 van TenneT als zijnde "in studie" voor een mogelijke realisatie net na 2031 [12]. Hierin wordt eerst nog gekeken naar alternatieven.
- "*Waterstof speelt nu al een substantiële rol als grondstof in de chemische industrie. Ook op de Chemelot site. Waterstof is reeds vanaf het begin van het bestaan van Chemelot een belangrijke bouwsteen voor de productie van ammoniak maar ook als grondstof voor onder andere kunstvezels*". Naar huidige inschatting van Chemelot zal op termijn 50% van de totale waterstofbehoefte vanuit lokale, duurzame productie op Chemelot plaatsvinden. Hierin kijkt men naar blauwe waterstof en mogelijke plasmatechnologie. "*Brightsite, het kenniscentrum voor duurzame chemie op Chemelot, wil duurzame waterstof en etheen uit (bio)methaan maken met behulp van plasmatechnologie op basis van duurzame elektriciteit. Deze technologie creëert de mogelijkheid polyetheen (PE) en polypropeen (PP) zonder broeikasgasemissies te produceren; hierdoor neemt het gebruik van fossiele nafta af*".

Figuur III.6 Onderzochte regio's (zie [2])



- *"De fabrieken op Chemelot gebruiken veel energie waarbij aardgas (methaan) een belangrijke energiedrager is. De huidige aardgasconsumptie bedraagt ca 1.5 miljard $m^3$ per jaar, waarbij het leeuwendeel als grondstof voor de productie van ammoniak wordt gebruikt. Daarnaast wordt aardgas gebruikt voor de productie van warmte, stoom en elektriciteit."*
- *"Het grootste gedeelte van de stoomvraag van de fabrieken op Chemelot wordt opgewekt door de fabrieken zelf met behulp van fornuizen, warmteterugwinning uit processen en stoomproductie door het gebruik van de energie uit exotherme processen. Overtollige stoom van fabrieken kan via het stoomnetwerk van USG worden ingezet bij andere fabrieken. De totale stoomvraag van alle fabrieken op Chemelot is groter dan de totale stoomproductie van fabrieken en USG levert de benodigde stoom om het systeem in balans te houden. De stoom die bij USG wordt opgewekt met een aardgas gestookte warmtekrachtcentrale en de stoomketels van USG. De stoomketels van USG verwerken restgassen van de fabrieken dat wordt aangevuld met aardgas."*
- Daling van de netto stoomvraag van Chemelot is al jaren zichtbaar en de verwachting is dat rond 2030 op Chemelot geen aardgas meer zal worden gebruikt voor de productie van stoom. " Op langere termijn zal ook elektrificatie van fornuizen en reformers op Chemelot leiden tot een verdere reductie van de import van aardgas waarbij Chemelot zelfs de potentie heeft een exporteur van methaan te worden."
- Door elektrificatie bij de LEA-bedrijven zal ook daar het aardgasverbruik dalen. Speciale aandacht verdienen daarin nog wel een aantal hoge temperatuur productieprocessen waarin (aard)gas zowel als brandstof en onmisbare grondstof vormt.
- *"Chemelot zal de fossiele grondstoffen (nafta en aardgas) stapsgewijs vervangen door hernieuwbare (circulaire en biogene) grondstoffen."*
- Chemelot en lokale en regionale overheden hebben de afgelopen jaren geïnvesteerd in het project "Het Groene Net" waarbij restwarmte wordt geleverd aan de woningen in de gemeente Sittard-Geleen. Dit project betreft maar een klein deel van de beschikbare restwarmte, maar door elektrificatie en efficiëntieverbeteringen zal de huidige beschikbare restwarmte in ieder geval met de helft afnemen. Er wordt gekeken om "Het Groene Net" gebied uit te breiden met het gebied naar en inclusief Maastricht waar een potentieel voor 75.000-100.000 woningen en vele bedrijfsgebouwen kunnen worden aangesloten. Voor de technische en infrastructurele haalbaarheid moet nog meer onderzoek gedaan worden.

### Elektriciteits-vraag Chemelot

Door het rapport worden 3 scenario's gepresenteerd "Elek" voor de hoge elektrificatie grens met hoge en snelle overstap naar elektriciteit. "Mol" voor hoog verbruik van moleculen en dan met name waterstof. Dit scenario gebruikt hoofdzakelijk het internationale scenario van II3050 [7] en CE Delft [8] waar de CES [9], RES'en [13, 14] en PES [15] geen Limburg-specifieke inzichten hebben. "Mid" is een gemiddelde van de twee grensscenario's tenzij de trends en beleid nu duidelijk meer naar een van de twee scenario's toe gaan. E.e.a. is samengevat in Tabel II.1.

Tabel II.2 en Figuur II.7 laten de elektrificatie verwachting voor Chemelot vanuit de CES [9] zien. Tot 2030 zullen relatief kleine installatie (gedeeltelijk) overschakelen. Richting 2040 komen daar wat grotere onderdelen bij zoals (gedeeltelijke) elektrificatie van aardgas reformer fornuizen en stoomturbines. Voor het elektrische scenario wordt al een eerste stap in elektrische naftakrakers gezet. Het "Mid" scenario volgt de grafiek van de CES. Voor 2050 wordt tussen de 700 en 1700 MW aan elektrische vermogensvraag verwacht.

### Waterstof-vraag (projectie) Chemelot

De waterstofvraag wordt nu vooral intern geproduceerd vanuit methaan en als bijproduct van chemische processen. Dit zal tot 2030 ook zo blijven, maar zal richting 2050 naar 50% externe waterstof gaan. Het totale waterstof gebruik (Tabel II.1) stijgt iets doordat waterstof wat meer wordt gebruikt als grondstof en in kleine mate voor HT-warmte voorziening. Interne elektrolyse is niet meegenomen in de overweging omdat dit met kernenergie of (offshore) wind energie beter gedaan kan worden.

### Restwarmte-vraag

Chemelot zou op dit moment ongeveer 8 PJ/jaar restwarmte kunnen voorzien aan de omgeving. Met elektrificatie van de interne warmtevoorziening zal dit afnemen met nog maximaal 4 PJ/j in 2050.

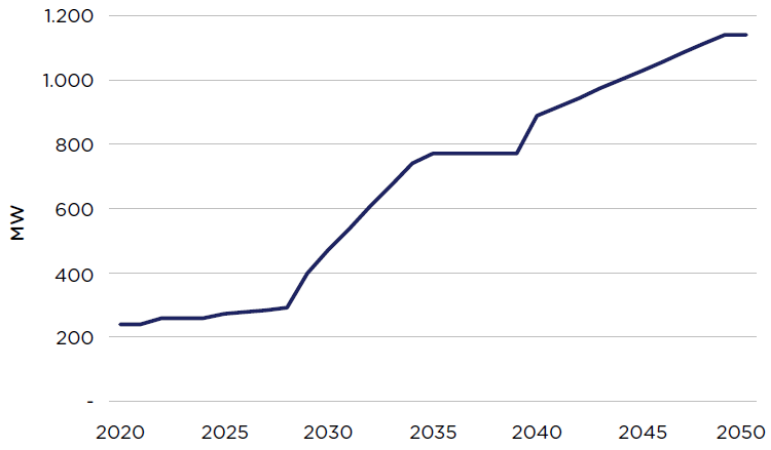
Tabel II.1 Vraagprojectie Chemelot [9].

| | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vraag Chemelot [TWh/j] | 2030 | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Elektriciteit | 3.3 | 9.7 | 6.8 | 5.6 | 14.9 | 10.1 | 6.1 |
| Waterstof totaal gebruik | 8.0 | 8.3 | 8.8 | 9.3 | 8.3 | 9.5 | 10.7 |
| Waterstof externe vraag | 0.0 | 2.3 | 3.2 | 4.2 | 4.2 | 4.8 | 5.3 |
| Restwarmte | -1.7 | -1.2 | -1.3 | -1.4 | -0.7 | -0.9 | -1.1 |

Tabel II.2 Elektrificatieprojecten Chemelot

| Elektrificatieproject | Verwacht benodigd vermogen | Jaartal |
|---|---|---|
| Elektrische stoomketels | Max 40 MWe | 2022 - 2026 |
| Elektrificatie stoomturbines (meerdere projecten) | Max 150 MWe | 2024 - 2035 |
| Warmtepomp projecten (MDR, meerdere projecten) | Max 20 MWe | 2024 - 2035 |
| Elektrificatie kleinschalige fornuizen | Max 20 MWe | 2025 - 2035 |
| Elektrificatie fornuizen aardgas reformers | Max 140 MWe (in stappen 70 MWe) | > 2030 |
| Elektrificatie fornuizen naftakrakers | Max 800 MWe (in stappen 400 MWe) | n.n.b. |
| Elektrolyse van stoom | Startend met 20 MWe | > 2027 |
| Plasma-technologie/plasmakraken | n.n.b. | > 2040 |

Figuur II.7 Geprojecteerde elektriciteitsbehoefte Chemelot [9].




*Elektriciteitsbehoefte Chemelot (incl. vervroegde elektrificatie kraker)*

Tabel II.3 Geprojecteerde energievraag glastuinbouw regio Venlo.

| Regio Venlo (Glastuin) [TWh/j] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2030 | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Elektriciteit | 0.5 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Methaan | 1.3 | 0.7 | 0.9 | 1.1 | 0.0 | 0.5 | 0.9 |
| Restwarmte | 0.3 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 1.2 | 1.0 | 0.8 |

Tabel II.4. Geprojecteerde energievraag Maastricht Aachen Airport

| Verbruik MAA [TWh/j] | 2030 |
|---|---|
| Elektriciteit | 0.011 |
| Warmte | 0.007 |

Tabel II.5. Geprojecteerde energievraag resterende overige industrie

| Vraag Limburg overig industrie [TWh/j] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2030 | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Elektriciteit | 19.6 | 44.2 | 38.1 | 31.9 | 57.6 | 45.5 | 33.3 |
| Waterstof | 7.2 | 8.8 | 12.7 | 16.7 | 16.7 | 21.1 | 25.5 |

Tabel II.6. Geprojecteerde energievraag huishoudens, dienstverlening en overige landbouw.

| Vraag rest Limburg [TWh/j] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Elektriciteit | 6.0 | 8.3 | 8.0 | 7.8 | 8.8 | 8.5 | 8.1 |
| Waterstof | 0.2 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| Restwarmte | 0.5 | 0.9 | 1.6 | 2.2 | 1.3 | 2.6 | 3.9 |

Tabel II.7. Verdeling energievraag t.b.v. mobiliteit/vervoer voor de scenario's van [7]

| | Regionaal | Nationaal | Europees | Internationaal |
|---|---|---|---|---|
| Personenvervoer | 100% elektrisch | 95% elektrisch<br>5% waterstof | 70% elektrisch<br>30% waterstof | 50% elektrisch<br>40% waterstof<br>10% biobrandstoffen |
| Vrachtvervoer | 75% elektrisch<br>15% waterstof<br>10% groengas | 50% waterstof<br>25% elektrisch<br>25% biobrandstoffen | 25% elektrisch<br>25% waterstof<br>25% groengas<br>25% biobrandstoffen | 50% biobrandstoffen<br>25% waterstof<br>25% elektrisch |

Tabel II.8. Geprojecteerde energievraag in de rest van Nederland [7, 18, 19]

| Vraag in rest van NL [TWh/j] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Elektriciteit | 115 | 204 | 203 | 202 | 214 | 226 | 238 |
| Additional E for P2X | 8.0 | 17 | 16 | 8 | 26 | 17 | 8 |
| Waterstof | 2.6 | 33 | 61 | 89 | 137 | 236 | 335 |

### II.5.1.2 Energievraag overige industrie

#### Regio Venlo (glastuinbouw)

De glastuinbouw in de regio Venlo (Tabel III.3) is verantwoordelijk voor ~85% van de Landbouw energievraag in Limburg (7% van totale energievraag Limburg). We nemen aan dat dit aandeel gelijk blijft voor warmte maar elektriciteit zal toenemen naar 90% voor de getallen die CE Delft gevonden [10] heeft. Er is weinig potentieel voor geothermie of restwarmte om de warmtevraag in de glastuinbouw te voorzien. Voor de scenario's van 2040 is een lineaire toename aangenomen tussen 2030 en 2050.

#### Maastricht Aachen Airport

Met 0,45 miljoen passagiers in 2019 is MAA klein vergeleken met Schiphol (71,7 miljoen). Vrachtvervoer is wel veel vergelijkbaarder met Schiphol met 114 kton vergeleken met 1570 kton. Het energieverbruik (excl. kerosine) bestaat grotendeels uit gas voor verwarming, benzine en diesel voor grondvoertuigen en elektriciteit [9]. Als we aannemen dat de voertuigen volledig geëlektrificeerd worden en het huidige elektriciteitsverbruik verdubbelt voor 2030 dan ontstaat de energievraag zoals weergegeven in Tabel II.4 [17].

#### Resterende overige industrie

De rest van de industrie is verdeeld over Limburg met de nadruk op Zuid-Limburg. De CES heeft een inschatting gedaan voor elektriciteits- en waterstofverbruik voor deze groep (Tabel II.5). Keramiek is een belangrijke industrie binnen deze groep en de sommige processen in deze groep zijn moeilijk te elektrificeren. De (grotere) bedrijven zullen van 2030 tot 2050 geleidelijk een waterstof aansluiting krijgen op het landelijke netwerk en zullen daarmee geleidelijk (aangenomen lineair) overstappen van methaan naar waterstof. Voor de processen die geëlektrificeerd kunnen worden is aangenomen dat dit bij 2040 gedaan is.

### II.5.1.3 Energievraag rest van Limburg

#### Huishoudens, dienstverlening en overige landbouw

CE Delft heeft de scenario's van II3050 toegepast op de provincie Limburg [8]. Ook al zijn de scenario's van II3050 [7] consistent, nieuwe inzichten en provincie specifieke situaties kan ertoe leiden dat op provincie niveau de ene sector meer op weg is naar een scenario en een andere sector naar een andere. Voor Limburg is er relatief veel groen gas productie mogelijk en de industrie in Zuid-Limburg maakt veel mogelijk op het gebied van warmtenetten. Daarom richten wij voor de gebouwde omgeving in het scenario Moleculen vooral op het regionaal scenario en voor de Elektrificatie scenario meer op het scenario Nationaal (omdat er dan ook minder restwarmte vanuit de industrie beschikbaar is). Voor 2040 is aangenomen dat elektrificatie d.m.v. (hybride) warmtepompen snel zal gaan. De toename van 2030 tot 2050 in elektriciteitsverbruik zou in 2040 al 75% zijn. Na 2040 zal het met name nog welvaartstoename zorgen voor een hoger elektriciteitsverbruik. De uitbreiding van warmtenetten is aangenomen lineair toe te nemen tussen 2030 en 2050. Overige warmtevoorziening kan nog door gassen verzorgd worden. E.e.a. is weergegeven in Tabel II.6.

#### Mobiliteit

Vanaf 2030 mogen er geen nieuwe brandstofauto's verkocht worden. Samen met de huidige ontwikkeling van elektrische auto's lijken het Nationaal (en Regionaal) II3050 [7] scenario voor personenauto's het meest realistisch te worden (zie Tabel II.7) en hier nemen we aan rond 2040 al op dat niveau te zitten. Voor vrachtvervoer is het wat lastiger te zeggen. Ontwikkelingen van (FC)EV vrachtvervoer zijn nog niet zo ver als voor personenvervoer. De hoeveelheid zal waarschijnlijk niet afnemen omdat de industrie waarschijnlijk ook niet zal afnemen (CES [9]). Hierin focussen we ons dan ook meer op het Nationaal scenario met een lineaire toename tussen 2030 en 2050.

### II.5.1.4 Energievraag rest van Nederland

De geprojecteerde energievraag voor (de rest van) Nederland is weergegeven in Tabel II.8.

#### 2030

Energievraag voor 2030 komt direct uit de KEV [18]. Dit is de meest up-to-date bron voor 2030.

#### Industrie

Voor industrie 2050 gebruiken we het Internationaal (Moleculen) en Nationaal (Elektrificatie) scenario van II3050 [7]. Hierin moet wel rekening worden gehouden dat het Internationaal van II3050 aanneemt dat de industrie 1% per jaar groeit en in het Nationaal scenario de grootte gelijk blijft. Voor de waterstofvraag in 2040 zijn de data van [12] gebruikt.

#### Huishoudens, dienstverlening en landbouw

Voor de hele Nederlandse gebouwde omgeving en landbouw hebben we het Internationaal (Moleculen) en Nationaal (Elektrificatie) scenario van II3050 [7] gebruikt in plaats van de Nationaal en Regionaal, die we voor de Limburgse gebouwde omgeving gebruikt hebben. Dit om in lijn te blijven met de consistentie van de scenario's in II3050 en Limburg daarin echt andere karakteristieken heeft.

#### Mobiliteit

Voor mobiliteit gebruiken we wel alleen het Nationaal scenario net zoals we gedaan hebben voor Limburg omdat de inzichten van nu nog niet verwerkt zijn in II3050. Die inzichten zijn de snelle groei en ontwikkeling in elektrische auto's en het beleid om geen nieuwe brandstof auto's vanaf 2030 toe te laten.

#### Waterstof/Power-to-X

De benodigde elektriciteit voor Power-to-X en dan met name Power-to-Hydrogen is sterk afhankelijk van de geïnstalleerde capaciteit offshore wind. Het beleid was 4 GW elektrolyse in 2030. Met de 2000 draaiuren waar het PBL rekening mee houdt is de jaarlijkse elektriciteitsvraag al hoger dan in het II3050 Internationaal scenario wordt verwacht. Met het toegenomen beleid van 21 GW offshore wind in 2030 werd ook een uitbreiding van de waterstof ambities genoemd naar 8 GW. Dit is dan ook wat we aangenomen hebben voor ons Mid 2040 scenario wat al dicht bij de Elektrificatie scenario route komt. Van 2040 tot 2050 zullen veel gascentrales over gaan schakelen van methaan naar waterstof.

## II.5.2 DUURZAME ENERGIEPRODUCTIE IN LIMBURG

De RES'en Noord-Midden Limburg en Zuid-Limburg [6,7] hebben een voorstel gedaan van mogelijke toename van zone en wind-energie in Limburg richting 2030. Dit komt grotendeels overeen met het KlimaatAkkoord (KA) scenario van CE Delft [8]. Voor 2050 heeft CE Delft ook een inschatting gemaakt waarbij we het Nationale scenario over hebben genomen voor ons Elektrificatie scenario en het Internationale scenario voor ons Moleculen scenario.

### II.5.2.1 ZONNEPANELEN

Voor Zon PV in heel Nederland is de toename van 2030 naar 2050 in het Internationaal (Moleculen) scenario toch nog zo groot dat we hebben aangenomen dat 75% van de toename in de eerste 10 jaar plaats vindt en de rest in de 10 jaar daarna. Voor de hoge zonnepanelen-capaciteit van het Nationaal (Elektrificatie) scenario is de volledige periode tot 2050 wel nodig. Zie Tabel II.9 voor de geprojecteerde energieproductie en Tabel II.10 voor de geprojecteerde capaciteit.

### II.5.2.2 WIND OP LAND

De productie uit wind zal in Limburg een stuk lager zijn dan productie uit zon. Ook al het geïnstalleerd vermogen van 2030 (0.34 GW) snel kunnen groeien tot aan maximaal 0.85 GW in 2050 (CE Delft 2020). Ook hier wordt ingeschat dat bij het Moleculen scenario de capaciteit van 2050 al in 2040 gehaald wordt en bij Elektrificatie dit langer zal duren.

## II.5.3 DUURZAME ENERGIEPRODUCTIE IN DE REST VAN NEDERLAND

Tabel III.11 en III.12 tonen de geprojecteerde productie van duurzame energie, respectievelijk de geprojecteerde capaciteit voor het opwekken van duurzame energie, d.w.z. wind op zee ("offshore wind"), wind op land ("onshore wind"), zon PV op daken en zon PV in zoneparken.

### II.5.3.1 WIND OP ZEE

In Nederland wordt groots ingezet op offshore wind. Recent is er bekend gemaakt de ambities voor 2030 te vergroten van 11.6 GW naar 21 GW. Dit komt al dicht bij de capaciteit in het II3050 Internationaal (Moleculen) scenario [1] en daarom gaan we ervan uit dat voor dit scenario die capaciteit er al in 2040 zal staan. Voor het Elektrificatie scenario wordt de capaciteit wel lineair verhoogd tussen 2030 en 2050.

### II.5.3.2 ZONNEPANELEN

Voor zonnepanelen in heel Nederland is de toename van 2030 naar 2050 in het Internationaal (Moleculen) scenario [7] toch nog zo groot dat we hebben aangenomen dat 75% van de toename in de eerste 10 jaar plaats vindt en de rest in de 10 jaar daarna. Voor de hoge zonnepanelen-capaciteit van het Nationaal (Elektrificatie) scenario is de volledige periode tot 2050 wel nodig.

### II.5.3.3 WIND OP LAND

Wind op land daarentegen neemt in het Internationaal (Moleculen) scenario na 2030 nog amper toe. Voor het Elektrificatie scenario heeft het dan wel weer de hele periode tot 2050 nodig.

Tabel II.9 Geprojecteerde energieproductie zon en wind in Limburg [9].

| Zon en Wind productie Limburg [TWh/] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Zon op dak | 2.1 | 3.5 | 3.2 | 2.8 | 4.9 | 3.9 | 2.8 |
| Zon op land | 1.3 | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 1.9 | 1.6 | 1.3 |
| Wind onshore | 1.0 | 1.8 | 1.5 | 1.3 | 2.5 | 1.9 | 1.3 |

Tabel II.10 Geprojecteerde capaciteit zon en wind in Limburg [9].

| Zon en Wind capaciteit Limburg [GW] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Zon op dak | 1.9 | 3.3 | 3.0 | 2.6 | 4.7 | 3.7 | 2.6 |
| Zon op land | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.9 | 1.7 | 1.5 |
| Wind onshore | 0.34 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.85 | 0.64 | 0.42 |

Tabel II.11 Geprojecteerde energieproductie zon en wind in de rest

| Zon en Wind productie in rest van NL [TWh/y] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Zon | 20 | 51 | 43 | 34 | 82 | 61 | 39 |
| Wind op land | 22 | 32 | 27 | 21 | 43 | 32 | 21 |
| Wind op zee | 91 | 142 | 122 | 103 | 192 | 148 | 103 |

Tabel II.12 Geprojecteerde capaciteit zon en wind in de rest van Nederland [7,9]

| Zon en Wind capaciteit in rest van NL [GW] | 2030 | 2040 | | | 2050 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Elek | Mid | Mol | Elek | Mid | Mol |
| Zon op dak | 21.8 | 28 | 20 | 12 | 44 | 30 | 15 |
| Zon op land | | 34 | 31 | 28 | 56 | 45 | 34 |
| Wind onshore | 9.4 | 14 | 12 | 10 | 19 | 14 | 10 |
| Wind offshore | 21.0 | 37 | 32 | 28 | 52 | 40 | 28 |

## II.6 REFERENTIES


1. IEA 2022., Nuclear Power and Secure Energy Transitions - From today's challenges to tomorrow's clean energy systems.
2. IEA 2020, Projected Costs of Generating Electricity
3. NEA 2020 . Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: a practical guide for Stakeholders.
4. ENTSOE.eu: Day-ahead uurprijzen elektriciteit ENTSO-E Transparency Platform (entsoe.eu).
5. Arjen Veenstra, Xinyu Li en Machiel Mulder, "Economic Value of Nuclear Power in Future Energy Systems - Required subsidy in various scenarios regarding future renewable generation and electricity demand", april 2022.
6. Martin Scheepers, "EEN KLIMAATNEUTRAAL ENERGIESYSTEEM VOOR NEDERLAND NIEUWE VERKENNING TOONT GRENZEN MOGELIJKHEDEN", TNO Whitepaper, april 2022.
7. Gasunie & TenneT (2021) II3050 Het Energiesysteem van de Toekomst
8. CE Delft (2020) Systeemstudie energie-infrastructuur Limburg
9. CES Limburg (2021) Cluster Energie Strategie V3
10. ETM EnergieTransitieModel
11. Chemelot-tafel (2021). "Duurzaam verbonden - Cluster Energie Strategie Chemelot 2030-2050"
12. TenneT (2022), "Ontwerpinvesteringplan Net op land 2022-2031
13. Chemelot tafel (2020) Regioplan cluster Chemelot 2030
14. RES-Zuid-Limburg 1.0 (2020)
15. PES Limburg (2021) Provinciale Energie Strategie deel 2.
16. Driven by Values 2020.
17. Interne communicatie DNV.
18. PBL Klimaat en Energie Verkenning 2021
19. TNO 2022

# III. Kernenergie-opties en uitdagingen

De rol van kernenergie in het verleden, heden en toekomst heeft reeds onderwerp uitgemaakt van tal van historische alswel recente studies welke hier niet herhaald worden. Deze studie behandeld geenszins de socio-politieke aanvaardbaarheid van kernenergie doch wenst op een gedocumenteerde wijze de verschillende uitdagingen, benodigde doelstellingen even voor eventueel gebruik van kernenergie alswel de evoluerende kernenergie-opties te verduidelijken welke sowieso aan de basis liggen van vele, zoniet alle, socio-politieke overwegingen betreffende de rol van kernenergie en de randvoorwaarden voor dergelijk gebruik ervan in een toekomstige energie-mix.

Vooreerst wordt op basis van een levenscyclusanalyse, samengevat in Addendum C, alsook tal van recente studies geconcludeerd dat kernenergie inderdaad een waardevolle optie in een duurzame energiemix kan zijn waarbij voornamelijk de heel beperkte ecologische impact, waaronder de vrijwel gehele decarbonisatie van kernenergie, gecombineerd met een groot regelbaar vermogen capaciteit, tezamen leiden tot een zeer efficiënte bijdrage van kernenergie tot een versnelde decarbonisatie van de energiemix. Uiteraard gaat dit gepaard met uitdagingen en doelstellingen waaraan toekomstige kernenergie blijvend en zelfs nog beter dan nu dient te beantwoorden. Dit hoofdstuk behandelt deze verschillende uitdagingen, doelstellingen alsook de mogelijke oplossingen en meer bepaald het potentieel alsook uitdagingen voor kleine modulaire reactoren (SMRs). Deze laatste worden immers recent als het 'nieuwe paradijs' van kernenergie omschreven doch dit nieuwe paradijs kent vele aspecten welke hierin wensen te verduidelijken met reflectie naar de opties voor Provincie Limburg.

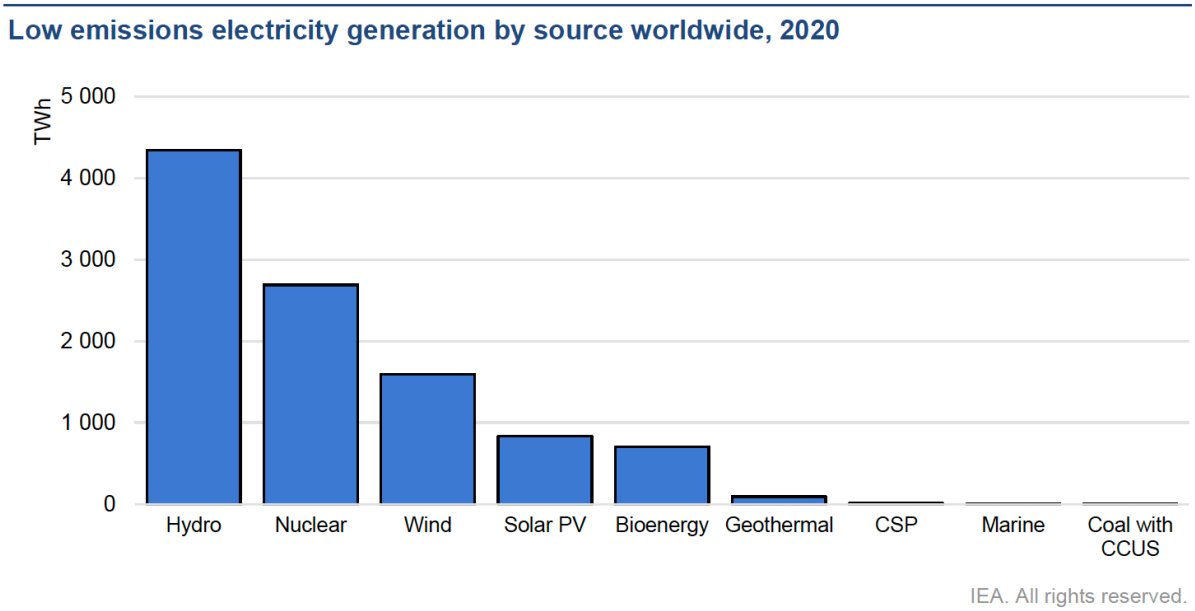
## III.1 UITDAGINGEN EN DOELSTELLINGEN VOOR KERNENERGIE IN ENERGIE-TRANSITIE

Heden ten dage worden voornamelijk de lage-emissies van kernenergie aangehaald als een heel belangrijke motivatie om kernenergie te beschouwen als optie of zelfs als noodzakelijk in elke gedecarboniseerde energiemix. Waar inderdaad kernenergie een heel lage broeikasgasemissie per eenheid geproduceerde energie presenteert (zie Addendum C – Levenscyclus-analyse kernenergie alsook Figuur III.1) brengt kernenergie nog andere heel belangrijke aspecten mee tot dergelijke energiemix, i.e.:

- De heel hoge energiedichtheid van kernsplijtstof (een miljoen maal hoger dan van fossiele brandstof per gram materiaal) brengt tevens een heel beperkte vraag aan splijtstof en dus een zeer grote onafhankelijkheid van eventuele toeleverings-risicos zoals heden in de fossile brandstof wordt gekend. Gezien de vorm van kernsplijtstof is deze tevens eenvoudig op te slaan, zodat een land of energie-bedrijf met een kerncentrale voldoende vrijheidsgraden heeft om dergelijke situaties te anticiperen of geheel te mitigeren;
- Dergelijke heel beperkte vraag aan kernsplijtstof resulteert tevens in een (zeer) lage marginale energie-productiekosten voor kernenergie, doch gecombineerd aan een hogere investeringskosten. De kostenstructuur voor kernenergie is aldus aanmerkelijk verschillend t.o.v. bijvoorbeeld gasgestookte elektriciteitscentrales waar een zeer grote afhankelijkheid van de fossiele brandstofkosten te noteren valt;
- Ondanks tevens een uitdaging zeker vanuit socio-politek perspectief, is de hoeveelheid afval komende van kernenergie zeer beperkt en zijn er mature, wetenschappelijk-technische bewezen en internationale expertise-gebaseerde oplossingen voor dit afval voorzien;
- De competiviteit van kernenergie is heel robuust doch zijn er blijvende uitdagingen in gedereguleerde elektriciteitsmarkten voornamelijk wanneer geen gehele integratie van systeemkosten van een energiemix verrekend worden in de elektriciteits prijszetting mechanismen. Bestaande kerncentrales, zoals Borssele, behoren heden tot de meest competitieve elektriciteits productiemiddelen.

Het is finaal deze combinatie van hoge en robuuste beschikbaarheid gecombineerd met de heel lage broeikasgasemissies welke een unieke positie oplevert voor kernenergie, temeer daar de groei-capaciteit voor kernenergie vrijwel onbeperkt is wat voor bijvoorbeeld waterkracht niet van toepassing is. Tot op heden heeft het gebruik van kernenergie zo'n 66 Gton aan $CO_2$-emissies vermeden waarbij dit, zonder kernenergie, reeds 20% meer $CO_2$-emissies vanwege elektriciteit-gerelateerde activiteiten zou hebben betekend en zo'n 6% voor de gehele energie-gerelateerde emissies.

Figuur III.1 Kernenergie als tweede belangrijkste decarboniserende elektriciteits-generatie in 2020




Note: CSP = concentrating solar power; CCUS = carbon capture, utilisation and storage.
Source: IEA (2021), World Energy Outlook 2021.

Ondanks dergelijke positieve bijdrage van kernenergie kan kernenergie niet op z'n lauweren blijven rusten gezien de nog steeds aanwezige uitdagingen welke de nucleaire sector dient te behartigen, i.e.:

- Vooreerst dient de realisatie van nieuwbouw kerncentrales aanzienlijk geoptimaliseerd te worden met het oog op een verbeterde investeerbaarheid voor kernenergie, nl.:
  - De recente nieuwbouwprojecten in West-Europa en de Verenigde Staten blonken niet uit in budgettaire en tijdsplanning performantie, met ontoelaatbare overschrijdingen in zowel kostprijs als oplevering van dergelijke nieuwbouw. Deze situatie is geheel anders in de Russische Federatie, China, alsook in nieuwbouw projecten in bijvoorbeeld de Verenigde Arabische Emiraten, alsook in het Verenigd Koninkrijk. De continue ervaring met nieuwbouw, grotendeels verloren in de voorheen nucleair leidende landen in EU en VS, betekent een sterke risico-reductie voor dergelijke nieuwbouw. Heden is een dergelijke leercurve wederom actueel in het Hinckley Point project in het Verenigd Koninkrijk, waar de lessen uit Olkiluoto en Flamanville voor EdF de nodige verbeteringen in aanpak opleveren, hetgeen hoopvol stemt met het oog op het grote nieuwbouwprogramma van meer dan 12 EPR2[i] kerncentrales in Frankrijk vanaf 2035. Sectie III.4 gaat dieper in op de risico-reducerende acties, welke een meer performante realisatie van nieuwbouw kerncentrales dient te garanderen;
- Het beheer van de gebruikte splijtstof en radioactief afval van kernenergie, alhoewel heel beperkt qua volumes, blijft een socio-politieke uitdaging naar aanvaarding van kernenergie. Addendum C omtrent de levenscyclusanalyse verwijst nog even naar de kleine hoeveelheden radioactief afval welke resulteren uit kernenergie, doch de levensduur alsook de blijvende onduidelijkheid hoe deze nu finaal te beheren, blijft een continue onzekerheid bij het grote publiek opwekken. Niettemin is er internationale consensus bij een multi-disciplinaire groep van, nucleaire en niet-nucleaire, experts dat mature, wetenschappelijk-technisch ondersteunde oplossingen voorhanden zijn, doch laten wachten op effectieve realisatie. Finland, Zweden alsook Frankrijk zijn heden het verst gevorderd, waar de gebruikte splijtstof en/of het (verglaasd) radioactief afval vanaf 2035 in geologische eindbergings-sites zal worden ondergebracht. Het radiologische risico van dergelijke bergingen blijft heel laag en enkel in hypothetische scenarios, waarbij opzettelijk toegang wordt gezocht tot het radioactief afval, zou een gedeelte van de radioactiviteit een radiotoxisch risico kunnen vormen. Reeds via opwerking en hergebruik van de splijtstof, zoals de huidige praktijk is in Nederland, kan een belangrijke reductie in de hoeveelheid te bergen radioactief afval worden bereikt. Nieuwe kerncentrales, zogenoemd "Generatie-IV" reactoren, kunnen een verdere reductie van ca. een factor 60 – 80 betekenen, waarbij tevens de levensduur van het finale radioactief afval kan worden ingekort. Gesmolten zout reactoren (MSRs) zijn heden een ontwikkeling welke vernieuwde internationale interesse kent en waarbij tevens de nucleaire industrie (waaronder ORANO, ROSATOM en China) een versterkte interesse uit met een groeiend aantal van projecten, welke een demonstratie vanaf ca. 2040 beogen. De industrialisatie van dergelijke geavanceerde kerncentrales, gekoppeld aan een geavanceerde splijtstofcyclus, dient eerder vanaf het midden van deze eeuw geprojecteerd.

i EPR2 is een nieuwe versie van de EPR (European Pressurirised Reactor

- Uiteraard staat de veiligheid van kernenergie nog steeds hoog op de agenda van socio-politieke overwegingen betreffende de aanvaarding van kernenergie. De discussie omtrent aanvaardbare risico's en zeker wat betreft heel lage probabiliteit doch potentieel hoge impact accidenten wordt sterk gekleurd door de verschillen in perceptie en dus weging van dergelijke kernenergie-gerelateerde risicos. De geschiedenis heeft inderdaad geresulteerd in drie nucleaire accidenten doch geheel van verschillende aard, i.e.
    - Three Miles Island was een technisch-economische ramp doch was er geen enkele impact op de directe omgeving, noch ware er fataliteiten te noteren;
    - Chernobyl was inderdaad een nucleaire ramp veroorzaakt door direct toedoen van onaanvaardbare design-fouten alsook de uitbating van de kerncentrale zelf;
    - Fukushima-Daaiichi was naast een technisch-economische ramp tevens gepaard gaande met een ecologische impact met enkele fataliteiten doch te plaatsen in een context waar een veel grotere technisch-economische ramp (aardbeving en tsunami) zich in de directe en ruimere omgeving ontplooide met meer dan 18 000 fataliteiten.
- Niettemin hebben deze rampen, elk op hun eigen manier, geleid tot nieuwe ontwikkelingen en voornamelijk versterkte regelgeving en design-wijzigingen en uitbatings-aanpak welke heden reeds een nog betere veiligheidsgraad garandeert zowel voor grote als kleine kerncentrales.
    - De kleinere SMRs kunnen hierbij tevens eenvoudiger deze hoge vereisten aan veiligheids-eisen behartigen door enkele simplificaties omwille van kleiner vermogen en verminderde complexiteit van de kerncentrales. Addendum D behandelt in meer detail deze aspecten.

Een geïntegreerd beeld omtrent de toekomsopties voor kernenergie is in figuur III.2 en dit volgens twee belangrijke dimensies waarop kernenergie in ontwikkelingen is naar toenemende performantie en duurzaamheid, i.e.:

- De horizontale as geeft de energie-markten weer waar kernenergie een duurzame aanbod kan en mogelijkerwijs dient aan te bieden, i.e. van de huidige elektriciteitsmarkten naar meer en meer (hogere temperatuur )warmte-markten, waar restwarmte en procewarmte reeds tot de mogelijkheden behoren toch nog onderbenut zijn;
- De verticale as betreft een intra-nucleaire ontwikkeling waarbij vanaf de meestal huidige splijtstofcyclus met directe geologische berging van gebruikte splijtstof, eerst een mono-recyclage van plutonium (Pu) en opgewerkt uranium (REPU) wordt gerealiseerd (zoals heden in Nederland toegepast), en vervolgens wordt overgestapt naar meer geavanceerde splijtstofcycli met minimalisatie van de hoeveelheid natuurlijk uranium welke benodigd is alswel een reductie in de hoeveelheid en mogelijks levensduur van het (hoog) radioactief afval.

Huidige licht-water reactoren (LWR) (zowat 94% van huidige kerncentrale park wereldwijd) alsook zwaar-water reactoren (PHWR/CANDU) maken gebruik van natuurlijk uranium welke wordt omgewerkt naar splijtstof. Voor LWRs vraagt dit de verrijking van het natuurlijk uranium naar een uranium-products met 3,5 tot 5% $^{235}$U-isotoop (uitgaande van 0,712% $^{235}$U in natuurlijk uranium) en dit wordt o.a. bij URENCO in Nederland uitgevoerd. In het merendeel van de landen wordt de gebruikte splijtstof, na zo'n 4 tot 5 jaar bestraling in de kerncentrale, ontladen en na een afkoelingsperiode overgebracht naar een interim opslag, totdat deze splijtstof als afval wordt beschouwd voor directe eindberging of, zoals in Nederland, alsook in enkele belangrijke nucleaire landen zoals Frankrijk, wordt opgewerkt met afscheiding van het PU (Plutonium) en het REPU ("reprocessed" Uranium) voor hergebruik, resulterend in hoog radioactief verglaasd afval, welke vervolgens tijdelijk wordt opgeslagen, totdat een geologische eindbergingsfaciliteit is gerealiseerd. Dergelijke 'Opwerking en éénmalige recyclage' laat reeds toe om zo'n 20% minder natuurlijk uranium te gebruiken, alsook om de hoeveelheid hoogradioactief afval met zo'n factor 10 te verkleinen. Doch er dient tevens aandacht gegeven te worden aan de resterende gebruikte MOX en REPU-OX splijtstof, welke meer radioactief is en heden nog niet systematisch wordt opgewerkt en gerecycleerd.

Sinds de 60-jaren werden meer geavanceerde kerncentrales ontwikkeld, welke bekend staan als snelle-neutronen kerncentrales (Fast Reactor FR) en welke een meervoudige recyclage van dergelijke Pu toelaten, alsook het verarmd uranium, komende van de verrijking en in grote hoeveelheden ter beschikking, kunnen gebruiken als vrijwel onuitputbare splijtstof voor de komende millennia. Tevens opereren deze FRs op hogere temperaturen (doch als dusdanig niet voor specifieke proceswarmte toepassingen gebruikt) en zijn bepaalde gasgekoelde versies van deze FRs in staat om zeer hoge temperaturen van 600 - 750 °C te produceren, wat in de toekomst heel wat hoge-temperatuur processen zou kunnen voeden. Frankrijk, de Russische Federatie, Japan, China, het Verenigd Koninkrijk, de Verenigde Staten en India hebben dergelijke FRs ontwikkeld, waarbij heden enkel de Russiche Federatie , China en India nog een operationeel FR-programma hebben. In het verleden was ook Nederland betrokken in dergelijke FR-ontwikkeling via het het KALKAR-project. In deze categorie van kerncentrales wordt heden tevens onderzoek verricht naar metaal, waaronder lood, gekoelde ontwerpen.

Andere types van kerncentrales betreffen de hoge-temperatuur gasgekoelde reactoren of HTGRs welke op dus hogere temperatuur werken en tevens Pu-opbrand kunnen verwezenlijken. Heden is voornamelijk China de leider in deze ontwikkelingen, naast de Verenigde Staten, doch heeft Nederland ook hier een verleden alsook kennis opgebouwd in het kader van het Duitse en Zuid-Afrikaanse HTGR programma.

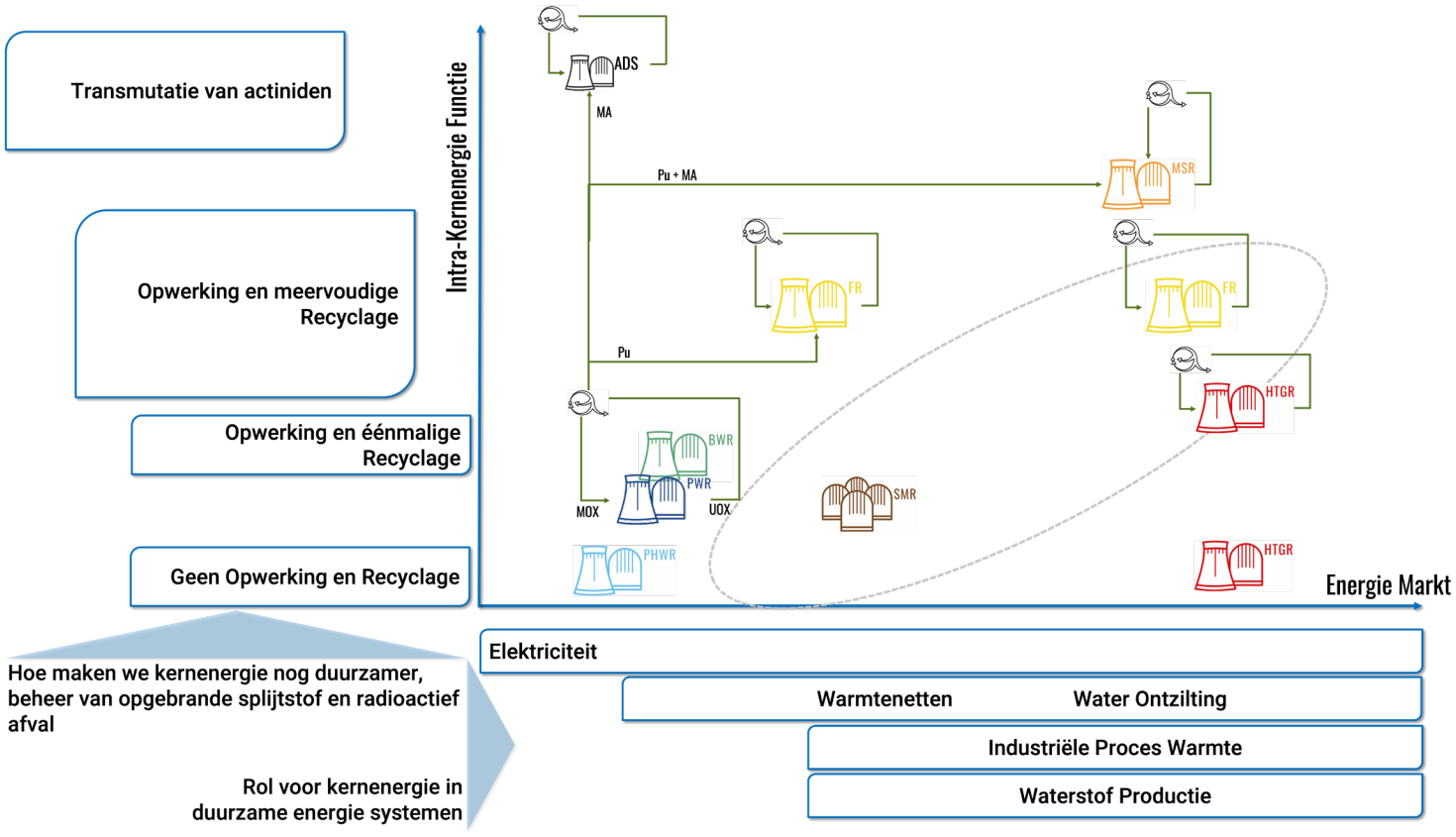
Met oog op minimalisatie van zowel natuurlijk uranium-behoefte als reductie van de hoeveelheid radioactief afval werd tijdens de jaren 1990 tot heden uitgebreid onderzoek uitgevoerd naar heel specifieke actiniden-verbranders en meer bepaald versneller-gedreven systemen (Accelerator Driven System ADS), welke de resterende actiniden,na een meervoudige opwerking en recyclage, vanuit andere kerncentrales verder zouden opbranden. Deze ADS-optie is door vrijwel alle toenmalige organisaties die het hebben onderzocht als niet-optimaal en niet industrieel haalbaar geacht en heden is België ongeveer het enige land welke nog een activiteit in dit domein nastreeft.

De essentiële complexiteit voor dergelijke ADS is voornamelijk de noodzaak om zeer radioactieve nucleaire materialen meermaals te recycleren en dus eerst te fabriceren, wat een schier onmogelijke industrialisatie vereist. Dit terwijl er andere opties zijn, welke reeds midden vorige eeuw werden ontwikkeld en heden via meer innovatieve ontwerpen en ontwikkelingen in materialen en radiochemie wederom tot de interessante mogelijkheden voor de toekomst behoren. Dit betreft de gesmolten zout reactor (Molten Salt Reactor  MSR), waarbij de meervoudige recyclage van nucleaire materialen (meestal) wordt verwezenlijkt door de splijtstof in vloeibare vorm in een gesmolten zout te bevatten. Aldus wordt de herfabricatie van vaste splijtstoffen, en de daarmee gepaard gaande ultra-complexe handelingen, vermeden. Bovendien kunnen dergelijke MSRs werken op atmosferische druk (vergelijk met LWRs op typisch 150 bar om finaal vloeibaar water op 350 °C te behouden) wat een aanzienlijk veiligheidsvoordeel kan uitmaken, naast tal van andere veiligheidsvoordelen. Doch deze voordelen komen ook niet zonder uitdagingen, waar materiaal-gedrag, radiochemie en stabiliteit van het gesmolten zout, alsook de algehele corrosie van structuurmaterialen de voornaamste noodzakelijke ontwikkelingen vereisen.

Ook hier heeft Nederland kennis opgebouwd bij de TU Delft en NRG, inclusief bestralingstesten voor gesmolten zout systemen, alswel meer recent met de THORIZON start-up, welke een dergelijke MSR beoogt met als doel om rond 2035 een demo-plant operationeel te hebben.

Tevens dient vermeld te worden dat dergelijke MSRs op termijn, na een eerste fase met uranium- en plutoniumgebruik, ook ideaal geschikt zijn voor het gebruik van thorium. Thorium kan, in verschillende en meestal beperktere mate, eveneens in de andere kerncentrale-opties worden toegepast, doch de echte toegevoegde waarde voor thorium is het beste te realiseren in dergelijke MSRs.

Figuur III.2 Overzicht van de kernenergie-opties in ontwikkeling



Figuur III.9 vermeld finaal tevens de kleine modulaire reactoren of SMRs doch dergelijke SMRs omvatten meerdere kerncentrale-technologieën van water-gekoelde, over metaal-gekoelde tot zelfs gesmolten zout reactoren. Al deze SMR-ontwerpen delen dus 'klein' en 'modulair' als design-opties doch verschillen veelal omtrent het specifieke design, de functies (volgens figuur III.9) welke beogen alswel de technologische maturiteit.

## III.2 MOTIVATIES VOOR DE EVOLUTIE NAAR KLEINE(RE) MODULAIRE REACTOREN (SMR)

SMRs kennen een gestaag toenemende interesse sinds reeds ongeveer 20 jaar en dit voornamelijk in de Verenigde Staten. Vele redenen leidden toentertijd tot het herzien van de mogelijkheden voor kerncentrales en tevens de mogelijke hernieuwde positionering van de Amerikaanse nucleaire industrie, i.e.:

- Rond de eeuwwisseling was het overheids-budget voor kernenergie in de VS vrijwel tot nul gereduceerd en werd een nieuw, voornamelijk internationaal, programma opgestart, wat later bekend werd onder de naam "Generation-IV", ofwel vierde generatie, kerncentrales, welke voornamelijk een verbeterde economische performantie alsook een nog hogere duurzaamheid beoogden. In grote lijnen betrof dit programma het heractiveren van bestaande concepten uit de vroegere dagen van kernenergie-ontwikkeling (i.e. jaren 1960 – 1970) doch met innovatieve ontwikkelingen voorbereidt voor de 21ste eeuw. Een internationaal programma werd opgericht, met deelname door de Europese Commissie, genoemd "Generation-IV International Forum" welke internationale samenwerking beoogde ter ontwikkeling van zes van beloftevolle kerncentrale ontwerpen.
- Tegelijkertijd werden tevens studies uitgevoerd door o.a. de University of Chicago alsook Argonne National Laboratory [1] betreffende de competitiviteit van kernenergie en de opties om kernenergie beter te laten beantwoorden aan de energie-markt behoeften in de toekomst. Sinds de jaren 2000 werden de opties om kleinere kerncentrales te ontwerpen ter vervanging van oude kolen-gestookte centrales nader bekeken. Kolen-centrales hebben typisch een gemiddeld vermogen van ca. 300 MWe en derhalve werd de 'target' voor de kleine kerncentrales in deze grootte-orde geplaatst;
    - Tevens dient gemeld dat de Verenigde Staten niet over een dergelijk uitgebouwd continentaal hoogspanningsnet beschikken zoals in Europe en dus kleinere kerncentrales veelal beter aansluiten aan de beschikbare netwerk-infrastructuur.
- Aangezien tevens de Verenigde Staten geen daadkrachtige mature nucleaire industrie meer had, diende tevens bekeken te worden hoe dergelijke kleinere kerncentrales zouden kunnen worden gebouwd en dus werd tevens het modulaire karakter uitgewerkt aangezien dergelijke modules in klassiekere fabricatie-omstandigheden zouden kunnen worden aangemaakt alsook voordelen bieden naar serie-productie en derhalve, hopelijk, een betere competitiviteit van deze kleinere kerncentrales;
- Sinds 2010 wordt in dit domein van finaal kleinere modulaire reactoren of SMRs met hoge graad aan innovatie gestimuleerd door tal van startup bedrijven welke verschillende concepten ontwikkelen en finaal, zo'n 10 jaar later, in verschillende graad van haalbaarheid en maturiteit resulteren.

Geo-strategisch dienen we nogmaals te wijzen op deze initiërende elementen welke ons finaal naar SMRs hebben gebracht en is het aangewezen nog enige aspecten hieromtrent op te merken:

- Het is opmerkelijk dat de meeste SMR-ontwerpen grotendeels vanuit de Verenigde Staten komen doch de verwachte realisatie niet zozeer in de VS te vinden is, maar in Canada en in toenemende mate in Europa;
- De geheel gedereguleerde markt alsook het gebrek aan nucleair-kundige energie-bedrijven in de VS brengt onvoldoende investerings-capaciteit om dergelijke SMR-projecten daadwerkelijk te realiseren binnen de VS. Het VS Ministerie van Energie, US-DOE, voorziet eventueel éné of enkel van die concepten te ondersteunen doch met een regionale investeringsbasis zoals voor NuScale in Ohio;
- Veelal wordt heden de Europese markt als "win-gebied" beschouwd door de VS SMR-ontwikkelaars en door de VS-overheid, i.e.:
    - Europa heeft, nog versterkt door de recente geo-politieke ontwikkelingen, meer dan ooit behoefte aan kernenergie;
    - Europe is een 'rijke' markt, i.e. er is mogelijkheid tot investeringen en er zijn voldoende kundige energiebedrijven alsook mogelijkheden voor de toeleveringsketen in Europa;
    - Bovenal bestendigt dergelijke SMR-ontwikkeling de geo-politieke invloed van de VS in Europa en vooral in Oost-Europa.
- Vandaar dat tevens aandacht dient te worden besteed aan de Europese SMR-ontwikkelingen en het potentieel tot verankering van een SMR toeleveringsketen in en door Europese bedrijven teneinde de geo-strategisch onafhankelijkheid voor Europa op termijn te garanderen. Evenwel is het aantal SMR-concepten in Europe geheel beperkt tot voornamelijk NuWard door Franse bedrijven betreffende licht-water gekoelde kerncentrale technologie waarbij andere SMR-concepten meer geavanceerde technologie voor ogen houden (bijvoorbeeld Seaborg, Copenhagen Atomics, Thorizon, NewCleo, …).

## III.3 BESCHRIJVING VAN SMR TECHNOLOGISCHE OPTIES

De benaming "SMR" omvat vele verschillende reactortypes met verschillende graad aan maturiteit alsook basisprincipes. Deze sectie zal dergelijke categorisatie van de SMRs in kaart brengen teneinde tevens de opties voor de Provincie Limburg te verduidelijken.

Vooreerst verduidelijking van de twee belangrijkste aspecten in hun benaming, d.w.z. 'klein' en 'modulair', i.e.:

- 'Klein' verwijst naar de eenheidsgrootte qua vermogen-capaciteit. Volgens de IAEA beschouwen we kerncentrales als
  - Klein bij eenheidvermogens van 200 – 300 MWe[i],
  - Mini bij eenheidsvermogens van 20 – 50 MWe, en
  - Micro voor eenheidsvermogens van < 5 MWe
- 'Modulair' verwijst naar verschillende aspecten:
  - Modulair in design en opbouw duidt aan dat dergelijke kerncentrales eerder op een modulaire manier worden gebouwd of samengesteld op basis van veelal modules welke in gecentraliseerde fabricage-plants worden aangemaakt. Dergelijke serie-productie zou finaal tot lagere bouw-kosten voor dergelijke SMRs moeten leiden doch vraagt uiteraard een voldoende graad aan serie-productie om de schaalgrootte effecten ("economy of scale") van typisch grote kerncentrales te compenseren;
  - Modulair kan er tevens verwijzen dat de kleinere schaalgrootte per kerncentrale een modulaire opbouw kan betekenen waarbij de geleidelijke inzet van meerdere SMRs de energie-markt behoeften beter kan volgen alsook de investerings-behoeften spreidt met een vroegere productie-mogelijkheid, en dus inkomstenstroom, dan met één grote kerncentrale;
  - De modulaire opbouw kan tevens leiden tot een verbeterde vervangbaarheid van componenten van dergelijke SMRs zodat een verbeterde onderhouds-aanpak alswel ontmanteling toelaat;
  - Finaal kan een modulaire opbouw tevens toelaten om:
    - Nieuwe productie-technieken, zoals additieve fabricatie, toe te passen wat tevens toelaat om evoluties aanpassingen/verbeteringen aan te brengen in daaropvolgende SMRs en/of bij vervanging van modules;
    - Tevens kan de vervanging van modules verder worden uitgewerkt, wat tevens een belangrijk voordele kan betekenen voor de kwalificatie van dergelijke modules of componenten, i.e. waar materialen en structuur-elementen bij grote kerncentrales beperkt of niet vervangbaar zijn dienen deze dan ook gekwalificeerd te zijn vanaf het begin, om de levensduur van een kerncentrale van typisch 40+ jaren (en heden eerder +60 jaar) te kunnen doorstaan. Met een meer modulaire aanpak zouden dergelijke componenten bijvoorbeeld reeds na 20 jaar vervangbaar zijn en vergt aldus ook een kwalificatie welke een dergelijke tijdsspanne omvat. Dit heeft mogelijk een enorme impact op de benodigde technologische kwalificatie van specifieke materialen, welke anders in onderzoeksreactoren (bijvoorbeeld de HFR te NRG Petten) een langdurig bestralingsprogramma dienen te ondergaan.

De benaming "SMR" kan dus verschillende aspecten van "klein" en "modulair" omvatten naast tevens nog de technologische keuzes zoals:

- Licht-watergekoelde SMRs welke grotendeels voortbouwen op de kennis en ervaring van de grote licht-water gekoelde (i.e LWR) kerncentrales welke heden 95% van het wereldwijde kerncentrale park uitmaken;
- Gas-gekoelde SMRs beogen typische hogere werkingstemperaturen met de High-Temperature Gas-Cooled (HTGR) reactoren een typisch voorbeeld;
- Waar de vorige twee categorieën van SMRs een thermisch neutronen spectrum hanteren, hanteren de Snel-spectrum SMRs een snel neutronen spectrum omwille van bijkomende doelstellingen om tevens de multi-recyclage van plutonium en eventueel de opbrand van andere actinides mogelijk te maken als onderdeel van een transitie naar nog meer duurzame kerncentrales;
- Gesmolten zout reactoren of MSRs betekenen een ware shift aangezien de meeste hierbij een kernsplijtstof in vloeibare vorm in een gesmolten zout circuit voorzien wat voordelen kan opleveren v.w.b. veiligheid en ook de multi-reclage van kernsplijtstof mogelijk maakt zonder de uitdagingen van herfabricatie van sterk bestraalde kernsplijtstof te vragen;
- Versneller-gedreven (snel spectrum) reactoren worden tevens beschouwd met een specifieke doelstelling op de opbrand van gebruikte kernsplijtstof te bewerkstelligen.

Andere classificaties voor SMRs kunnen tevens gewag maken van:

- Voorzien om te worden gebouwd op land of als drijvend eiland (cfr. Russische KLT-40S)?
- Voornamelijk generatie van elektriciteit alswel tevens voorziening in proceswarmte en/of restwarmte?
- Single-unit of meerdere units per site?
- Mobiele/transporteerbare SMRs?

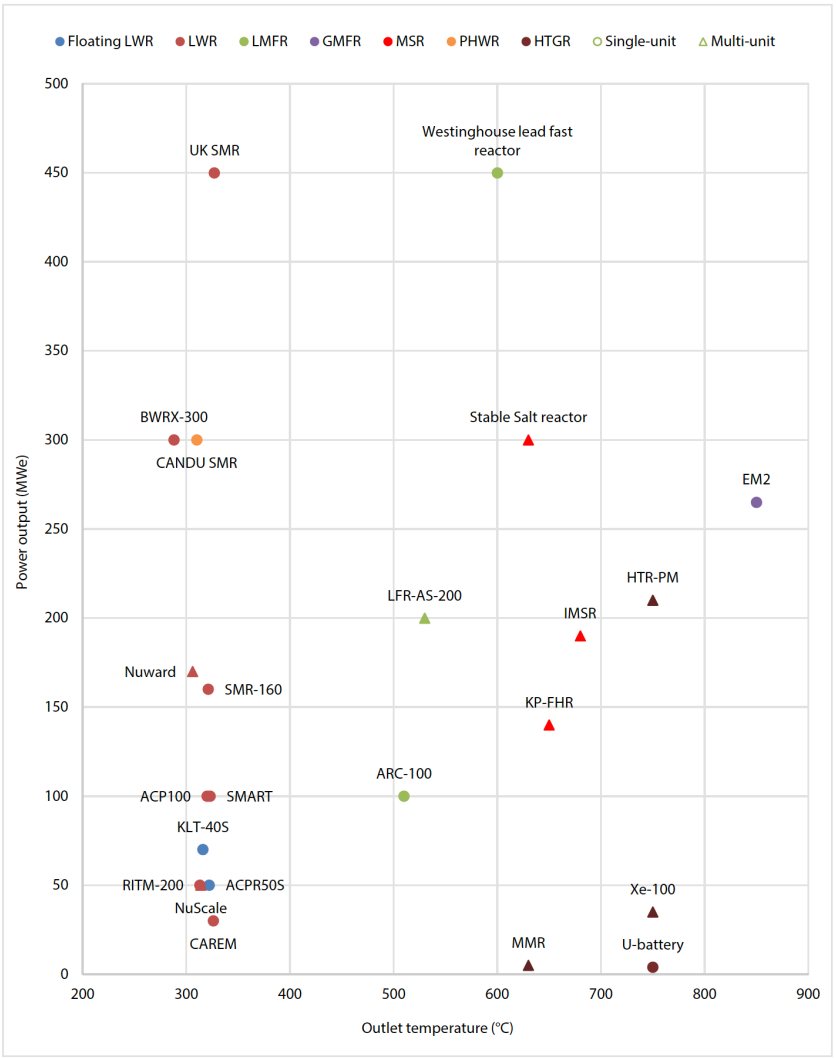
i De grenzen qua eenheidsvermogen dienen als indicatie te worden geïnterpreteerd en niet als harde grenzen. Ze geven eerder de grootte-orde aan.

Waar de initiële intenties voor SMRs inderdaad de combinatie van 'klein' en 'modulair' beschouwden hebben verschillende SMR-concepten evenwel verschillende van deze aspecten noodzakelijk verlaten, vanwege technisch-economisch overwegingen, bv.:

- Teneinde de competitiviteit van deze SMRS te waarborgen of te verbeteren wordt het eenheidsvermogen per SMR verhoogd en/of ontstaat de noodzaak tot realisatie, weliswaar met enige fasering, van meer SMRs binnen één site en meer bepaald binnen een initieel te voorziene civiele structuur uit te bouwen;
  - Een voorbeeld hiervan is NuScale welke projecten met minimaal 6 à 8 'Nuclear Power Modules' van 77 MWe elk dient voor te stellen teneinde de competitiviteit van het geheel te waarborgen aangezien de civiele constructies nog steeds voordelen hebben van schaalgrootte en realisatie in één constructie-kalender;
- Andere concepten zijn nog bezwaarlijk 'klein' te noemen zoals Rolls Royce "UK SMR" met 443 MWe eenheidsvermogen en dus vergelijkbaar met EPZ's Borssele kerncentrale. Evenwel wordt voorzien in modulaire constructie-technieken doch dergelijke aanpak werd en wordt eveneens bij grotere kerncentrales toegepast zoals AP1000 en EPR;
  - NUWARD vanwege de Franse industrie voorziet een 'binoom' reactor met 2 maal 170 MWe waarbij dus tevens op redundantie in uitbating alswel tevens enige serie-effect bij de bouw van dergelijke SMR wordt ingecalculeerd.

Eén van de vele classificaties van SMRs werd gerapporteerd door IAEA en OECD/NEA [2] (zie figuur III.3) met classificatie op basis van eenheids-vermogen (verticale as) en beschikbare uitgangstemperatuur (horizontale as) van belang voor eventuele processwartme toepassingen. Een interessant overzicht van de SMR-ontwerpen is tevens ter beschikking via Stichting Kernvisie.

Figuur III.3 Eén van de mogelijke klassificaties van SMRs




Notes: LMFR = Liquid metal fast reactor; GMFR = Gas modular fast reactor; HTGR = High temperature gas reactor.

Source: IAEA (2020).

## III.3.1 WANNEER KAN EEN SMR WORDEN GEREALISEERD?

Deze vraag behelst meerdere aspecten waarbij de vier belangrijkste hier worden behandeld, i.e. wat is de technische maturatie van SMR-concepten, wat is de toeleveringsketen, welke markt-dynamiek kan invloed hebben op tijdslijn en welke tijdslijn voor vergunning is te beschouwen?

### III.3.1.1 Technologische maturiteit van SMRs

De markt biedt heden meer dan 70 SMR-ontwerpen met verschillende concepten en eenheidsvermogen (cfr figuur III.3), maar ook met verschillende niveaus van technologische maturiteit. In het geval van de provincie Limburg en Nederland en meer in het algemeen in Europa betekent het behalen van de doelstellingen van decarbonisatie van de energie-behoeften voor 2050 dat het lanceren van SMR-projecten (ruim) vóór 2035 dient te kunnen beginnen.

In dit stadium, gezien de ontwikkelingsstatus van de verschillende ontwerpen wereldwijd en de nodige R&D- en engineeringstudies die nog steeds nodig zijn voor "geavanceerde SMR's" (hetzij op basis van snelle neutronen-reactoren of projecten voor gesmolten zoutreactoren), lijken alleen op licht-water reactor (LWR) technologie gebaseerde SMRs in aanmerking te komen om vóór 2035 online te worden gezet.

Onder de verschillende ontwerpen die vandaag op de markt worden voorgesteld, hebben we voorzichtig een classificatie voorgesteld op basis van twee criteria:

- ontwerpvolwassenheid (gedetailleerd ontwerp en pre-licensing aan de gang voor een eerste reeks reactortypen en minder geavanceerde, meestal met alleen een basisontwerp of haalbaarheidsstudies uitgevoerd);
- regio van herkomst (Europa, Noord- en Zuid-Amerika/Japan, Korea, Rusland en China).

In Europa kennen we heden enkele LWR-technologie gebaseerde SMR-projecten;

- Nuward (Frankrijk) (zie figuur III.4) is een binoom SMR van tweemaal 170 MWe welke heden in detail ontwerpfase bevindt met een geprojecteerde inbedrijfstelling van een eerste demo/prototype tegen 2030. Recent werd door de Franse partners (EdF, Framatome, CEA, Technicatome, NAVAL Group) tevens met drie Europese regulatoren (STUK (Finland), SUJB (Tsjechië) en ASN (Frankrijk)) overeengekomen om de veiligheidsstudies en het vergunningstraject voor dergelijke NuWard SMR in detail uit te werken met tevens oog op een grotere harmonisatie in Europe en dit met oog op een zo snel mogelijke inzetbaarheid van dergelijke NuWard SMRs. Er is een versneld programma opgestart door zowel de Franse regering als EdF, Framatome, CEA, NAVAL Group en Tractebel Engineering teneinde naar 2030 een eerste NUWARD te kunnen realiseren waarbij tevens gebruik kan worden gemaakt van de fabricatie-capaciteit van NAVAL Group (i.e. nucleaire reactoren voor militaire toepassingen) wat dus een aanzienlijk tijds-voordeel kan opleveren;
- Rolls Royce SMR (UK) (zie figuur III.5) voorziet in een 470 MWe LWR SMR (opschaling vanuit een vorig ontwerp van 230 MWe) als een single-unit LWR SMR gebaseerd op grotendeels bestaande LWR-technologie met gebruik van innovatieve fabricage-opties welke sinds de voorbije 15 jaren werden ontwikkeld door o.e. Nuclear Advanced Manufacturing Research Center (NAMRC) in Sheffield. Heden word een 415 M£ programma uitgewerkt met tevens recent de aankondiging van zeven mogelijke locaties voor de bouw van een fabricage-faciliteit voor de verschillende componenten in casu de reactor drukvaten [3]. Een realisatie van een eerste prototype/demo SMR wordt veelal aangekondigd rond 2030 in North-Wales / West Cumbria gezien tevens de lokale aanwezigheid van de nucleaire industrie. Het recent aangekondigd Future Nuclear Enabling Fund (FNEF) [4] voorziet heden in 120 M£ voor het R&D en ontwikkelingsprogramma voor 'Advanced Modular Reactors (AMRs) waarbij Rolls Royce mogelijks een deel van dergelijke funding kan verkrijgen voor bepaalde fabricage technologie ontwikkelingen. Het fund kadert in de recent ge-update ambitie van de UK overheid om 24 GWe kerncentrale capaciteit te bouwen tegen 2050.

De LWR-SMR ontwerpen welke vanuit de Verenigde Staten worden ontwikkeld doch met een beduidende focus op Europa betreffen:

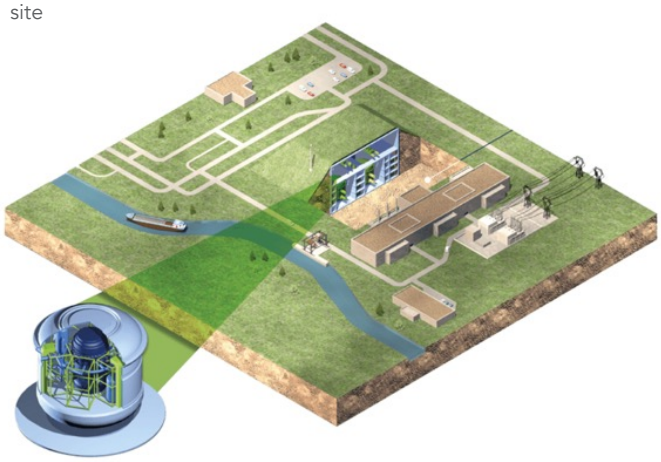
- BWRX-300 (zie figuur III.6) is een 300 MWe single-unit LWR SMR ontwikkeld door GE/Hitachi (VS/Japan) en leunt op heel wat ervaring met de ESBWR LWR reactorlijn en realisaties door GE/Hitachi. Er wordt beweerd dat dergelijke BWRX-300 zou kunnen worden gebouwd vanaf 2028 waarbij heden voornamelijk de Canadese markt wordt beoogd via, o.a., een samenwerking met de Canadese operator Ontario Power Generation (OPG) welke een BWRX-300 optie beschouwd voor de bestaande nucleaire site Darlington. Tevens zijn er gesprekken met sites/investeerders in de VS, Polen (in samenwerking met Synthos Green Energy) , Estonia en Tsjechië;
- Nuscale (VS) (zie figuur III.7) ontwikkelt sinds zo'n 15 jaar wat heden de VOYGR SMR wordt genoemd met tot 12 "NuScale Power Modules" van elke 77 MWe eenheidsvermogen. NuScale heeft US NRC design certificering ontvangen in augustus 2020 en is dus naar een mogelijke vergunning in de VS zeer ver gevorderd. Momenteel wordt een demo locatie in Ohio beschouwd op de site van een oude kolencentrale wat tevens tot de demonstratie zou leiden van dergelijke site-conversie. Tevens zijn er gesprekken in Europa met Polen, Tsjechië en Roemenië betreffende de inzetting van dergelijke VOYGR-plants;

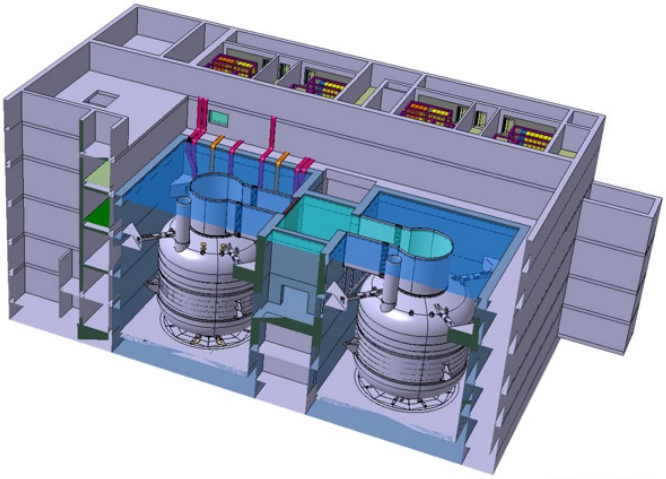
- Holtec 160-SMR (US) (zie figuur III.8) is heden een 160 MWe (525 MWth) LWR SMR in ontwerp fase en focuseert voornamelijk de elektriciteits-behoeften en niet zozeer de valorisatie van proces/rest-warmte. Gesprekken zijn lopende in de Verenigde Staten, met Oekraïne alsook in Azië doch de tijdsplanning naar realisatie blijft nog onduidelijk. Niettemin, gezien de pragmatische business-aanpak van HOLTEC in al z'n activiteiten, kan een realisatie van een demo-versie haalbaar geacht naar 2030 toe. Recent werd door HOLTEC een 7,4 miljard USD voorstel gelanceerd naar de Amerikaanse regering voor de realisatie van meerdere 160-SMRs alsook de bijhorende fabricatie-capaciteit teneinde dergelijke SMRs te kunnen realiseren naar 2030 toe.
- Last Energy (VS) (zie figuur III.9) voorziet de ontwikkeling van mini LWR SMRs met een eenheidsvermogen van ca. 17 MWe per SMR. Last Energy bouwt op de kennis en ervaring van een set van experts, die initieel in het Energy Impact Center actief waren en wordt hierbij ondersteund door Silicon Valley technologie investeerders. Heden zou een investerings-capaciteit van ca 300 M$ hen toelaten om alvast de niet-nucleaire componenten waaronder de turbine te bouwen, om een versnelde markt-introductie vanaf ca. 2026 mogelijk te maken. De inzet van meerdere van dergelijke mini-SMRs zou tevens voordelen opleveren qua redundantie in bedrijfszekerheid en dus continue energie-productie aan eindgebruikers. Tevens wordt beschouwd dat een dergelijk eenheidsvermogen aanleunt aan typische mature elektrolyser technologieën alsook aanleunt tegen de energie-behoeften voor verschillende segmenten van de energie-markt behoeften naast tevens een investerings-haalbaarheid welke binnen bereik van meerdere investeerders zou liggen.

Ontwikkelingen in andere landen betreffen:

- Zuid-Korea, i.e KAERI, ontwikkelt sinds zo'n twintigtal jaar het SMART 100 SMR concept, wat een 100 MWe ontwerp is welke gecertificeerd werd in Zuid-Korea. Origineel betrof dit een 100 MWe (330 MWth) geïntegreerd LWR ontwerp waarbij een 660 MWth versie in een latere periode werd beschouwd. De voornaamste markt perspectieven betreffen Saudi-Arabië via een overeenkomst met K.A. CARE (sinds 2015) ten bedrage van 130 M$ waar de first-of-a-kind engineering zou worden ondernomen alsook de noodzakelijke veiligheidsstudies met finaal oog opde realisatievan twee SMART SMRs. Verwacht werd dat dergelijke units van 100 MWe zo'n 4000 $/kWe zouden kosten, i.e. 400 M$ per 100 MWe met tevens zo'n 200 M$ voor turbines, netwerk-aansluiting en rand-installaties.
- De CAREM reactor is in ontwikkeling in Argentinië waarbij een demo van 25 MWe in aanbouw is met oog op een tweede 100-200 MWe SMR in Formosa Provincie in Argentinië. Sinds eind 2019 is de bouw van de CAREM-25 onderbroken vanwege contractuele problemen met subcontractors na reeds zo'n 500 – 700 M$ aan dergelijke demo te hebben besteedt doch wordt opbouw recent heraangevat.. Verwachtingen betreffen Saudi-Arabië voor zowel elektriciteit als water ontzilting toepassingen.
- De ACP 100 – 125 MWe (zie figuur III.10) is in aanbouw in de provincie Changjiang in China en beoogd elektriciteitsproductie, stads verwarming, industriële warmte productie en water ontzilting. Heden wordt verwacht dat deze demo-SMR tegen midden 2025 operationeel zou zijn en dit na de initiële ontwikkeling ervan sinds 2010 met start van constructie in 2021.
- De Russische Federatie heeft tevens twee belangrijke SMR-ontwerpen met tevens reeds realisatie ervan in o.a. een drijvende reactor Akademik Lomonosov (zie figuur III.11) toegepast op de noordelijke route te Pevek. Deze Akademik Lomonosov is voorzien van twee KLT-40S reactoren van elk 35 MWe. Anderzijds betreft het een 'Floating Nuclear Power Plant' (FNPP) met tweemaal 50 MWe waarbij de Yakutia region voorziet in de constructie van twee mobiele (barge-type) SMRs met telkens twee RITM-200N SMRs van elk 57 MWe waarbij realisatie wordt verwacht in 2027 tot 2031. Naast barge-gebaseerd worden dergelijke RITM-200Ns tevens voorzien voor land-gebaseerde realisatie.

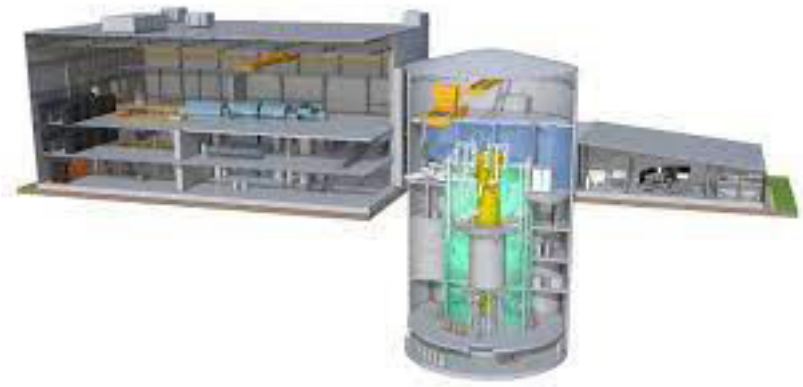
Figuur III.4 Overzicht van NuWard SMR als binoom SMR van 2 maal 170 MWe in co-locatie op een site



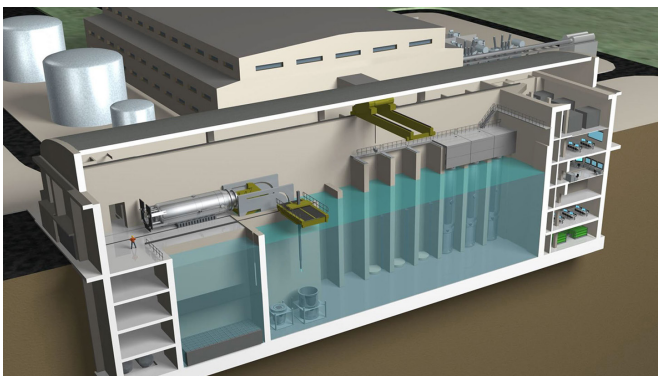


Figuur III.5 Rolls Royce SMR concept

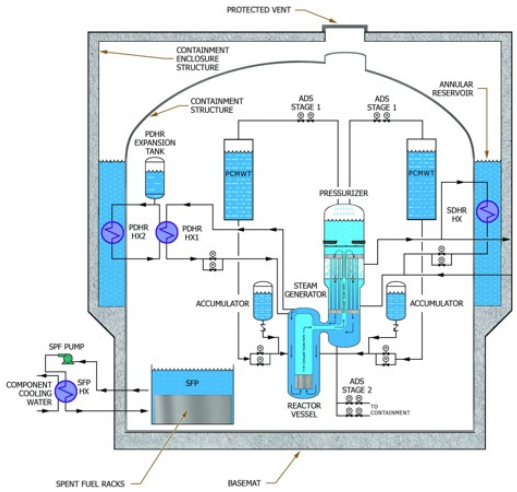
Figuur III.6 BWRX-300 GE/Hitachi Design

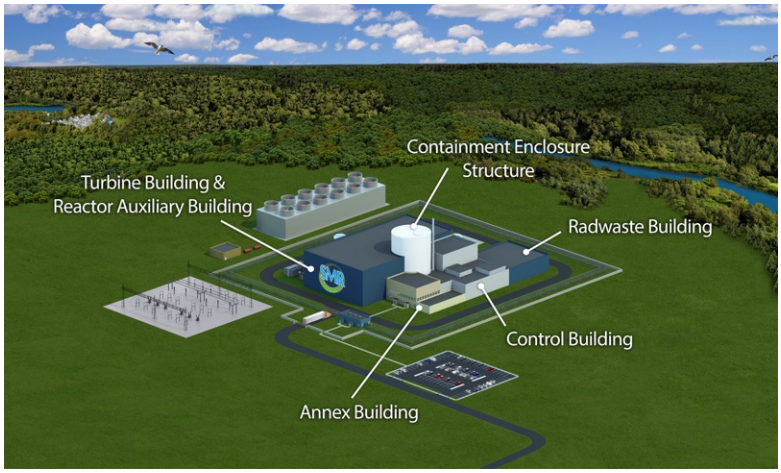


Figuur III.7 NuScale VOYGR concept and multi-unit SMR-design

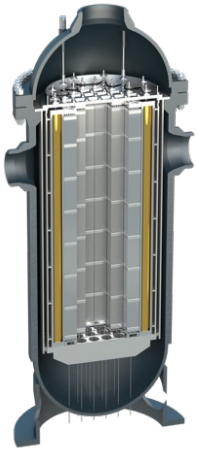


Figuur III.8 Holtec LWR SMR concept

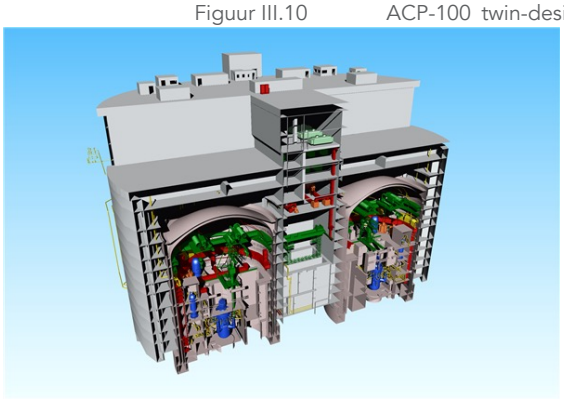



Figuur III.9 Last Energy concept Mini-SMR



Figuur III.10 ACP-100 twin-design en de status van ACP-100 demo single-unit in aanbouw



Figuur III.11 Akademik Lomonosov met twee KLT-40S SMRs aan boord voor regionale energievoorziening op de noordelijke handelsroute

Hoewel het geen LWR SMR is, kan de HTGR, de High Temperature Gas-cooled Reactor, hier toch niet onvermeld blijven als SMR met een behoorlijke graad van maturiteit. De HTGR is een grafiet-gemodereerde, helium gekoelde reactor, met een typische kern-uitlaat temperatuur van 750 °C of hoger (tot bijvoorbeeld boven de 900 °C bij de HTTR), wat dit type reactoren een hogere rendement geeft bij omzetting naar elektriciteit en ze tevens bij uitstek geschikt maakt voor het leveren van hoge temperatuur proceswarmte. De splijtstof van dit reactortype is volledig keramisch (zgn. "TRISO – Tristructural Isotropic coated particles" van ongeveer 0,5 mm diameter, zie Figuur III.19), wat bijdraagt aan de inherent veilige karakteristieken van dit reactortype. Figuur III.20 geeft een overzicht van de geschiedenis van de HTGR-testreactoren en demonstrators.

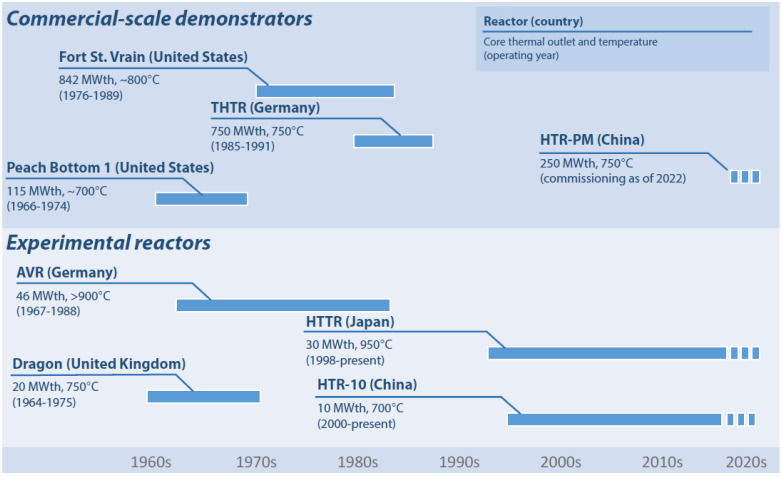
Bij de HTR-PM in Shidao Bay, China, een pebble-bed type HTGR met continue online (her)lading van brandstof, is op dit moment reeds één van de twee reactoren in bedrijf, de ander is in de commissioning fase en zal later dit jaar in bedrijf komen. De centrale is reeds gekoppeld aan het net. De meeste commerciële HTGR ontwerpen gebruiken zgn. HALEU (High Assay Low Enriched Uranium) splijtstof, met een verrijkingsgraad tussen 5,00 en 19,75 % 235U. De vraag naar HALEU-brandstof zal naar verwachting vanaf het midden van de jaren 2020 toenemen en daarna een aanzienlijk niveau bereiken, als gevolg van de groeiende belangstelling voor geavanceerde kernreactoren en ongeval tolerante brandstoffen voor conventionele lichtwaterreactoren (LWR). Op dit moment wordt HALEU-brandstof niet in voldoende hoeveelheden geproduceerd om grootschalige HTGR-inzet mogelijk te maken en de ontwikkeling van HALEU-brandstoftoevoercapaciteit, inclusief verrijking, reconversie, transport en fabricage, is van cruciaal belang om de toekomstige ontwikkeling en inzet van HTGR's en andere geavanceerde nucleaire technologieën te ondersteunen [5]. Huidige productiecapaciteit voor HTGR TRISO brandstof is te vinden in China (2,1 ton U/jaar) en Japan (0,4 ton U/jaar) [6]. De huidige productie in China is slechts ongeveer voldoende voor 2 HTR-PMs, met ieder 2 reactoren van 250 MWth [2]. In de USA is een TRISO brandstof productielijn operationeel op engineering schaal, met plannen om deze op te schalen naar commerciële schaal in 2023 [2]. Ontladen, gebruikte splijtstof kan als zodanig uiteindelijk in een eindberging worden geplaatst, waarbij volumereductie mogelijk is door de TRISO coated particles te scheiden van hat matrixgrafiet. Opwerking en hergebruik van de brandstof is in principe mogelijk, met een head-end proces om de binnenste splijtstof "kernel"(zie figuur III.12) te scheiden van de coatings. De basistechnologie hiervoor is reeds beschikbaar, maar voor de praktische uitvoering in een hot-cell is nog verdere technologische ontwikkeling nodig [5].

Al met al is grootschalige uitrol van HTGRs niet voor medio jaren 2030 te verwachten.

Figuur III.12 TRISO coated particle splijtstof voor block-type en pebble-bed HTGRs. [1]

Source: Gougar, H.D., 2019.

Figuur III.13 HTGR experimentele reactoren en demonstratie-plants [1].




Source: Beck and Pincock, 2011; CNNC, 2021.

Tabel III.1. Technische specificaties van enkele HTGRs [1].

| Reactor design | SC-HTGR | GTHTR300C | HTR-PM | Xe-100 | MMR® | U-Battery | (Test reactor) HTTR | (Test reactor) HTR-10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Reactor thermal output (MWth) | 625 | 600 | 250 | 200 | 15 | 10 | 30 | 10 |
| Primary reactor coolant | Helium 750°C 6.0 MPa | Helium 950°C 5.1 MPa | Helium 750°C 7.0 MPa | Helium 765°C 6.0 MPa | Helium 630°C 3.0 MPa | Helium | Helium 850-950°C 4.0 MPa | Helium 700°C 3.0 MPa |
| Intermediate heat medium | Steam 560°C 16 MPa | Helium 900°C 5.15 MPa | Steam 567°C 13.25 MPa | Steam 565°C 16.5 MPa | Molten salt 560°C 0.5 MPa | Nitrogen or helium 710°C | Helium 775-905°C 4.1 MPa | --- |
| Fuel type | TRISO fuel | TRISO fuel | TRISO fuel | TRISO fuel | TRISO fuel | TRISO fuel | TRISO fuel | TRISO fuel |
| Fuel material and enrichment | UCO 15.5% | $UO_2$ and MOX 14.3% | $UO_2$ 8.5% | UCO 15.5% | $UO_2$ 9-13% | $UO_2$ <20% | $UO_2$ 3.4-9.9% | $UO_2$ 17% |
| Core assemble type | Block | Block | Pebble-bed | Pebble-bed | Block | Block | Block | Pebble-bed |
| Design life | 80 years | 60 years | 40 years | 60 years | 20 years | 30 years | ~ 20 years (operation time) | 20 years |
| Refuelling cycle | 18-24 months | 18-24 months | Online refuelling | Online refuelling | No refuelling | N/A | --- | Online refuelling |
| Plant footprint ($m^2$) | 10 000 $m^2$ | 63 000 $m^2$ (4 reactor modules) | 43 000 $m^2$ (for 12 reactor modules layout) | 131 000 $m^2$ (for 4 reactor modules layout) | 12 000 $m^2$ | 350 $m^2$ | 60 000 $m^2$ | 13 000 $m^2$ |
| Development status | Conceptual design | Basic design | Commissioning | Basic design | Basic design | Conceptual design | Operating | Operating |
| Designer | Framatome Inc. | JAEA | Tsinghua University | X-energy LLC | USNC | U-Battery | JAEA | Tsinghua University |
| Country | United States | Japan | China | United States | United States | United Kingdom | Japan | China |

Source: IAEA, 2020; GFP, 2019; Mulder, 2019; U-battery, 2022; Venneri, 2019; Yan et al., 2018; Yan, 2017.

## Coherentie en synergieën betreffende splijtstof en radioactief afval beheer

De technische maturiteit wordt mede bepaald door de splijtstof(cyclus) welke wordt voorzien in deze SMRs alwel de algehele ter beschikking staande service-keten voor onderhoud en upgrading, alswel de mogelijkheid tot uitbouw van een lokale toeleveringsketen uitbouw. De bovengenoemd LWR SMRs maken allen gebruik van vrij standaard uranium-oxide UOX splijtstof wel gekend vanuit de grote LWR markt en aldus stellen deze LWR SMRs geen specifiek risico betreffende de splijtstofcyclus.

Er zijn wel aandachtspunten welke voor dergelijke splijtstof dienen te worden beschouwd zoals de verschillen in neutronen-spectrum alswel de mogelijke hogere graad aan vermogensbelasting van de splijtstof, i.e.:

- De kleinere SMR-reactorkernen leiden tot een hogere neutronenlek en tevens een gemiddeld hoger neutronen-spectrum vergeleken met grote LWRs. Gezien de compactheid van de kern alsook een beperktere neutronen-reflector omheen de kern zijn er groetere neutronenflux gradiënten in de kern en dus splijtstof-assemblages wat aandacht vergt naar uitbatings-regime en het gedrag van dergelijke UOX-splijtstof in dergelijke omstandigheden. Evenwel is er ruime ervaring met load-following LWRs alsook met UOX splijtstof in kokend-water BWR reactoren welke tevens een harder neutronenspectrum hebben. De performantie van UOX-splijtstof onder dergelijke omstandigheden heeft nog geen specifieke performantie of veiligheidsrisico's uitdagingen meegebracht en vormt dus een goede basis voor de vergunning van dergelijke UOX-splijtstof SMRs;
- Dergelijke SMRs zouden kunnen worden gebruikt in energie-markt behoeften waar meer load-following noodzakelijk is met dus veelvuldiger of grotere vermogen-overgangen voor dergelijke SMRs en dus hun splijtstof. Eveneens duidt de ervaring vanuit de PWR/BWR-wereld dat dergelijke load-following aldus geen specifieke risico's inhoudt en geheel mature kennis omvat.

Aldus worden vanuit het splijtstof-gedrag onder bestralingscondities geen specifieke problemen verwacht voor dergelijke LWR SMRs met splijtstof, welke verrijking van $^{235}U$ tot 5% vraagt. Een dergelijke beperking leidt evenwel tot de noodzaak om dergelijke LWR SMRs elke 18 à 24 maanden te herladen, wat dus een stilstand van ca. 3 – 4 weken met zich meebrengt en wat eventueel een probleem stelt naar de compatibiliteit met energie-behoeften (i.e. continuïteit voor bijvoorbeeld chemische procesinstallaties). Aldus dient naar meerdere SMRs gekeken te worden om dus dergelijke continuïteit met betrekking tot energie-behoeften te garanderen (wordt bijvoorbeeld in een pre-haalbaarheidsstudie in meer detail onderzocht).

Tevens zal de opbrand van de splijtstof resulteren in een gebruikte splijtstof met wat hogere resterende 235U-concentratie, wat additionele mogelijkheden naar hergebruik van dergelijke splijtstof kan inhouden. Gezien het Nederlandse beleid om de uranium-oxide splijtstof van Borssele op te werken te La Hague, met recyclage van Plutonium (Pu) als MOX-splijtstof, kan het gebruik van dergelijke LWR SMRs, met vergelijkbare UOX-splijtstof, een continuïteit van dergelijke splijtstofcyclus inhouden, temeer daar tevens vanuit de zijde van het radioactief afval beheer, vanwege COVRA, geen bijkomende 'specifieke' splijtstof-afvalstroom dient te worden voorzien.

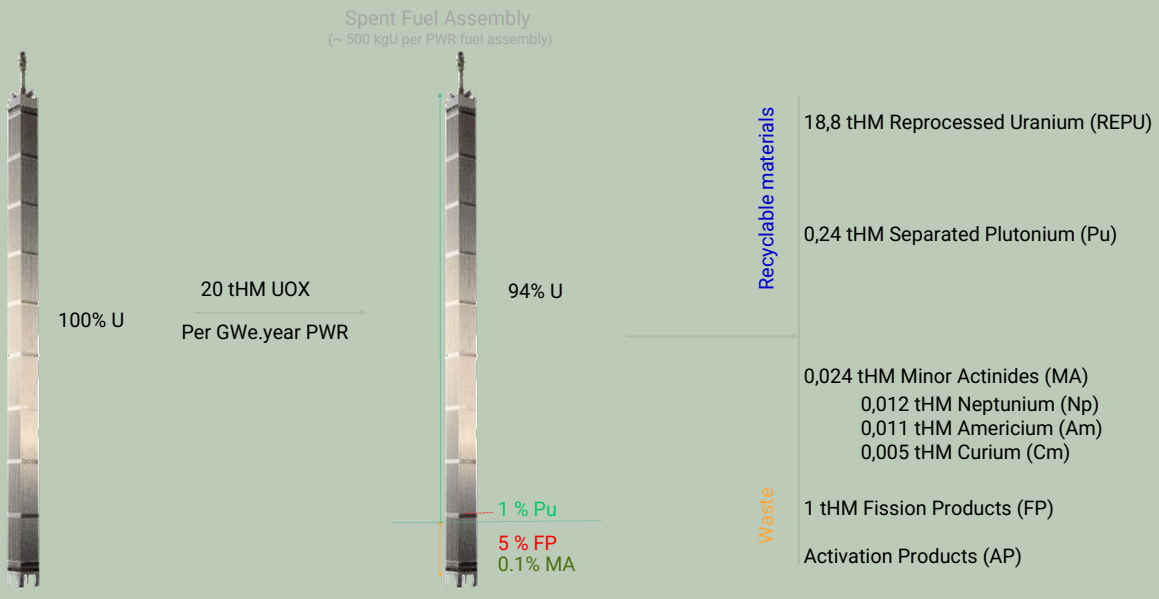
Bovendien kunnen we gewag maken van een synergetische situatie voor de Nederlandse splijtstofcyclus, waar de UOX-splijtstof van Borssele alsook deze van de twee verwachte, nieuwe grote kerncentrales blijvend wordt geheropwerkt, met recyclage van MOX-splijtstof in deze grotere reactoren en waar de splijtstof van dergelijke LWR SMRs tevens wordt opgewerkt voor recyclage als MOX en REPU-OX splijtstof in de grote centrales. Op termijn kan de gebruikte MOX en REPU-OX splijtstof nog verder gerecycleerd worden in gesmolten zout reactoren (MSRs) (na 2040).

## Splijtstofcyclus en radioactief afval beheer

Na bestraling van splijtstof (zie onderstaande figuur voor een typische LWR splijtstofstaaf) in een kerncentrale bestaat deze zogenoemde gebruikte splijtstof tal van nucliden met verschillende graad aan radioactiviteit. Voor LWR kerncentrales, gebruik makend van typische uranium-oxide splijtstof (UOX) met een aanrijkingsgraad tot 5% an 235U, bestaat dergelijke gebruikte splijtstof uit zo'n 94% uranium, 1.1% plutonium (Pu), zo'n 0.1% aan andere actiniden zoals neptinium (Np), Americium (Am) en Curium (Cm), naast uiteraard zo'n 5% splijtstofproducten als gevolg van de kernsplijtingen en dus generatie van warmte.

De gebruikte splijtstof wordt heden tijdelijk opgeslagen te Borssele en nadien verzonden naar de La Hague opwerkings-plant voor verdere tijdelijke opslag tot deze opgewerkt wordt. Het resulterende hoogactief afval komt als verglaasd afval terug, welke in de HABOG-installatie van COVRA wordt opgeslagen gedurende zo'n 100 jaar totdat het kan worden overgebracht naar een nog te realiseren eindbergingsfaciliteit. Het geheel van deze splijtstofcyclus is dus gebaseerd op de uranium-oxide and/of uranium-plutonium oxide splijtstof, waarbij tevens Nederlandse bedrijven zoals URENCO belangrijke splijtstofcyclus-operaties uitvoeren (in casu verrijking van het natuurlijk uranium).

Deze splijtstofcyclus-strategie kan geheel voortgezet worden in de nieuwbouw kerncentrales alsook met Mini-SMRs en SMRs. De splijtstof uit deze (Mini-)SMRs kan op dezelfde wijze als voor de huidige Borssele en de nieuwbouw LWRs worden opgewerkt met reclage van zowel het opgewerkte uranium al het plutonium in nieuwe splijtstof welke, naar verwachting idealiter, in de grote LWR kerncentrales wordt gebruikt. Op termijn, gezien de interesse en ontwikkelingen van meer geavanceerde kerncentrales, zoals gesmolten zout reactoren (MSRs), kan zelfs de toekomstige splijtstof en specifiek de gebruikte MOX-splijtstof verder worden opgewerkt en gerecycleerd in dergelijke MSRs, wat tevens de hoeveelheid aan hogere actiniden kan verminderen met voordelen voor thermische impact en/of een toekomstige geologische eindberging voor het radioactief afval. Tevens kan hiermee de levensduur van dergelijke radioactief afval wat worden verkort, doch het essentiële voordeel is te vinden in een verkleind opslagvolume voor het Nederlands radioactief afval.



### III.3.1.2 Toeleveringsketen en mogelijke rol voor Nederlandse en Limburgse industrie

De toeleveringsketen voor SMRs is een belangrijk gegeven in de tijdslijn naar realisatie van dergelijke SMRs gezien:

- de capaciteit voor fabricatie voor nucleaire kritische componenenten beperkt is wereldwij omwille van een lange periode van verminderde nieuwbouw van kerncentrales waarbij tevens in bepaalde landen heel wat ervaring verdween;
- grotere SMRs zullen tevens gebruik maken van de toeleveringsketen van grote kerncentrales voor bijvoorbeeld de reactorvaten en stoomgeneratoren en daar kan dus een competitie optreden volgens de verschillende markt-verwachtingen voor nieuwbouw van deze grote kerncentrales en de SMRs;
- voor meer geavanceerde SMRs zowel uit oogpunt van technologie alswel, eveneens voor LWR-technologie, vanwege design zijn nieuwe fabricatie-technologieën noodzakelijk naast nog de nieuwe materialen en andere welke deze zouden gebruiken. Dergelijke kwalificatie-proces voor dergelijke ontwikkelingen neemt beduidende tijd in beslag;
- finaal, de toeleveringsketen-industrie dient eveneens voldoende markt-vertrouwen te hebben om inderdaad dergelijke toeleverings-activiteiten opnieuw te versterken of zelfs nieuw te ontwikkelen wat tevens een vertragend effect naar realisatie van SMRs kan betekenen.

De volgende secties vat de voornaamste aspecten voor deze toeleverings-aspecten samen welke dus tevens de tijdslijn voor SMRs en zelfs differentiatie tussen deze SMRs zal betekenen. Zoals de sectie III.4 zal beschrijven, is deze toeleveringsketen tevens een belangrijk element in het verminderen van risico's naar de realisatie van dergelijke SMRs toe (en zelfs in ruimere mate tevens voor grote kerncentrales).

#### SMR en nieuwbouw toeleveringsketen in Europa

Bij de implementatie in de provincie Limburg van een mogelijk SMR-bouwprogramma zal rekening moeten worden gehouden met de behoefte aan een toeleveringsketen voor alle kritieke systemen die in staat zijn om de verschillende componenten ter plaatse te ontwerpen, produceren, assembleren en assembleren, met het kwaliteitsniveau dat vereist is door de veiligheidseisen die van kracht zijn in West-Europa, en lokale regelgeving. De geschiedenis heeft aangetoond dat dit niet gemakkelijk is bij de eerste nieuwe nucleaire bouwprojecten in Europa, maar het is ook een kans, op zichzelf of via partnerschappen, om lokaal vaardigheden en hooggekwalificeerde banen te ontwikkelen.
Evenzo zal bij de keuze van de gekozen technologie rekening moeten worden gehouden met de noodzaak om een toeleveringsketen te hebben voor de brandstoffen die zullen worden gebruikt, alsook om hun mogelijke verwerkings-/recyclingketen en het beheer van de uiteindelijke residuen te definiëren.

Deze problemen, in een mondiale Europese context van heropleving van nieuwe bouwactiviteiten voor de productie van elektriciteit uit nucleaire bronnen, zouden eenvoudigweg moeten kunnen worden opgelost door de bestaande "toeleveringsketen" in Europa, met hoe obstakels ook moeten worden verwacht op basis van de gekozen technologieën. Daarnaast is het bestaan van een goed functionerende nucleaire industrie in Nederland een belangrijk steunpunt.

De kritieke gebieden waarvoor het "klassieke" industriële weefsel waarschijnlijk slechts gedeeltelijke antwoorden heeft, en die we in deze notitie behandelen, zijn de systemen en componenten van de nucleaire ketel en andere apparatuur die belangrijk is voor de veiligheid, de turbine voor het conventionele deel, de brandstof, evenals het veiligheidsbesturingscommando (het "brein" van de reactor), en de simulator voor zowel technische studies als operatortraining.

#### Ketelsystemen en componenten en apparatuur belangrijk voor de veiligheid

Over het algemeen vereisen het ontwerp, de fabricage en de assemblage van ketelcomponenten, evenals verschillende veiligheidsbelangrijke apparatuur die in systemen is geïnstalleerd om operationeel te zijn in incidentele of toevallige situaties, een specifiek kwalificatieniveau, dat vaak verloren was gegaan tijdens de ongeveer twintig jaar zonder grote nucleaire projecten in Europa. De recente veld specifieke ISO 19 943-norm is geleidelijk een noodzaak geworden voor leveranciers die toegang willen krijgen tot de overeenkomstige markten en zal waarschijnlijk deel moeten uitmaken van de eisen van de klant voor nieuwe installaties die in Nederland moeten worden gebouwd. De ervaring die in Europa is opgedaan met de eerste grote nucleaire projecten die eind jaren 2000 van start zijn gegaan, zal moeten worden gebruikt bij de opbouw van de industriële organisatie die zal worden belast met de realisatie van de in fine geselecteerde SMR's, in combinatie met een analyse van de bestaande industriële capaciteiten in Nederland.

De “ketelmakers” die in staat zijn om de componenten van het primaire circuit te produceren, zijn relatief weinig in Europa (voornamelijk Framatone en Technicatome, Westinghouse en Rolls Royce). Voor de productie van de belangrijkste uitrusting, Naval Group in Frankrijk, ENSA in Spanje en Mangiarotti in Italië, completeert SKODA in Tsjechië tot op zekere hoogte de Europese keten met de nodige ervaring. De vooruitzichten die de SMR’s bieden op het gebied van fabrieksbouw, modulariteit en standaardisatie en serieel effect maken het echter mogelijk om op lange termijn een mogelijke uitbreiding van mogelijkheden en de opkomst van nieuwe spelers te voorzien.

Ketelfabrikanten en leidingbedrijven die in staat zijn om de meest gevoelige circuits te ontwerpen, prefabriceren en installeren, zijn tot op heden ook beperkt in aantal. Recente projecten hebben met name te kampen gehad met een tekort aan gekwalificeerde lassers, waarbij de kwalificatie voor bepaalde kritische lassen een lang en moeilijk proces vereiste, waarin bedrijven, zonder uitzicht op nieuwe locaties, niet hadden geïnvesteerd. Endel (nu een dochteronderneming van Altrad), Boccard, Ponticelli, Nordon en Bilfinger zijn vandaag de dag de belangrijkste bedrijven die sinds 2007 aanzienlijke ervaring hebben opgebouwd met de eerste grote Europese bouwplaatsen.

Het gebied van kleppen is ook voor de betrokken circuits vrij weinig geleverd met gekwalificeerde fabrikanten van apparatuur, en zal meer specifiek moeten worden geanalyseerd. Zo was het bedrijf Velan bij de eerste EPR-reactoren gebouwd, onder meer in China, een kritische leverancier. Het is hetzelfde voor sommige specifieke pompen, waar vaardigheden zeldzaam blijven (primaire pompen, pompen van veiligheidsinjectiecircuits ...).

Een evaluatie van de specifieke bevoegdheden voor Nederland, en in het bijzonder van de structuur van de onderaannemers van EPZ, in combinatie met een analyse van alle kritieke componenten, waarvan sommige zojuist zijn genoemd, zal essentieel zijn om ruim voor de bouwplaats een duidelijke leveringsstrategie voor elk van hen vast te stellen. De smeedstukken en ketelapparatuur van het primaire circuit hebben ook een zeer lange doorlooptijd, waardoor een aanzienlijke anticipatie vereist is in vergelijking met conventionele industriële projecten.

## Turbine

Als de mogelijkheden om hoogvermogen turbines (van het type EPR) te leveren momenteel beperkt zijn, zal het waarschijnlijk gemakkelijker te vinden zijn voor SMR's, gezien een vermogen dat beperkt is tot een paar honderd MW thermisch, de benodigde apparatuur. In alle gevallen beschikken Alstom, GE en Siemens in Europa over de vereiste capaciteiten en knowhow, ook in de functie van projectmanagement van het gehele conventionele eiland. Afhankelijk van het beoogde gebruik (elektriciteitsproductie, warmteproductie, waterstofproductie, enz.), zal het uiteraard nodig zijn om het industriële weefsel dat in staat is om de systemen te leveren die zijn aangepast aan het eindgebruik van de geproduceerde energie, nader moeten worden bestudeerd.

## Brandstof

### *Aanvoer*

Op dit gebied zal het aanbod min of meer complex zijn, afhankelijk van het gekozen type SMR, en de op te zetten industriële regelingen kunnen radicaal verschillen.

Lichtwater-SMR's, PWR's (water onder druk) of BWR's (kokend water) hebben in Europa, samen met GE, Westinghouse, Framatome en Technicatome, al de middelen om brandstofelementen te ontwerpen en te produceren die gepland zijn om te worden gebruikt in de meeste SMR-concepten die in deze categorie worden ontwikkeld.

Hoge-temperatuur SMR's daarentegen zijn over het algemeen gebaseerd op brandstoffen van een ander type, waarvoor nog toeleveringsketens moeten worden gecreëerd, althans op industriële schaal. De verantwoordelijkheid voor de overeenkomstige levering zou in dit geval aan de reactorleverancier kunnen worden toevertrouwd, maar het zal, ongeacht het gekozen schema, sterk moeten anticiperen om de werking op lange termijn van de reactoren die zullen worden geïmplementeerd, te garanderen. Niets onoverkomelijks, natuurlijk.

SMR's met gesmolten zout, die momenteel in grote aantallen over de hele wereld worden ontwikkeld, vereisen de studie en ontwikkeling van hun hele brandstoftoeleveringsketen, omdat er tot op heden geen industriële oplossing bestaat. Evenzo moet het onderwerp voor snelle neutronen-SMR's ook nog volledig worden bestudeerd.

### *Recycling of opslag*

Er moet ook worden geanticipeerd op het stroomafwaartse deel van de cyclus (d.w.z. het lot van de brandstof na de uitputting ervan in de reactor) en kan bepalend zijn voor de mogelijke keuze van soorten SMR die moeten worden behouden, vooral als men ze binnen vijftien jaar wil implementeren. In het geval van lichte waterbrandstoffen (SMR van het LWR-technologie type) kan de sector die momenteel in Nederland bestaat (opwerking van brandstof in Frankrijk, recycling van materialen en opslag van verglaasd afval op de site van Borsele) voordelig worden overwogen.

Eventuele alternatieve oplossingen zullen moeten worden bestudeerd met het oog op de opstelling van een langetermijnplan om de regelgevende instanties en het publiek de nodige visie te geven op de regelingen die zullen worden getroffen voor het beheer van verbruikte splijtstoffen.

Deze oplossingen, die variëren afhankelijk van de geselecteerde SMR-concepten, vereisen de meest innovatieve (met name gesmolten zouten) onderzoeks- en ontwikkelingsstappen die nog niet door de promotors van deze concepten worden ondernomen, en kunnen daarom een sterke invloed hebben op hun mogelijke implementatieschema.

## Security control-command en simulator

Systematisch op het kritieke pad van onlangs gelanceerde nieuwbouwprojecten behoren de besturingsbesturing, nu grotendeels gedigitaliseerd, en de rijsimulator die zowel in engineering als in de opleiding van operators wordt gebruikt, ook tot de componenten waarvan het aanbod moet worden verwacht en waarvoor er weinig competente potentiële leveranciers zijn. De veiligheidscontrole, althans in Europa (maar ook in Rusland, waar de meest recente VVER-reactoren zijn uitgerust met systemen die door Frankrijk worden geleverd) wordt grotendeels gedomineerd door Framatome (dat onlangs ook Rolls Royce Grenoble heeft verworven dat de volledige Franse nucleaire vloot uitrust, exclusief EPR). De wereldmarkt op dit gebied is verdeeld tussen Framatome, Amerikanen en Chinezen. Het gebied van operationele controle en commando (zorgen voor de werking van reactoren in normale situaties) is meer open.

De simulatoren, althans voor de energiereactoren die momenteel in de wereld actief zijn, hebben twee belangrijke leveranciers op recente projecten: Corys, een dochteronderneming van Framatome, en L-3 MAPPS, een Canadees bedrijf. Ook Siemens, MHI en andere spelers zoals Alstom zouden over de nodige capaciteit beschikken. Meer in het algemeen op dit gebied met betrekking tot de engineering van complexe installaties, kan de huidige ontwikkeling van methoden zoals "systems engineering", en PLM-tools, of zelfs "digital twin", om de levenscyclus van installaties te beheren, voor Nederland en de provincie een gebied vormen voor de ontwikkeling van specifieke vaardigheden ter gelegenheid van deze projecten,  op een domein in volle transformatie vandaag. Niettemin zullen de behoeften die door de simulatoren worden gedekt, moeten worden aangepakt, en vroeg genoeg in het project om het bijbehorende kritieke pad te beheren.

### III.3.1.3 SMR Markt-dynamiek

Een derde voornaam aspect betreffende de realisatie en tijdslijn naar realisatie van dergelijke SMRs is de markt-dynamiek wereldwijd.

Vooreerst is er wereldwijd een opnieuw verhoogde vraag naar kernenergie, voornamelijk grote kerncentrales van het LWR-technologie type, gezien de groeiende elektrificatie wereldwijd naast tevens de erkenning dat kernenergie een belangrijke of zelfs cruciale rol vervult om duurzame energie te voorzien. De keuzes in China, India, Verenigde Arabische Emiraten maar ook in West-Europese landen als Finland en recenter het Verenigd Koninkrijk bevestigen deze algemene trend.

De geo-politieke context voegt hier een bijkomende dimensie aangezien een duurzaam energie-aanbod terug als een strategisch gegevens is beschouwd en waarbij verschillende landen tevens het belang van een gedegen capaciteit naar kernenergie als existentieel zien, e.g. Verenigde Staten zoeken een hernieuwde industriële positionering betreffende kernenergie, Europe met voornamelijk Frankrijk voorziet een bestendiging van de Europese capaciteit voor kernenergie en dit met het oog om de groeiende hegemonie van Russische Federatie en China in de internationale markt te counteren. Zuid-Korea heeft tevens verschillende internationale successen en recent versterkt door een alliantie met de Verenigde Staten om de industriële capaciteit van die laatste te versterken. Canada, historisch op PHWR/CANDU reactoren gericht, heeft zo'n 10-tal jaren een strategische switch voorzien om zich te differentiëren naar andere type kerncentrales waar de voorname SMR-ontwikkelingen ook in dit kader dienen te worden gezien.

Naast de groeiende duurzame energie-behoeften welke mogelijks inderdaad ook SMRs vergen, treedt er dus ook een geo-politieke competitie op tussen typische kernenergie concurrenten welke verschillende impacts kan betekenen naar de tijdslijn van realisatie van SMRs, e.g.:

- de geprojecteerde markt voor SMRs brengt een nieuwe competitie teweeg welke cruciaal de realisatie van een demo/protype-SMR vergt voor elk van de leidende technologie ontwikkelaars. Zeker voor SMRs van het 200-300 MWe type vergt dit voldoende ervaring, een bewezen track-record qua realisatie van (grotere) kerncentrales en een algehele beschikbaarheid van een nucleair ecosysteem welke de expertise en ervaring toelevert en onderhoudt;
- er zijn heel wat start-ups welke op verschillende manieren financiering vergen en bekomen en dit via publiek-private financiering alswel via filantropische weldoeners. De meer dan 70 SMR-projecten, en voornamelijk in de Verenigde Staten, zullen niet allen tot eindresultaat komen en een concentratie via samenwerking of finaal filtering qua realiseerbaarheid zal zich in de komende jaren ontwikkelen. In eerste instantie zullen de LWR-type SMRs een markt-potentieel kennen waar meer geavanceerde niet-LWR SMRs, ook wel AMRs genoemd, hun ontwikkeling zullen gedragen zien omwille van uitmuntendheid in design en duidelijke toegevoegde waarde creatie voor toekomstige markten. Dergelijke AMRs kunnen immers zowel de energie-markt als de intra-nucleaire markt bedienen waarbij deze laatste intra-nucleaire 'markt' doelt op het optimaliseren van de splijtstofcyclus en een minimalisatie van het radioactief afval;
- Mini-SMRs zitten in een andere dynamiek aangezien deze mogelijks eerder door kleinere consortia, met eventueel beperktere historisch nucleaire ervaring, kunnen worden ontwikkeld aangezien de investeringsrisico's nog lager zijn dan voor SMRs. Tevens kunnen zij specifieke markten aanboren welke voor SMRs te klein of te 'niche' worden beschouwd ondanks het feit dat de energieproductie kost voor dergelijke Mini-SMRs hoger verwacht is dans voor SMRs en deze tevens hoger dan voor grote LWR-type kerncentrales. Doch, in verwachte hogere energie-prijzen in de toekomst, zouden allen een competitief aanbod brengen voor energie-markten en dus betaalbaar worden voor tal van partijen;
- Zowel Mini-SMRs als SMRs boren tevens een bijkomende markt aan van de energie-intensieve industrie welke, met het oog op decarbonisatie, bijkomende opties voor duurzame energie-bevoorrading dienen te onderzoeken en waarbij kernenergie als dusdanig terug op de short-list kan prijken indien dergelijke (Mini-) SMRs inderdaad beter beantwoorden aan de industriële energie-vraag vereisten;
- Vele potentiële klanten wachten de realisatie van een demo/prototype (Mini-)SMR af aangezien weinigen de capaciteit hebben nog eventuele risico's wensen te nemen om dergelijke First-of-a-Kind (FOAK) (Mini-)SMR -project te behartigen. Vandaar dat vele van de (Mini-)SMR-ontwikkelaars dergelijke demo/protype-projecten projecteren tijdens de periode 2026 - 2030 (met zelfs enig marketing-opbod qua data) aangezien de periode rond 2030 als drempel wordt gezien naar effectieve commerciële uitrol van (Mini-)SMRs wereldwijd.

Dergelijke markt-dynamiek kan dus een versnellend effect hebben op de in dit rapport vermelde tijdslijnen met mogelijk een inkorting van de tijdslijn met enkele jaren en bovenal ook, voor Provincie Limburg, bepaalt door de vraag hoe Nederland zich positioneert in een potentiële rol in dergelijke (Mini)SMR/AMR-ontwikkelingen en eventueel een dergelijk FOAK (Mini-)SMR wenst en kan huisvesten. We komen in hoofdstuk VI hierop terug.

### III.3.1.4 Vergunnings traject

Het vergunningstraject voor dergelijke (Mini-)SMRs alsook in de toekomst AMRs is uiteraard een vierde aspect welke de tijdslijn zal bepalen.

Hoofdstuk V detailleert deze aspecten van zowel planologische, geo-technische randvoorwaarden vertalend in beschikbaarheid van sites voor dergelijke (Mini-)SMRs en AMRs, alswel het nucleaire vergunningstraject welke dien te worden gehanteerd.

In synthese, er zijn aldus geen echte harde belemmeringen on Nederland voor welke kerncentrale vergunningstraject aangezien de regelgevende overheid ANVS een gedegen vergunningstraject heeft uitgetekend waarbij snel bij aanvang via een voor-overleg reeds de voornaamste struikelblokken kunnen worden geïdentificeerd en navenant door de project-eigenaar behandeld.

Niettemin, een vergunningstraject van zo'n 2 - 3 jaar dient te worden gehanteerd als richtlijn voor LWR-type kerncentrales met mogelijk een 1-2 jaar traject voor Mini-SMRs en waarbij voor meer geavanceerde AMRs een langer traject zelfs vooraf aan het vooroverleg dient te worden ingepland gezien hogere nood aan technologie kwalificatie en demonstratie van essentiële veiligheidsaspecten.

## III.4 HOE RISICO'S VOOR SMR-PROJECTEN TE MINIMALISEREN?

Om het succes van een nieuwbouwproject te garanderen en vertrouwen te krijgen van de financieringsorganen voor een robuuste en redelijke financieringsregeling (de helft van de MWh-kosten voor Hinkley Point in het VK bestaat uit financiële verplichtingen!), is de integratie van de ervaringsfeedback van projecten die sinds 2004 in Europa zijn gestart, verplicht. Deze sectie is bedoeld om enkele belangrijke onderwerpen te benadrukken die moeten worden overwogen zowel voor grote kerncentrales alswel (Mini-)SMRs. Het pretendeert uiteraard niet uitputtend te zijn.

### III.4.1 Regulering, vergunningverlening en vergunningverlening

Vooreerst is de ervaring in Frankrijk, Finland of het Verenigd Koninkrijk dat de tijd die nodig is om groen licht te krijgen om te beginnen met de daadwerkelijke bouw van een nieuw kerncentrale, te beginnen vanaf de levering door de nucleaire veiligheidsautoriteit van het voorlopige veiligheidsrapport (of het ontwerpdossier voor certificering in het geval van het VK), ongeveer 5 jaar, inclusief de verplichte openbare onderzoeken, indien van toepassing.

Ervoor zorgen dat de verschillende regelgevende stappen van tevoren goed zijn voorbereid, geanticipeerd en opgenomen in de wereldwijde planning van het project is een belangrijke succesfactor om uitglijden te voorkomen en de resterende onvoorziene omstandigheden te kunnen beheren. Het is nog belangrijker in het kader van een nieuw reactorontwerp, als SMR's, waarvoor de regulator een nieuwe manier moet overwegen om een innovatief ontwerp in licentie te geven, met een andere manier om ernstige ongevallen te overwegen, een veel lager vermogen, meestal een veiligheidsfilosofie op basis van passieve systemen, en een nieuw schema voor de productie en constructie van componenten op locatie.

Alle projecten, en meer in het bijzonder in Finland en Frankrijk, hebben te kampen gehad met onduidelijke veiligheids- en kwaliteitseisen en het beheer van de eisen is niet correct toegepast. De veiligheids- en kwaliteitseisen die van toepassing zijn op het ontwerp, de productie van componenten en de bouw op locatie moeten duidelijk, vermeld en goed beheerd zijn tijdens het project, vanaf het begin en op het hoogste niveau van de projectorganisatie.

De veiligheidsreferentie, en in veel gevallen de modaliteiten om de verschillende vereisten toe te passen, werden niet gedefinieerd vóór de productie van componenten en de bouw ter plaatse en zijn gedurende het hele project instabiel geweest. In Frankrijk meer bepaald is het absoluut nefast geweest in termen van projectplanning. Zorgen voor de stabiliteit van de veiligheids- en kwaliteitsreferentie tijdens het project is een voorwaarde om het algehele projectschema en een goede uitvoering van de productie en installatie van componenten te waarborgen, inclusief de verwachte acties.

De controle- en inspectiemodaliteiten door de veiligheidsorganen, althans in Finland en Frankrijk, waren niet van meet af aan gedefinieerd en veroorzaakten onbeheersbare vertragingen. Dit geldt voor alle stappen tijdens de uitvoering van het project (ontwerpdocumentatie en gedetailleerde veiligheidsanalyse, productie van componenten - meer dan 1000 wachtpunten voor inspectie voor een stoomgenerator, bijvoorbeeld -, en constructie op locatie). Controle- en inspectieprocessen en -modaliteiten, in overeenstemming met de veiligheids- en kwaliteitseisen, moeten vooraf duidelijk worden gedefinieerd en besproken met de veiligheidsinstantie, althans voor de veiligheidsgerelateerde componenten.

Alle nieuwbouw die vandaag aan de gang is, is op bestaande nucleaire sites, de locatie die het toestaan was meestal geen probleem, wat natuurlijk niet betekent dat het niet goed moet worden behandeld. Locatiestudies moeten vroeg genoeg worden uitgevoerd en er moet worden geanticipeerd op locatie specifieke veiligheidsvoorzieningen. Zorg voor een soepel proces voor het toestaan van de locatie.

Veiligheidsinstanties en controleorganen waren niet voorbereid, noch gedimensioneerd om de grote hoeveelheid documentatie aan te kunnen die moet worden gecontroleerd en goedgekeurd en de controle- en inspectiewerkzaamheden die tijdens de productie- en bouwfasen moeten worden uitgevoerd. Het zorgde voor veel problemen bij het schemabeheer.

Voor zover mogelijk moet de organisatie om de piekvraag naar veiligheidsexpertise en controle- en inspectie-ervaren personeel aan te kunnen, vooraf worden geanticipeerd en besproken met de overeenkomstige autoriteiten. Er moet worden onderhandeld over aanvaardbare vertragingen bij de goedkeuring en er moet worden voorzien in de nodige externe steun. Het kan erg gevoelig zijn in Nederland, vooral als zowel grote energiereactoren als SMR's in dezelfde periode worden gelanceerd.

Meer globaal, wat SMR's betreft, moet zoveel mogelijk worden gezorgd voor een geharmoniseerde aanpak van de Europese veiligheidsinstanties om normalisatie mogelijk te maken en een nieuwe primeur in elk land te voorkomen. Met dat in gedachten is het initiatief van het EDF Nuward SMR-project in Frankrijk, waarbij een gemeenschappelijke "pre-licensing" wordt uitgevoerd waarbij Franse, Finse en Tsjechische veiligheidsinstanties betrokken zijn, heel interessant en zou het kunnen worden besproken met de Nederlandse veiligheidsautoriteit. Deelname aan dit initiatief zou een goede manier kunnen zijn om te beginnen en zou het mogelijk maken om het overeenkomstige voordeel van gestandaardiseerde licentiebenaderingen te benutten.

## Maturiteit van het ontwerp – Normen en standaarden

Toen het OL3-project van start ging, was het basisontwerp voor EPR nauwelijks voltooid. Het starten van de bouw in zo'n vroeg stadium van de ontwerpactiviteiten was duidelijk zeer riskant en risico's kwamen uiteindelijk tot uiting. Er waren nog veel onzekerheden op het gebied van licenties, maakbaarheid en productie van componenten. Landspecifieke kenmerken en normen (zoals YVL-normen in Finland of specifieke vereisten voor I&C in het VK) werden niet verwacht. Meer globaal waren de geldende normen en standaarden, evenals technische regels, niet duidelijk genoeg op het startpunt van het project.
Om de planning voor een opstart vóór 2035 veilig te stellen, moet waarschijnlijk een volwassen gedetailleerd ontwerpniveau en een duidelijke reeks toepasselijke normen, normen en technische regels worden geselecteerd. Vereisten, configuratie en gegevensbeheer maken deel uit vanaf het begin van projectmanagementprocessen en -tools.

## Gereedheid van de toeleveringsketen

Toen het OL3-project werd gestart, was er al ongeveer 20 jaar geen nieuwbouw in Europa gebouwd en gingen de knowhow, ervaren personeelscapaciteit, technische capaciteiten en EPC-ervaring verloren. Een van de uitstekende voorbeelden was op het gebied van lassen, waarvoor het werven van alle gekwalificeerde lassers in heel Europa verre van voldoende was om met het juiste kwaliteitsniveau de productie- en installatiewerkzaamheden voor de lopende projecten te garanderen. Het vereist ongeveer 10 jaar om een lasser van "nucleaire kwaliteit" op te leiden en te kwalificeren, en het bijbehorende personeelsbestand wordt nog steeds opgebouwd met een sterke steun van EDF.

Zelfs op het gebied van civiele werken zijn OL3 en Flamanville gebruikt als trainingscentra door de CW-bedrijven, met uiteraard enkele initiële kwaliteitsproblemen. Het goede nieuws van vandaag is dat de lessen die zijn geleerd van OL3, FA3 en nu HPC duidelijk zijn geïntegreerd en dat we nu kunnen profiteren van een veel beter voorbereide supply chain dan 10 jaar geleden. Maar ze hebben projecten nodig om het juiste niveau of de juiste gereedheid te behouden, de meeste activiteiten zijn nu voorbij voor OL3 en FA3. Beslissingen over het Franse programma worden niet voor 2023 genomen. Het zal een belangrijke rol spelen in de manier waarop leveranciers de knowhow die is teruggewonnen langs de 3 eerste GEN III-reactorprojecten in Europa al dan niet zullen behouden.

Zorg voor een goede toewijzing van de projectactiviteiten om het industriële schema te optimaliseren en de interfaces te minimaliseren, zorg voor de gereedheid van de supply chain voor een goede projectuitvoering, inclusief EPC-competenties, en het benutten van alle voordelen van de ervaring die is opgedaan met de lopende projecten zullen belangrijke succesfactoren zijn voor SMR-nieuwbouwprojecten in Nederland.

## Project-/programmamanagement

De eigenaar en toekomstige exploitant heeft een belangrijke rol te spelen om het succes van het project te garanderen, naast de operationele uitmuntendheid van EPC. Relatie met de Veiligheidsautoriteit, beheer van onvoorziene omstandigheden, beheer van specificaties en vereisten van de eigenaar, periodieke uitgebreide projectbeoordelingen, beheer van wijzigingsverzoeken van EPC of supply chain, goedkeuring van documentatie en financiële verplichtingen ... al deze activiteiten moeten naar behoren worden georganiseerd en beheerd, meestal door een klein ervaren team op hoog niveau.

Het uitvoeren van dergelijke grote projecten of programma's vereist vrij specifieke kwaliteiten en ervaring, en een sterk leiderschap om grote multidisciplinaire teams te starten rond duidelijke projectdoelstellingen (veiligheid, kwaliteit, planning en kosten). Het juiste projectteam kan het verschil maken. Vanuit ons oogpunt en onze ervaring zijn de sleutelposities de projectdirecteur, uiteraard de directeur planningsbeheer, de manager financiën en risico's, het hoofd inspectie en versnelling, de engineeringmanager en de bouwdirecteur. Allen moeten een echte ervaring hebben in grote projecten, en ten minste een deel van het team in de nucleaire industrie. Er moet een projectmanagementreferentie zijn, evenals een duidelijk risicobeheerproces.

## III.5 EU-TAXONOMIE EN VOORUITZICHTEN VOOR KERNENERGIE

De wel of niet inclusie van kernenergie in de EU-Taxonomie heeft zeker een beduidende impact op de mogelijkheden voor kernenergie in Europa en dus Provincie Limburg zowel naar de financierings-mechanismes alswel eventueel de technologische opties.

### III.5.1 Enige info omtrent de EU-Taxonomie

De EU-taxonomieverordening [7] stelt een kader vast voor de classificatie van "groene" of "duurzame" economische activiteiten die in de EU worden uitgevoerd. Het ondersteunt de klimaat- en energiedoelstellingen van de EU voor 2030 en begeleidt de EU in de richting van klimaatneutraliteit tegen 2050. Het classificatiesysteem voor duurzame activiteiten heeft tot doel een gemeenschappelijke opvatting tot stand te brengen. De EU-taxonomie richt zich op de volgende zes milieudoelstellingen:

- Mitigatie van klimaatverandering
- Aanpassing aan klimaatverandering
- Duurzaam gebruik en bescherming van water en mariene hulpbronnen
- Transitie naar een circulaire economie
- Preventie en bestrijding van verontreiniging
- Bescherming en herstel van biodiversiteit en ecosystemen

De Technical Expert Group on Sustainable Finance, die de Commissie adviseert over taxonomie, erkent dat kernenergie een koolstofarme energiebron is. Dit is in lijn met de standpunten van internationale organisaties zoals het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) en de Economische Commissie voor Europa van de VN, die de CO2-uitstoot van kerncentrales over hun levenscyclus vergelijkbaar achten met die van hernieuwbare energiebronnen (als laag of zelfs lager).

Het oordeel van deskundigen was echter minder overtuigend over de andere milieueffecten van kernenergie en de verenigbaarheid ervan met het criterium "do no significant harm (DNSH)". Daarom heeft de Commissie een specifiek proces voor kernenergie opgezet, met een technische beoordeling door het Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek (JRC), de wetenschaps- en kennisdienst van de Europese Commissie. Hun verslag is gepubliceerd en beoordeeld door deskundigen van de lidstaten op het gebied van stralingsbescherming en afvalbeheer die door het Wetenschappelijk en Technisch Comité zijn aangewezen overeenkomstig artikel 31 van het Euratom-Verdrag, alsmede door deskundigen van het Wetenschappelijk Comité voor gezondheids-, milieu- en opkomende risico's (SCHEER). Over het geheel genomen wordt in het verslag en de evaluaties geconcludeerd dat de naleving van de veiligheidsnormen en de vereisten inzake afvalbeheer in het kader van het regelgevingskader in de EU-lidstaten een hoog niveau van bescherming van het milieu en van mensen waarborgt.

Rekening houdend met wetenschappelijk advies en de huidige technologische vooruitgang, is de Europese Commissie van mening dat er een rol is voor particuliere investeringen in gas- en nucleaire activiteiten in de overgang, wat als zodanig is vastgesteld in een gedelegeerde verordening [8].

### III.5.2 EU-Taxonomie en kernenergie

Belangrijke data voor kernenergie in de taxonomie zijn nu:

- Nieuwe kerncentraleprojecten, waarbij gebruik wordt gemaakt van de beste bestaande technologieën, zullen tot 2045 worden erkend;
- Wijzigingen en upgrades van bestaande nucleaire installaties, met het oog op de verlenging van de levensduur, zullen tot 2040 worden erkend;
- Eindbergingsfaciliteiten voor laagradioactief afval moeten al operationeel zijn en de lidstaten moeten beschikken over een gedetailleerd plan om tegen 2050 een eindbergingsfaciliteit voor hoogradioactief afval in gebruik te hebben.

De wet (gedelegeerde verordening) treedt in januari 2023 in werking. Het verdient wel aanbeveling om, bij voorgenomen investeringen in de uitrol van nucleaire energietechnologie in Nederland, waaronder in Limburg, de exacte tekst van de (gedelegeerde) verordening [7,8] en de interpretatie van de voorwaarden en bepalingen daarin nauwkeurig verder te bestuderen.

## III.6 REFERENTIES


1. University of Chicago (VS), Argonne National Laboratory (VS), "The Economic Future of Nuclear Power", 2003
2. OESO NEA, "Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities", 2021
3. Rolls Royce, "Rolls-Royce SMR shortlists locations for first factory", 2022
4. UK Government, Future Nuclear Enabling Fund (2022)
5. OESO/NEA, 2022. High-temperature Gas-cooled Reactors and Industrial Heat Applications. NEA No. 7629.
6. Daniel Tadeusz Wojtaszek and Sourena Golesorkhi, 2020. FUEL CYCLE IMPLICATIONS OF DEPLOYING HTGRS IN HYBRID ENERGY SYSTEMS AS RESERVE POWER GENERATION IN ONTARIO. CNL Nuclear Review. 10(1): 30-38. https://doi.org/10.12943/CNR.2020.00002.
7. VERORDENING (EU) 2020/852 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 18 juni 2020 betreffende de totstandbrenging van een kader ter bevordering van duurzame beleggingen en tot wijziging van Verordening (EU) 2019/2088
8. GEDELEGEERDE VERORDENING (EU) 2022/1214 VAN DE COMMISSIE van 9.3.2022 tot wijziging van Gedelegeerde Verordening (EU) 2021/2039 wat betreft economische activiteiten in bepaalde energiesectoren en Gedelegeerde Verordening (EU) 2021/2178 wat betreft specifieke openbaarmakingen voor die economische activiteiten.

# IV. SMR-opties voor de Provincie Limburg

Na de beschrijving van de geprojecteerde energie-behoeften (hoofdstuk II) en de kernenergie ontwikkelingen en uitdagingen alsook de in-ontwikkeling zijnde (Mini-)SMR (hoofdstuk III) wordt in dit hoofdstuk de focus gelegd op de Provincie Limburg en welke (Mini-)SMRS, AMRs of zelfs grote kerncentrales zouden kunnen worden voorgesteld?

## IV.1 (MINI-)SMRS VERSUS BEHOEFTEN EN SPECIFICITEIT VAN DE PROVINCIE LIMBURG

De (Mini-)SMRs welke in dit rapport worden vermeld kenmerken zich door 'klein' te zijn t.o.v. de typische grote kerncentrales, alswel 'modulair' te zijn waarbij dit laatste evenwel verschillende vormen aanneemt zoals in het vorige hoofdstuk is omschreven.

Niettemin vergt dergelijke verschillende vormen van 'modulariteit' enige nuancering in de context van de energie-behoeften voor de Provincie Limburg.

De modulariteit qua constructie alsook in de mogelijkheden tot vervanging van componenten, tevens tijdens ontmanteling, zijn inherente voordelen welke zeker gelden voor (Mini-)SMRs voordelen aanleveren doch waarbij dergelijke aanpak tevens meer en meer ingang vindt in de grote kerncentrales met oog op een grotere efficiëntie qua bouw en dus algehele financiële prestatievermogen.

Er zijn evenwel twee types van modulariteit welke in het kader van de Provincie Limburg beduidend van waarde zijn en een differentiatie tussen de voorheen vermelde (Mini-)SMRs brengt, namelijk:

- De modulariteit naar investering en dus het potentieel naar multi-unit sites of multi single-unit sites met oog op een meer gealigneerde uitbouw van de (Mini-)SMRs met de energie-behoeften:
  - Heel wat economische kosten-effecten in de bouw van kerncentrales (groot en klein) komen vanuit twee belangrijke aspecten, zijnde enerzijds de schaalgrootte effecten ("economy of scale"), anderzijds de leercurve effecten, indien series kunnen worden gebouwd, met dus een snelle terugkoppeling van bouw en uitbatingservaring op de volgende te bouwen kerncentrales.
  - Waar de schaalgrootte effecten in het verleden aanspoorden naar grotere LWR eenheidsvermogens van > 1000 MWe per kerncentrale vinden we in sommige SMR-concepten een vergelijkbare schaalgrootte-effect, bijvoorbeeld;
    - Waar de NuScale SMR lange tijd werd voorgesteld als een geheel modulair systeem welke dus theoretische per nucleaire module van 77 MWe kon worden uitgebouwd, tonen de meeste studies aan dat een economische, en zelfs kritisch, voordeel optreedt indien de civiele technieken qua niet-nucleaire gedeelten van de kerncentrale in éénmaal worden gebouwd waarbij nadien de nucleaire modules kunnen worden ingebracht. Waar dit in principe een aantrekkelijk idee kan vormen is de economie van dergelijke aanpak evenwel leidend tot minimaal benodigde 6 nucleaire modules om het geheel als rendabele investering te zien. Aldus verkrijgt men een minimaal vermogen van 528 MWe als 'start'-vermogen, doch, eens geïnvesteerd, kan dit inderdaad modulair wordt uitgebaat. Evenwel zal er, om diezelfde economische redenen, een voorkeur zijn om dergelijke SMR in vollast uit te baten.
    - NuWard bestaat uit tweemaal 170 MWe LWR-type SMRs welke evenwel als binoom worden gebouwd en dus een initële investering voor in totaal 340 MWe vergen. Nogmaals kan hier dergelijke SMR modulair worden uitgebaat waarbij tijdelijk, bijvoorbeeld voor onderhoud, één van de 170 MWe-eenheden wordt stilgelegd terwijl de andere nog operationeel blijft. Dit betreft echter qua investering een geringe graad aan modulariteit en is het eenheidsvermogen van 340 MWe essentieel ingegeven door de verwachte markt-segmenten welke een dergelijke grootte-orde aan energie-behoeften hebben.
- De schaalgrootte zal tevens voordelen opleveren in de energieproductie kosten per MWth waar inherente voordelen optreden om door grotere schaal finaal lagere generatie-kosten te bereiken;
- Modulariteit naar uitbating bepaalt in welke mate dergelijke kerncentrales op een meer continue basis de energie-behoeften kan beleveren waarbij een tijdelijke stilstand omwille van herlading met splijtstof en onderhoud minder impact heeft op dergelijke continue energieproductie. Dit kan inderdaad aanzienlijke voordelen opleveren indien kritische industriële processen sterk afhankelijk zijn van dergelijke continue energie-aanbod en waar de energieproductie-eenheden op dus een modulaire manier de vraag kunnen behartigen. Tevens betreft dit een risico-minimalisatie waarbij een onvoorziene stilstand van een (grote) kerncentrale een al te grote hap uit het energie-aanbod zou betekenen. Dergelijke modulariteit kan men dan ook verkrijgen door multi-unit site uitbouw of multi single-unit sites uitbouw, i.e. meerdere (Mini-)SMRs op één site dan wel meerdere sites met één (Mini-)SMR.

- Beiden kunnen immers van serie-effecten in de bouw van dergelijke multi-units voordeel uithalen zeker indien dit binnen een regio-grootte zoals Provincie Limburg geschiedt. De noodzakelijke logistieke ondersteuning van het bouwproces wordt eerder bepaalt door het serie-effect meer dan door de co-locatie op één site indien de verschillende sites uiteraard in nabije afstand liggen;
    - Dergelijke (Mini-)SMRs benodigen tevens niet de aansluiting op 380 kV HS-net en zijn geheel compatibel met bestaande 150 kV lijnen wat dus tevens een connectiviteit en dus redundantie via bestaande lijnen verzekert;
    - De modulariteit in uitbating mag geen excuus zijn om te kiezen voor SMRs, indien er geen meer fundamentele vraag naar redundantie is. Zowel grote als kleine kerncentrales hebben reeds bewezen regelbaar vermogen aan te kunnen bieden (zie tekstbox), zoals dagelijks wordt gedaan in bijvoorbeeld Frankrijk door EdF. Echter vergen de meeste ontwerpen van kerncentrales een geregelde stilstand, zo'n elke 12 à 24 maanden, voor onderhoud en splijtstof-beheer. Indien de energie-behoeften dergelijke discontinuïteit, gezien eventuele beperkte back-up capaciteit via ander generatie-aanbod of via het netwerk voor de elektriciteits-vraag, niet aankan, levert inderdaad een multi-unit aanpak door (Mini ) SMRs een hoge toegevoegde waarde.

Er zijn tevens LWR (Mini ) SMRs die de noodzaak tot dergelijke stilstand voor onderhoud en voornamelijk splijtstof-beheer kunnen minimaliseren, zowel in frequentie als in tijdsduur. Sommige ontwerpen van (Mini ) SMRs voorzien in splijtstof-gebruik gedurende 4 – 6 jaar, zelfs met tot 5% $^{235}$U-verrijking van het UOX, waarbij, optioneel, zelfs wordt voorzien om de gehele splijtstoflading na die 4-6 jaar te vervangen. Dergelijke 'batterij'-type (Mini ) SMRs kunnen inderdaad van aanzienlijke interesse zijn, voornamelijk in afgelegen gebieden, waarbij een meer frequente stilstand en voornamelijk splijtstof-beheer idealiter minimaal geschiedt (bijvoorbeeld vanwege minimalisatie van splijtstof transport). Sommige Mini-SMR concepten, zoals Last Energy, stellen zelfs voor om elke 6 jaar zowel het reactorvat als de splijtstof in één geheel te vervangen en dus een nieuw reactorvat met bijhorende splijtstof aan te leveren.

Deze lange splijtstof-cycli in dergelijke reactoren vergen evenwel een hoger uranium-gebruik om een dergelijk lange splijtstof-gebruik toe te laten, welke tevens dient gepaard te gaan met gebruik van zogenoemd slijtend gif ("burnable poison"). Finaal zal per MWth gegenereerde warmte een hogere hoeveelheid gebruikte splijtstof worden ontladen wat, op zichzelf, geen kritiek nadeel behoeft te zijn, aangezien het recyclage-potentieel van dergelijke splijtstof tevens groot kan zijn en dus geïntegreerd kan worden in een opwerking-recyclage strategie, zoals heden reeds in Nederland uitgevoerd.

Gezien de energie-behoeften van de Provincie Limburg, in deze studie summier in kaart gebracht, omvat volgende tabel IV.1 de mogelijke afwegingen welke in dergelijke energie-behoefte voor (Mini-)SMRs dienen te worden beschouwd.

Samenvattend, de energie-behoeften in de Provincie Limburg hinten naar:

- Een inzet van Mini-SMRs met eenheidsvermogen van 20-50 MWe in zowel een multi-unit site aanpak voor industriële cluster(s) alswel, met serie-effect naar NOAK toe, als multi single-unit sites voor LEA-bedrijven en tuinbouw energievraag.
    - Een meer gedetailleerde haalbaarheidsstudie (pre-haalbaarheid studie of "Phase 0" (zie hoofdstuk I en VI) is aanbevolen om het eenheidsvermogen en de elektriciteit/warmte-koppeling noden en mogelijkheden technisch-economisch te detailleren alsook qua vergunnings-traject te analyseren.
- De sterke elektrificatie behoefte van, op grotere schaal, voornamelijk de industriële cluster(s) (bijvoorbeeld Chemelot) zal op termijn schaalgrootte-effecten opleveren waarbij eerder SMRS of grote LWRs geconnecteerd via de 380 kV HS-lijn de nodige elektrificatie-aanbod aanleveren. Qua warmte-koppeling blijven evenwel de Mini-SMRs een welkome aanvulling, aangezien deze tevens met een hogere ratio warmte/elektriciteit de benodigde warmte kunnen aanleveren aande industriële processen;
- Betreffende de gebouwde omgeving alsook voor overige industriële energie-behoeften in de Provincie Limburg is een regionaal aanbod met schaalgrootte van enkele tientallen tot honderden MWe/MWth aangewezen en dit in een gefaseerde ontwikkeling gekoppeld aan de uitrol van meer geïntegreerde energie-systemen.

| | Modulariteit in investering | Modulariteit in uitbating |
|---|---|---|
| Schaalgrootte van energie-vraag | • De voorziene energie-vraag in Limburg schaalt op:<br>  • Tientallen MWe's per elektrificatie-fase voor industriële cluster Chemelot<br>  • 10 – 20 MWe per LEA of voor cluster van LEA-bedrijven | • De verschillende stappen naar elektrificatie alsook proces/rest warmte gebruikt vergt tevens een gefaseerde aanpassing van de kerncentrales naar dergelijke elektriciteit/ warmte-koppeling uitbating. Een gemoduleerde investering alswel uitbating volgens verschillende geoptimaliseerde uitbatings-condities kan hiertoe voordelen aanbieden |
| Verzekerde continuïteit van energie-vraag | • Modulariteit via multi-units sites of multi single-unit sites kan aangewezen zijn aangezien:<br>  • Gefaseerd uitbouw van elektrificatie van processen<br>  • Lokale/regionale clusters van LEA-bedrijven gecombineerd met tuinbouw bedrijven (warmte vraag) naar lokalere generatie-capaciteit<br>• Op niveau van Provincie Limburg kan serie-effect uitgebaat worden met maximale voordelen naar NOAK-effecten | • Voor bepaalde LEA-bedrijven en Chemelot-processen is verzekerde energie-aanbod cruciaal<br>  • Voor elektriciteit kan de toekomstige 380 kV HS-lijn hieraan een antwoord bieden (mede door grote LWRs elders in Nederland)<br>• Voor gecombineerde elektriciteit-warmte generatie dient in lokale redundant aanbod voorzien in grootte-orde van 10 (heden) – honderden MWth naar 2040 toe |

## IV.2 KAN EEN SMR AANSLUITEN AAN DE ENERGIE-BEHOEFTEN VOOR DE PROVINCIE LIMBURG EN MEER BEPAALD DE INDUSTRIËLE CLUSTER CHEMELOT EN LEA-BEDRIJVEN?

In hoofdstuk II werden de energie-behoeften voor de Provincie Limburg en deze voor Chemelot en de LEA-bedrijven in kaart gebracht. Deze sectie koppelt deze energie-behoeften aan de SMR-concepten en opties welke mogelijkheden bieden in de Provincie Limburg. Figuur IV.1 vat de energievraag projecties samen voor verschillende sectoren in de Provincie Limburg met aanduiding van mogelijke elektriciteits-vraag, waterstof noden alswel de mogelijke ontwikkeling van restwarmte toepassingen.

De verschillende scenarios voor Chemelot 's en LEA-bedrijven energievraag is tevens in Figuur IV.2 vervat zowel uitgedrukt in TWhe/jaar vraag alswel de equivalente vermogens in MWe welke deze TWhe/jaar vraag kunnen voldoen (à rato van een gemiddelde beschikbaarheidsfactor van 90% zoals gebruikelijk met kerncentrales). De aardgas en elektriciteits vraag (Figuur IV.4) alsook de daaruit volgende equivalente elektriciteitsvraag voor de LEA-bedrijven in 2019 wordt weergegeven in Figuur IV.5.

In het geheel wordt dus een toenemende elektrificatie verwacht van het geheel van de Provincie Limburg en zeker wat de energie-intensieve industrie betreft wat zich vertaalt naar een equivalente productie-vermogen behoefte van zo'n 30 TWhe/jaar in 2030 naar ca. 50 – 82 TWhe/jaar in 2050 voor het geheel aan elektriciteits-vraag in Limburg waarbij Chemelot zelf reeds instaat voor een vraag van 3.3 TWhe/jaar in 2030 tot 6.1 à 14.9 TWhe/jaar in 2050. De LEA-bedrijven evolueren voor elektriciteit alleen van zo'n 20 TWhe/jaar in 2030 naar 33 à 58 TWhe/jaar in 2050.

Uitgedrukt in regelbaar vermogen vertaalt zich dit voor Chemelot en de LEA-bedrijven in Figuur IV.2 voor elektriciteit alleen in zowat 1 GWe voor Chemelot (op 1.4 GWe voor het geheel van industrie) in 2020 naar 3 à 7 GWe voor Chemelot in 2050 op zo'n 5 à 10 GWe voor het geheel aan industrie. Merk op dat de elektrificatie van de processen bij bijvoorbeeld in fase geschiedt zoals nogmaals in Figuur IV.6 samengevat.

## HOE HET TRAJECT NAAR SMR IN PROVINCIE LIMBURG NAAR 2030 TE 'DE-RISKEN'?

Het minimaliseren van nieuwbouw risico's is essentieel zoals ook reeds in hoofdstuk III werd samengevat. Niettemin achten we het nuttig voor de beschouwing van een (Mini-)SMR-project in de Provincie Limburg nogmaals de voornaamste elementen te herhalen.

Tal van LWR (Mini-)SMRs zijn voorzien in demo/prototype fase rond de periode 2030-2035 met verwachte realisatie van dergelijke prototypes in de VS, Canada en mogelijks Europa. **Waar uiteraard de technologische maturiteit een zeer belangrijk gegeven is dient een geheel project tot dergelijke SMR-realisatie worden 'de-risked', d.w.z. de nodige voorbereidingen en randvoorwaarden dien te worden geschapen zodat zowel qua tijdslijn alswel budgettair een dergelijk project tot een goed einde wordt gebracht**.

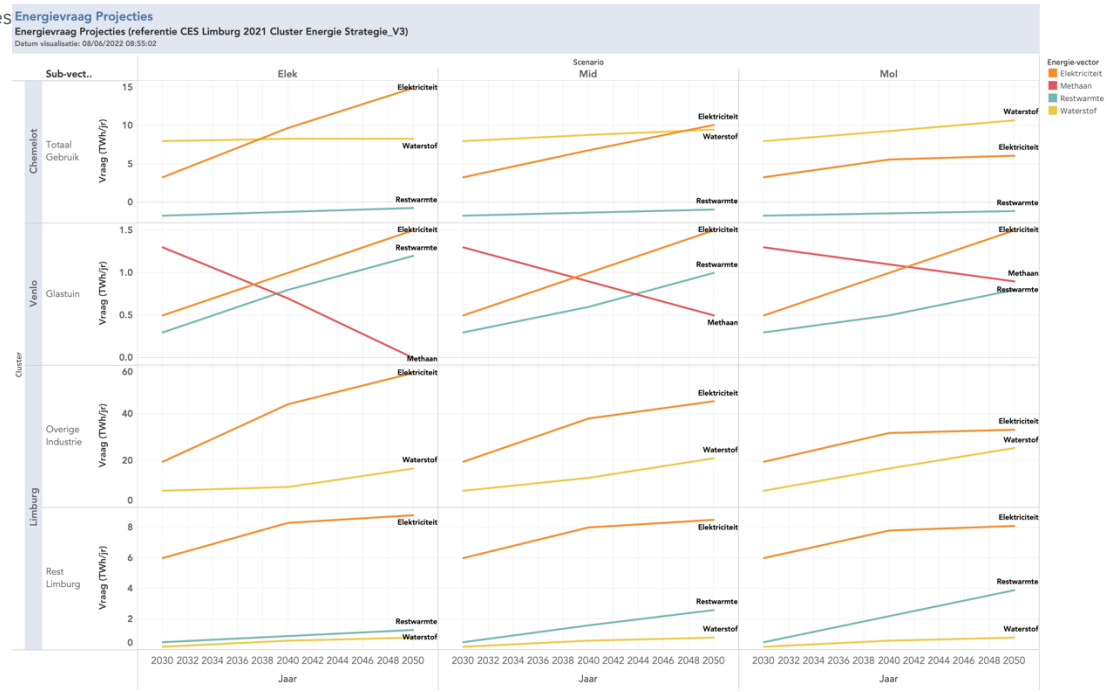
**De voornaamste 'de-risking' aspecten en bijhorende acties betreffen:**

1. **Bepaal een nationale energiestrategie waarin (Mini-)SMR-projecten worden geïntegreerd (Provincie Limburg)**. Deze projecten moeten nu integraal onderdeel zijn van de Nederlandse nucleaire strategie. Als de periode 2030-2035 wordt beschouwd als die van de overgang tussen de huidige situatie en die met de implementatie van 2 hoogvermogen reactoren naast de bedrijfsduur-extensie van Borssele, dan moet de ingebruikname van de eerste (Mini-)SMR's in dezelfde periode plaatsvinden om de goede werking en co-habitatie van de verschillende elektrische generaties te garanderen.
    - Deze beperking leidt tot het nemen van een minimum aan risico's voor de keuze van de leverancier (of leveranciers) van technologieën.
2. **Kies een bekende technologie** = LWR, met veel overeenkomsten met de technologie van grote LWR-reactoren.
    - Het is wenselijk om te moeten kiezen tussen ten minste drie LWR (Mini-)SMRs ontwikkelaars om vergelijkingen te kunnen maken en uiteindelijk de kandidaten in competitie te kunnen brengen.
3. **Anticipeer op een First-of-a-Kind (FOAK) situatie. Ondanks de hierboven genoemde overeenkomsten zullen (Mini-)SMR's waarschijnlijk innovaties presenteren die technologische risico's kunnen opleveren**. Gezien de inbedrijfstellingsperiode die vanaf vandaag is gepland, om een consistent wereldwijd nucleair programma aan te kunnen, is het zeer waarschijnlijk dat het project op zijn minst tot de "eerste in zijn soort" zal behoren. Nu anticiperen op deze situatie zou dan nodig zijn, door de voorwaarden te scheppen om de risico's die inherent zijn aan dit soort projecten te beperken. Op regeringsniveau, samen met de industriële verbruikers, moeten de financieringsvoorwaarden en -regelingen worden bestudeerd om de investering te vergemakkelijken, met inachtneming van de EUtaxonomie, en de principes van de industriële regeling moeten zorgvuldig worden geanticipeerd, rekening houdend met de feedback van ervaringen met de bestaande nieuwbouwprojecten in Europa.
    - **We doen drie voorstellen die kunnen helpen om op een dergelijke situatie te anticiperen:**
        - Verschillende(Mini-)SMR ontwikkelaars zoeken vooroverleg met regulators om hun respectieve ontwerpen aan een eerste screening te onderwerpen alsook om de markt-kansen beter in te schatten. Meer bepaald EdF heeft onlangs aangekondigd dat het zijn NUWARD SMR heeft gepresenteerd aan drie Europese veiligheidsinstanties, in Frankrijk, Tsjechië en Finland. **Het zou goed zijn als ANVS zich bij dergelijk einitiatieven in EU-verband aansluit om evaluatiemethoden te delen, de (Mini-)SMRs te kennen en een proces van harmonisatie van vergunningen aan te gaan.** Het is duidelijk niet per se een officieel vergunningsproces, maar deze "voor-overleg"-discussies zullen op zijn minst enige harmonisatie van licentieprocessen in Europa voor (Mini-)SMR's ondersteunen en de kopers in staat stellen te profiteren van standaardisatie, een voorwaarde voor het concurrentievermogen van (Mini-)SMR's.
        - **De constructie van een demonstrator door een leverancier zal het ontwerp debuggen en de risico's verminderen.** De demonstrator zal vertrouwen geven aan investeerders, exploitanten, belanghebbenden en het publiek.
            - De demonstrator zal de actoren van de toeleveringsketen serieuze informatie geven om de productietools voor te bereiden. Deze stap is al gepland voor sommige van de ontwerpen en waarschijnlijk zullen andere in de volgende jaren verschijnen.
            - **Indien de Provincie Limburg de tijdslijn van 2030 als urgent beschouwd voor de integratie van (Mini-) SMR(s) in de energiemix zal, met de Rijksoverheid, dienen te worden voorzien in de optie tot realisatie van een dergelijke (Mini-)SMR of tot participatie in een Europese context.**
        - **Operatoren werkgroep** : Exploitanten van kernreactoren in Frankrijk, Tsjechië, Finland, Nederland, ... kan zich verenigen om een werkgroep te vormen voor de ontwikkeling van beste praktijken voor het beheer van SMR's.
4. **De realisatie van een programma voor de bouw van nucleaire installaties is een project met zowel industriële als menselijke aspecten en de kwestie van human resources en kennis/expertise-management is fundamenteel op alle gebieden van dergelijk complex project**: organisatie en management, engineering, supply chain en constructie. Het bijna opgeven van investeringen gedurende twintig jaar heeft de competentie en know-how van een generatie van zeer gespecialiseerde ingenieurs, managers en technici opgeofferd. Recente projecten hebben de omvang van de vraag aangetoond. **Nederland zal nu een nationaal onderwijs- en opleidingsplan moeten opstellen dat in werking zal treden zodra het besluit tot het uitvoeren van een nucleair programma is genomen. Wat de Provincie Limburg betreft, is dit vraagstuk van vitaal belang en zal het moeten worden aangepakt, zodat de regionale werkgelegenheid ten volle van deze aanpak kan profiteren.**

Dergelijke grootte-orde aan elektriciteits-productie vermogen behoefte leidt alvast tot verschillende scenarios voor de (gedeeltelijke) invulling van deze behoeften met kernenergie, i.e.:

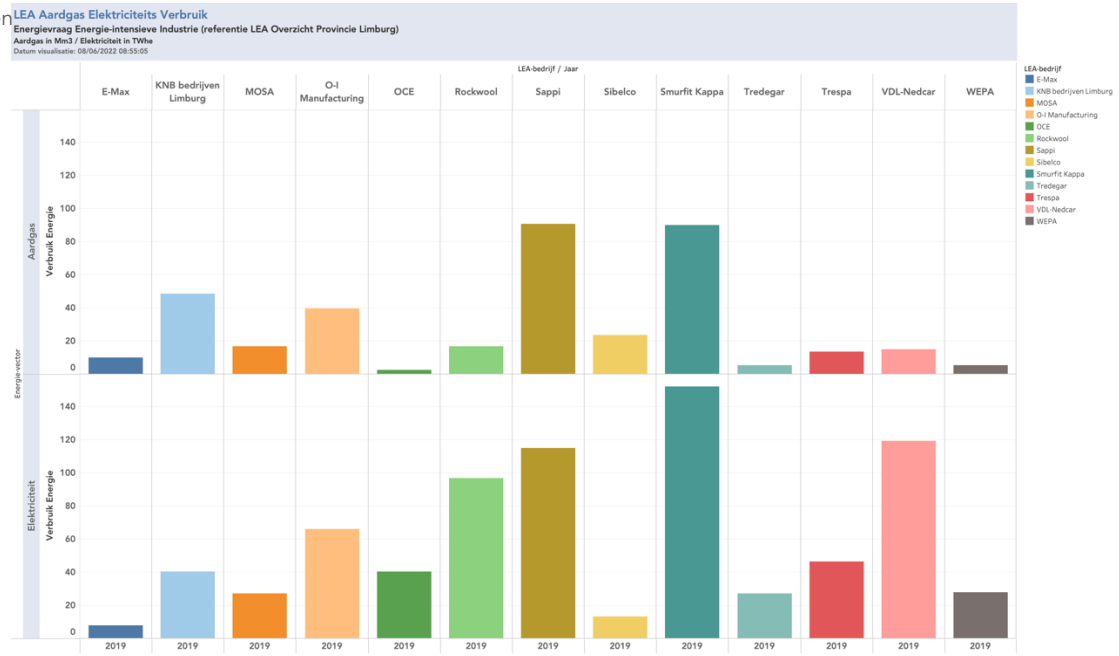
- Een eerste fase en/of pakket aan elektrificatie-behoeften omvat vermogens van 20 MWe tot ca 150 MWe vanaf de komende jaren tot ca. 2035. Bemerk tevens dat heel wat LEA-bedrijven momenteel een elektrificatie kennen tot ca 20 MWe vermogen behoefte per bedrijf (zie Figuur IV.3).
  - Dergelijke vermogens liggen in het domein van mini-SMRs en/of een combinatie van enkele Mini-SMRs teneinde het vermogen tevens op een redundante manier te leveren.
- Een tweede fase vanaf ca. 2035 plaatsts zich in gecombineerde vermogens van ca. 500 – 2000 MWe wat, gezien de beperking voor grote kerncentrales, een combinatie van enkele Mini-SMRs or eerder SMRS vraagt. Uiteraard niet uitsluitend dat dergelijke behoeften qua elektrificatie gepaard gaan met een combinatie van genetwerkte toevoer (via de 380 kV HS lijn actief vanaf ca 2032) alsook andere productie-mogelijkheden en dus niet in z'n totaliteit door dergelijke Mini-SMR/SMRs dient te worden voorzien.
- De behoeften naar of na 2050, als derde fase, dienen te worden beschouwd als geleverd door een combinatie van (genetwerkte) grote kerncentrales in Nederland in combinatie met een synergetische mix aan hernieuwbare energie en Mini-SMR/SMRs.

Figuur IV.2. Energievraag projecties voor Provincie Limburg

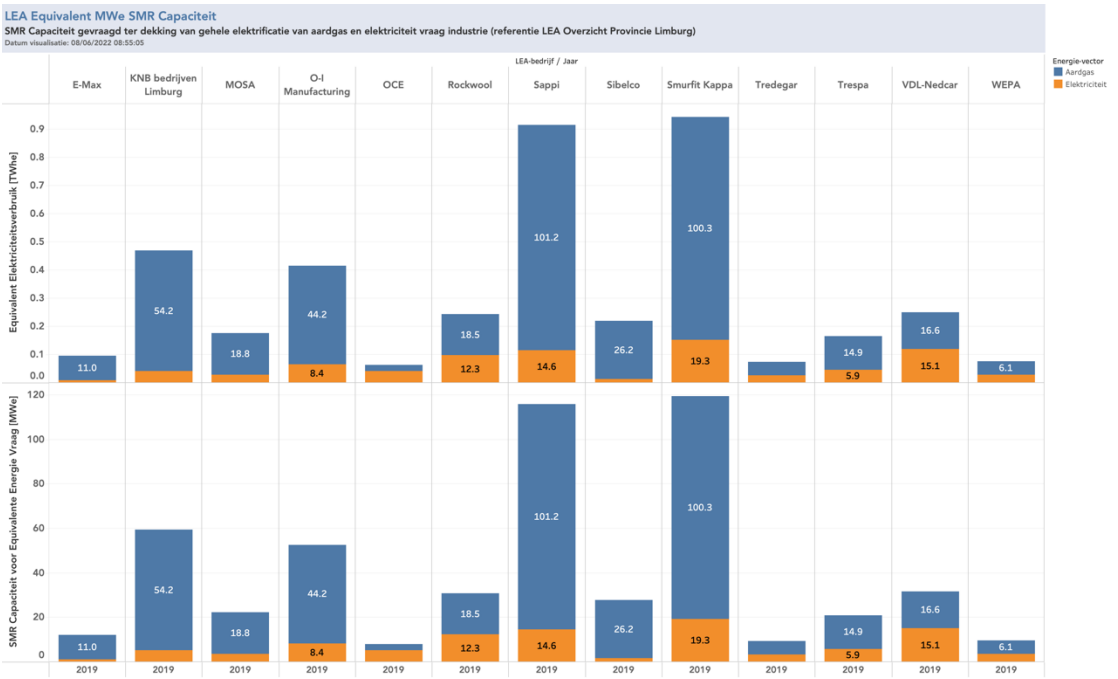



Figuur IV.3 Energie-behoeften voor Chemelot en LEA bedrijven alsook uitgedrukt in equivalence productie-capaciteit (MWe)

Figuur IV.4 LEA-bedrijven aardgas en elektriciteitsvraag in 2019




Figuur IV.5 LEA bedrijven equivalent elektriciteitsverbruik




Figuur IV.6 Elektrificatie-projecten Chemelot

| Elektrificatieproject | Verwacht benodigd vermogen | Jaartal |
|---|---|---|
| Elektrische stoomketels | Max 40 MWe | 2022 - 2026 |
| Elektrificatie stoomturbines (meerdere projecten) | Max 150 MWe | 2024 - 2035 |
| Warmtepomp projecten (MDR, meerdere projecten) | Max 20 MWe | 2024 - 2035 |
| Elektrificatie kleinschalige fornuizen | Max 20 MWe | 2025 - 2035 |
| Elektrificatie fornuizen aardgas reformers | Max 140 MWe (in stappen 70 MWe) | > 2030 |
| Elektrificatie fornuizen naftakrakers | Max 800 MWe (in stappen 400 MWe) | n.n.b. |
| Elektrolyse van stoom | Startend met 20 MWe | > 2027 |
| Plasma-technologie/plasmakraken | n.n.b. | > 2040 |

## IV.3 KAN EEN SMR GEÏMPLEMENTEERD IN DE PROVINCIE LIMBURG, I.E. PLANOLOGISCHE EN GEO-TECHNISCHE RANDVOORWAARDEN?

Het volgende hoofdstuk V gaat ruimer in op de planologische en geo-technische randvoorwaarden voor dergelijke kerncentrales in de Provincie Limburg met finaal een conclusie dat:

- Grote, i.e. > 1000 MWe, kerncentrales zowat uitgesloten zijn indien niet gekoppeld aan een geïntegreerde warmte-benutting inclusief restwarmte zodat de netto af te voeren warmte beperkt blijft tot zo'n 300 MWth per centrale (te vergelijken met zo'n 2000 MWth bij huidige centrales).
- Mini-SMRs en SMRs, zelfs zonder dergelijke geïntegreerd gebruik van de (rest)warmte, zijn wel compatibel met de geo-technische randvoorwaarden en dit voor meerdere sites in de Provincie Limburg. Dit geldt zeker betreffende de Mini-SMRs welke nog meer dan de SMRs kunnen gebruik maken van actieve luchtkoelings-systemen, met een minimale impact en integratie in de omgeving.

De combinatie van een (mini ) SMR met warmte-kracht koppeling laat toe om een maximale warmte-efficientie te verkrijgen door generatie van elektriciteit, proces-warmte en districts-verwarming door gebruik van de restwarmte. Evenwel is dit eveneens zo te voorzien voor grote kerncentrales in de toekomst.

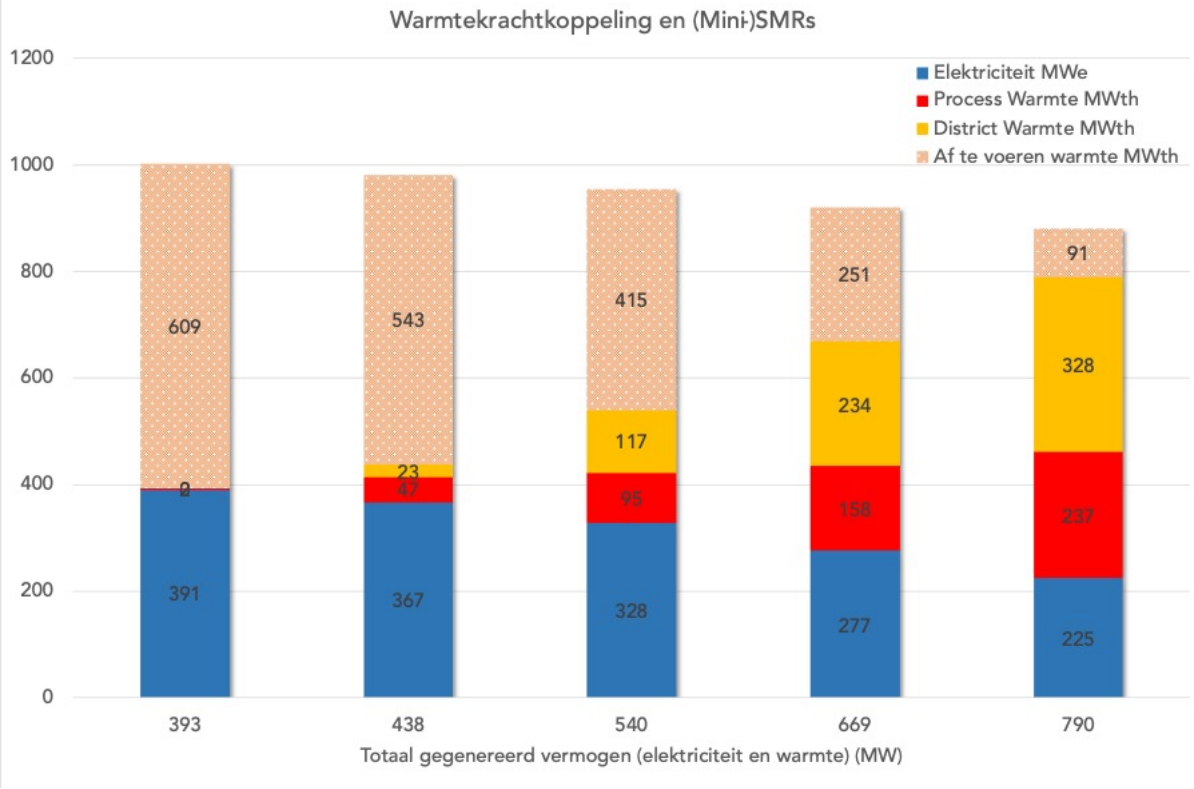
Op basis van een 'grote' 1000 MWth/393 MWe SMR wordt in Figuur IV.7 een vergelijking gemaakt met eenzelfde SMR, doch met verschillende graden aan gebruik van de gegenereerde nucleaire warmte van initieel 1000 MWth. In een klassieke uitbating van de SMR voor elektriciteitsproductie wordt netto 393 MWe elektriciteit gegenereerd en de resterende 607 MWth aan warmte afgevoerd naar de omgeving. Door meer en meer gebruik te maken van de beschikbare gegenereerde stoom-hoeveelheden voor proceswarmte ("PW"), alsook voor disctrict warmte ("DW"), kan de netto hoeveelheid energie van hetzelfde startvermogen gemaximaliseerd worden naar finaal een 790 MW gegenereerd vermogen ter beschikking aan de verbruikers en slechts een af te voeren warmte van 90 MW (d.w.z. < 10% t.o.v. de 61% in eerste louter elektriciteit productie), met tevens zo'n 240 MW aan proces-warmte en 328 MW aan district warmte. Uiteraard zijn er andere tussenliggende combinaties mogelijk, zoals tevens in Figuur IV.9 weergegeven. De resulterende marktwaarde, alsook aardgasbesparingen door dergelijk warmte-gebruik, vanuit dergelijke SMRs is aanzienlijk, zoals figuur IV.8 aantoont, en maakt dus de financierbaarheid voor dergelijke SMRs beduidend aantrekkelijker in een dergelijke energie-systeem aanpak. Een "Phase 0" of pre-haalbaarheidsstudie kan o.a. dergelijke technische-economisch evaluaties verder uitwerken met concretere systeemgegevens.

De geo-technische randvoorwaarden, alsook de tijdsplanning naar dergelijke meer geïntegreerde energie-systemen in de Provincie Limburg, maken de vroege inzet van grote kerncentrales, d.w.z. LWRs met > 1000 MWe, weinig waarschijnlijk, dan wel schier onmogelijk. Op termijn zou evenwel een dergelijke LWR toch kunnen worden gerealiseerd, mits het geheel geïntegreerd is in een energie-systeem met valorisatie van elektriciteit, proceswarmte en restwarmte, zodat de netto af te voeren restwarmte beperkt wordt tot ca. 200 - 300 MWth, wat dan wederom compatibel is met de beschikbare koude bronnen in de Provincie Limburg (vergelijkbaar met restwarmte die bij STEG- eenheden wordt afgevoerd). Doch een dergelijke optie is slechts op langere termijn te beschouwen, waarbij tevens grotere energie-systemen (bijvoorbeeld industriële clusters en gebouwde omgevingen) dergelijke > 1 GWe en meerdere honderden MWth's behoeften kunnen implementeren: een reden temeer waarom dergelijke grote kerncentrales in de Provincie Limburg nog niet realiseerbaar zijn naar de periode 2030-2035 toe.

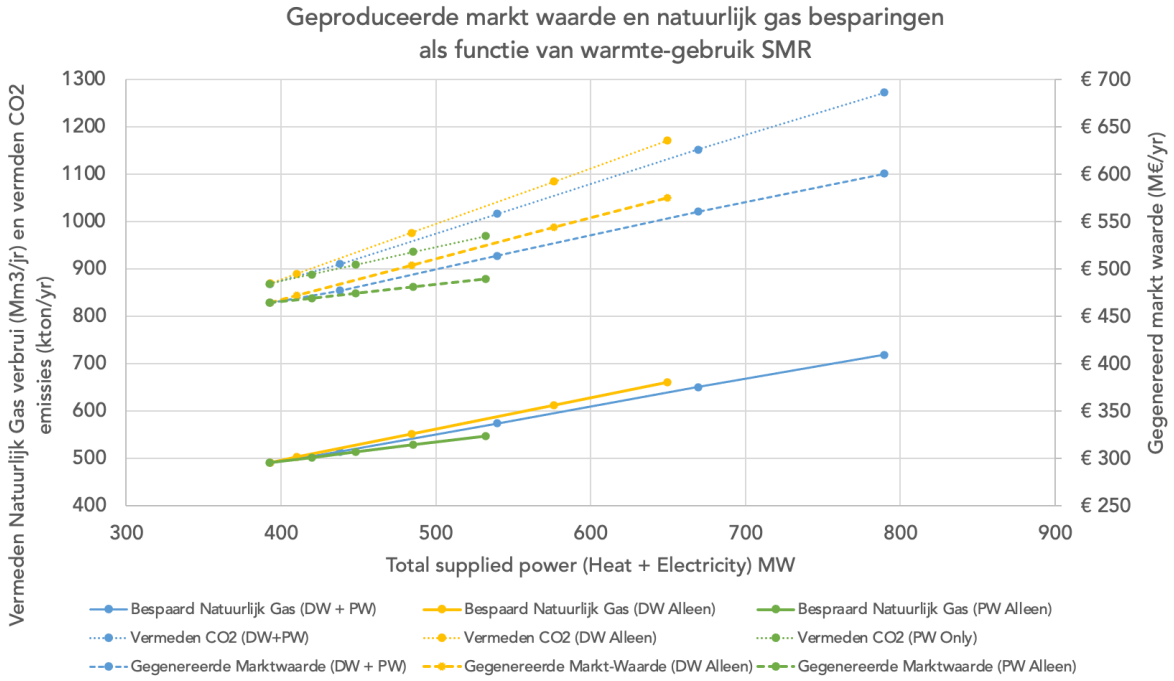
Kleine modulaire reactoren (SMRs) brengen hierbij de mogelijkheid om tegen de periode 2030-2035 wèl dergelijke gedecarboniseerde energie-productie aan te leveren, waarbij twee belangrijke opties zich aanbieden:

- Mini-SMRs met een eenheidsvermogen van 20 – 50 MWe , zijn een optie welke matuur en inzetbaar zijn in de Provincie Limburg vanaf 2030. Dergelijke Mini-SMRs zouden bovendien kunnen steunen op een sterk Nederlandse toeleveringsketen, alsook compatibel zijn met de noodzakelijke redundantie om met enkele van dergelijke Mini-SMRs op een continue basis energie toe te leveren in het vraag-bereik van 100 - 200 MWe en navenant honderden MWth's, compatibel met de continue energie-behoeften van de energie-intensieve industrie. Bovendien is het eenheidsvermogen van dergelijke Mini-SMRs geheel compatibel met de stapsgewijze aanpassing van de industriële processen en kunnen deze tevens op meerdere sites geïntegreerd. De geprojecteerde vraag aan vermogens door de LEA-bedrijven (Limburgs Energie Akkoord) is in de grootte-orde van enkele MWe tot tientallen MWe's per bedrijf, zodat een regionale clustering met dergelijke Mini-SMR's een optie kan worden;
- SMRs met een eenheidsvermogen van 200 – 300 MWe zijn eveneens een optie, welke realiseerbaar wordt geacht in Nederland en in de Provincie Limburg vanaf ca. 2035. Dergelijke SMR-ontwikkeling kan genieten van een wereldwijde interesse, doch kan tevens qua tijdsplanning beperkt worden door de mogelijke druk op de internationale toeleveringsketen voor dergelijke SMRs, hetgeen dus hun realisatie meer vanaf midden 2030 plaatst.
    - Vanwege een groter eenheidsvermogen zijn deze SMRS zeker een aangewezen optie vanaf 2035, met het oog op de hoge graad aan elektrificatie en warmtebehoefte, welke naar de jaren 2040 zeker de > 1 GWe en meerdere honderden MWth niveaus bereikt.

Figuur IV.7. SMRs en warmtekoppeling mogelijkheden naar maximaal gebruik van elektriciteit en warmte




Figuur IV.8 Overzicht analyse van marktwaarde en bespaarde natuurlijk gas en CO2 emissies door warmtekrachtkoppeling van (Mini-)SMRs



De analyse concludeert dat enkel licht-water gekoelde technologie (LWR) (Mini-)SMRs in aanmerking komen als optie naar 2030 toe. Andere, meer geavanceerde kerncentrale opties, zoals gesmolten zout reactoren (MSR), welke tevens op interesse kunnen bogen in Nederland, dienen op langere termijn (i.e. industriële MSRs eerder vanaf midden deze eeuw te verwachten) beschouwd te worden en kunnen een belangrijke complementaire rol invullen t.o.v. de LWRs en (Mini-)SMRs, zowel naar energiemarkt als naar de splijtstofcyclus en radioactief afval beheer voor het geheel aan kernenergie in Nederland.

De analyse van de toegevoegde waarde van dergelijke (Mini-)SMRs in de toelevering van elektriciteit en in toenemende mate tevens proces-warmte en restwarmte, duidt aan dat de waarde van zowel elektriciteit (te leveren tegen < 120 €/MWhe) als warmte aanzienlijke economische voordelen opleveren, door beperking van de vraag naar natuurlijk gas en de sterke reductie, zoniet eliminatie, van de $CO_2$-emissies. Slechts zo'n 10% van het gegenereerde vermogen dient dan te worden afgevoerd via koude bronnen, waarbij de gevraagde koel-behoeften voor dergelijke (mini-)SMRs velerlei mogelijkheden bieden, inclusief het gebruik van actieve luchtkoelingen of beperkte waterkoeltorens met minimale ecologische en visuele impact. Aldus zijn er heel beperkte site-beperkingen vanuit dit oogpunt en kan dus de implementatie van dergelijke (mini-)SMRs dicht(er) bij industriële clusters en/of grote verbruiks-centra mogelijk gemaakt worden, hetgeen tevens een bijkomende sociaaleconomisch voordeel naar gebruik van (rest) warmte inhoudt.

De regelgeving voor dergelijke (Mini-)SMRs kan tevens een inzet dicht bij dergelijke verbruik-centra voorzien met vergunningstraject welke realisatie van Mini-SMRs vanaf 2030 en SMRs vanaf 2035 mogelijk maakt (referentie gesprek met ANVS) (hoofdstuk V en Addendum D).

## IV.3 WELKE (MINI-)SMR KEUZES VOOR PROVINCIE LIMBURG?

Een samenvattend en vergelijkend overzicht voor de Mini-SMR en SMR-opties alsook voor meer geavanceerde 'Advanced Modular Reactors' (AMRs) wordt in onderstaande tabel weergegeven. Hierbij staat AMR voor meer geavanceerde kerncentrales welke niet-LWR-technologie gebruiken en heden in verder ontwikkeling zijn. Deze beogen innovatieve ontwikkelingen betreffende andere koelingsmiddelen, zoals gesmolten zouten, alsook dan tich complexere splijtstofcycli met multi-recyclage van actiniden teneinde de hoeveelheid radioactief afval alsook mogelijks de levensduur te verkleinen. Nog meer geavanceerde AMRs beschouwen zelfs het gebruik van thorium als bijkomende component in de splijtstof.

### Welke tijdslijn kan als realistisch en haalbaar worden voorgesteld?

- Indien de risico-mitigerende acties worden ondernomen (zie pagina 79), zou een realisatie volgens onderstaande tijdslijn mogelijk kunnen worden:
  - 2023: (pre-)haalbaarheidsstudie (cfr. "Phase 0") van (Mini ) SMRs met de verschillende partijen ter bepaling van de meest aangewezen user-requirements vanwege de energie-vraag en shortlisting van specifieke Mini-SMR en SMR ontwerpen;
  - 2024: marktconsultatie van de verschillende (Mini ) SMR ontwerpers alsmede de start van uitbouw van een vernieuwde Nederlandse toeleveringsketen, cfr. "Neratoom 2.0", teneinde een duidelijke en degelijke nieuwbouwproject aanpak voor dergelijke (Mini )SMRs te bepalen;
  - 2025 – 2026: vooroverleg met ANVS en opstart van MER en nucleaire vergunningsaanvraag, naast het samenbrengen van een investerings-consortium, de contractualisatie van toeleveranciers en de technologische kwalificatie;
  - 2027: start van bouw:
    - waarbij door de technologische maturiteit van bepaalde Mini-SMR ontwerpen een realisatie in 24-36 maanden mogelijk wordt geacht, i.e. operationaliteit vanaf ten vroegste 2029;
    - waarbij voor SMRs een langere technologische kwalificatie, alsook de nood aan prototyping, hoger wordt geacht, met tevens een mogelijk grotere afhankelijkheid van de internationale toeleveringsketen, naast een langere bouwtijd van 36 – 48 maanden. Aldus wordt de vroegste datum voor SMR-realisatie eerder na 2033 geprojecteerd.

De investeringsnoden voor dergelijke Mini-SMRs and SMRS zijn tevens verschillend, i.e.:

- De kapitaalkosten voor een mini-SMR, van 20-50 MWe, zouden ongeveer 5 M – 3 M €/MWe[i] kunnen bedragen, waarbij een sterk serie-effect kan optreden indien er enkele mini-SMRs worden gebouwd (bijvoorbeeld multi-unit site) zoals, voornamelijk voor redenen van redundantie t.b.v. de continuïteit in productie, in Provincie Limburg te beschouwen;
    - Een eerste FOAK Mini-SMR van 30 MWe wordt begroot op een totaal-kost van ca 250 M€ met een sterk serie-effect resulterend in ca. 150 M€ totale kosten voor NOAKs (deze inschattingen zijn heden louter gebaseerd op 'expert-judgement' van de auteurs doch representatief voor ervaring in verschillende projecten)
- Voor SMRs dient eerder 8 M - 4 M€/MWe als richtlijn gehanteerd te worden, mede in het licht van de hogere first-of-a-kind initiële kosten (zelfs in vergelijking met grote kerncentrales), mede omwille van andere noden aan toeleveringsketen, maar waarbij nadien serie-effecten in productie wederom beduidende economische voordelen kunnen opleveren;
    - Een 300 MWe SMR totaal kost wordt begroot op zo'n 2,5 miljard € voor een FOAK naar circa 1,5 miljard € voor NOAK.

Samenvattend, de energie-behoeften voor Provincie Limburg kunnen vanaf 2030 in toenemende mate worden vervuld met de uitbouw van meerdere (Mini-)SMRs waarbij een vroegste uitbouw, tevens met aansluiting aan industriële cluster/centra behoeften, vanaf 2030 met Mini-SMRs haalbaar wordt geacht. De industriële cluster Chemelot zou reeds 3 – 5[ii] van dergelijke Mini-SMRs kunnen huisvesten met reeds een beduidende impact op z'n energie-behoeften, compatibel met de energie-transitie van de processen voorzien gedurende de eerste 2030-jaren. Tevens zouden dergelijke Mini-SMRs regionaal in Midden- en Noord-Limburg kunnen voorzien in de toenemende elektrificatie en bovendien proces- en restwarmte kunnen leveren voor de LEA-bedrijven, waarbij tevens de schaalgrootte van 20-50 MWe aansluit aan de typische vermogens benodigd door dergelijke toepassingen. Bovendien is dergelijke vermogens-grootte compatibel met de recentste waterstof-productie eenheden welke enkele MWe en MWth warmte vragen ter productie van waterstof van zo'n 1 à 2 ton $H_2$ per dag. De koppeling van een Mini-SMR met dergelijke MW-schaal electrolyser waterstof-productie is een mature optie tegen 2030.

De toenemende elektrificatie-vraag (naast tevens proceswarmte-vraag) kan vanaf 2035-2040 een bijkomende vraag naar SMRs rechtvaardigen. De invulling van deze vraag door een multiplicatie van meerdere Mini-SMRs kan mogelijks socio-politiek niet wenselijk worden of technisch-economisch suboptimaal worden. SMRs met een groter eenheidsvermogen worden dan meer compatibel met de dan geprojecteerde energie-behoeften.

Figuur IV.9 vat de situatie voor de Provincie Limburg samen, waarbij gehint wordt naar een gefaseerde aanpak waarbij Mini-SMRs een versnelde mogelijkheid zouden kunnen bieden vanaf 2030, met SMRs vanaf 2035, doch waarbij deze laatste tevens in directere concurrentie kunnen treden met grotere LWR-kerncentrales elders in Nederland, zodra de 380 kV HS-lijn het geheel van de Provincie Limburg bedient (heden voorzien vanaf 2031 doch met gewenste realisatie vanaf 2028/2029). De tijdslijn voor SMRs valt immers vrijwel samen met de voorziene realisatie van de grote LWR-kerncentrales op het Nederlandse HS-net, alswel met de uitrol van het 380 kV HS netwerk in de Provincie Limburg, met dus een nader te analyseren vraag wat de optimale balancering tussen regionale SMR-realisatie en nationale grote LWR-centrales zal worden. De mini-SMR in een eerste fase zou dus een sneller antwoord kunnen bieden aan een dringende vraag naar beschikbaar regelbaar vermogen, zowel voor elektrificatie als warmte-behoeften.

Een dergelijke gefaseerde aanpak via Mini-SMRs naar SMRs is een optie welke tevens een gefaseerde en de-risked ontwikkeling van de toeleveringsketen, alsook de transities in energie-systemen, kan omvatten. Evenwel kan tevens geopteerd worden om direct een SMR-ontwikkeling te beogen, welke dan dient te worden gekaderd in de verzekerde 380 kV HS-lijn naar Midden- en Zuid-Limburg teneinde voldoende back-up vermogen te kunnen garanderen indien het aantal gerealiseerde SMRs onvoldoende redundantie t.b.v. continue productie zouden opleveren i.v.m. de 18-24 maanden onderhouds-cycli voor SMRs (t.o.v. een 5-6 jaar onderhoudscyclus voor de industriële cluster Chemelot).

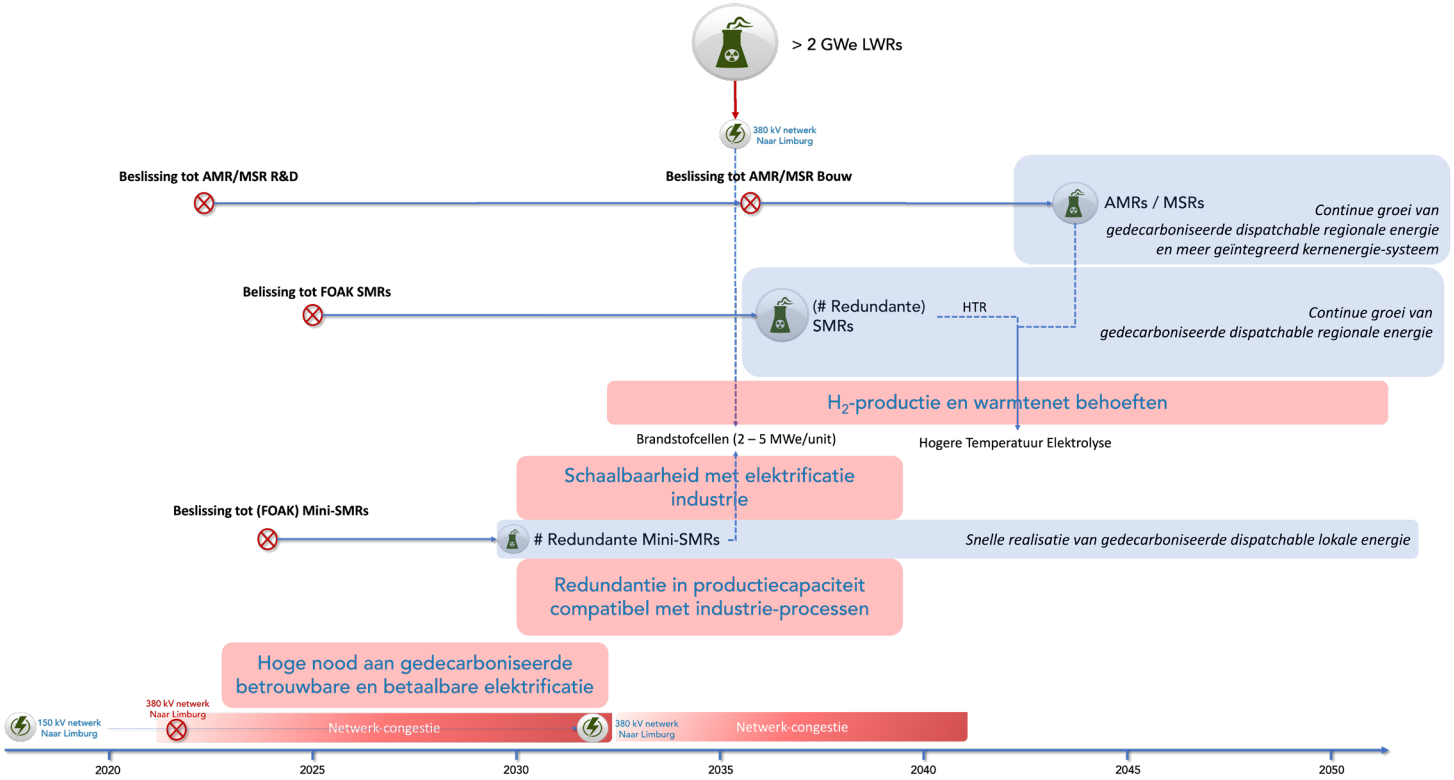
i Eerste waarde verwijst naar een First-of-a-Kind (FOAK) en tweede waarde naar "Nth-of-a-Kind" (NOAK)

ii "3-5" dient geïnterpreteerd als 'enkele' 30 MWe-equivalente Mini-SMRs waarbij het aantal wordt bepaald uit een risico en investerings-analyse alsook in functie van eenheidsvermogen.

Tabel IV.2 Samenvattende routekaart voor de voornaamste opties

| | Mini-SMR | SMR | AMR |
|---|---|---|---|
| Eenheidsvermogen (MWe) | 20 - 50 | 200 - 300 | 100 - 500 |
| Tijdslijn naar industriële realisatie in Nederland | 2030 | 2035 | >2040 |
| Technology type | LWR | LWR | voornamelijk non-LWR |
| Investering (M€) | 100 - 250 | > 1000 | > 1000 |
| Siting voorwaarden | • Actieve luchtkoeling mogelijk met dus ruimere site-keuze | • Actieve (water/)lucht-koeling (met koeltoren)<br>• Meer mogelijkheid tot warmtenet-gebruik ter reductie restwarmte | • Velen hanteren hogere werktemperaturen met lagere restwarmte en netto restwarmte koelbehoefte |
| Toeleveringsketen | • Kan meer steunen op Nederlandse bedrijven | • Nood aan internationale toeleveringsketen welke mogelijks capaciteits-beperkend zal zijn (cfr Canada, Oost-Europa, …)<br>• EU SMR-design (Nuward) FOAK verwacht rond 2030 met industriële NOAK vanaf ca 2035 | • Geheel specifieke toeleveringsketen met case-specifiek consortium aanpak<br>• Geen internationale toeleveringsketen te verwachten |
| Synergie met energie-intensieve industrie behoeften | • Sterk schaalbaar<br>• Evenwel beperkt in schaalbaarheid > 500 MWe capaciteitsnoden | • Doch financiële opstap naar grote LWR is klein zeker bij beschikbaarheid van een 380kV-net | • Indien MSRs, atmosferische druk omstandigheden kan voordelig zijn voor industriële site locatie<br>• Hogere temperatuur energie voorziening mogelijk |
| $H_2$-productie | • Compatibel met brandstofcel oplossingen van enkele MW met tevens warmte gebruik<br>• Laat toe Mini-SMR in base-load uit te baten | • Compatibel met grotere $H_2$-productie units, alsook met warmtetoevoer door SMRs | • Eventueel hogere temperatuur (electrolyse) $H_2$-productie processen |
| Scenario | • Snelste gedecarboniseerde en dispatchable elektriciteitsproductie voor energie-intensieve industrie behoeften | • In competitie met grote LWRs en 380 kV alsook in toekomst met AMRs<br>• Optie voor industriële sites > 2035 met back-up via net | • Geïntegreerde nucleaire systemen met LWR/Mini-SMR en MSR voor splijtstof/ afval optimalisatie |

Figuur IV.9 Samenvattende route-kaart voor de voornaamste opties




Bijkomende redenen waarom in deze studie de LWR-technologie voor zowel grote als kleinere kerncentrales wordt geprioriteerd zijn tevens:

- Er is reeds een beduidende kennis en ervaring in Nederland voor de bouw en uitbating van dergelijke LWRs, cfr. Borssele en EPZ, waarbij een continuïteit beduidende risico-reducties inhoudt naar nieuwbouw programma's en de mutualisering van dergelijke kennis en ervaring over het Nederlands nucleair programma;
- Anderzijds is de toeleveringsketen internationaal voornamelijk op LWR-technologie voorhanden en zijn heel wat kritische ontwikkelingen en investeringen, meestal ook in niet-Europese landen, te beschouwen voor niet LWR-technologieën zoals meer bepaald de te gebruiken splijtstof. Bijvoorbeeld HTGR-reactoren gebruiken geheel verschillende splijtstof waarvoor heden enkel R&D/prototype/kleine-schaal fabricage-plants bestaan in o.a. VS en China en een ontwikkeling ervan in Europa geenszins in de tijdslijn naar 2030-2035 wordt voorzien;
- Een belangrijk punt betreft de splijtstofcyclus en het radioactief afval beheer. Gezien het belang ervan wordt dit in volgende paragraaf verder uitgewerkt.

Het Nederlands nucleair programma wordt tot op heden gekenmerkt door het gebruik van LWRs met uranium-oxide splijtstof welke opgewerkt wordt met recyclering van het plutonium (Pu) als mixed-oxide (MOX) splijtstof in Borssele waarbij tevens opgewerkt uranium wordt gerecycleerd als "compensated enriched reprocessed uranium" (c-ERU). Dergelijke zogenoemde mono-MOX splijtstof cyclus resulteert in zo'n 20% besparing in natuurlijk uranium en een factor 8 in hoeveelheid gebruikte splijtstof doch wordt deze heden tijdelijk opgeslagen te Borssele en nadien verzonden naar La Hague heropwerkings-plant voor verder tijdelijke opslag tot deze ook heropgewerkt wordt. Het resulterende hoogactief afval komt als verglaasd afval terug welke in de HABOG-installatie van COVRA wordt opgeslagen totdat het kan worden overgebracht naar een nog te realiseren eindbergingslocatie. Het geheel van deze splijtstofcyclus is dus gebaseerd op de uranium-oxide and/of uranium-plutonium oxide splijtstof, waarbij tevens Nederlandse bedrijven zoals URENCO belangrijke splijtstofcyclus operaties uitvoeren (in casu verrijking van het natuurlijk uranium).

Deze splijtstofcyclus strategie kan geheel worden voortgezet in de nieuwbouw kerncentrales, alsook met Mini-SMRs en SMRs. De splijtstof uit deze (Mini ) SMRs kan gelijkaardig als voor de huidige Borssele als de nieuwbouw LWRs worden opgewerkt met recyclage van zowel het opgewerkt uranium alwel het plutonium in nieuwe splijtstof, welke, naar verwachting, idealiter in de grote LWR kerncentrales wordt gebruikt. Op termijn, gezien de interesse en ontwikkelingen van meer geavanceerde kerncentrales zoals gesmolten zout reactoren (MSRs), kan zelfs de toekomstige splijttof en specifiek de gebruikte MOX-splijtstof verder worden opgewerkt en gerecycleerd in dergelijke MSRs, welke tevens de hoeveelheid aan hogere actiniden kan verminderen met voordelen m.b.t. thermische impact in een toekomstige geologische eindberging voor het finale radioactief afval. Tevens kan hiertoe de levensduur van dergelijke radioactief afval wat worden verkort, doch het essentiële voordeel is te vinden in een verkleind opslagvolume voor het Nederlands radioactief afval.

Aldus is de keuze voor (Mini-)SMRs van het LWR-technologie type aangewezen aangezien tevens COVRA geen specifiek nieuwe afvalstromen vanuit de splijtstofcyclus en radioactief afval te verwachten heeft en een verderzetting van de bestaande splijtstofcyclus kan worden gegarandeerd.

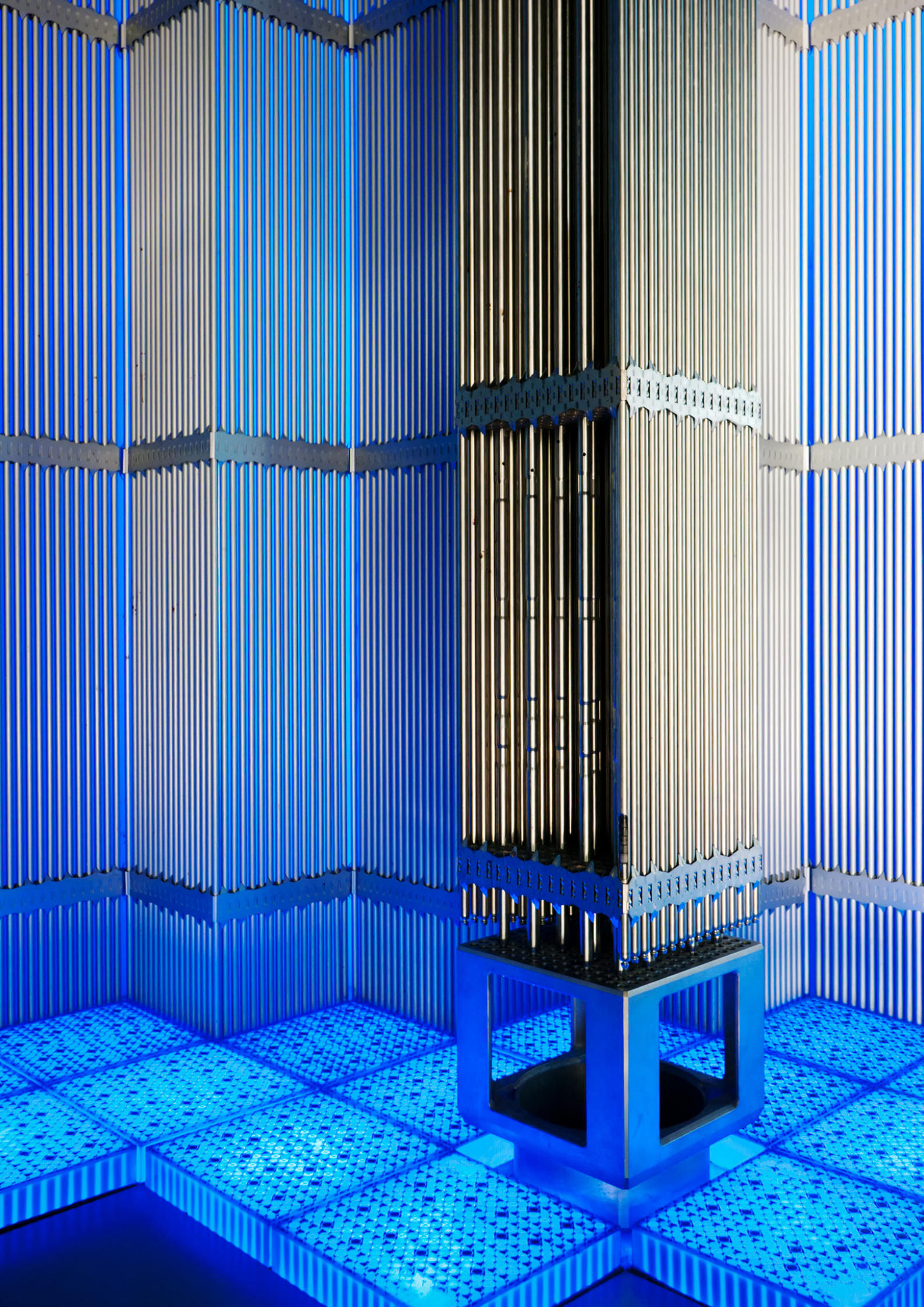
Mini-SMRs en SMRs sluiten elkaar niet uit en kunnen, via Mini-SMRs, een versnelde toelevering van regelbaar vermogen garanderen en via, op vergelijkbare technologie gebaseerde, SMRs in de toekomst verder bouwen in kader van de groeiende energiebehoeften. Nieuwe technisch-economische overwegingen betreffende de waterstof-productieeenheden zijn te voorzien met vraag naar een hoger eenheidsvermogen welke dan eerder SMRs rechtvaardigen. Een dergelijke gefaseerde aanpak laat een gestage kennisopbouw toe met daarbij economische waarde-creatie voor Nederlandse en Limburgse bedrijven.
Tevens laat een dergelijke gefaseerd aanpak volgende fasering in investeringen toe met mogelijkheid tot investeringsrisico minimalisatie:

- De eerste 3 – 5 Mini-SMRs (bijvoorbeeld op basis van een 30 MWe/eenheid), verwacht geplaatst te worden in nabijheid van industriële cluster(s), verwachten een investering van ca. 250 M€ voor FOAK en geleidelijk naar 150 M€ voor NOAK voor multi-unit realisaties;
- Single-unit Mini-SMRs voor andere sites zoduen dan op basis van NOAK een investering in de grootte-orde van 150 M€ vragen;
- Nadien, voor SMRs van ca 250 Mwe eenheidsvermogen worden investeringen van > 1 miljard € gevergd doch met mogelijkheid om aan lagere €/MWhe te produceren.

Tot slot, de inpassing van dergelijke Mini-SMRs en SMRs wordt op verschillende sites mogelijk geacht aangezien aan de geotechnische (o.a. seismische) randvoorwaarden in de Provincie Limburg op verschillende van dergelijke sites wordt voldaan. Een meer gedetailleerde haalbaarheidsstudie dient ertoe om de karakteristieken van dergelijke sites, zeker met oog op de gewenste energie-systeem integratie, nader te analyseren en eventueel site-opties uit te sluiten om planologische, geotechnische en/of sociaal-economische redenen. Evenwel kan deze initiërende studie besluiten dat diverse sites binnen Limburg in aanmerking komen ten behoeve van de verschillende types van energie-verbuikers met gebruik van Mini-SMRs en, voor grotere industriële clusters en/of gebouwde omgevingen, tevens voor SMRs. Gezien de heel beperkte land-oppervlakte benodigd voor dergelijke Mini-SMRs (voetbalveld grootte) en voor SMRs (4-5 voetbelvelden) kan de integratie in de omgeving aanmerkelijk eenvoudiger worden gerealiseerd, terwijl tevens de visuele impact, door het ontbreken van de klassieke koeltorens, als aanvaardbaarder kan worden geëvalueerd.

Uiteraard dient in een dergelijke haalbaarheidsstudie de algehele socio-politieke aanvaarding van kernenergie behartigd te worden als onderdeel van betrokkenheid van stakeholders in het gehele proces. Dit is heden niet in deze studie vervat geworden.

De toekomst voor een gedecarboniseerde en verzekerde energie-bevoorrading in de Provincie Limburg kan dus met Mini-SMRs en SMRs verzekerd worden en dit in synergie met hernieuwbare bronnen en geïntegreerd in de algehele Nederlandse energie-infrastructuur. Technisch-economische mogelijkheden tot realisatie van een dergelijke optie vanaf 2030 zijn voorhanden en vragen essentieel een initiatief-nemende organisatie, welke de verschillende partijen, met oog op een regionale energie strategie met geïntegreerde energie-systeem aanpak, coördineert naar een effectief programma, ingebed in het nationaal nucleair programma. Het nationale programma, voornamelijk geschoeid op grotere (> 1000 MWe) kerncentrales als 'back-bone' van het nationale HS-net, en het regionale energie-cluster met (Mini-)SMRs beleid, kunnen geheel complementair en zelfs wederzijds versterkend werken door optimaal gebruik van de kennis en toeleverings-infrastructuur in Nederland. Deze dient tijdens de 2020-jaren versneld te worden versterkt teneinde tijdig de realisatie van nieuwbouw kernenergie, voor kleine of grote kerncentrales, vanaf 2030 mogelijk te maken.



# V. Juridische, planologische en geo-technische randvoorwaarden

Dit hoofdstuk gaat in op de nucleaire en niet-nucleaire regelgeving en de planologische en geotechnische (inclusief seismische) mogelijkheden en onmogelijkheden voor kernreactoren, en in het bijzonder Mini-SMRs en SMRs, in de Provincie Limburg. Bij de laatste twee onderwerpen is uitdrukkelijk niet gekeken naar de bijzonderheden van specifieke locaties, maar wordt meer aangegeven wat de planologische en geotechnische karakteristieken van een locatie zouden moeten zijn.

## V.1 NUCLEAIRE REGELGEVING EN VERGUNNING

Deze sectie geeft een beknopte beschrijving en discussie van het nucleaire regelgevingskader m.b.t. kernreactoren, en in het bijzonder SMR's, in Nederland, met inbegrip van het Europese en internationale kader. Een uitgebreide en diepgaande bespreking hiervan is te vinden in Addendum D.

De visie hierop van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) was tevens onderwerp van een gesprek met de ANVS op 23 juni 2022 [12].

### V.1.1 NUCLEAIRE VEILIGHEID IN NEDERLAND – KERNENERGIEWET EN VEILIGHEIDSRICHTLIJNEN ANVS

Referentie [1] beschrijft het huidige vergunningenbeleid van de ANVS en geeft o.a. een overzicht van de hiermee verband houdende regelgevingsdocumenten. In het document komen de volgende zaken aan de orde:

- Hoofdstuk 1 gaat in op het doel en werkveld van de ANVS en de organisatie van de vergunningverlening.
- Hoofdstuk 2 beschrijft het juridisch kader waarbinnen de ANVS haar taken uitvoert.
- Hoofdstuk 3 schetst de leidende principes die de ANVS hanteert bij vergunningverlening.
- Hoofdstuk 4 gaat in op het type vergunningen, de inhoud en structuur van deze vergunningen en het vergunningbesluit.
- Hoofdstuk 5 beschrijft de werkwijze van de ANVS rond toetsing en beoordeling.
- Hoofdstuk 6 schetst de procedures die aan de orde zijn bij het verlenen van vergunningen.
- Hoofdstuk 7 gaat over evalueren en verantwoorden.

Het belangrijkste wettelijke kader voor de nucleaire veiligheid en stralingsbescherming is de Kernenergiewet (KeW), laatstelijk geamendeerd in 2009 (Stb.[i] 1963, No. 82) en de daarop gebaseerde regelgeving. Deze wetgeving en de daarop gebaseerde vergunningen vormen de juridische borging van nucleaire veiligheid en stralingsbescherming. De Kernenergiewet is een raamwet die ongeveer 80 artikelen omvat. Het belangrijkste instrument van de Kernenergiewet is een vergunningstelsel. In de KeW wordt aangegeven voor welke activiteiten een Kernenergiewetvergunning nodig is:

- Artikel 15 onder a: handelingen met splijtstoffen en ertsen, te weten: vergunningen voor het vervoer, voorhanden hebben, binnen of buiten Nederlands grondgebied brengen of doen brengen dan wel zich ontdoen van splijtstoffen.
- Artikel 15 onder b: verschillende nucleaire inrichtingen, namelijk: vergunningen voor het oprichten, inwerking brengen, in werking houden, buiten gebruik stellen, ontmantelen of wijzigen van een inrichting waarin kernenergie kan worden vrijgemaakt, splijtstoffen worden vervaardigd, bewerkt of verwerkt dan wel splijtstoffen worden opgeslagen.
- Artikel 29: handelingen met radioactieve stoffen, te weten: vergunningen voor het bereiden, vervoeren, voorhanden hebben, toepassen, binnen of buiten Nederlands grondgebied brengen of doen brengen, dan wel zich ontdoen van radioactieve stoffen.
- Artikel 34: het gebruik van toestellen (verbodsbepaling inzake toestellen): de vergunningplicht staat niet in de KeW, maar is gebaseerd op het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming.
- Artikel 67: de implementatie van Euratom-regelgeving, het hiertoe benodigde vergunningenstelsel is neergelegd in het Besluit in-, uit- en doorvoer van radioactieve afvalstoffen.

i Stb. = Staatscourant

Waar de Kernenergiewet relatief compact is, is de op de Kernenergiewet gebaseerde regelgeving omvangrijk. Op de Kernenergiewet zijn algemene maatregelen van bestuur, ministeriële regelingen en een aantal algemeen werkende besluiten en ANVS-verordeningen gebaseerd. Daarnaast bevat de wet een flink aantal delegatiebepalingen. Deze strekken enerzijds tot uitwerking van de in de wet opgenomen (basale) normen die door dit normstellende karakter ook betekenis hebben voor de vergunningverlening. Dit betreft onder meer (niet limitatief):

- Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse).
- Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs).
- Besluit vervoer splijtstoffen, ertsen en radioactieve stoffen (Bvser).
- Besluit in-, uit- en doorvoer van radioactieve afvalstoffen en bestraalde splijtstoffen (Biudrabs).
- Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Rbs).
- ANVS-Verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Vbs).
- Regeling stralingsbescherming beroepsmatige blootstelling.
- Regeling nucleaire veiligheid kerninstallaties.
- Besluit vergoedingen Kernenergiewet.

Merk op dat de toepasselijke nucleaire wetgeving ook wordt gepresenteerd in de referentie OESO / NEA nucleaire wetgeving in OESO- en NEA-landen - Nederland en in het bijzonder de sectie over "Vergunningen en inspectie, inclusief nucleaire veiligheid" [2].

Referentie [3] "Handleiding VOBK", in oktober 2015 gepubliceerd door de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), presenteert de Veiligheidsrichtlijnen waarin de Nederlandse Veiligheidseisen (DSR) voor het veilig ontwerpen en exploiteren van (lichtwatergekoelde) kernreactoren zijn vastgelegd. Het document geeft richtlijnen ter ondersteuning van de voorbereiding van een vergunningsaanvraag, zoals vereist op grond van de Kernenergiewet (zie hierboven).

Deze veiligheidsrichtlijnen dienen ook als referentiedocument waar geautoriseerde partijen terecht kunnen voor informatie over de nieuwste ontwikkelingen en inzichten die relevant zijn voor de veiligheid van kernreactoren, zelfs als de reactor niet van het lichtwatertype is, en moeten op analoge basis worden gevolgd[i]. De veiligheidsrichtlijnen hebben niet de status van (ministeriële) voorschriften en definiëren daarom geen wettelijke vereisten. Niettemin zullen vergunningaanvragen worden beoordeeld op basis van hun veiligheidseisen en daarom wordt de inhoud ervan van essentieel belang geacht om het kader te definiëren van de taak die in dit document wordt gematerialiseerd. Conform ref. [3] zijn de eisen in overeenstemming met de veiligheidsnormen van de Internationale Organisatie voor Atoomenergie (IAEA) en met de standpunten van de West-Europese Vereniging van Nucleaire Regelgevers (WENRA) en kunnen zij, "indien van toepassing en noodzakelijk", als basis dienen voor het formuleren van de voorwaarden die zijn verbonden aan vergunningen voor nieuwe reactoren. De tekst geeft aan dat de veiligheidsrichtlijnen van toepassing zijn op het ontwerp en de werking van lichte watergekoelde kernreactoren, maar dat een "graduele benadering" ("graded approach") kan worden gevolgd voor toepassing op andere installaties. De verwijzing verwijst expliciet naar onderzoeksreactoren, maar het lijkt redelijk om te overwegen dat de indicatie kan worden geëxtrapoleerd naar de SMR.

Veiligheid en veiligheidscontrole zijn ook de verantwoordelijkheid van de ANVS die toezicht houdt op de beveiliging van nucleaire faciliteiten en radioactief materiaal. De gedetailleerde analyse van de verordening (ref. [4]) valt weliswaar buiten de scope van deze opdracht, maar de zorgen met betrekking tot beveiliging, evenals die met betrekking tot waarborgen, worden hieronder beknopt behandeld en gedetailleerd in Addendum D (zie ook secties V.2.6 en V.2.7).

De Veiligheidsrichtlijnen [3] bevelen aan om zoveel mogelijk op doelen (d.w.z. objectieve) gebaseerde vereisten toe te passen, in plaats van op middelen gebaseerde vereisten[ii]. Voor de doelstellingen koppelt Tabel V.1 bijvoorbeeld de maximaal toelaatbare doses aan de frequentie van ongevallen zonder kernsmelt die zich kunnen voordoen.

i N.B. Ondanks het feit dat, zoals blijkt uit de referentie [3], de veiligheidsrichtlijnen "moet eens in de vijf jaar worden bijgewerkt, en vaker als de behoefte zich voordoet", zijn er, voor zover de auteurs weten, sinds 2015 geen bijgewerkte versies gepubliceerd.

ii Vgl. DSR : "Een op doelstellingen gebaseerd vereiste specificeert de veiligheidsdoelstelling waaraan moet worden voldaan, maar schrijft, in tegenstelling tot een op middelen gebaseerd vereiste, niet of slechts in mindere mate de middelen voor waarmee het doel moet worden bereikt. Het gebruik van objectieve eisen waar mogelijk maakt maatwerkoplossingen mogelijk om de veiligheid zo efficiënt mogelijk te verbeteren binnen gedefinieerde parameters. De objectieve benadering dient ook om de primaire verantwoordelijkheid van de licentiehouder voor veiligheid te benadrukken."

Tabel V.1. Frequentie van voorkomen en maximaal toegestane doses voor ongevallen zonder kernsmelten.

| **Occurrence frequency (F) per year8** | **Maximum allowable effective dose per person (over a 70-year period)** |
|---|---|
| $F \geq 10^{-2}$ | 0.1 mSv |
| $10^{-2} > F \geq 10^{-3}$ | 1 mSv |
| $F < 10^{-3}$ | 10 mSv |

Bij ongevallen met kernsmelten is het van essentieel belang de integriteit van de insluiting te handhaven, die zodanig moet zijn ontworpen dat het vrijkomen tijdens het kernsmeltproces tot een minimum wordt beperkt. Aan de in Tabel V.2 samengevatte eisen moet worden voldaan. Figuur V.1 toont de zones en interventieniveaus voor gepostuleerde kernsmeltongevallen.

Zoals aangegeven in de tekst in ref. [3]: "De zones die in de eisen zijn gespecificeerd, zijn bedoeld voor gebruik tijdens het ontwerp van een nieuwe reactor, niet voor ongevalssituaties. Het Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten en de regionale rampenplannen specificeren de te nemen maatregelen bij een ongeval en de bijbehorende voorbereidingszones. Daarom moet een aanvrager aantonen dat in geval van een gepostuleerd kernsmeltongeval aan de eisen zal worden voldaan. Bij de analyses wordt uiteraard rekening gehouden met de plaatselijke weersomstandigheden."

Ten slotte is een essentieel beginsel dat in de richtlijnen [3] is opgenomen, het beginsel van "Praktische uitsluiting" van ongevallen die leiden tot vroegtijdige en/of grote lozingen.

## V.1.2 INVOERING VAN SMR'S IN DE PROVINCIE LIMBURG

In het licht van het veelvoud aan SMR-concepten dat internationaal wordt aangeboden, kan men ervan uitgaan dat er geen "a priori" prohibitieve kenmerken zijn die de installatie van SMR in de provincie Limburg zouden verhinderen. Natuurlijk is het Technology Readiness Level (TRL) van de verschillende technologieën en of concepten niet hetzelfde, maar gezien het relatief lange schema is het redelijk om te denken dat, wanneer de tijd daar is, de meeste technologieën beschikbaar zullen zijn voor implementatie. Het probleem doet zich eerder voor in termen van optimalisatie, d.w.z. wat de beste technologie is voor de provincie.

De keuze moet worden gemaakt op basis van criteria en maatstaven van verschillende aard: uitdrukking van behoeften (d.w.z. gebruiksdoelstellingen), economie, veiligheid, enz. (de details van de Gen IV-doelstellingen kunnen als kader dienen, worden opgenomen en aangepast: duurzame kernenergie ("Sustainable Nuclear Energy"), concurrerende kernenergie ("Competitive Nuclear Energy"), veilige en betrouwbare systemen ("Safe and Reliable Systems"), proliferatiebestendigheid en fysieke bescherming ("Proliferation Resistance and Physical Protection")). In dit verband is het essentieel dat de provincie snel een "Cahier des Charges" (programma van eisen) opstelt en publiceert waarin al deze criteria worden opgenomen en beschreven.

Hieronder vindt u algemene overwegingen voor SMR's; zij hebben enerzijds betrekking op de eis van harmonisatie van regelgevingsbenaderingen om de toepassing van deze concepten te vergemakkelijken en anderzijds op enkele specifieke aspecten van veiligheid, beveiliging en waarborgen. Naast de generieke informatie is het belangrijk om te bedenken dat de selectie van mogelijke technologieën voor de provincie Limburg deze aspecten niet kan negeren omdat in hun praktische uitvoering de rol van de (toekomstige) eigenaar / operator essentieel is.

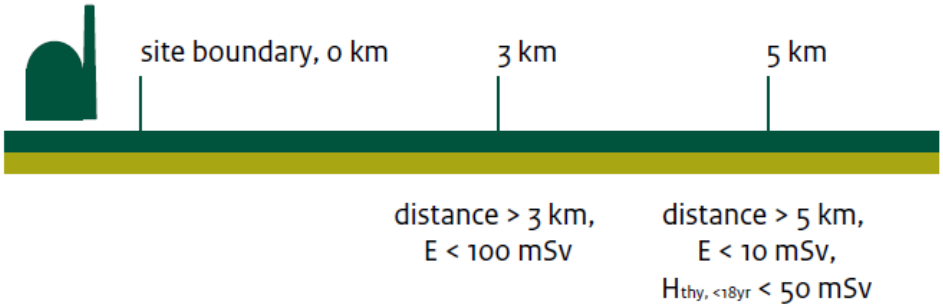
### V.1.2.1 De kleine modulaire reactoren – SMR – Algemeen

Volgens het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA) en het Nuclear Energy Institute wordt een kleine modulaire reactor (SMR) gedefinieerd als "*een kernreactor, over het algemeen 300 MWe equivalent of minder, ontworpen met modulaire technologie met behulp van modulefabricage in een fabriek, die besparingen van serieproductie en korte bouwtijden nastreeft.*"

SMR-ontwerpen bevatten innovatieve benaderingen om eenvoud, modulariteit en bouwsnelheid te bereiken, implementatie van passieve veiligheidsfuncties, proliferatiebestendigheid en verminderd financieel risico. Verhoogde prestaties op het gebied van veiligheid worden door ontwerpers benadrukt, onder andere dankzij gunstige intrinsieke kenmerken en of het gebruik van passieve systemen. Het vereenvoudigen van het ontwerp en het beperken van de bouwtijd door modulaire opbouw, de standaardisatie en het serie-effect kan naar de mening van de ontwerpers leiden tot een verlaging van de kosten om economisch concurrentievermogen te bereiken. Hun kleine formaat leidt tot het overwegen van modulaire installaties met de installatie van verschillende modules en het bundelen van bepaalde ondersteuningssystemen.

Interessante inzichten om te overwegen in het kader van de preselectiefase zijn te vinden in de referenties [5] en [6]. Aanwijzingen met betrekking tot de praktische toepassing van de SMR zijn beschikbaar in referentie [7].

Figuur V.1. Zones en interventieniveaus voor gepostuleerde kernsmeltongevallen.




Tabel V.2 Ontwerpeisen voor een kernsmeltongeval dat praktisch niet kan worden uitgesloten

| Protective action | Evacuation zone (< 3 km) | Sheltering zone (< 5 km) | Beyond sheltering zone |
|---|---|---|---|
| **Permanent evacuation** | No | No | No |
| **Evacuation** | May be needed | No | No |
| **Sheltering** | May be needed | May be needed | No |
| **Iodine prophylaxis[10]** | May be needed | May be needed | No |

## V.1.2.2 SMR ontwerpen de wereld rond

Tientallen concepten worden over de hele wereld voorgesteld (zie de IAEA ARIS-database). Nadere bijzonderheden over SMR's worden verstrekt in referentie [8].

Een paar SMR's zijn reeds in bedrijf (bijvoorbeeld de Akademik Lomonosov, een drijvend centrale uitgerust met twee KLT-40S-reactoren van elk 35 MWe, gestationeerd in Pevek, Russische Federatie, en de HTR-PM, met twee hoge temperatuur gasgekoelde reactoren, in Shidao Bay, China), een paar anderen bevinden zich in een vergevorderd ontwerpstadium (VS, China, Zuid-Korea, enz.). Vele andere concepten, waaronder concepten die gebaseerd zijn op andere technologieën dan lichtwatertechnologieën, zijn in ontwikkeling (gesmolten zout, lood, natriumreactoren, hoge temperatuurreactoren, enz.). De maturiteit van deze concepten is momenteel over het algemeen nog onder het niveau dat nodig wordt geacht om een vergunningsprocedure te starten.

## V.1.2.3 SMR's en de 3S-aanpak: veiligheid, beveiliging, waarborgen

De mogelijke inzet van SMR's wordt gedeeltelijk bepaald door de versterking van de reflectie over wat belangrijk en zelfs essentieel wordt geacht voor de toekomst van de nucleaire technologie, namelijk wat wordt gekwalificeerd met het acroniem 3S - Safety, Security & Safeguards - en waarvoor een geïntegreerde en gelijktijdige behandeling van deze drie domeinen wordt aanbevolen om te komen tot wat "Safety by Design" wordt genoemd, "Security by Design" en "Safeguard by Design", i. e. de integratie, op ontwerpniveau, van alle uitdagingen die door deze drie gebieden worden gegenereerd en hun onderlinge interacties/interfaces.

Addendum D behandelt het onderwerp in meer diepgang door aanwijzingen te geven die het mogelijk maken om het belang van het onderwerp te waarderen met in het bijzonder de eis van een commitment van de (toekomstige) eigenaar/exploitant, zowel voor de selectie van de technologie als nadat de keuze van het concept is voltooid.

## V.1.2.4 Harmonisatie van het regelgevingskader en paradigmaverschuiving

De harmonisatie van de regelgevende context is een van de essentiële voorwaarden en universeel erkend voor de inzet van SMR's op internationale schaal en daarom is het belangrijk dat de potentiële eigenaar/exploitant, die uit het aanbod zal moeten kiezen, op de hoogte is van de voortgang van de reflectie.

De inspanningen voor deze harmonisatie zijn al enkele tientallen jaren aan de gang en er is aanzienlijke vooruitgang geboekt (bijvoorbeeld met de veiligheidsnormen van de IAEA), maar het proces is nog niet voltooid.

De reflectie heeft in de eerste plaats betrekking op ontwerpers en regelgevers, maar potentiële eigenaren/exploitanten moeten het werk in uitvoering volgen om de doelstellingen, uitdagingen en vooruitgang ervan te begrijpen met het oog op een relevante evaluatie/selectie uit de concepten die op de markt beschikbaar zijn. Nadere bijzonderheden over dit thema zijn opgenomen in Addendum D.

### V.1.2.5 Veiligheidseisen voor SMR's

Een telkens terugkerend onderwerp van discussie betreft de veiligheidseisen die van toepassing zijn op SMR's; naar de mening van sommige belanghebbenden moeten de veiligheidseisen worden aangepast (d.w.z. verlaagd) vanwege de intrinsieke veiligheidskenmerken die inherent zijn aan deze concepten. Naar de mening van de auteurs is er, afgezien van de harmonisatie van de in het vorige sectie genoemde vereisten, geen reden om positief op dit verzoek te reageren, omdat dit negatieve gevolgen zou kunnen hebben, met name op het niveau van de communicatie met het publiek in het algemeen.

Integendeel, omwille van de duidelijkheid en de transparantie is het raadzaam dezelfde eisen van het hoogste niveau te handhaven die van toepassing zijn op alle nucleaire installaties, wetende dat op deze eisen voor elk van de installaties op specifieke wijze zal worden ingespeeld en zich ervan bewust zijn dat de vereenvoudiging en de intrinsieke of passieve kenmerken van de veiligheidsvoorzieningen het veiligheidsniveau ten goede zullen komen, en in het bijzonder de robuustheid van de demonstratie. Technologie-neutrale en doelgerichte eisen zijn in overeenstemming met deze aanpak.

Dat gezegd hebbende, vanwege hun lage vermogen en kleine formaat, maken SMR's een verscheidenheid aan ontwerpkeuzes mogelijk, waarvan sommige objectief gunstig zijn voor de veiligheid. De implementatie van innovatieve technische oplossingen, waarvan de haalbaarheid en effectiviteit nog moeten worden aangetoond, vereist echter een gedetailleerd onderzoek om de mogelijke reële voordelen op het gebied van veiligheid in vergelijking met reactoren met een hoger vermogen te beoordelen.

Wat meer in het bijzonder de veiligheidsdoelstellingen betreft, kan worden verwacht dat uit de door de WENRA/RHWG uitgevoerde evaluatie blijkt dat, hoewel er momenteel een grote verscheidenheid aan SMR-ontwerpen in ontwikkeling is, de veiligheidsdoelstellingen die WENRA in 2010 heeft uitgegeven, ook voor SMRs kunnen worden gebruikt [9]. Ondertussen beschouwt de WENRA deze doelstellingen als de minimumeis voor SMR's; hogere veiligheidseisen mogen redelijkerwijs worden verwacht, vooral wanneer rekening wordt gehouden met het potentieel van dergelijke moderne technologieën om aanzienlijke verbeteringen in de veiligheidsprestaties te bieden. Addendum D biedt enkele details en voorbeelden met betrekking tot de gunstige veiligheidskenmerken als gevolg van het lage vermogen om de veiligheid door ontwerp te helpen bereiken.

### V.1.2.6 "Nucleair Security by Design"

Zoals voor alle nucleaire installaties en zoals hierboven uiteengezet, moet bij het ontwerp van SMR rekening worden gehouden met de behoeften van nucleaire veiligheid. Om te passen bij het begrip "beveiliging door ontwerp" ("Security by Design", SeBD), moeten de maatregelen die nodig zijn om te voldoen aan de toepasselijke wettelijke nucleaire beveiligingsvereisten tijdens de ontwerpfase in het totale ontwerp worden geïntegreerd.

Zoals uiteengezet in referentie [10], kan de toepassing van dergelijke benaderingen leiden tot lagere fysieke beveiligingskosten gedurende de levensduur van de nucleaire faciliteit, en het kan de taak van het handhaven van een effectief fysiek beveiligingssysteem gedurende de levensduur vereenvoudigen. Nadere bijzonderheden worden gegeven in Addendum D.

### V.1.2.7 Specifieke uitdagingen op het gebied van Safeguards

De proliferatieresistentie ("Proliferation resistance") wordt gedefinieerd als zijnde "*…that characteristic of a nuclear energy system that impedes the diversion or undeclared production of nuclear material or misuse of technology by the Host State seeking to acquire nuclear weapons or other nuclear explosive devices*" [11]. Safeguards bieden onafhankelijke verificatie dat het doel wordt bereikt ("safeguardability", d.w.z. de geschiktheid om het ontwerp van nucleaire safeguards te vergemakkelijken is een aspect van proliferatieresistentie). Nadere bijzonderheden worden gegeven in Addendum D. Voor wat betreft de veiligheid ("safety") en de beveiliging ("security") die hierboven zijn besproken, spelen de eigenaar / operator een essentiële rol bij het garanderen van de "safeguardability" van de installatie.

### V.1.3 Internationale ontwikkelingen in (harmonisatie van) regelgeving

In Addendum worden de belangrijkste documenten beknopt beschreven die de overwegingen en aanbevelingen van internationale organen met betrekking tot SMR's samenvatten, zowel aan de kant van fabrikanten als aan de kant van regelgevers:

- IAEA
- OESO/NEA,
- Electric Power Research Institute (EPRI) Utility Requirements Document (URD) en NRC,
- European Utility Requirements Organization en WENRA,
- Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP).

De huidige activiteiten, doelstellingen en timing worden besproken.

### V.1.4 Europese regelgeving en (on)mogelijkheden voor FOAK/NOAK SMR's

Uit de analyse, zoals uitgevoerd en gedetailleerd in Addendum D, volgt dat er geen "a priori" voorwaarden zijn die de implementatie van SMR in de provincie Limburg zouden verhinderen. Ervan uitgaande dat specificaties ("Cahier des Charges") snel worden opgesteld (cf. sectie V.2), en gezien het bestaan van de wettelijke vereisten, is het een kwestie van in detail onderzoeken welke van de beschikbare technologieën op een geoptimaliseerde manier aan deze randvoorwaarden voldoet. Hiervoor is het belangrijk om de eisen op te splitsen in meer gedetailleerde technische specificaties en het is in dit stadium dat eventuele problemen zich kunnen voordoen, met als belangrijkste oorzaak het relatieve gebrek aan (Europese/Internationale) harmonisatie van het regelgevingskader (zie sectie V.2.4)
.
Zoals aangegeven wordt er op internationaal niveau een inspanning voor deze harmonisatie geleverd. Hiervoor worden een aantal onderwerpen tegelijkertijd behandeld met inspanningen om de gewenste harmonisatie te bereiken: gestandaardiseerde industriële benaderingen voor ontwerp, productie, constructie, inbedrijfstelling en werking van SMRs, evenals generieke gebruikersvereisten en -criteria.

Het is moeilijk voor te stellen dat alle thema's met dezelfde timing zullen worden voltooid en het is redelijk om te denken dat voor sommige van hen (bijv. Codes & Standards) harmonisatie meer tijd zal vergen. Bovendien zijn sommigen, zoals besproken in Addendum D (sectie D.2.4) in het kader van deze zoektocht naar harmonisatie, van mening dat een fundamentele paradigmaverschuiving nodig is. Op het gebied van de veiligheidsaanpak voor het ontwerp en de beoordeling bestaan er voorstellen om deze harmonisatie te helpen bereiken en vanuit dit oogpunt kan de implementatie in het kader van de ervaring van de provincie Limburg een voorbeeldfunctie vervullen.

### V.1.5 Nederlandse context - Bespreking met ANVS, 23 juni 2022

Op 23 juni 2022 hadden enkele van de auteurs een onderhoud met de ANVS [12]. Hieruit kwamen de volgende punten naar voren:

- De Rijkscoördinatieregeling geldt voor centrales van 500 Mwe of meer. ANVS heeft bij EZK een vraag uitstaan of SMR's (met een lager vermogen) daar onder vallen voor wat betreft de Plan-MER. Een vergunning onder de KeW valt niet onder de Rijkscoördinatieregeling. PALLAS had er vrijwillig voor kunnen kiezen om onder de Rijkscoördinatiregeling te vallen, maar heeft er voor gekozen dat niet te doen. De ANVS kan niet zeggen wat de voor- en nadelen zijn om dat al dan niet te doen. Het advies is om met PALLAS te spreken over het vergunningstraject, dat zij nu bijna geheel hebben doorlopen. In Nederland zijn het vergunningstraject en de (doelstellende) eisen hetzelfde voor research-reaktoren en grote nucleaire centrales, en dus ook voor SMR.
- Plan-MER en Project-MER kunnen in principe worden samengevoegd, maar dat is waarschijnlijk niet praktisch. Om een Project-MER in te dienen, moet nl. vrijwel alle informatie, ook van de veiligheidsonderbouwing (Preliminary Safety Assessment Report) PSAR, al bekend zijn.
- Volgens de ANVS zijn de Technische Richtlijnen (VOBK, uit 2015 [3]; evaluatie gepland voor dit jaar) ook goed toepasbaar op SMR's, waarbij geldt "comply or explain".
- Met een goede PSAR duurt de beoordeling hiervan door ANVS ongeveer een jaar. Met een kwalitatief minder goede SAR kan dat gemakkelijk het dubbele zijn.
    - N.B. Alleen de PSAR beoordeling kan in een jaar. Pas als die beoordeeld is kan een aanvraag ingediend worden (parallel aan PSAR kan een aanvrager ook MER en andere documenten opstellen). In de praktijk is er voordat een PSAR ingediend wordt tijd nodig voor een initiatiefnemer voor discussies met ANVS over specifieke eisen, locatieonderzoek etc. Daarna komt nog de formele vergunning procedure van een half jaar.
- Er wordt meestal begonnen met een "informeel vooroverleg" ("pre-licensing" kan hier een onderdeel van zijn), waarin de precieze/specifieke eisen worden bepaald. In het algemeen geldt hierbij dat hoe meer een ontwerp lijkt op een systeem dat reeds (in Europa) vergund/in bedrijf is, hoe eenvoudiger (en sneller) ANVS de aanvraag kan behandelen. In het bijzonder zou dit gelden voor LWR-SMR's, met componenten die reeds gekwalificeerd zijn voor bestaande/vergunde grote LWR's in Europa. Gebruikte computercodes dienen gevalideerd te zijn, en dat zal gemakkelijker het geval zijn voor LWR-SMR's.
- De inzet van middelen en personeel door de ANVS tijdens het "informeel overleg" worden mede bepaald door de tijdsplanningen en mijlpalen van de aanvrager.
- ANVS kan een rol spelen in het aanbestedingsproces, bijvoorbeeld om aan aanbieders uit leggen hoe regels m.b.t. vergunningverlening er gelden en hoe ze worden geïnterpreteerd. Dit is bijvoorbeeld gedaan voor PALLAS.
- Voor de ANVS maakt het niet echt uit of het een vergunningsaanvraag voor een FOAK of een NOAK (SMR) betreft. Alle risico's (bijvoorbeeld nabijheid van andere reactoren en/of een industrieel cluster) dienen wel in de MER's en de PSAR te worden afgedekt. ANVS leert graag van vergunningsprocedures die reeds in het (Europese) buitenland zijn doorlopen, maar kijkt zeker naar de toepasbaarheid in het Nederlandse vergunningskader. Rick neemt deel aan Europese samenwerking op SMR-licensing gebied met andere regulators in Europa.
- ANVS heeft een "interne TSO" voor de beoordelingen en heeft momenteel Bel-V (België) en IRSN (Frankrijk) gecontracteerd voor o.a. ervarings-uitwisseling. Het aantrekken van geschikt personeel (bijvoorbeeld indien er meerdere aanvragen binnenkomen voor grote LWR's en SMR's) is een uitdaging, maar de mogelijkheden hiertoe worden positief gezien. Er hoeft nl. niet alleen maar in de vijver van nucleaire deskundigen te worden gevist: een groot aantal aspecten van een nucleaire centrale zijn in essentie conventioneel (beton, bekabeling, etc.).

### V.1.6 Context van de regelgeving: voorlopige conclusies

De regelgevingscontext voor de invoering van SMR's is op internationaal niveau nog niet geharmoniseerd; bovendien moeten sterke aanbevelingen worden geïntegreerd, met name met betrekking tot het 3S-concept: "Safety/Security/Safeguards" – Veiligheid / Beveiliging / Waarborgen door ontwerp. Internationale inspanningen zijn momenteel aan de gang.

Toch lijken er geen onoverkomelijke beperkingen te zijn voor een inzet van SMR's in de provincie Limburg. De inzichten, voortkomend uit de interactie met de ANVS van 23 juni 2022, zijn hiermee in overeenstemming. De keuze van het concept waarvan de kenmerken het best aansluiten bij de behoeften van de provincie kan echter pas worden gemaakt nadat de vereisten met betrekking tot de gebruiksdoelstellingen bekend zijn, waardoor het mogelijk is om de technische doelstellingen te ontwikkelen die nodig zijn om de criteria en de maatstaven vast te stellen die nodig zijn om de keuze te finaliseren.

## V.2 GEO-TECHNISCHE EN INFRASTRUCTUUR RANDVOORWAARDEN VAN SMRS

De geo-technische en infrastructurele randvoorwaarden van verschillende SMR technieken worden in deze paragraaf behandeld. De technieken zijn hiervoor ingedeeld in de volgende hoofdgroepen:

- LWR SMRs op land
- LWR SMRs op water
- Gasgekoelde SMRs
- Snelle neutronen SMRs

De vier groepen staan centraal bij het bepalen van de randvoorwaarden en zijn gekozen op basis van het IAEA SMR handboek en de status van verschillende technologieën (van detailed design tot operationeel). Er zijn een aantal aspecten waar rekening mee gehouden kan worden als het gaat om het oriënteren op de benodigdheden van de verschillende technologieën in de Provincie Limburg Hierbij wordt gedacht aan de volgende aspecten:

- Restwarmte levering (temperatuur)
- Grootte (capaciteit)
- Grootte (ruimtebehoefte)
- Waterbehoefte

Aangezien er een behoorlijk aantal verschillende soorten technieken zijn binnen elke hoofdgroep, is het niet mogelijk om in detail naar technische aspecten zoals veiligheid te kijken. Deze zullen in een latere fase in meer detail bekeken moeten worden wanneer er een aantal technische ontwerpen zijn gekozen.

### V.2.1 Restwarmte levering

#### LWR SMRs

LWR SMRs (op land en op water) kunnen een restwarmte leveren tussen de 200 en 450 graden Celsius. Op verschillende plekken in het proces kan restwarmte geleverd worden aan een derde. Deze hoogwaardige warmte is ook geschikt voor toepassing in een aantal industriële processen als ook warmtenetten. Voor de LWR SMR op water zal onderzocht moeten worden hoe de warmte naar de provincie Limburg wordt getransporteerd.

#### Snelle neutronen SMRs

De snelle neutronen SMRs kunnen een restwarmte leveren tussen de 500 en 700 graden Celsius. Deze hoogwaardige warmte is geschikt voor het leveren van restwarmte aan de industrie als ook warmtenetten zoals stadsverwarming. Op verschillende plekken in het proces kan restwarmte geleverd worden aan een derde.

#### Hoge temperatuur gasgekoelde SMRs

Hoge temperatuur gas gekoelde SMRs hebben de mogelijkheid om zeer hoogwaardige warmte te leveren, boven de 700 graden. Deze temperatuur kan in principe voor allerlei processen gebruikt worden en heeft van de genoemde technieken dan ook de meest mogelijke toepassingen. Op verschillende plekken in het proces kan restwarmte geleverd worden aan een derde.

### V.2.2 Grootte (capaciteit)

De capaciteit van de kerncentrales is afhankelijk van het model. Er zijn grotere SMRs (300 MW) en kleinere SMRs (10 MW) waar meerdere reactoren van gebouwd kunnen worden. De capaciteit van een SMR is meestal onder de 300 MW.

### V.2.3 Grootte (ruimtebehoefte)

Net als de capaciteit is ook de ruimtebehoefte van een SMR afhankelijk van het model. Er zijn vele modellen op de markt van verschillende grootten. De grootte kan variëren tussen 2000 m2 tot 200.000 m2. De ingeschatte omvang betreft alleen de installatie en betreft niet de oppervlakte nodig voor de gehele locatie.

### V.2.4 Waterbehoefte

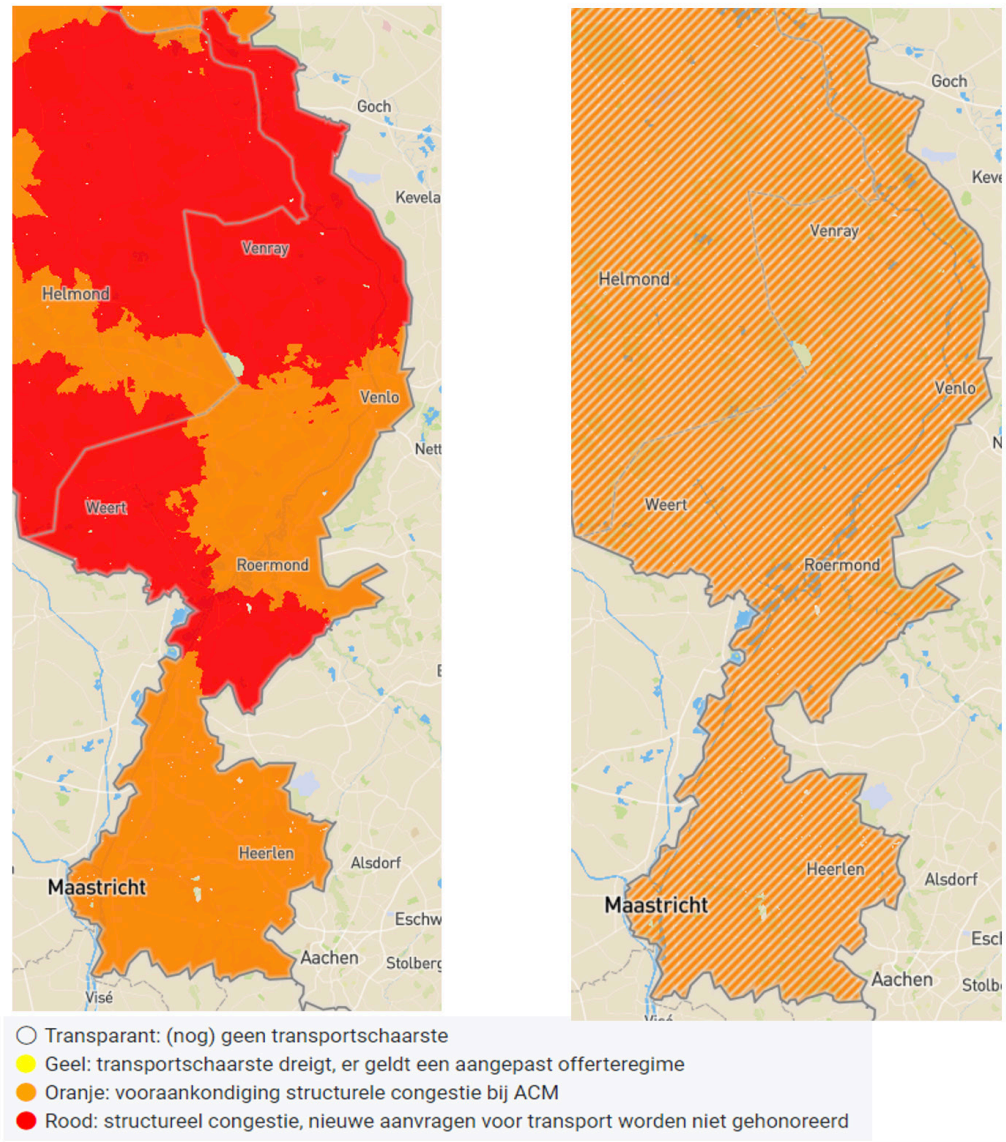
De waterbehoefte van de verschillende hoofdgroepen SMR technieken kan alleen op hoofdlijnen beschreven worden. Voor de meeste SMR technieken (LWR SMRs en snelle neutronen SMR) zal water nodig zijn voor het koelen van de kern en/of in de stoomwatercyclus in de stoomturbine. Hier zal dus rekening mee gehouden moeten worden met de locatie van de kerncentrale. Dit kan door de centrale dichtbij oppervlaktewater te plaatsen voor het onttrekken en lozen van water of door het plaatsen van (actieve) koeltorens op de locatie. De gasgekoeld SMRs hebben geen water nodig om de kern te koelen en er zijn mogelijkheden om bijvoorbeeld een gas-gas warmtewisselaar aan te sluiten in plaats van een stoomwatercyclus. Dan is er geen water nodig en kan er bijvoorbeeld door de buitenlucht gekoeld worden als de reactor klein genoeg is (bijvoorbeeld 150 MWth en kleiner).

Zoals Hoofdstuk IV heeft weergegeven laten een geïntegreerd energie-systeem met (Mini-)SMRs tevens toe om de netto te koelen warmte afvoer beduidend te beperken zodat de plaatsing van kerncentrales qua waterbehoefte vergelijkbaar wordt tot maximaal de noden voor huidige STEG-centrales en voor (Mini-)SMRs zelfs nog beduidend kleiner wat aldus geen echte beperking qua site vanwege waterbehoeften inhoudt.

### V.2.5 Conclusie en aanbeveling

De infrastructurele en geotechnische voorwaarden van de beoogde SMR centrale is op dit moment alleen op een hoog niveau te beschrijven. Wanneer er specifiekere technieken en modellen zijn uitgekozen (of in ieder geval specifieke parameters waar de techniek aan moet voldoen) welke geschikt zijn voor de provincie Limburg en als de passende locaties zijn geselecteerd, zal een nieuwe uitgebreidere analyse gemaakt moeten worden. De volgende paragraaf zal dieper ingaan op de randvoorwaarden en aspecten waar rekening mee zal gehouden worden in de Provincie Limburg.

Figuur V.2 Capaciteitskaart invoeding elektriciteitsnet (links) en capaciteitskaart afname elektriciteitsnet (rechts) (10 juni 2022) (Capaciteitskaart elektriciteitsnet (netbeheernederland.nl))



# V.3 GEO-TECHNISCHE EN INFRASTRUCTUUR KARAKTERISATIE VAN PROVINCIE LIMBURG

In deze paragrafen wordt ingegaan op de karakteristiek van de Provincie Limburg en welke aspecten belangrijk zijn om meegenomen te worden wanneer het opereren van SMRs overwogen worden.

## V.3.1 ELEKTRICITEITSNETWERK (ON-)MOGELIJKHEDEN (BESTAAND EN TOEKOMSTIG)

Bestaande en verwachte toekomstige elektriciteitsnetwerk in de Provincie Limburg zal kort beschreven worden. Hierbij wordt voornamelijk aandacht aan de volgende drie onderwerpen besteed:

- Netcapaciteit Limburg
- Mogelijkheden tot netaansluiting
- Andere mogelijkheden

### V.3.1.1 Netcapaciteit Limburg

Via de Nederlandse capaciteitskaart van Netbeheer Nederland, is het mogelijk om het huidige elektriciteitsnet en haar capaciteit te bekijken. Er is een overzicht voor het invoeden van elektriciteit (als nieuwe kerncentrale zou de optie om elektriciteit in te voeden op het net van belang zijn als elektriciteitsproducent) voor de provincie Limburg, als ook een kaart voor de afname van elektriciteit (zie Figuur V.2).

Qua invoeding is er in heel Limburg een (vooraankondiging) structurele congestie waarbij nieuwe aanvragen voor de invoeding van elektriciteit niet aangenomen worden. In de gehele provincie is er sprake van transport schaarste. Qua afname is er in de provincie Limburg ook structurele congestie. Afname is bedoeld voor partijen met plannen waar een zware netaansluiting voor nodig is. In de afname kaart (figuur V.2) is te zien dat er in heel Limburg structurele congestie is.

Deze twee kaarten laten zien dat er veelal een overcapaciteit van elektriciteitsproductie is in de provincie Limburg, en dat er uitbreidingen aan het net nodig zijn om een kerncentrale te kunnen bouwen mocht deze willen invoeden in het elektriciteitsnet. De bouw van een SMR in gebieden waar lokaal een grote vraag is naar elektriciteit, kan het netwerk verlichten omdat er minder elektriciteit over een grote afstand verplaatst hoeft te worden. Een SMR of Micro-SMR (MSMR) is hier bij uitstek geschikt voor aangezien deze kunnen matchen met de lokale vraag en kan dus het elektriciteitsnet verlichten op andere plekken. Dit is een belangrijke kans voor Limburg en ook voor de netbeheerder om de structurele congestie (deels) op te lossen.

Voor de netcapaciteit in de toekomst wordt gekeken naar de investeringsplannen van de netbeheerders in de provincie Limburg. Deze zijn regionale partij Enexis en landelijke partij TenneT.

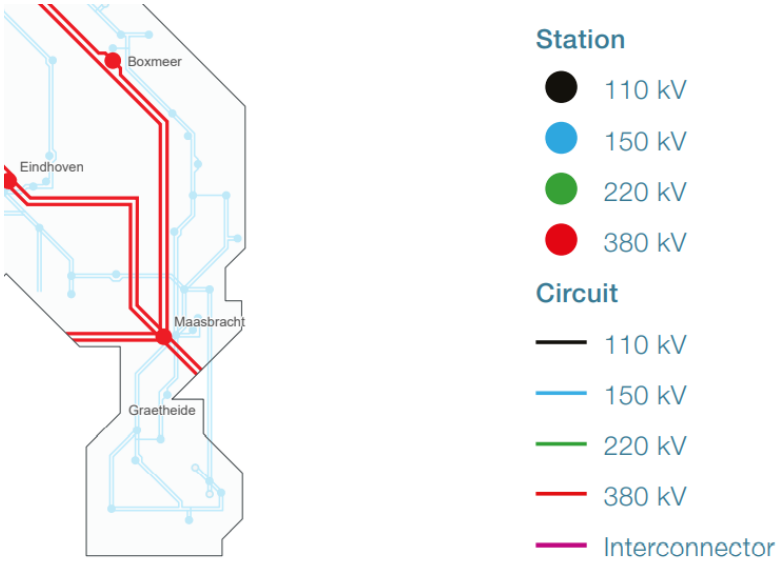
#### Investeringsplannen Enexis

De komende 10 jaar is Enexis Netbeheer van plan om de capaciteit van het elektriciteitsnet te verdubbelen. Gasnetten zullen beperkt zijn omdat de nieuwbouw gebruik maakt van andere energiebronnen. Afhankelijk van verdere ontwikkeling van invoeding van groen gas, kunnen de uitbreidingsinvesteringen om nieuwe invoeders aan te sluiten in de toekomst wel toe gaan nemen.

#### Investeringsplannen TenneT Limburg

TenneT is van plan het net uit te breiden, maar hier wordt geen rekening behouden met een kerncentrale. Er zijn verschillende investeringen beoogd in het 380 kV net zoals de vernieuwing van het station Maasbracht en de uitbreiding van station Boxmeer.  Er zijn een aantal nieuwe projecten gepland, en een aantal bestaande projecten zal worden vernieuwd en uitgebreid.

Figuur V.3 Netaansluitingen provincie Limburg




## Netaansluiting Limburg

Er zijn verschillende stations in Limburg waar een netaansluiting zit. De meeste stations zijn 150 kV stations en er zijn een aantal 380 kV stations (zie Figuur V.3). De verwachting is dat de potentiële kerncentrale aangesloten zou worden op het 380 kV net (dit ligt aan de beoogde capaciteit). Er zijn twee 380 kV stations in Limburg, in het noorden van Limburg bij Boxmeer, en het station Maasbracht in het midden van Limburg. De hoeveelheid rode lijnen geeft aan hoeveel spanningslijnen naar en van het hoogspanningsstation lopen. Het hoogspanningsstation in Maasbracht is het aantrekkelijkst aangezien deze de meeste hoogspanningslijnen heeft en ook lijnen naar België en Duitsland heeft. Wanneer er een lijn uitvalt door bijvoorbeeld onderhoud, zijn er nog genoeg lijnen over om de elektriciteit af te nemen. In Boxmeer is dit minder (4 lijnen t.o.v. 8 lijnen in Maasbracht, er is dus in Boxmeer een hoger risico van uitval en daarmee beperking van afname dan in Maasbracht. Het hoogspanningsstation in Maasbracht wordt volledig vernieuwd, deze is naar verwachting in 2027 gerealiseerd (380 kV station)[i]. Ook is er voorzien dat de 380 kV stations Eindhoven en Geertruidenberg worden uitgebreid. Er wordt een nieuw 380 kV station gebouwd bij Graetheide, waar het Chemelot cluster gesitueerd is. Wanneer deze gereed is, is nog niet bekend, maar de verwachting is dat dit niet voor 2030 zal zijn. Dit station is ook een mogelijke optie.

Als er een nieuwe netaansluiting nodig is dan moet deze aangevraagd worden bij TenneT. De procedure voor het aanvragen start met de aanvrager die een netaansluiting aanvraagt bij de netbeheerder. De netbeheerder maakt een bijbehorend technisch ontwerp en offerte voor het ontwerp en waar nodig wordt de regionale netbeheerder betrokken. Deze offerte wordt besproken en als de opdracht is verstrekt gaat de netbeheerder hier mee aan de slag. Als er geen netuitbreiding nodig is, neemt het proces van aanvraag tot realisatie 12 tot 18 maanden. Als er wel netuitbreiding nodig is kan dit proces een stuk langer duren. Dit zal tussen beide partijen worden besproken.
In juni 2022 is gepubliceerd dat nieuwe bedrijven niet meer worden aangesloten op het net in de provincie Limburg. Er worden momenteel dus geen netaansluitingsaanvragen behartigd. Het net is structureel overbelast en deze congestie zal minimaal tot 2027 duren en maximaal tot 2032[ii] . Zoals eerder in het hoofdstuk aangegeven, is **een groot voordeel van SMR en Mini-SMR dat deze gematcht kunnen worden met de lokale elektriciteitsvraag waardoor er minder elektriciteit getransporteerd hoeft te worden vanuit het landelijke net. Dit heeft als gevolg dat het net op andere plaatsen verlicht wordt en er meer ruimte is in het net.**

De bouw van een (Mini-)SMR alswel grote kerncentrale neemt ongeveer 5-10 jaar (periode van verkenning tot operationeel), wat betekent dat de netaansluiting pas over een aantal jaar nodig zal zijn. Desalniettemin zullen er gesprekken met de netbeheerder gevoerd moeten worden om de mogelijkheden te bespreken om aangesloten te worden op het net en welke voorwaarden hieraan verbonden zijn.

### V.3.1.3 Andere mogelijkheden

Een andere mogelijkheid dan aansluiten op het Nederlandse elektriciteitsnet is een directe lijn met partijen die de elektriciteit afnemen van de kerncentrale. De verkenning met de industrie in de provincie Limburg heeft de toekomstplannen voor de industrie belicht. De industrie is bezig met elektrificatie van hun installaties en processen. Er is naar verwachting elektriciteit nodig, maar weinig warmte of stoom. Deze optie is mogelijk, maar de kerncentrale is dan erg afhankelijk van de klant en het contract. Deze optie is daarom minder flexibel in vergelijking tot een aansluiting op het net.
Er wordt aangeraden om tijdig met de netbeheerder TenneT om tafel te gaan om de mogelijkheden wat betreft een kerncentrale te bespreken en de capaciteit op het net. Aangezien het gaat om een grootschalige energieproducent, zal er in Limburg uitbreiding moeten komen, meer dan al gepland is.

i Station Maasbracht - TenneT
ii Solar Magazine - Stroomnet Limburg en Brabant vol: TenneT stopt met aansluiten nieuwe klanten

Ook is er de optie om van de elektriciteit of warmte die de kerncentrale produceert waterstof te produceren met behulp van een elektrolyser (elektriciteit als input) of een hoge temperatuur stoom electrolyzer (warmte als input). Het waterstofnet is momenteel nog niet uitgerold, maar de verwachting is dat waterstof een prominentere rol gaat innemen in Nederland (zie ook hoofdstuk II). De industrie in Limburg wil op de waterstof backbone aansluiten in de toekomst. Deze opties kunnen in meer detail worden verkend in een volgende fase.

#### V.3.1.4 Conclusie en aanbeveling

Het elektriciteitsnet is qua invoeding op een aantal plekken overbelast in de provincie Limburg. Deze congestie zal minimaal tot 2027 duren, wellicht tot 2032. De toekomstige plannen voor het net in de provincie Limburg is het uitbreiden van het net en de capaciteit. In de investeringsplannen van de netbeheerders is geen rekening gehouden met een eventuele kerncentrale.

Er wordt aangeraden om tijdig met de netbeheerder TenneT om tafel te gaan om de mogelijkheden wat betreft een kerncentrale te bespreken en de capaciteit op het net. **Aangezien het gaat om een grootschalige energieproducent, zal er in Limburg uitbreiding moeten komen, meer dan al gepland is.**

Ook kunnen alternatieve opties worden bekeken zoals een directe lijn met afnemers, of het aansluiten van electrolyzers om waterstof te maken van de opgewekte elektriciteit welke kan worden gebruikt voor bijvoorbeeld transport of als alternatief voor aardgas.

### V.3.2 NIET-ELEKTRICITEIT BEHOEFTEN

Naast het beschikbare netwerk, zijn er andere aspecten die overwogen moeten worden om een geschikte locatie te vinden. Deze algemene aspecten zullen beschreven worden voor de provincie Limburg. Ook mogelijke mitigerende maatregelen en volgende stappen worden hier aangegeven.

#### V.3.2.1 Veiligheid (evacuatie mogelijkheden)

Veiligheid is een erg belangrijk aspect om mee te nemen bij het bouwen van een kerncentrale. De kerncentrale zal aan de veiligheidseisen van de Nederlandse en Europese nucleaire veiligheidsregels en technische eisen voldoen. Een aantal uitgangspunten zijn bijvoorbeeld[i] :

- De kans op een kernsmeltongeval is minder dan eens in de miljoen jaar
- Voorzieningen zijn aanwezig die voorkomen dat bij kernsmeltongevallen de kern buiten de omhulling terechtkomt
- Ongevallen zonder kernsmelt hebben geen radiologische gevolgen en zeker geen preventieve maatregelen zoals evacuatie of schuilen tot gevolg

Mocht er toch een ongeval uitbreken waar evacuatie noodzakelijk is, dan moeten er genoeg evacuatiemogelijkheden zijn in de omgeving. Evacuatiemogelijkheden bestaan uit manieren om de gebouwen en locatie te verlaten. Er zullen genoeg nooduitgangen en andere noodvoorzieningen aanwezig moeten zijn op de locatie. Ook is een locatie waar voldoende uitvalswegen beschikbaar zijn gewenst. Voldoende uitvalswegen geldt voor de kerncentrale locatie zelf, maar ook in de omgeving daaromheen. Ook zal moeten nagedacht worden over een evacuatiezone om de kerncentrale heen. Een straal van 20 km wordt meestal aangehouden (bijvoorbeeld voor Borssele). Een SMR heeft als voordeel dat het als kleinere installatie wellicht ook een kleinere noodzaak tot evacuatie en dus een kleinere evacuatiestraal nodig heeft. Er zal nader onderzoek gedaan moeten worden om vast te stellen of een straal van 20 km afdoende is of dat de evacuatiezone zal moeten worden verkleind of uitgebreid.

i Kamerstuk 32645, nr. 1 | Overheid.nl > Officiële bekendmakingen (officielebekendmakingen.nl)

Tabel V.3 Richtlijnafstanden kerncentrale met koeltorens

| Milieuaspect | Afstand (m) |
|---|---|
| Geur | 10 |
| Stof | 10 |
| Geluid | 500 |
| Gevaar | 1.500 |
| Grootste afstand | 1.500 |
| Categorie 6 | 1.500 |

### V.3.2.2 Veiligheid (veilige afstand)

Een veilige afstand tussen de kerncentrale en gevoelige functies zoals woningen is een belangrijk gegeven. De handreiking 'Bedrijven en milieuzonering' van de meest actuele uitgave van maart 2009 geeft richtlijnafstanden voor verschillende milieubelastende activiteiten. Zo ook voor kerncentrales met koeltorens[i]. De volgende richtlijnafstanden zullen minstens aangehouden moeten worden volgens deze meest actuele uitgave (zie tabel V.3).

De aanbeveling is om geen kerncentrale te bouwen op een dichtbevolkte plek, de afstand moet minimaal 1,5 km zijn. Stedelijke gebieden dienen vermeden te worden net zoals kwetsbare objecten zoals scholen, kinderdagopvangen, ziekenhuizen en andere zorginstellingen.

Gezien de verschillende aard qua (Mini-)SMRs qua veiligheids-verwachtingen dient voor deze (Mini-)SMRs deze richtlijnafstanden mogelijks opnieuw geëvalueerd (zie ook sectie V.1 en Addendum D).

### V.3.2.3 Beschikbare ruimte

De beschikbare ruimte voor de bouw van een kerncentrale is een belangrijk aspect. De grootte van de kerncentrale heeft te maken met de beoogde techniek en de beoogde capaciteit van de centrale. De benodigde ruimte is per kerncentrale verschillend, er zijn kleine centrales van ongeveer 1.500 m2 waar een aantal van geplaatst kunnen worden, maar er zijn ook kerncentrales die 200.000 m2 kunnen innemen. De site zelf zal groter zijn dan de centrale zelf i.v.m. de richtlijnafstanden en eventuele ondersteunende installaties. Bovenstaande paragraaf geeft aan dat een veilige afstand minstens 1,5 km is. Er is naar verwachting dus een straal van 1,5 km buiten de kerncentrale nodig wat betreft gevoelige functies. Er zal dus rekening gehouden moeten worden met de benodigde ruimte om de locatie heen wanneer de potentiële kerncentrale(s) is(zijn) uitgekozen.

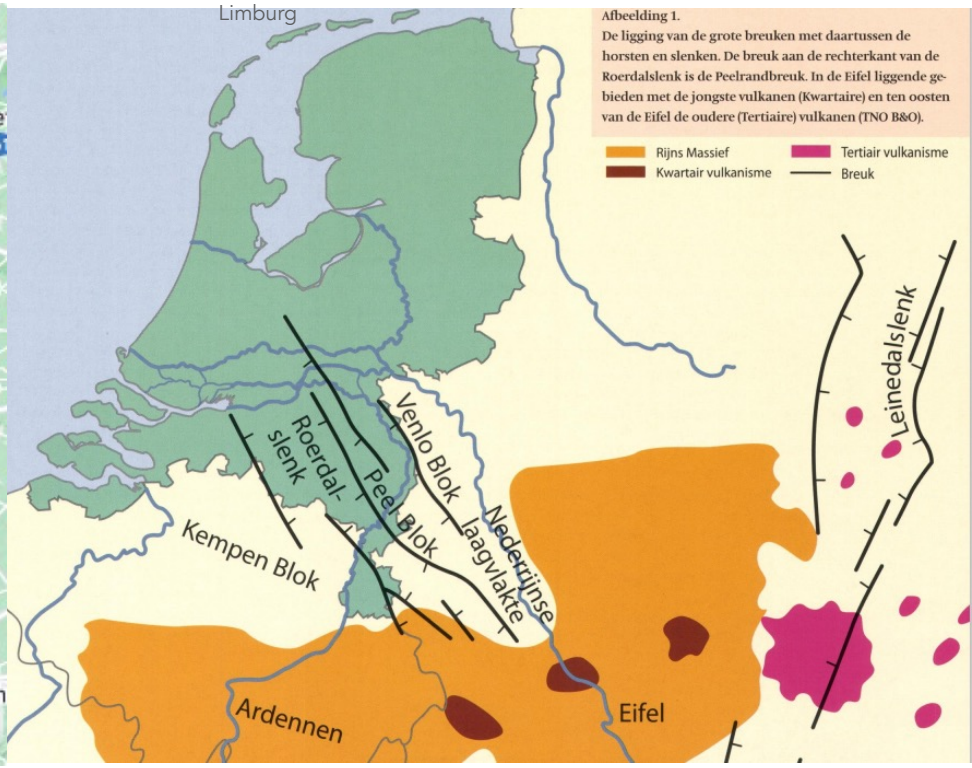
### V.3.2.4 Bodem stabiliteit

De stabiliteit van de bodem is een belangrijk aspect in vooral het zuiden van Limburg. Er zijn een aantal oude ondergrondse kolenmijnen waar de kerncentrale niet op geplaatst dient te worden in verband met de stabiliteit van de bodem in deze gebieden (Figuur V.4 en V.5). De mijnen zijn voornamelijk rondom Heerlen en Kerkrade te vinden. Ook zijn er ondergrondse zoutmijnen welke in acht genomen moeten worden. Mijnen kunnen zorgen voor verzakkingen als het grondwaterpeil niet goed wordt gemonitord, hetgeen kan zorgen voor risico's. De aanbeveling is om gedegen bodemonderzoek te doen op beoogde locaties. Het bodemonderzoek zal niet alleen qua kwaliteit van de bodem, maar ook de opbouw van de bodem mee moeten nemen[ii].

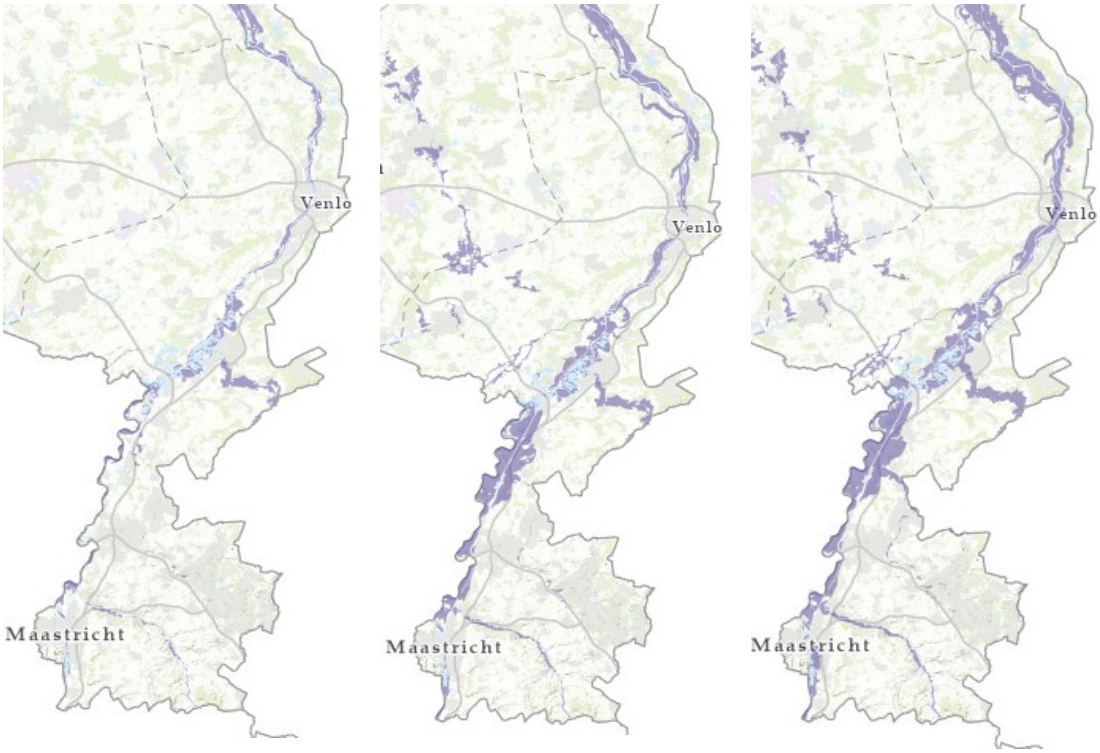
i Bedrijven en milieuzonering | VNG
ii DE MIJNEN | De Nederlandse mijnstreek in het heden

Figuur V.4 Locatie mijnen provincie Limburg

Figuur V.5. De ligging van grote breuken en scheuren bij de provincie Limburg



Figuur V.6 Overstromingsrisico Limburg (links groot risico, midden middelgroot risico, rechts klein risico)




### V.3.2.5 Overstromingsrisico

In de provincie Limburg is een overstromingsrisico. Een online tool, Geoweb Gelderland, heeft de mogelijkheid om verschillende risico's in Nederland voor elke regio in kaart te brengen. Ook het overstromingsrisico valt hieronder. De risico's zijn verdeeld in kleine, middelgrote en grote kansen volgens Geoweb (zie Figuur V.6)[i].

De kans op overstroming ligt langs de rivieren in Limburg. Vanwege de beschikbaarheid van koelwater en daarmee waterinname is de verwachting dat een kerncentrale wellicht dichtbij oppervlaktewater ligt. Er zal dus rekening gehouden moeten worden met de kans op overstroming en hier zullen passende maatregelen voor genomen moeten worden in het ontwerp van de kerncentrale. Ook kan de kans gemitigeerd worden door de kerncentrale niet in gebieden te plaatsen waar een overstromingsrisico is. Dit betekent dat de kerncentrale voor koeling gebruik maakt van koelwatertorens.

### V.3.2.6 Aardbevingsrisico

Aardbevingsrisico is aanwezig op een aantal plekken in Limburg. De aardbevingen worden veroorzaakt door de breuklijnen die dwars door Limburg lopen (zie Figuur V.5). Er zal dus in Limburg aardbevingsbestendig gebouwd moeten worden. De aanbeveling is om gedegen aardbevingsrisico onderzoek uit te voeren waarbij de risico's gemitigeerd worden door de aanwijzing van de plek van de kerncentrale en door het technisch ontwerp van de centrale. **Hierbij wordt aangeraden om geen kerncentrale te bouwen boven of dicht langs grote breuken.**

### V.3.2.7 Restwarmtelevering mogelijkheden in de buurt

De restwarmtelevering mogelijkheden in de buurt kunnen een belangrijk aspect zijn om mogelijke locatie te bepalen. Een kerncentrale (afhankelijk van de gekozen techniek en grootte (MWth/MWe)) kan elektriciteit en (rest)warmte leveren. De mogelijkheden om deze bij afnemers in de buurt te kunnen leveren is een belangrijk gegeven. Hierbij kan gedacht worden aan een lage temperatuur levering voor bijvoorbeeld warmtenetten, of hoge temperatuur levering voor industriële processen. Warmtenetten voor stadsverwarming kan een interessante optie zijn in de provincie Limburg omdat er geen of nauwelijks geothermie kan worden toegepast in verband met het aardbevingsrisico en de bodem stabiliteit op een aantal plekken. Uit de gesprekken met de industrie in Limburg blijkt dat de industrie haar processen warmteneutraal gaat bedrijven, dus de warmte die opgewekt wordt in hun eigen processen worden ook weer gebruikt in hun eigen processen. De hoeveelheid warmte die nodig is voor de processen worden minder door de elektrificatie van de industrie.

De industrie heeft in hun toekomstvisie geen rekening gehouden met een warmteleverancier in de buurt. Hier zullen gesprekken over gevoerd moeten worden om te kijken wat de behoefte is in Limburg en waar een kerncentrale waardevol kan zijn voor restwarmte en elektriciteit (of eventuele waterstof als er elektrolyzers worden aangesloten op de centrale). **De mogelijkheden voor de toepassing van de output van de kerncentrale zullen nog in detail verkend moeten worden met beoogde afnemers.**

i GeoWeb 5.3 (gelderland.nl)

### V.3.2.8 Beschikbaarheid oppervlaktewater

De beschikbaarheid van oppervlakte water is een belangrijk gegeven voor het bedrijven van de stoomwatercyclus (hier zal het oppervlaktewater eerst voor gezuiverd moeten worden) van de kerncentrale en als koelmiddel van de kern. Ook wordt er voor LWR SMRs water gebruikt voor het koelen van de kern. Een mogelijkheid is om water te onttrekken aan oppervlaktewater, en dat deze na gebruik weer geloosd wordt op datzelfde oppervlakte water (doorstroomkoeling). Voor deze methode wordt geadviseerd om dicht bij een oppervlaktewater te bouwen om de aan- en afvoerleidingen zo kort mogelijk te houden qua lengte.

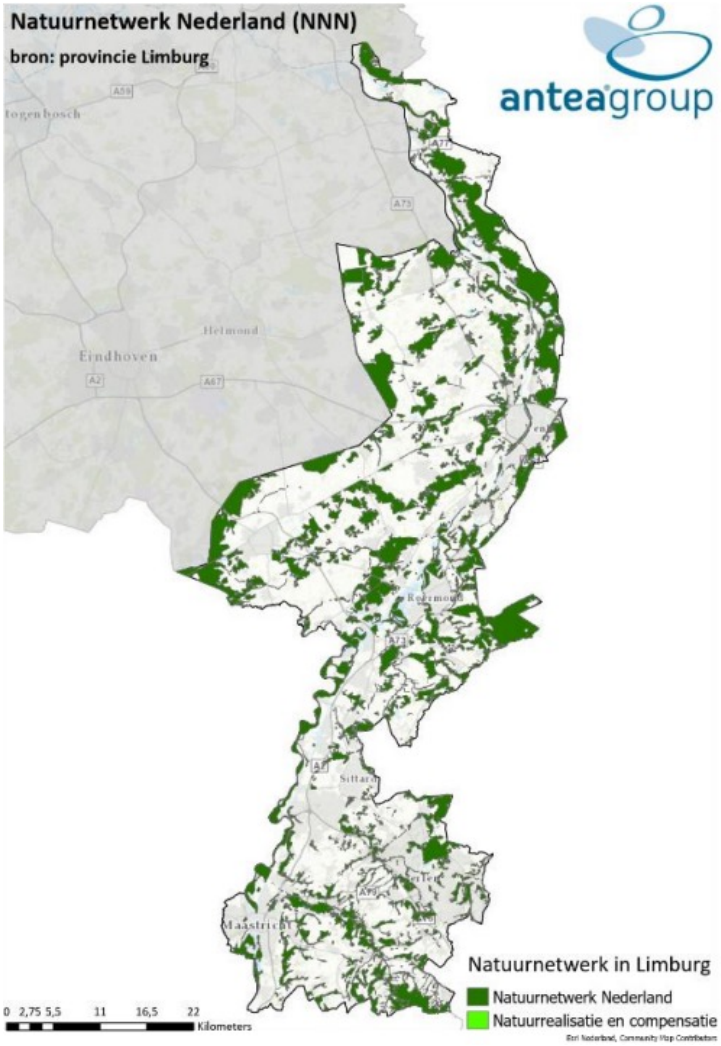
Het meest voor de hand liggende oppervlaktewater betreft de rivier de Maas. Het peil van de rivier is afhankelijk van regenval en dat bepaald ook de beschikbaarheid. Dit betekent dat de beschikbaarheid van voldoende oppervlaktewater niet jaarrond gegarandeerd is. Buiten de beschikbaarheid van het oppervlaktewater is ook de koelwaterlozing een belangrijk onderwerp in Limburg. De koelwaterlozing is een sensitief onderwerp waar restricties aan verbonden zijn met betrekking tot de vervuilingsgraad van het water als ook de temperatuur van het geloosde water.

Afhankelijk van welke conditioneringsmiddelen gedoseerd worden, kan ook zoutlast een probleem zijn. Hier zijn voor de Maas restricties verbonden vanuit Rijkswaterstaat. Er zal dus ook een watervergunning aangevraagd moeten worden.  Ook is het overstromingsrisico van een locatie dichtbij bijvoorbeeld de Maas is een aspect om mee te nemen in deze beslissing.

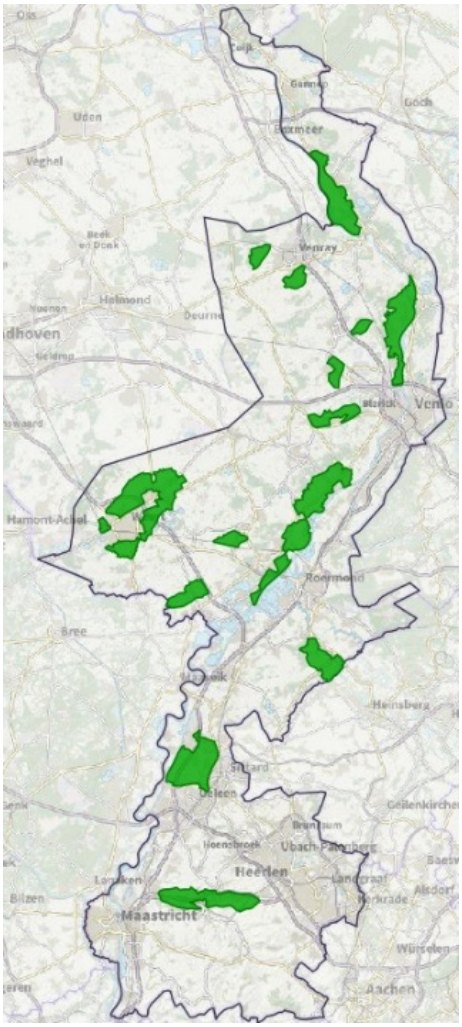
Een alternatief is de toepassing van (actieve) koeltorens waarmee de hoeveelheid oppervlaktewater dat wordt onttrokken wordt gereduceerd. Het spui vanuit het koeltorensysteem zal moeten worden verwerkt. Hier zijn ook restricties aan verbonden vanuit de bevoegde gezagen in Limburg.

Er zijn ook mogelijkheden om luchtgekoelde (Mini-)SMRs te bouwen welke, in vergelijking tot bijvoorbeeld LWR SMRs, geen tot nauwelijks water nodig hebben om te functioneren.

Figuur V.7. Natuurnetwerk in de provincie Limburg




Figuur V.8 Provinciaal archeologische aandachtsgebieden



### V.3.2.9 Bereikbaarheid (nooddiensten, aanvoer en afvoer van stoffen)

De bereikbaarheid van de kerncentrale locatie is belangrijk in verband met de verbinding met nooddiensten en de aanvoer en afvoer van stoffen. Hier wordt aangeraden om een locatie uit te zoeken waar een goede infrastructuur aanwezig is (bijvoorbeeld snelwegen, stations, havens, dit ligt aan de manier van vervoer van stoffen van en naar de locatie). Ook is er een link tussen bereikbaarheid en evacuatiemogelijkheden.

De afvoer van stoffen (radioactief afval en de verwerking hiervan) is een belangrijk thema. Voor het bedrijven van een kerncentrale is het de bedoeling dat de eigenaar een bedrag betaalt voor de opslag van het nucleaire afval bij de organisatie die is aangewezen voor de verwerking en beheer voor radioactief afval: de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval N.V. (COVRA). Hier zullen afspraken over gemaakt moeten worden. De COVRA is gesitueerd in Zeeland, dus het transport van radioactief afval kan bijvoorbeeld met een schip geschieden. Ook zal er een bedrag betaald moeten worden voor een fonds waar onderzoek naar de eindbestemming van radioactief afval van wordt gedaan. Dit fonds wordt beheerd door de COVRA. Hier is ook de keuze van techniek van de kerncentrale interessant, er zijn namelijk een aantal AMRs, zoals MSRs, waar splijtstoffen worden opgewerkt en weer gebruikt worden als splijtstof. Hier wordt dus circulair gewerkt. Door de circulaire werking worden ook de reststoffen (afvalstoffen) minder gevaarlijk en de halfwaardetijd van de reststoffen zijn korter ten opzichte van de conventionele technieken. De bereikbaarheid van de locatie is dus een belangrijk aspect om mee te nemen. De mogelijkheden van aanvoer en afvoer van stoffen (bijvoorbeeld breedte van de weg en hoogte) zal ook moeten worden onderzocht als ook de verwerking van de finale afvalstoffen.

### V.3.2.10 Geluidszonering

Geluidszonering is een planologisch aspect welke voor elke locatie geldt. De specifieke geluidszonering per locatie is vastgelegd in gemeentelijke bestemmingsplannen (omgevingsplannen onder de Omgevingswet) welke kan verschillen per locatie. De beoogde techniek zal onder de gezette geluidslimieten moeten blijven waar onderzoek voor naar uitgevoerd moet worden. Mocht de plant niet aan de geluidseisen voldoen, dan zijn er meestal mitigerende maatregelen mogelijk zoals het plaatsen van een omhulsel over geluid producerende motoren, of het plaatsen van geluidsschermen. Dit zal in een later stadium onderzocht moeten worden en meegenomen moeten worden in het technisch ontwerp van de kerncentrale.

### V.3.2.11 Natuurgebieden

De natuur in natuurgebieden wordt conform de geldende wet- en regelgeving beschermd tegen mogelijke negatieve effecten van onder andere nieuwe initiatieven. Het verdient de voorkeur om het bouwen van een kerncentrale in of dicht bij een natuurgebied te vermijden. Figuur V.7 geeft het natuurnetwerk in de provincie Limburg weer. Waarschijnlijk zien mogelijke stakeholders in Limburg liever geen kerncentrale in of nabij dit soort gebieden, en zullen naar verwachting tijdens de ter inzagelegging van de vergunningen zienswijzen indienen wat de vergunningsprocedure kan vertragen of zelfs blokkeren.

De huidige stikstofdiscussie in Nederland heeft nog geen conclusie bereikt. Hierdoor is het onmogelijk te voorspellen wat er te verwachten valt met de stikstofproblematiek. Mocht de vrijstelling van stikstofdepositie voor de bouwfase wegvallen, dan zal er aangetoond moeten worden dat er tijdens de bouwfase voldaan wordt aan de stikstof grenswaarde. Als dit niet het geval is zullen er technische oplossingen moeten komen om onder de grenswaarde te komen (bijvoorbeeld door het gebruik van elektrische voertuigen). Dan zal er emissiearm of emissieloos gebouwd moeten worden. De oplossingen hiervoor zullen technisch van aard zijn[i] [ii].

### V.3.2.12 Flora en fauna

De beschermde flora en fauna in beoogde locaties voor de bouw en het bedrijven van een potentiële kerncentrale zullen met een quickscan (uitgevoerd door een ecologisch adviesbureau) onderzocht moeten worden als er één of meerdere locaties zijn uitgekozen. Uit de quickscan kan volgen dat verder onderzoek nodig is als er beschermde soorten of de mogelijkheid van aanwezigheid van beschermde soorten op de locatie zijn gevonden.

i Bijlagenrapport MER Omgevingsvisie (ruimtelijkeplannen.nl)
ii Eindversie MER (ruimtelijkeplannen.nl)

### V.3.2.13 Archeologische en cultuurhistorische waarden

In Limburg zijn gebieden aanwezig die grote archeologische en/of cultuurhistorische waarden kennen. De archeologische en cultuurhistorische waarden dienen meegenomen te worden in de keuze voor een locatie. Figuur V.8 laat de archeologische aandachtspunten in de provincie Limburg zien. Er zal een archeologisch onderzoek gedaan moeten worden op de beoogde locaties. Als de kerncentrale in een gebied van grote waarde wordt gebouwd dan is er kans op vertraging door bijvoorbeeld eventuele vondsten in de bodem waardoor er aanvullend archeologisch onderzoek uitgevoerd moet worden of afgravingen met archeologische begeleiding. Waarschijnlijk zien mogelijke stakeholders in Limburg liever geen kerncentrale in of nabij dit soort gebieden, en zullen naar verwachting tijdens de ter inzage legging van de vergunningen zienswijzen indienen wat de vergunningsprocedure kan vertragen of zelfs blokkeren.

Het wordt aanbevolen om gebieden van grote archeologische en cultuurhistorische waarden te vermijden. Mocht dit niet mogelijk zijn, dan zal er archeologisch onderzoek gedaan moeten worden.

### V.3.2.14 Overig

In het zuiden van Limburg is ook de Noord-Atlantische Verdragsorganisatie (NAVO) gestationeerd. De NAVO Allied Forces North Europa (AFNORTH) ligt in Brunssum en Heerlen. Deze wordt vooral bemand door Amerikanen en is het hoofdkwartier voor Noord Europa. Hier werken ongeveer 1.500 militairen en niet-militair personeel. Een kerncentrale dicht bij de locatie van de NAVO zal niet gewenst zijn. Een kerncentrale dicht bij de locatie van de NAVO ligt niet voor de hand[i].

### V.3.2.15 Conclusie en aanbeveling

In dit hoofdstuk is een overzicht gegeven van de belangrijkste planologische en geotechnische aspecten om rekening mee te houden tijdens de selectie van geschikte locaties voor een kerncentrale. Op dit moment bevindt het project zich in een dermate pril stadium dat het niet mogelijk is om mogelijke locaties te kunnen selecteren. Er zullen een aantal verdiepende onderzoeken uitgevoerd moeten worden wanneer een aantal locaties zijn uitgezocht voor de mogelijke bouw en het bedrijven van een kernenergiecentrale, waaronder:

- Evacuatiemogelijkheden
- De grootte van de beoogde kerncentrale en de omliggende site
- Stabiliteit van de bodem
- Overstromings- en aardbevingsrisico
- Restwarmte/elektriciteitslevering mogelijkheden
- Koelwaterinname en -lozingsmogelijkheden
- Beschikbare infrastructuur
- Geluidzonering
- Nabij gelegen natuurgebieden en een quickscan flora en fauna
- Archeologisch en cultuurhistorische onderzoek
- Optionele gesprekken met de NAVO

De techniek en soort kerncentrale is een belangrijk gegeven om de onderzoeken te kunnen starten. Ook zijn mogelijke locaties van belang voordat bovenstaande onderzoeken gerichter uitgevoerd kunnen worden.

i JFC BRUNSSUM | Home (nato.int)

## V.4 HUIDIGE LOCATIE-OPTIES KERNENERGIE IN NEDERLAND

Momenteel zijn er drie locaties aangewezen in het derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III)[i] waar kernenergie gevestigd kan worden. Deze locaties zijn de vestigingsplaatsen Eemshaven, Maasvlakte I en Borssele. In maart 2021 is een motie aangenomen waar Eemshaven als mogelijke locatie in SEV III geschrapt moet worden[ii] . Geen van deze locaties is gelegen in de Provincie Limburg.

## V.5 WAT ZIJN DE NOODZAKELIJKE ONTWIKKELINGEN NAAR SMR-IMPLEMENTATIE IN PROVINCIE LIMBURG

Mocht de Provincie Limburg locatie-opties voor kernenergie willen aanwijzen, dan zullen er een aantal stappen ondernomen moeten worden. Denk hierbij aan een wijziging in het bestemmingsplan en stakeholder management. Deze twee aspecten zullen hier worden uitgewerkt.

### V.5.1 WIJZIGEN BESTEMMINGSPLAN

Het wijzigen van het huidige Provinciale Inpassingsplan (PIP) heeft een aantal procedurele stappen. PIPs kunnen de gemeentelijke bestemmingsplannen (omgevingsplannen onder de Omgevingswet) overrulen. Dat kan alleen als het gaat om een onderwerp van provinciaal belang. Volgens de ANVS mogen overal in Nederland kerncentrales gebouwd worden als er aan de veiligheidseisen van de Europese Unie (EU) en Nederland wordt voldaan[iii]. Het wijzigen van PIPs is qua inhoud en procedurele aspecten vrijwel gelijk aan het wijzigen van een gemeentelijk bestemmingsplan. Er bestaat echter een extra verplichting om de gemeenteraad te horen, de wijze waarop dit gebeurt is vormvrij. De Provinciale Staten zijn het bevoegd gezag voor de provincie Limburg. Hieronder is een overzicht gegeven van de verwachte procedure om een PIP te wijzigen[iv] [v] :

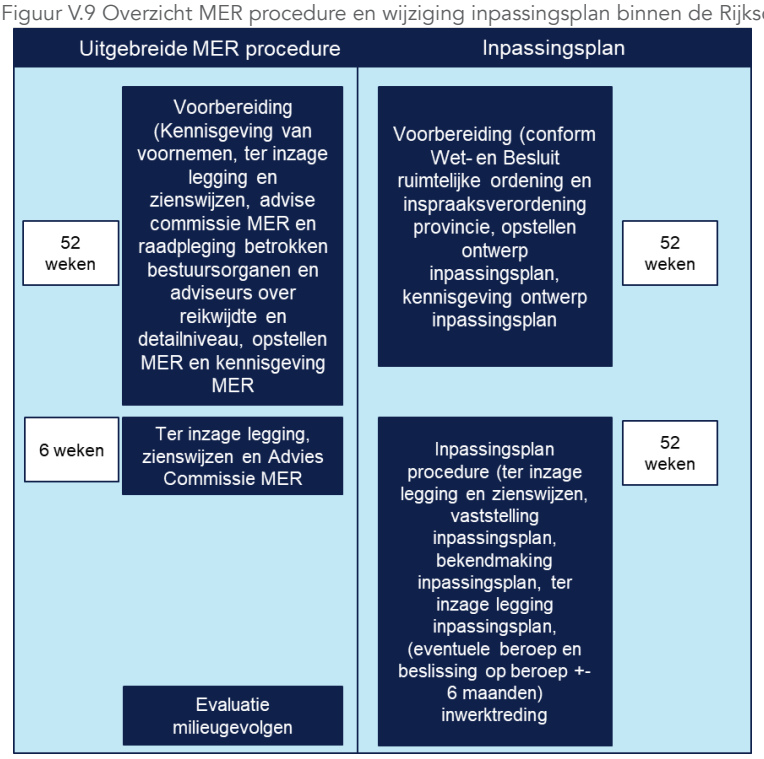
- Voorbereiding:
  - Kennisgeving, het ontwerp PIP wordt voorbereid en wordt (elektronisch) gepubliceerd (bij het bevoegd gezag).
- Ontwerp
  - Vooroverleg, hier wordt het ontwerp PIP overlegd met relevante bestuursorganen en plaatsen het resultaat in de toelichting.
  - Inhoud en onderbouwing, hier worden relevante feiten en belangen tegen elkaar opgewogen en stellen bestemmingen regels en toelichtingen op voor de te wijzigen delen.
  - Kennisgeving, de kennisgeving wordt in de Staatscourant en elektronisch gepubliceerd. Belangrijke partijen worden ingelicht.
  - Terinzagelegging, het ontwerpbesluit en belangrijke stukken worden (elektronisch) ter inzage gelegd.
  - Zienswijzen, iedereen kan zienswijzen tegen het ontwerpbesluit indienen.
- Vaststelling
  - Reactie op zienswijzen, hier beantwoordt de Provincie de zienswijzen welke dient als motivering van het PIP. Het PIP kan ook gewijzigd worden vastgesteld als reactie op de zienswijzen.
  - Beslistermijn/besluit, binnen twaalf weten wordt besloten na de termijn van terinzagelegging van het ontwerpbesluit over de vaststelling van het PIP.
  - Kennisgeving, de kennisgeving van het vaststellingsbesluit wordt gepubliceerd in de Staatscourant als ook elektronisch.
  - Terinzagelegging, het vaststellingsbesluit en belangrijke stukken worden (elektronisch) ter inzage gelegd.

Voor het vaststellingsbesluit vinden nog eventuele beroepsprocedures plaats wanneer er bezwaar en beroep wordt aangetekend.

Volgende stappen zijn het aanvragen van vergunningen waarbij de Rijkscoördinatieregeling van toepassing is voor de bouw van kerncentrales groter dan 500 MW (zoals aangewezen in de Elektriciteitswet van 1998). Alle vergunningen en ontheffingen worden dan tegelijkertijd aangevraagd door de minister van EZK. Voordat de vergunningen en ontheffingen kunnen worden aangevraagd, gaat er een voorbereidende periode aan vooraf. In deze periode wordt er een uitgebreide MER-procedure en de wijziging in het inpassingsplan van het Rijk parallel aan elkaar uitgevoerd (zie Figuur V.9). De procedure die van toepassing is hangt af van de grootte van de kernenergiecentrale. Beneden de 500 MW dan is de provinciale procedure van toepassing, en wanneer de kernenergiecentrale een vermogen heeft van boven de 500 MW is de Rijkscoördinatieregeling van toepassing[vi]. De ANVS heeft overigens momenteel een vraag uitstaan bij het Ministerie van EZK of SMRs (met een lager vermogen) onder de Rijkscoördinatieregeling vallen voor wat betreft de Plan-MER. Een vergunning onder de KeW valt niet onder de Rijkscoördinatieregeling (zie sectie V.1.5).

i Derde Structuurschema Elektriciteitsvoorziening (SEV III) | Tweede Kamer der Staten-Generaal
ii Motie van het lid Beckerman c.s. over geen kerncentrale in Groningen | Tweede Kamer der Staten-Generaal
iii Kerncentrale bouwen: hoe gaat dat in zijn werk? | Autoriteit NVS
iv Stapsgewijs: procedure bestemmingsplan - Kenniscentrum InfoMil
v https://www.infomil.nl/onderwerpen/ruimte/ruimtelijke/wet-ruimtelijke/bestemmingsplan/procedure/bestemmingsplan-mer/stapsgewijs/
vi Rijkscoördinatieregeling (RCR) (rvo.nl)

Figuur V.9 Overzicht MER procedure en wijziging inpassingsplan binnen de Rijkscoördinatieregeling




## V.5.2 STAKEHOLDER MANAGEMENT

**Stakeholder management is een belangrijk aspect om aandacht aan te besteden tijdens de procedure van het wijzigen van het inpassingsplan, alsook ervoor en erna. Van initiatiefnemers van een nieuwe kerncentrale wordt geacht dat zij zorg dragen voor een adequate en transparante opzet, inhoud en uitwerking van de communicatie van het project, zodat het project voor een breed publiek begrijpelijk en toegankelijk is.**

Stakeholders zijn verschillende partijen die te maken hebben met het project, in het geval van de bouw van een nieuwe kerncentrale zijn stakeholders bijvoorbeeld het publiek, ministeries van I&W en EZK, ANVS, de COVRA, netbeheerders, onderzoeksinstanties (URENCO, NRG, RID).

Wat betreft de verschillende rollen van de ministeries en de ANVS, is de ANVS de vergunningsbeoordelaar en vergunningsverlener in het kader van de Kernenergiewet en toezichthouder van nucleaire installaties. De Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat is verantwoordelijk voor het beleidsmatige en wettelijke kader voor nucleaire veiligheid en stralingsbescherming. Het ministerie van EZK is verantwoordelijk voor de beslissing of kernenergie onderdeel uitmaakt van de energiemix in Nederland.

- De COVRA is de organisatie die is aangewezen voor de verwerking en beheer voor radioactief afval in Nederland en is gesitueerd in Zeeland. De COVRA heeft een fonds in beheer welke bijdraagt aan onderzoeken naar de duurzame verwerking en opslag van nucleair afval.
- Netbeheerders zijn belangrijke stakeholders omdat deze een netaansluiting mogelijk kunnen maken.
- URENCO is het Nederlandse uranium verrijkingsbedrijf. Zij spelen een essentiële rol in de wereldwijde verrijking van nucleaire brandstoffen.
- NRG is een onderzoeksinstantie welke onderzoek uitvoert naar gezondheid en klimaat neutrale energie en de ontwikkeling van nucleaire medicijnen. NRG onderzoekt en adviseert over veilige kernenergie voor bestaande kerncentrales en nieuwe concepten zoals een thoriumreactor. Zij is deskundig op het gebied van radioactiviteit en straling.
- RID (Reactor Instituut Delft) is het kenniscentrum voor straling.
- Publiek – Een onderzoek naar de maatschappelijke perceptie van kernenergie in 2009 laat zien dat kernenergie een weerbarstig onderwerp is voor de Nederlandse bevolking. Kernenergie wordt gezien als gevaarlijk, maar ook als noodzakelijk. De perceptie is dat het een noodzakelijk kwaad is wat hopelijk een tijdelijk karakter heeft. Er is geen eenduidige perceptie in Nederland wat betreft kernenergie. Het is belangrijk om de angsten en zorgen van de bevolking en feiten en cijfers over kernenergie met elkaar te verbinden en aandacht aan te besteden. Een goede informatievoorziening en uitleg van de kansen, risico's en gevaren van kernenergie is noodzakelijk om een duidelijk beeld te geven van kernenergie in Limburg. Ook zal deze informatie gemakkelijk te verkrijgen moeten zijn door middel van een website bijvoorbeeld.

De zorgen van de burgers hebben te maken met het radioactief afval en de opslag hiervan en de veiligheid van de kerncentrale(s). Het wordt aangeraden om de informatievoorziening door middel van onafhankelijke instanties te laten verlopen. Kernenergie wordt gezien als een overbruggingstechnologie op weg naar een duurzame energiehuishouding.

Dit onderzoek is afgenomen in 2009, het wordt aangeraden om een nieuw onderzoek te starten wat de perceptie nu is en of er veranderingen hebben plaatsgevonden ten opzichte van de perceptie van kernenergie. In de EU bijvoorbeeld wordt kernenergie als duurzaam beschouwd onder bepaalde voorwaarden (zie EU-Taxonomie, sectie III.5).

## V.6 REFERENTIES


1. ANVS. Vergunningenbeleid ANVS 2019. Den Haag : s.n., 2019.
2. OECD, NEA. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities NEA 7560. 2021.
3. ANVS, Autoriteit voor Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming -. Veiligheidsrichtlijnen - Richtlijnen voor het veilige ontwerp en de werking van kernreactoren. 2015.
4. Minister van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie. Regeling van de Minister van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie van 7 december 2010, nr. WJZ/10183066 houdende regels voor de beveiligingbeveiliging van nucleaire installaties en nucleair materiaal (Nuclear Facilities and Nuclear Materials (SecuritySecurit. 2013.
5. IAEA. Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors TECDOC-1972 2021. 2021.
6. —. Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors IAEA-TECDOC-1915 2020. 2020.
7. —. Nuclear Energy Series Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment No. NR T 1.18 2021. 2021.
8. —. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition.
9. WENRA. Applicability of the Safety Objectives to SMRs. January 2021.
10. IAEA_MAFA-NSNS_Kristof_Horvath_Tariq_Majeed. Nuclear Security Practical Solutions in Design. Technical Meeting on Safety, Security and Safeguards by Design for SMRs, 1 –3 June 2022, Vienna.
11. GIF, Proliferation Resistance and Physical Protection Group. Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems Revision 6. September 2011.

# VI. SMR Roadmap

De vorige hoofdstukken hebben het kader beschreven omtrent de energie-behoeften (hoofdstuk II), de mogelijkheden alsook uitdagingen voor kernenergie (hoofdstuk III), de specifieke (Mini-)SMR opties welke te beschouwen zijn (hoofdstuk IV) en de planologische, geo-technische randvoorwaarden en vergunnings-aspecten voor kerncentrales en meer bepaald (Mini-)SMRs in Nederland (hoofdstuk V). De Addenda voegen hierbij meer specifieke informatie toe om het geheel te documenteren.

Aldus blijft de vraag 'En wat nu voor de Provincie Limburg en de opties voor kernenergie welke een toegevoegde waarde kunnen leveren aan de toekomstige duurzame energiemix?'.

Vooreerst de conclusies uit vorige hoofdstukken:

1. Nederland en de Provincie Limburg hebben, net zoals veel andere landen en regio's, de uitdaging om de energie-transitie naar een meer duurzame energie-voorziening zo snel mogelijk en effectief te laten geschieden. De recente geo-politieke context schetst bovendien een toekomst beeld met een toenemende vraag naar onafhankelijkheid van kritische materialen in de energie-infrastructuur (heden gas ... morgen zeldzame aardmetalen gebruikt door hernieuwbare energie ?) naast uiteraard de noodzaak om de gehele energie-voorziening duurzaam en betaalbaar te houden. De socio-economische alsook de ecologische consequenties van een tekortkomingen op zowel betaalbaarheid als duurzaamheid zijn namelijk immens;
2. Nederland en de Provincie Limburg hebben in deze context beduidende nood aan regelbaar vermogen teneinde de excessen qua een te snelle en te uitgebreide uitbouw van intermitterende hernieuwbare energie-bronnen te mitigeren. Gezien de doelstellingen van zowel duurzaamheid als betaalbaarheid zijn kolen- en gasgestookte elektriciteitscentrales vrijwel uitgesloten als structureel antwoord aan dergelijke vraag naar regelbaar vermogen. De capaciteit aan waterkracht is reeds grotendeels uitgeput in Nederland en biomassa voor laagwaardige toepassing door verbranding wordt niet als optie beschouwd. Tevens wordt elektriciteitsopslag, althans met de vermogens- en energiecapaciteit op dagen/weken-schaal nog niet haalbaar geacht en zijn de voor de hand liggende opslagcapaciteiten via waterbekkens niet in voldoende mate ter beschikking. Waar er transmissiecapaciteit is met naburige landen blijft evenwel de vraag of de Europese elektriciteitsmarkt tijdens de komende decennia effectief als betrouwbare 'bron' kan worden beschouwd naar Nederland en specifiek de Provincie Limburg toe;
3. De Nederlandse overheid beschouwt kernenergie wederom als waardevolle optie en voorziet naast de bedrijfsduurverlenging van Borssele tevens de realisatie van twee grote kerncentrales. Naar verwachting zouden dergelijke grote kerncentrales, van het LWR-type, medio de jaren 2030 realiseerbaar kunnen zijn;
4. Verschillende energiemarkt-scenario studies hebben tevens uitgewezen dat kernenergie een aantrekkelijke optie is om effectief en kosten-efficiënt een energie-transitie naar een meer duurzame energie-voorziening te garanderen. Voor alle duurzaamheids-criteria vertaalt via een levenscyclus-analyse scoort kernenergie bij de beste opties en recente studies tonen tevens aan dat een integratie van kernenergie in een energiemix een lage, zoniet laagste, kost en financieel risico betekent voor een duurzame energiemix;
5. Evenwel dient kernenergie uiteraard te blijven voldoen aan de strengste veiligheids-verwachtingen en tevens een performantere realisatie van nieuwbouw projecten te garanderen, naast tevens continue excellentie in uitbating en in beheer van splijtstof en radioactief afval. Indien kernenergie inderdaad een belangrijke of zelfs essentieel onderdeel dient te zijn van een duurzame energiemix, dient kernenergie de verschillende uitdagingen (zie hoofdstuk III) ter harte te nemen. Eén daarvan is tevens een aanbod te brengen van energiemarkt-aangepaste kerncentrales, welke aan diverse energie-behoeften kunnen voldoen en in diverse energie-markten op een performante manier als meest effectieve en efficiënte optie kunnen worden beschouwd en aldus ook uitgebaat worden;
6. Kleine modulaire reactoren (SMRs) zijn hierbij een mogelijk antwoord en deze worden heden door verschillende partijen ontwikkeld en/of onderzocht. Naast de LWR-technologie SMRs welke als eerste realiseerbaar zijn, is er ook veel interesse voor meer geavanceerde kerncentrales, zogenoemd Advanced Modular Reactors (AMRs), welke een langere ontwikkeltijd kennen doch, op termijn, mogelijkerwijs een nog hoger performantievermogen kunnen etaleren, zowel in de energie-markt alswel in de intra-nucleaire markt van circulaire economie van splijtstoffen en minimalisatie van radioactief afval;
7. De tijdslijn voor ontwikkeling en finale industriële maturiteit van dergelijke SMRs projecteert dat deze SMRs op basis van bekende LWR-technologie een optie zijn voor de Provincie Limburg naar 2030 toe en zeker tijdens de periode 2030-2035. Twee belangrijke LWR-technologie type opties dienen hierbij verkozen, i.e.:
    - Mini-SMRs met een indicatief eenheidsvermogen van zo'n 20-50 MWe kunnen naar 2030 een optie aanbieden;
    - SMRs met eenheidsvermogen in het bereik van zo'n 200 - 300 MWe dienen eerder naar 2035 geprojecteerd te worden als haalbare optie voor Provincie Limburg;

8. Er zijn geen harde geotechnische randvoorwaarden welke de implementatie van dergelijke Mini-SMRs en/of SMRs in Provincie Limburg belemmeren. Tevens is het vergunningstraject compatibel met een dergelijke tijdslijn naar de periode 2030-2035 toe;
9. Zowel Mini-SMRs als SMRs kunnen regelbaar vermogen aanleveren en zijn flexibel:
    - zowel elektriciteit als warmte toeleveren aan een verscheidenheid aan gebruikers in gebouwde omgeving en industrie;
    - als tevens warmte toeleveren, zowel voor proces-warmte als warmtenetten.

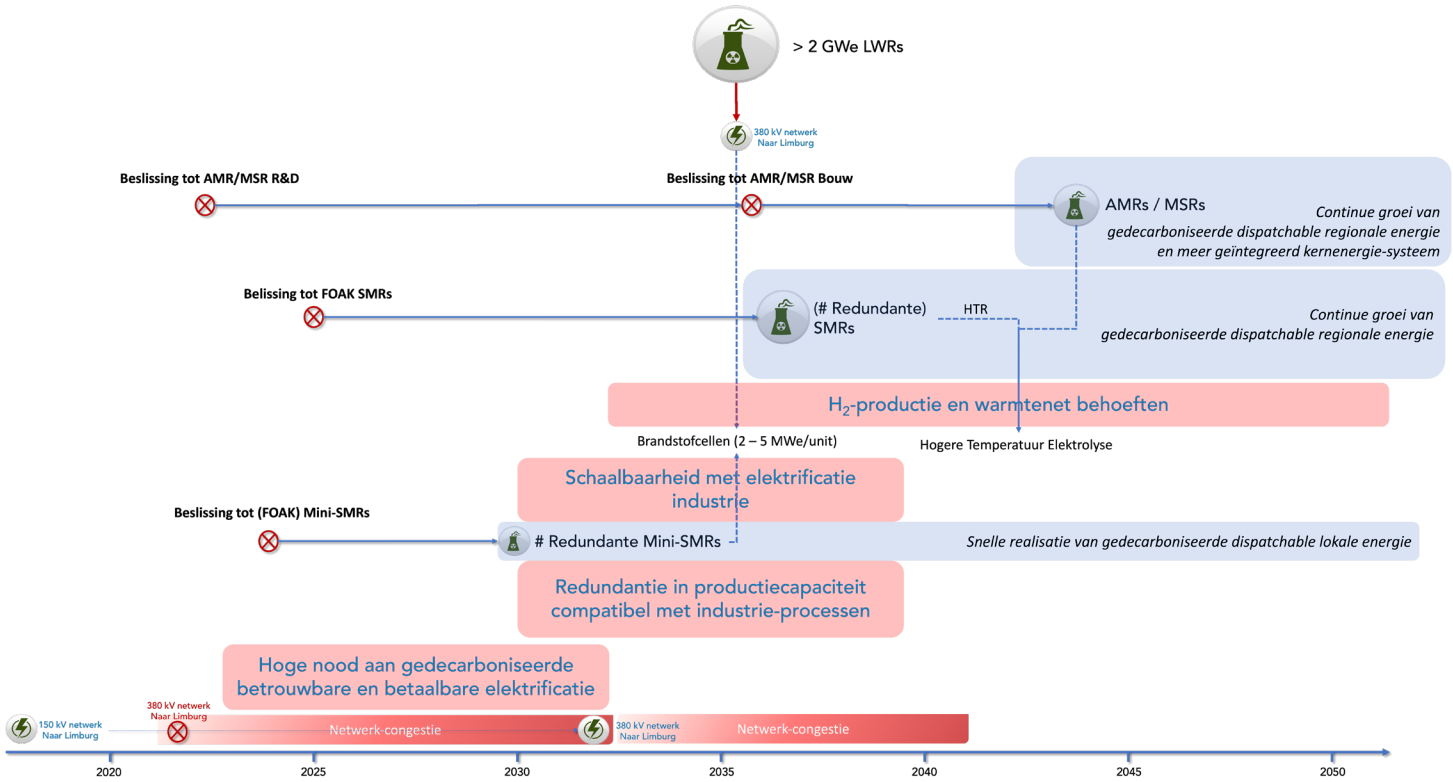
    Hun kleinere benodigde land-oppervlakte en kleinere exclusie-zone laten tevens hun implementatie toe dichter bij energie-verbruikers en tevens op meerdere locaties;
10. De keuze voor Mini-SMR en/of SMR wordt in eerste instantie bepaald door de 'urgentie' welke de Provincie Limburg toebedeelt aan de dringeden vraag naar regelbaar vermogen, i.e.:
    - Mini-SMRs kunnen gegarandeerd worden vanaf 2030 waarbij onder ideale omstandigheden (zie verder) enkele jaren zouden kunnen worden gewonnen;
    - SMRs dienen eerder vanaf 2035 te worden gezien als mature optie doch, wederom, met eventuele winst van enkele jaren indien de omstandigheden dit bewerkstelligen.

De tijdslijn welke in deze samenvatting van de vorige hoofdstukken wordt voorgesteld is wat ons als experten-team betreft, als haalbaar te bestempelen, doch een snellere, maar ook tragere realisatie kan zich aanbieden en dit wordt voornamelijk bepaald door de belangrijkste volgende factoren:

- Vooreerst is er de factor 'urgentie' voor de Nederlandse overheid en die van de Provincie Limburg overheid om de energie-transitie te versterken in de huidige geo-politieke alswel dringende ecologische context. Met betrekking tot de optie kernenergie vertaalt zich dit in de noodzaak om:
    - in eerste instantie de bedrijfsduurverlenging van de Borssele kerncentrale te faciliteren;
    - ten tweede de publiek-private context voor nieuwbouw van kerncentrales, groot en klein, te bekrachtigen door een initiatief-nemende rol in te vullen;
    - ten derde, en dit is structureel op lange termijn, om het nucleaire ecosysteem, reeds aanwezig in Nederland, te versterken en een sterk nieuwe nucleair programma uit te tekenen voor een versterkte kennis-creatie, kennistransfer en kennis-opbouw in alle domeinen welke de realisatie van meerdere kerncentrales in de nabije alswel langere toekomst in Nederland behoeft. Hierbij hebben alle stakeholders, en zeker de Nederlandse industrie, een specifieke rol om een nieuw "Neratoom 2.0" te overwegen waarbij "Nucleair Nederland BV" een performante en maatschappelijke verantwoorde kernenergie-capaciteit garandeert doch ook toegevoegde waarde voor Nederland creëert via de toeleveringsketen, zowel in Europa als internationaal.
- Gerelateerd aan deze 'urgentie' is er tevens een gelijkaardige 'urgentie' in tal van landen in Europa, waaronder zeker de Oost-Europese landen welke nog meer dienen te decarboniseren en onafhankelijk te worden van (import van) fossiele brandstof. Deze landen bekijken tevens de opties voor (Mini-)SMRs en vele, voornamelijk Amerikaanse, (Mini-)SMR-ontwikkelaars zien de Europese markt als win-gebied, ondersteund door de Amerikaanse overheid als onderdeel van een geo-politieke strategie. Naast de nodige kant-bemerkingen of dit een ideale situatie is voor o.a. Nederland, brengt deze situatie tevens kansen mee aangezien een toenemende competitie tussen deze ontwikkelaars resulteert in een 'buyers-markt' voor dergelijke (Mini-) SMRs. Alle ontwikkelaars zijn immers op zoek naar een FOAK-realisatie van hun ontwerp naast tevens geheel open naar een lokalisatie van hun toeleveringsketen en dus hoogwaardige werkgelegenheid in deze markten welke dergelijke (Mini-)SMRs realiseren;
- De mogelijk aanzienlijk toenemende vraag naar SMRs vanaf de jaren 2030 zal belemmerd worden door de beperkte capaciteit in de toeleveringsketen van kritische componenten. Aldus kan een situatie ontstaan van 'first come, first served' met tevens een mogelijkheid tot strategische positionering voor de Nederlandse industrie in een dergelijke toeleveringsketen (cfr. voorheen gemelde "Neratoom 2.0");
- De verzekerde oplevering van de 380 kV HS-lijn en waterstofnet naar Provincie Limburg, alhoewel van cruciaal belang, kan tevens bijkomende onzekerheid brengen naar concrete tijdslijn, naast nog de blijvende behoefte aan verdere uitbouw, in het geval van onvoldoende (regionaal) regelbaar vermogen en toenemende transmissie-noden (en kosten) vanwege intermitterende hernieuwbare energiebronnen;
- En uiteraard is er de zeer belangrijke socio-economische doelstelling om hoogwaardige industriële sectoren en clusters in Nederland en de Provincie Limburg te behouden en te versterken in een wereldmarkt waar de beschikbaarheid van veilige, duurzame, verzekerde en betaalbare energie cruciaal is.

Figuur VI.1 herhaalt deze omgevings-context waar de verschillende verwachte ontwikkelingen in de Nederlandse en Provincie Limburg energie-omgeving worden geschetst en waar terug de tijdslijn voor kernenergie als optie naar 2030 en zeker tijdens de periode 2030-2035 naar voren treedt.

Figuur VI.1 Energie-markt omgeving voor Provincie Limburg




Deze verschillende aspecten kunnen dus zowel tot versnelde realisatie leiden alswel een vertragend effect hebben op de voorheen gemelde tijdslijn naar 2030-2035 toe.

Evenwel zijn bepaalde activiteiten op de tijdslijn naar 2030-2035 beperkt comprimeerbaar of te versnellen in uitvoering, e.g.:

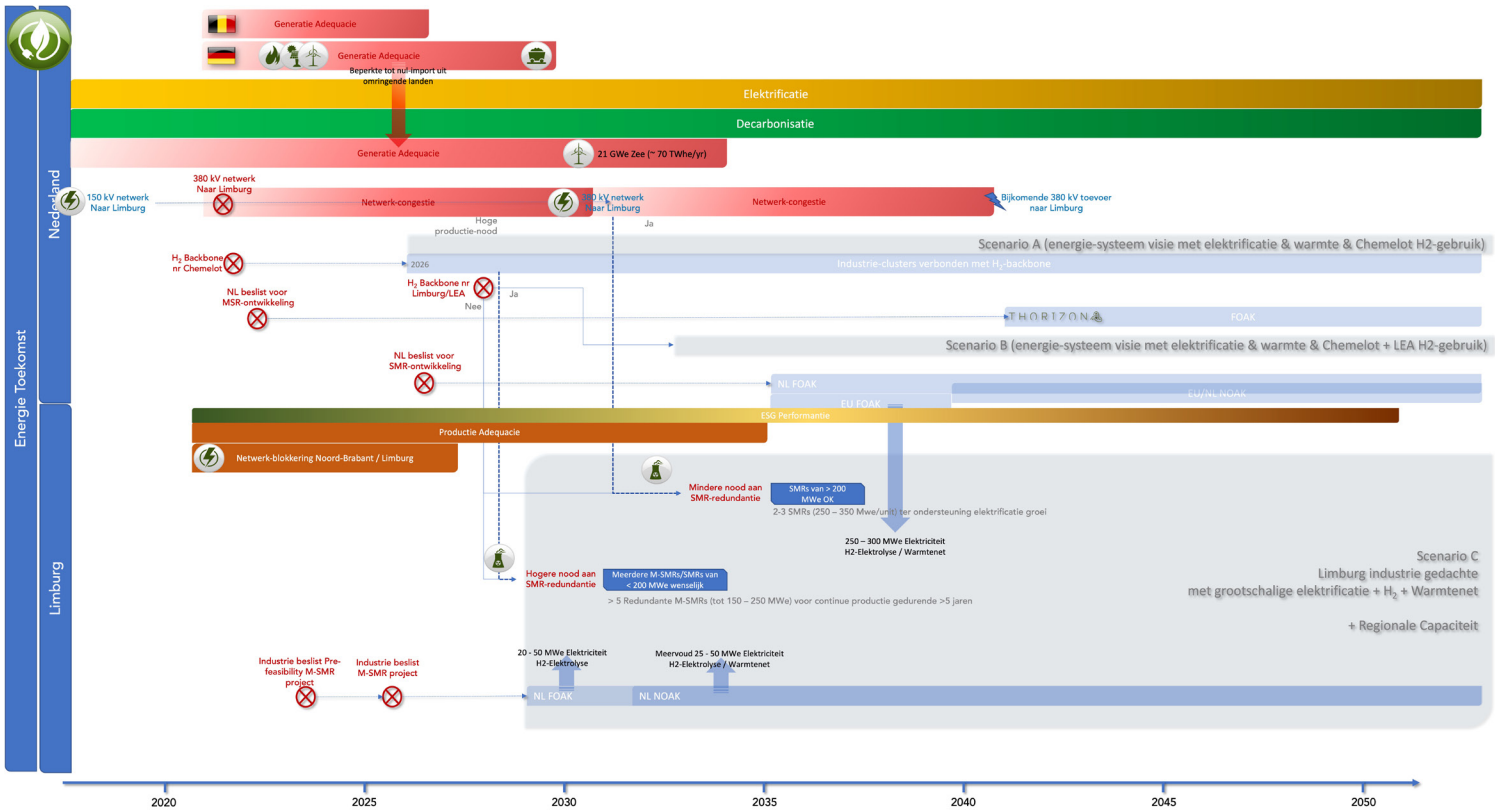
- vooreerst dient een socio-maatschappelijk overleg plaats te vinden om de keuze voor kernenergie te laten dragen door de verschillende stakeholders. Dit houdt een SEA/MER-proces in, waarbij zowel de studies als het overleg een minimale tijdsperiode vergen;
- de technologische kwalificatie van (Mini ) SMRs vergt tevens een tijdspanne van mogelijk enkele jaren, zeker indien dit specifieke R&D-activiteiten vergt. Heel bepalend is de noodzaak van bevestigende kwalificatie bestralingen van materialen en/of splijtstof in onderzoeksreactoren, zoals HFR te Petten. Gezien het beperkte aantal van dergelijke onderzoeksreactoren, alsook de noodzakelijke tijd voor het ontwerp van een bestralingsfaciliteit of test, alsook de vergunning daarvan, dienen we reeds enkele jaren (extra) hiervoor in de planning in te calculeren;
- de toeleveringsindustrie dient gekwalificeerd en gecertifieerd te worden om nucleair-kritische componenten te kunnen en mogen afleveren. Ook dit vergt enige tijd, doch een internationale markt is ter beschikking, eventueel ten nadele van een Nederlandse positionering in dergelijke activiteiten;
- naast nog de nood om het vergunnings'-vooroverleg te houden met eventueel bijkomende onderzoeksactiviteiten en/of experimentele verificaties/demonstraties, alvorens een vergunningsdossier in te kunnen dienen;
- in parallel, of eerder vooraf, dient tevens een investeerbaar project te worden gedefinieerd, waarbij dus de tijdslijn door verschillende stakeholders wordt bepaald en, in publiek-private initiatieven, tevens het noodzakelijke wetgevend kader;
- en uiteraard onder voorwaarde van een aanpassing aan de Kernenergiewet, wat heden voorzien is naar eind 2023 toe;
- en finaal ook de attractiviteit van de Nederlandse energie-markt voor (Mini ) SMR-ontwikkelaars, aangezien er mogelijkerwijs een internationale competitie tussen landen zou kunnen ontstaan, zeker naar vroege realisatiedata toe.

Verschillende (Mini-)SMR ontwikkelaars stellen tijdslijnen vanaf ongeveer 2026 tot 2030 voor ter realisatie van hun eerste (Mini-)SMRs, doch dergelijke tijdsplanning dient in bovenstaande context kritisch te worden geanalyseerd. Inderdaad, indien alle randvoorwaarden en intenties geheel gealigneerd en gunstig verlopen, zouden voor Mini-SMRs bijna twee (2) jaar van de voorziene 2030 kunnen worden ingekort en vergelijkbaar wat SMRs betreft, i.e. eerder 2033-2034 dan 2035.

De reeds voorheen vermelde SMR-Roadmap, herhaald in figuur VI.2, hint naar een beslissings-patroon gestructureerd volgens volgende belangrijke vragen en keuzes:

1. Onderschrijft de Nederlandse Rijksoverheid, alsook de Provincie Limburg op complementair niveau, de wens naar kernenergie in de duurzame energiemix en de vertaling van deze wens in een versterkt en versterkend nucleair programma?
    - Indien dit het geval is, kan dit de basis vormen om het nucleair programma geschaald en gefaseerd te baseren op:
        - in eerste instantie LWR-technologie gebaseerde Mini-SMRs om de dringendste noden naar 2030 te behartigen alsook met beperkt risico alsook investeringsrisico, de toeleveringsketen voor dergelijke LWR Mini-SMRs en nadien SMRs uit te bouwen en internationaal te positioneren;
        - Dit levert ook onderhandelings-kracht naar de Mini-SMR en later SMR-ontwikkelaars toe met tevens, indien voldoende tijdig (i.e. vanaf 2024), een Europese, al dan niet internationale positionering voor Nederlandse bedrijven te ondersteunen;
        - Dit vergt aldus ook de analyse of Nederland een FOAK-project van Mini-SMR wenst te huisvesten ?;
        - Dit levert tevens de basis voor een SMR-programma in partnership met belangrijke SMR-ontwikkelaars en de mogelijkheid om business-interesses voor de Nederlandse bedrijven in de toeleveringsketen te valoriseren in dergelijke, vermoedelijk ruimere, markt in de toekomst. Tevens wordt hier nog meer een transitie gemaakt naar meer geïntegreerde energie-systemen met dus waterstof-productie en proces/rest-warmte valorisatie zoals tevens in Provincie Limburg gewenst;
    - Een dergelijk nucleaire programma omvat het benodigde ecosysteem en zeker een coördinerende rol door en met de Nederlandse industrie en met de overheid/overheden naar wat een nieuwe “Neratoom 2.0” kan worden, i.e. een gestructureerde business-aanpak naar een pragmatisch doch strategisch geschoeide business-ontwikkeling van “Nuclear Nederland BV”;
        - De in onderstaande roadmap vermeldingen van “Industrie beslist Pre-haalbaarheidsstudie Mini-SMR project” alsook “Industrie beslist Mini-SMR project” zijn de basis-vragen welke zich vanaf 2023 opwerpen en welke essentieel onderdeel uitmaken van een pre-haalbaarheidsstudie of “Phase 0” studie (zie tevens figuur I.3 en herhaald in figuur VI.3) welke maximaal één jaar dient te duren (zie uitleg omtrent gefaseerde programma aanpak in tekstvak op volgende pagina’s);
        - Het is onze mening dat een beslissing omtrent een Mini-SMR implementatie door de Provincie Limburg en gerelateerde stakeholders mogelijk is qua business-optie, uiteraard in direct overleg en complementariteit met de Rijksoverheid;

Figuur VI.2 Energie-markt omgeving voor Provincie Limburg



2. De tweede structurerende beslissing betreft de tijdsperiode rond 2035, waar er mogelijk zowel complementariteit alswel competitie optreedt tussen grote kerncentrales en meerdere SMRs, welke op meer gedecentraliseerde wijze tevens proces/rest-warmte valorisatie aanbrengen;
    - zoals eerder gemeld zouden SMRs, in ideale condities en eventueel gebaseerd op een FOAK-positie door Nederland, vanaf 2032-2033 te realiseren zijn wat tamelijk moeilijk te garanderen is met grote kerncentrales. Evenwel hebben zij beiden hun plaats en mogelijkheden in een toekomstige duurzame energiemix in Nederland doch capaciteits-beperkingen in financiering en toeleveringsketen en technische/technologische expertise-basis kunnen resulteren in additionele programmatorische risico's voor gelijklopende projecten rond de periode van 2035;
    - Onder andere de Energiescenarios Kernenergie studie door Rijksoverheid EZK kan hier reeds elementen aanbrengen alsook dient een scenario-studie omtrent deze specifieke complementariteit/competitie tijdens "Phase 0" activiteiten worden ondernomen. Dit met oog op een analyse van de strategische keuzes voor en in het nucleair programma op basis van overleg met alle stakeholders;
3. Naast de hiervoor reeds vermelde 'urgentie' mede bepaald door de verwachte alsook reële beschikbaarheid van de 380 kV HS-lijn naar de Provincie Limburg, zijn de voornaamste industrie energie-behoeften tevens getypeerd door een vraag naar een continue belevering gezien sommige kritische industriële processen, ook na elektrificatie, een dergelijk continue energie-aanbod dient gegarandeerd te zijn. Meerdere Mini-SMRs en op langere termijn SMRs kunnen dergelijke redundantie aanbrengen. Deze studie heeft niet een technische-economische risico-analyse uitgevoerd, doch dit is zeker een te ondernemen actie in de pre-haalbaarheids-studie "Phase 0", welke het geheel aan energie-aanbod en vraag vanuit een risico-analyse dient te evalueren, teneinde de waarde te bepalen van een eerste Mini-SMR uitrol t.o.v. een enige latere SMR-uitrol evenwel in een grotere energie-vraag context;
4. De bedrijfsduurverlenging van Borssele en de nieuwbouw van grote alswel kleinere, op LWR-technologie gebaseerde, kerncentrales bouwt verder op de kennis en ervaring in Nederland welke enkel verder kan versterkt kan worden via een nucleair programma. Tevens ondersteunt dit de vervolgstappen naar AMRs, bijvoorbeeld gesmolten zout reactoren zoals THORIZON, welke tevens een bijkomende functie van splijtstofcyclus en radioactief afval beheer optimaliseren naast een bijkomend energie-aanbod welke mogelijkerwijs nog meer compatibel is met de latere energie-behoeften. Realisatie van dergelijke MSRs, als demo mogelijkerwijs vanaf de periode 2035-2040, als matuur industriële optie dient na 2040 geschetst. Aldus kan een dergelijk nucleair programma over de komende decennia tevens de performantie van de splijtstofcyclus en radioactief afval beheer in Nederland bestendigen en verder optimaliseren, waarbij tevens een continuïteit voor de activiteiten van COVRA bevestigd wordt;
5. In parallel aan dit nucleair programma en tevens noodzakelijk voor dit nucleair programma dienen de opties naar proces en restwarmte valorisatie voor waterstof-productie, synthetische brandstoffen en warmtenetten uitgebouwd en hoerbij zijn verschillende Nederlandse bedrijven reeds internationale koplopers. Het nucleair programma dient dan ook rond 2035 de demonstratie van dergelijke geïntegreerde energie-systemen met kernenergie-bron als voornaam doel voorop te stellen teneinde de evoluerende rol voor kernenergie vanaf midden de jaren 2030 in een duurzame energiemix te demonstreren en te valideren;
6. Tot slot, nogmaals via "Neratoom 2.0" dient een risico-mitigerend actieplan naar performante nieuwbouw alswel uitbating en geassocieerde splijtstofcyclus en radioactief afval beheer verzekerd te worden door alle stakeholders.

Het voorgaande pretendeert geenszins dat de aanzet voor dergelijke keuzes en beslissingen reeds genomen is en dat dit aannames zijn voor deze studie. Het voorgaande wenst enkel te kaderen in welke context een uitrol van kernenergie voorstellen gegarandeerd kunnen worden. Deze uitrol vergt immers een langere termijn visie en een langere termijn uitbating.

# VI.1 ANTWOORDEN OP HOOFD EN DEELVRAGEN

## TECHNISCHE (ON)MOGELIJKHEDEN VAN SMRS OP LIMBURGS GRONDGEBIED?

### Welke praktische en fysieke beperkingen dan wel mogelijkheden kent de Provincie Limburg die bij voorbaat leiden tot het ondersteunen van één spécifiek SMR-ontwerp?

- De studie concludeert dat energie-behoeften in Provincie Limburg vanaf 2030-2035 zouden kunnen worden beantwoord met licht-water gekoelde (LWR) SMRs.
- Er zijn heden geen praktische en/of fysieke beperkingen, welke het gebruik van dergelijke LWR SMRs in de Provincie Limburg uitsluiten.
- Er zijn wel verschillen in de mogelijkheden en wensen qua plaatsing met betrekking tot de energie-behoeften en de beschikbare koelcapaciteit.

### In hoeverre is het technisch haalbaar dat SMR-ontwerpen, naast basislast elektriciteitsproductie, kunnen worden ingezet voor flexibel regelbaar vermogen, productie van waterstof en andere (energetische) toepassingen?

- De energie-intensieve industrie heeft in eerste instantie behoeften uitgedrukt naar elektrificatie van hun processen.
- Daarnaast zijn warmtenetten een interessante mogelijkheid, waar hogere-temperatuur proces-warmte op dit moment echter niet als kritisch wordt gezien.
- De beschouwde LWR SMRs kunnen allen deze energie-behoeften flexibel beleveren
- Op langere termijn, waarbij hogere temperatuur processen van interesse zouden zijn, kunnen meer geavanceerde SMRs (HTGRS, MSRs) worden ingezet.

### Wat zijn voor Limburg, mede gelet op de uitdagingen qua netcongestie en het benodigde flexibele vermogen tussen 2030-2050, de meest logische varianten voor het aantal te plaatsen SMRs? Met andere woorden wat past op realistische wijze op Limburgse schaal?

- Energie-intensieve industrie vraagt om een betrouwbare en redundante energie-belevering, compatibel met het uitbatings-regime van hun processen (tijdsschaal 6-7 jaar). Dit kan door meerdere SMRs worden verwezenlijkt, waarbij de beschikbaarheid van een 380 kV HS-aansluiting bijkomende redundantie kan verzekeren.
- Het aantal te plaatsen SMRs hangt af van de integratie met voornamelijk deze industriële noden en met de keuze tussen Mini-SMR (20 – 50 MWe) of SMR (200 -300 MWe).
- Er zijn geen directe geo-technische beperkingen qua inplanting van (Mini-)SMRs.

### Welke SMR-ontwerpen hebben de gunstigste randvoorwaarden vanuit het vergunningsperspectief?

- Zolang het gekozen SMR-ontwerp zich baseert op beschikbare kennis en ervaring vanuit bestaande reactor-ontwerpen, is er geen significant onderscheide qua vergunningsperspectief.
- Aldus is er een voorkeur voor LWR SMRs, waarbij vanuit vergunningsperspectief tevens geen kritisch onderscheid gemaakt wordt tussen FOAK of NOAK en waarbij dit essentieel als een project-risico wordt beschouwd.

## WAT OMTRENT DE VOLGENDE STAPPEN INDIEN BESLOTEN OM DE OPTIE KERNENERGIE VERDER TE ANALYSEREN?

Deze studie behandelde slechts enkele van de infrastructuur-aspecten welke dienen te worden geadresseerd in een nucleair programma, zoals vervat in de methodologische aanpak voorgesteld door IAEA, i.e. een 'Milestones Approach' welke gewag maakt van Phase I tot en met Phase III waarbij indeze laatste fase daadwerkelijk de nieuwbouw kerncentrales worden gerealiseerd.

Onze ervaring raadt een bijkomende "Phase 0" of pre-haalbaarheisstudie aan welke volgende doelen behartigd:

- het behandelen van alle infrastructuur-aspecten (zie figuur VI.3);
- het betrekken van de verschillende stakeholders en zeker de socio-maatschappelijke actoren;
- het in kaart brengen van de verschillende opties en identificeren van mogelijke scenarios met alswel zonder kernenergie als voorloper van een meer gedetailleerde SEA/MER in Phase I;
- een risico-analyse alsook detaillering van het beslissingsproces in Phase I tot Phase III;
- en resulterend in een detail-plan van kosten/baten en plan van aanpak

Een dergelijke Phase 0 leidt tot een beleidsinformerend rapport, welke de stakeholders, op basis van een strategische alignatie van deze stakeholders, toelaat een beslissing te nemen of de noodzakelijke pre-project activiteiten (o.a. SEA/MER, ...) kunnen worden aangepakt en tevens wordt een markt-consultatie uitgevoerd met het oog op de bepaling van de contractuele context voor nieuwbouw kerncentrale(s).

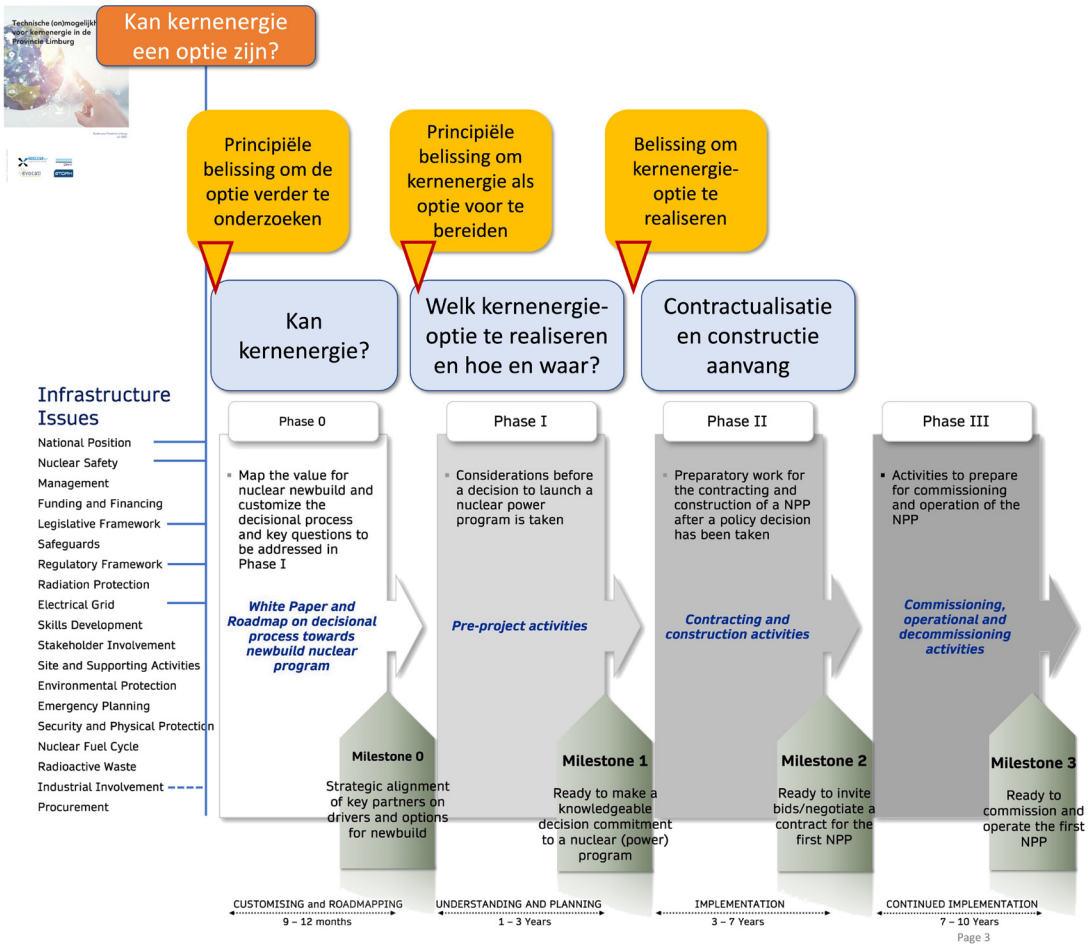
De Phase I onderneemt deze pre-project activiteiten met als belangrijkste doel om een geheel geïnformeerde beleidsbasis aan te bieden, welke dan toelaat tevens de (politieke) beslissing te nemen om het nucleaire programma in realiteit om te zetten en vervolgens de voorbereidende stappen naar het tendering-proces voor een nieuwbouw kerncentrale op te starten.

Eens deze (politieke) politieke beslissing is genomen, worden in Phase II de contractuele onderhandelingen opgestart en voorbereidende activiteiten naar nieuwbouw uitgevoerd, wat op het einde leidt tot een formeel tendering-proces, waarna Phase III het geheel van activiteiten naar vergunning, bouw en oplevering van de kerncentrale omvat.

Gezien de kennis-basis en ervaring in Nederland kan een Phase 0 uitgewerkt worden in ca. 9 maanden, met een Phase I gedurende één à anderhalf jaar en daarna Phase II in 2-4 jaar, resulterend in een basis tot besluit omtrent Mini-SMR en/of SMR bouw omstreeks 2026 - 2028.

i IAEA "Milestones Approach"

Figuur VI.3 Gefaseerde "Milestones Approach" aangeraden door IAEA met voorgestelde bijkomende "Phase 0"



# Lijst van Afkortingen en Begrippen

| Symbool / Afkorting | Betekenis / Omschrijving |
|---|---|
| ADS | Accelerator Driven System. Versneller aangedreven subkritieke kernreactor. |
| AFNORTH | De NAVO/NATO Allied Forces North Europa |
| aFRR | automatic Frequency Restoration Reserve. Een van de middelen voor het bewaren van de netstabiliteit |
| Am | Americium (element) |
| AMR | Advanced Modular Reactor. Geavanceerde modulaire reactoren, meestal met een "snel" neutronenspectrum en andere koelmiddelen dan (licht) water, bijvoorbeeld natrium, lood, helium of gesmolten zout. |
| ANVS | Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming |
| Burnable poison | Zogenoemd "slijtend gif". Dit is een sterk neutronenabsorberend materiaal, die in een kernreactor kan worden toegepast om bijvoorbeeld een langere cycluslengte te verkrijgen. Door neutronenvangst worden slijtend gif-atomen omgezet in atomen die (vrijwel) geen neutronen absorberen. Het opraken van brandstof ¬ waarmee energie wordt geproduceerd wordt hiermee enigszins gecompenseerd. |
| BWR | Boiling Water Reactor. Kokend water reactor. Type LWR, waarbij het primaire koelwater boven de kern (in de "schoorsteen") tot koken komt. Met de stoom van het primaire water wordt de turbine aangedreven. De BWR heeft dus geen aparte stoomgenerator zoals de PWR. Zie ook LWR en PWR |
| CANDU | CANada Deuterium Uranium. In Canada ontwikkelde reactor van het PHWR-type. Zie aldaar |
| CCS | Carbon Capture and Sequestration. $CO_2$-afvang en -opslag |
| CE | Centrum voor Energiebesparing, Delft |
| c-ERU | Compensated Enriched Reprocessed Uranium. De verrijking is iets hoger dan van "gewoon" UO2 splijtstof, om te compenseren voor extra neutronenabsorptie door, vooral, $^{236}U$. Zie ook ERU |
| CES | Cluster Energie Strategie, bijvoorbeeld van Chemelot |
| Cm | Curium (element) |
| CO2 | Kooldioxide, broeikasgas |
| COVRA | Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval, gevestigd te Nieuwdorp, Provincie Zeeland |
| CSP | Concentrated Solar Power |
| CV | Centrale Verwarming |
| DW | DistrictWarmte |
| EPR | European Pressurized Reactor. Europese drukwater reactor. Een van de twee types lichtwater reactoren (LWR). |
| EPR2 | Vervolg-serie van de EPR. Zie aldaar |
| ETS | Emission Trading System |

| | |
|---|---|
| EPRI | Electric Power Research Institute 5EPRI) |
| EPZ | Elektricteits Produktiemaatschappij Zuid-Nederland, eigenaar van kerncentrale in Borssele |
| ERU | Enriched Reprocessed Uranium, Herverrijkt Uranium uit uranium dat is verkregen uit de opwerking van gebruikte splijtstof |
| ETM | Energie Transitie Model van Quintel |
| EU | Europese Unie |
| EURATOM | Europese Gemeenschap voor Atoomenergie. Het betreffende verdrag is in werking getreden op 1 januari 1958 |
| EU-Taxonomie | VERORDENING (EU) 2020/852 VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 18 juni 2020 betreffende de totstandbrenging van een kader ter bevordering van duurzame beleggingen en tot wijziging van Verordening (EU) 2019/2088 |
| EV | Electric Vehicle. Electrische auto |
| EZK | Ministerie van Economische Zaken en Klimaat |
| F | Frequentie van vookomen (per jaar) |
| FNEF | Future Nuclear Enabling Fund |
| FOAK | First-Of-A-Kind. Eerste exemplaar (van een specifiek reactortype). Zie ook NOAK |
| FR | Fast Reactor. Kernreactor met "snel" neutronenspectrum, d.w.z. de neutronen in de reactor hebben gemiddeld een (veel) hogere kinetische energie dan in "thermische" kernreactoren, zoals de LWR en de HT(G)R. Zie aldaar |
| FTE | Full-Time Equivalent |
| GHG | GreenHouse Gas. Broeikasgas, o.a. $CO_2$. Zie aldaar |
| GIF | Generation IV International Forum |
| Gt | Gigaton. Zie Gton |
| Gton | Gigaton. 1 Gigaton = 1000 Megaton = 1000 Mton. Zie aldaa |
| GWe | Gigawatt electrisch vermogen. 1 GWe = 1 000 000 000 watt thermisch vermogen |
| GWh | Gigawattuur (eenheid van energie). 1GWh = 1 miljoen kWh = 3,6 PJ |
| GWhe | Gigawatt electrisch uur (eenheid van electrische energie). Zie ook GWh |
| H2 | Waterstof (gas) |
| ha | Hectare. 1 ha = 10 000 vierkante meter. |
| HABOG | Hoogradioactief Afval Behandelings- en OpslagGebouw van de COVRA. Zie aldaar |
| HALEU | High-Assay Low Enriched Uranium. Laagverrijkt uranium splijtstof met een verrijkingsgraad tussen 5,00 en 19,75% in $^{235}U$. Benodigd voor HTGR-type reactoren. Zie aldaar |
| HFR | Hoge Flux Reactor. Onderzoeksreactor voor isotopenproductie en materiaatestbestralingen in Petten |
| HS-lijn/-net(werk) | Hoogspanningslijn/-net(werk) |
| HT (warmte) | Hoge Temperatuur (warmte) |
| HT(G)R | High Temperature (Gas) Reactor. Hoge temperatuur (gasgekoelde) reactor. Kernreactortype met grafiet als moderator en helium als koelmiddel. Een specifiek gemeenschappelijk kenmerk van dit type reactoren is het gebruik van zgn. TRISO brandstof. Zie aldaar |
| HTTR | High-Temperature Test Reactor. Kernreactor van het zgn. "Primatische" HTGR type (zie aldaar) in Oarai, Japan. Speciaal ontworpen voor het bereiken van hoge uitlaattemperaturen tot 900 °C |

| | |
|---|---|
| IAEA | International Atomic Energy Agency. Internationaal Atoomenergie Agentschap, gevestigd in Wenen |
| IEA | International Energy Agency. Internationaal Energie Agentschap van de OESO in Parijs (OESO/IEA) |
| J | Joule (eenheid van energie) |
| KA | KlimaatAkkoord |
| KEV | Klimaat en Energie Verkenningen van het PBL. Zie aldaar |
| KPI | Key Performance Indicator |
| kV | Kilovolt. 1 kV =1000 Volt. |
| kV | Kilovolt. Voorbeeld: 380 kV HS-lijn = 380 000 volt hoogspanninglijn |
| kWh | Kilowattuur (eenheid van energie). 1 kWh = 3,6 miljoen J = 3,6 MJ. Zie ook voorvoegsel k |
| LEA | Limburgs Energie Akkoord |
| LEF | Limburgs Energie Fonds |
| LWR | Light Water Reactor. Kernreactor, waarbij (licht) water wordt gebruikt voor de afremming (moderatie) van neutronen en als koelmiddel van de kernbrandstof. |
| M€ | Miljoen euro |
| MAA | Maastricht-Aachen Airport |
| MER | Milieu Effect Rapportage |
| Minor Actinides (MA) | Verzameling van overige zware elementen (o.a. Np, Am en Cm) in kernbrandstof, naast de "Major" actiniden, zoals U en Pu |
| MOX | Mixed Oxide. Mengoxide brandstof, d.w.z. een mix van uranium- en plutoniumoxide als brandstof voor een kernreactor |
| mrd | Milljard |
| MSR | Molten Salt Reactor. Kernreactortype met koeling en/of brandstof in de vorm van gesmolten zout |
| mSv | Milli-Sievert. Eenheid van effectieve stralingsdosis |
| Mt | Megaton. Zie ook Mton |
| Mton | Megaton = miljoen ton = miljard kilogram. Zie voorvoegsel ook M |
| MWe | Megawatt electrisch vermogen. 1 MWe =1 000 000 watt electrisch vermogen. Zie ook voorvoegsel M |
| MWth | Megawatt thermisch vermogen. Zie ook voorvoegsel M |
| NAVO | Noord-Atlantische Verdrags Organisatie (= NATO) |
| NEA | Nuclear Energy Agency. Agentschap van de OSEO in Parijs (OESO/NEA) |
| NOAK | Nth-Of-A-Kind. N-de exemplaar (van een specifiek reactortype), wat wil zeggen dat er al (veel) ervaring verwerkt zit in de bouw en bedrijfsvoering (leercurve). Hier door is een NOAK goedkoper dan een FOAK (zie aldaar) |
| NOx | Diverse stikstofoxides ("stikstof") |
| Np | Neptunium (element) |
| NPV | Net Present Value. Huidige effectieve waarde |
| NRC | Nuclear Regulatory Commission (USA) |
| °C | Temperatuur in graden Celsius |

| | |
|---|---|
| OECD | Afkorting van de Engels benaming van de OESO |
| OESO | Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling, gevestigd te Parijs |
| OPERA | Options Portfolio for Emissions Reduction Assessment. Gedetailleerd simulatiemodel van TNO met uitgebreide technisch-economische optimalisatie van het geïntegreerde energiesysteem |
| PBL | PlanBureau voor de Leefomgeving |
| PE | Polyetheen |
| PES | Provinciale Energie Strategie |
| PHWR | Pressurised Heavy Water Reactor. Drukwaterreactortype met zwaar water als moderator en eventueel koelmiddel. Zie ook CANDU |
| PIP | Provinciaal InpassingsPlan |
| PJ | Petajoule (eenheid van energie). 1 PJ = 1 biljard joule = 1 000 000 000 000 000 joule = 1 biljard joule. Zie ook voorvoegsel P |
| PLEF | Pentalateral Energy Forum |
| PLM-tools | Product Lifecycle Management tools |
| PP | Polypropeen |
| Pu | Plutonium |
| PV | Photo-Voltaic, ofwel zonnecellen/-panelen |
| PW | ProcesWarmte |
| PWR | Pressurized Water Reactor. Drukwater reactor. Type LWR, waarbij het primaire koelwater na de kern door een stoomgenerator gaat, om stoom te genereren uit het water in de secundaire kringloop. Deze stoom drijft de turbine aan. Zie ook LWR en BWR |
| R&D | Research and Development. Onderzoek en ontwikkeling |
| REPU | REProcessed Uranium. Zie ook ERU en c-ERU |
| REPU-OX | Uranium (di-) oxide brandstof voor een kernreactor, gemaakt uit opgewerkte (“reprocessed”) gebruikte brandstof. Zie ook c-ERU, ERUen REPU |
| RES | Regionale Energie Strategie |
| SEA | Strategic Environmental Assessment |
| SER | Sociaal Economische Raad |
| SEV | Structuurschema ElectriciteitsVoorziening |
| SMR | Small Modular Reactor. Kleine modulaire kernreactor |
| SNETP | Sustainable Nuclear Energy Technology Platform |
| STEG | Stoom- en gasturbine centrale (ook wel “combined cycle” genoemd) |
| Subscript e | Electrisch. Voorbeeld: 1000 MWe = 1000 megawatt electrisch vermogen |
| Subscript p | Piek. Voorbeeld: 15 kWp = 15 kW piekvermogen |
| Subscript th | Thermisch. Voorbeeld: 1000 MWth = 1000 megawatt thermisch vermogen |
| TNO | Nederlandse organisatie voor Toegepast-Natuurwetenschappelijk Onderzoek |

| | |
|---|---|
| Triple Helix (partners) | Triple Helix is een model voor het kijken naar en het sturen op innovatie in de kenniseconomie. In Limburg zijn de Triple Helix partners: MKB-Limburg, overheid en onderwijs |
| TRISO | TRi-structural ISOtropic nucleaire brandstof. Splijtstofvorm voor HTGRs (zie aldaar), bestaande uit zgn. "coated particles", bestaande uit een UO2 of UCO "kernel", omgeven door coatings van prolytisch grafiet en silicium-carbide, in een grafiet matrix. Zeer goed bestand tegen hoge temperaturen. Zie figuur III.12 |
| TRL | Technology Readiness Level |
| TSO | Technical Support Organization |
| TWh | Terawattuur (eenheid van energie). 1 TWh = 3,6 petajoule |
| TWhe | Terawatt electrisch uur (eenheid van electrische energie). Zie ook TWh |
| U | Uranium |
| UCO | Uranium Oxi-Carbide. Brandstof voor sommige HTGR reactortypes. |
| UO2 | Uranium(di-) oxide. Brandstof voor een kernreactor, meestal licht verrrijkt in $^{235}U$ (tot maximaal ongeveer 5%) |
| UOX | Uranium Oxide splijtstof. Bestaat uit UO2. Zie aldaar |
| USD | US dollar |
| US-DOE | US Department of Energie. Ministerie van Energie van de Verenigde Staten |
| V | Volt (eenheid van electrische spanning). |
| Value-added levelized costing | Methode van kostenberekening, waarbij kosten worden teruggerekend naar de huidige waarde, waarbij tevens rekeningen gehouden wordt met de kosten van noodzakelijke aanpassingen aan het totale (energie) systeem. |
| Voorvoegsel G | Voorvoegsel giga (miljard) |
| Voorvoegsel k | Voorvoegsel kilo (duizend). Voorbeeld: 1kW = 1 kilowatt = 1000 Watt |
| Voorvoegsel M | Voorvoegsel mega (miljoen). Voorbeeld: 1 MJ = 1 megajoule = 1 miljoen Joule |
| Voorvoegsel P | Voorvoegsel peta (biljard = 1000 biljoen). Voorbeeld: 1PJ = 1 petajoule = 1 000 000 000 000 000 joule |
| Voorvoegsel T | Voorvoegsel tera (biljoen =1000 miljard). Voorbeeld: 1 TJ = 1 terajoule = I 000 000 000 000 joule |
| VVER | Drukwater reactor van Russisch ontwerp en makelij |
| W | Watt (eenheid van vermogen = energie per tijdseenheid) |

ADDENDUM A

# STUDIE-OPDRACHT PROVINCIE LIMBURG

De studie-opdracht met referentie T13442 werd aan ons consortium gegund op 31 maart 2022 waarbij de studie werd uitgevoerd tijdens de periode van 17 april tot en met 22 juli 2022, i.e. gedurende een tijdsperiode van 3 maanden.

Dit finaal rapport werd op vrijdag 22 juli 2022 aan de Provincie Limburg overhandigd en wordt op 16 september 2022 toegelicht aan de Provinciale Staten van de Provincie Limburg.

Het geheel van de studie-opdracht wordt in onderstaande figuren geheel hernomen ter informatie aan de lezer teneinde de vraagstelling voor deze studie te verduidelijken. Hoofdstuk I kadert deze studie-opdracht en verduidelijkt

**Bijlage 1 - Programma van Eisen**

**Hoofdvraag opdracht**

In kaart brengen van de technische mogelijkheden én onmogelijkheden van SMRs op Limburgs grondgebied.

Hierbij spelen zowel juridische en planologische eisen (zoals omtrent conventionele milieuaspecten, natuurbescherming, stralingsbescherming en nucleaire veiligheid) een rol als praktische overwegingen (zoals beschikbaarheid van voldoende koelwater).

Op basis van de marktconsultatie kernenergie (Zie Bijlage B “KPMG Martkconsultatie kernenergie”) kan gesteld worden dat op dit moment de SMR-ontwerpen van NuScale Power, GE-Hitachi Nuclear Energy, KAERI en Terrestrial Energy Inc. in hun licentiefase zitten en daarmee het meest kansrijk zijn om op relatief korte termijn commercieel beschikbaar te komen. Daarnaast wordt door de marktpartijen de UK SMR van Rolls-Royce genoemd als mogelijk interessant door de steun vanuit de Britse overheid en de NUWARD SMR welke door EDF wordt ontwikkeld. [1]
De vraag is welk van de bovenstaande ontwerpen een omvangrijke vraag in de markt zal genereren waardoor verdergaande schaalvoordelen in de productie en bij de toeleveringsketen mogelijk zijn — door modularisatie, design-simplificatie, standaardisatie en harmonisatie — waardoor productiekosten verder verlaagd worden. Zoals in de notitie *kernenergie in provincie Brabant* [2] beschreven kunnen overheidspartijen initiatief nemen om tot (internationale) samenwerking te komen, bijvoorbeeld door de krachten te bundelen met andere regio’s die belangstelling hebben voor het realiseren van een SMR op hun grondgebied. De partijen kunnen vervolgens bepalen welke reactorontwikkeling zij gezamenlijk willen ondersteunen.

Als uitwerking van de hoofdvraag én rekening houdend met bovenstaande bevindingen, dienen de volgende deelvragen beantwoord te worden in het onderzoek:

**1. Welke praktische en fysieke beperkingen dan wel mogelijkheden kent de provincie Limburg die bij voorbaat leiden tot het ondersteunen van één specifiek SMR-ontwerp?**

In tegenstelling tot de conventioneel (vaak grote) ontworpen kerncentrales kunnen SMRs in de regel flexibeler inspelen op de huidige energiebehoeften. Zo kunnen deze SMRs als back-up capaciteit dienen om fluctuaties in hernieuwbare energie op te vangen (flexibel regelbaar vermogen) óf kan de opgewekte energie gebruikt worden in andere toepassingen dan elektriciteit, zoals warmtenetten en het aandrijven van industriële processen (produceren waterstof).

Om een antwoord te vinden op deze mogelijke toegevoegde waarde wordt de volgende deelvraag gesteld:

**2. In hoeverre is het technisch haalbaar dat SMR-ontwerpen, naast basislast elektriciteitsproductie, kunnen worden ingezet voor flexibel regelbaar vermogen, productie van waterstof en andere (energetische) toepassingen?**

[1] Pagina 59 van https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2021/07/07/kpmg-marktconsultatie-kernenergie/210702+KPMG_rapportage_marktconsultatie_kernenergie_FINAAL.pdf

[2] https://www.brabant.nl/-/media/00c2090014614905ac09fef57ef2403c.pdf

Wat betreft flexibel regelbaar vermogen, stelt de Provinciale Energie Strategie dat het wil toewerken naar een flexibel regelbaar vermogen van tussen 1,3 – 1,6 GW voor de Limburgse elektriciteits-infrastructuur uiterlijk in 2030 voor momenten van lage hernieuwbare productie[3]. Voor 2050 is deze bandbreedte 2,2-2,6 GW zoals opgenomen in de Limburgse Systeemstudie.[4] De vraag is in hoeverre SMRs (met een vermogen tussen de 10 en 300 MW) deze behoefte tot flexibel vermogen kunnen invullen? Gezien de hoge dichtbevolktheid in Nederland, verwachten marktpartijen volgens de marktconsultatie dat het aantal mogelijke kerncentrales relatief beperkt is. Niet alleen qua fysieke ruimte, maar ook qua milieuruimte. Bovendien dient er voldoende netcapaciteit in Limburg aanwezig te zijn. Vandaar de deelvraag:

**3. Wat zijn voor Limburg, mede gelet op de uitdagingen qua netcongestie en het benodigde flexibele vermogen tussen 2030-2050[5], de meest logische varianten voor het aantal te plaatsen SMRs? Met andere woorden wat past op realistische wijze op Limburgse schaal?**

Tot slot is vanuit de ANVS een aangepast regelgevend en juridisch raamwerk nodig omdat veel nieuwe concepten die met een SMR samenhangen nog onvoldoende in de praktijk zijn getest, waardoor de veiligheid nog moet worden aangetoond. Gelet hierop wordt de volgende deelvraag gesteld:

**4. Welke SMR-ontwerpen hebben de gunstigste randvoorwaarden vanuit het vergunningenperspectief?**

**Eisen bij de beantwoording van bovenstaande vragen**

- De totale beantwoording van bovenstaande vragen moet leiden tot aanbevelingen die betrekking hebben op de provincie Limburg;
- De beantwoording van bovenstaande vragen vindt plaats via een schriftelijk rapport
- Een niet-technische presentatie (in zowel Engels als Nederlands, maar voor de rest vormvrij) maakt onderdeel uit van het onderzoek waarbij voor de Provinciale Staten van Limburg voldoende inzicht bestaat om zich een oordeel te kunnen vormen over de technische haalbaarheid van kernenergie in Limburg;
- Bij de beantwoording van bovenstaande vragen zal zo nauw mogelijk worden aangesloten bij de lopende nationale en internationale (beleids)ontwikkelingen zoals:
    - uitwerking regeerakkoord
    - de scenariostudie kernenergie [6]
    - Programma energie hoofdstructuur (meenemen van kernenergie als energiedrager in een van de alternatieven)[7]
    - Focus op SMRs binnen **Euratom Research and Training Programme**
    - European SMR Partnership in oprichting

**Opleverdata mijlpalen en opleverdatum eindoplevering**

[3] https://www.limburg.nl/publish/pages/5666/provinciale_energiestrategie_deel_2.pdf

[4] Systeemstudie energie-infrastructuur Limburg - CE Delft

[5] Zie pagina 7 van Bijlage I "Powerflex analyse" van de Limburgse Systeemstudie: CE_Delft_190423_Bijlage_i_Powerflex-analyse_Limburg_Def.pdf

[6] Staatssecretaris Yeşilgöz-Zegerius gaat toekomstige rol kernenergie onderzoeken | Nieuwsbericht | Rijksoverheid.nl

[7] https://www.rvo.nl/sites/default/files/2021/04/Concept-Notitie-Reikwijdte-en-Detailniveau-Programma-Energiehoofdstructuur.pdf



Het onderzoek naar de technische haalbaarheid kernenergie in Limburg kent de volgende mijlpalen en daaraan gekoppelde opleverdata:

| | | |
|---|---|---|
| Mijlpaal 1 | Afronding bureaustudie en interviews om technisch inzicht en overzicht te hebben van de (on)mogelijkheden van kernenergie in Limburg | 29 april 2022 |
| Mijlpaal 2 | Afronding concept (schriftelijk) rapport en bespreking met Provincie Limburg | 27 mei 2022 |
| Eindoplevering onderzoek | Afronding definitief rapport | 30 juni 2022 |
| | Afronding presentatie | 1 augustus 2022 |
| | Presentatie voor Provinciale Staten van Limburg | 16 september 2022 |

ADDENDUM B

# Samenvatting van enkele bestaande energie-strategiestudies voor Nederland

Dit addendum omvat een beknopte analyse van bestaande energiescenario studies waarbij beoogd wordt deze elementen relevant aan deze studie samen te vatten. Een belangrijk element hierbij is de mogelijk gunstige impact van kernenergie op de kosten van het energiesysteem van Nederland.

## B.1 INLEIDING

Tot aan de huidige dag is het gebruik van kernenergie in het energiesysteem van een land veelal synoniem met grootschalige productie (In de orde van 1000 MWe per centrale) van basislast elektriciteit. Echter, ervaringen In o.a. Frankrijk laten zien dat nucleaire elektriciteitscentrales (veelal van de drukwaterreactor – PWR – variant) ook In staat zijn om lastvolgend (en daarmee ook In deellast) te functioneren [1], weliswaar met enig verlies aan rendement en rentabiliteit.

In huidige en toekomstige energiesystemen (tenderend naar -netto- zero $CO_2$ emissie in 2050) concurreert de inzet van kernenergie met de inzet van andere productietechnologieën, waaronder windenergie (on-shore/ off-shore), zonnepanelen, (groen) gas, biomassa, etc. Hierbij hebben, conform de huidige "merit-order", de inzet van zonnepanelen en on-shore/off-shore windenergie voorrang boven andere vormen van $CO_2$-arme/ vrije elektriciteitsproductie-technologieën. Dit betekent dat de overige technologieën de fluctuaties in de elektriciteitsproductie van zonnepanelen en windenergie dienen op te vangen, met inachtneming van de momentane vraag naar elektriciteit.

In recente jaren zijn strategiestudies uitgevoerd, die de mogelijke evolutie van het Nederlandse energiesysteem beschrijven en analyseren naar een klimaatneutraal (netto zero emissie van $CO_2$ en zo mogelijk van andere broeikasgassen). Een zeer uitgebreide, recente studie is de "Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050" [2] ofwel "II3050". Echter, de mogelijke rol die kernenergie zou kunnen spelen in toekomstige klimaatneutrale toekomst wordt hierin slechts in beperkte mate geadresseerd. Twee andere, meest recente, studies [3,4], gaan dieper en meer in detail in op de mogelijke rol die kernenergie in een dergelijke toekomst zou kunnen spelen, met nadruk op de economische aspecten. Enkele andere studies [5-12] geven nadere informatie, nadere onderbouwing en/of andere gezichtspunten. In de volgende secties geven we een zeer beknopte samenvatting (voornamelijk modelaannames en conclusies) van de meest recente studies [2,3,4].

## B.2 "II3050"

De Werkgroep "Integrale Infrastructuurverkenning 2030 - 2050" heeft een zeer uitgebreide studie uitgevoerd, en dito rapport en bijlagen [2], afgeleverd. Drie centrale vragen worden hierin geadresseerd:

- Volgens welke scenario's kan de energietransitie zich van 2030 naar 2050 in Nederland ontwikkelen?
- Welke aanpassingen aan de infrastructuur zijn nodig om die scenario's goed te faciliteren?
- En wat betekenen die broodnodige aanpassingen aan de infrastructuur op hun beurt voor het ruimtegebruik, de planning, de totale kosten en de uitvoerbaarheid van de transitie van het gehele energiesysteem?

Drie studiefasen worden onderscheiden:

- Fase I: De scenario's (afkomstig uit [5]). 4 basisscenario's brengen in beeld hoe een betrouwbaar, duurzaam energiesysteem eruit kan zien. Vraag en aanbod van alle energiedragers voor alle sectoren zijn erin verwerkt. In de praktijk zal de energietransitie zich ontvouwen op het speelveld tussen de grenzen van deze scenario's. De scenario's zijn nadrukkelijk geen blauwdrukken waaruit gekozen moet worden. Het zijn studiemodellen. De focus van de scenario's loopt uiteen van zelfvoorzienend tot meer import-georiënteerd.
- Fase II: De infrastructuur. Deze fase laat zien welke aanpassingen nodig zijn aan het systeem (zoals flexibiliteit, opslag) en aan de infrastructuur bij elk van de scenario's.
- Fase III: De consequenties. Deze fase toont de consequenties van elk scenario, in kosten, doorlooptijd, ruimtelijke impact. Geeft ook een beeld van mogelijke knelpunten en cruciale beslismomenten in de route naar realisatie.

De studie kiest dus 4 basisscenario's, die elk een extreem weergeven van de mogelijke evolutie van het Nederlandse energiesysteem vanaf 2030. Deze basisscenario's, met hun algemene uitgangspunten, zijn:

- **Regionale sturing** (regionale ontwikkeling; 100% $CO_2$-reductie; (vrijwel) zelfvoorzienend; zeer geringe im-/exporten; krimp van energie-intensieve industrie; regionale focus energiesysteem, zonneweiden, wind op land; veel warmtenetten; burgers zeer gedreven; circulariteit speerpunt voor goederen en voedselproductie);

- **Nationale sturing** (Nederland $CO_2$-reductie koploper in Europa; 100% $CO_2$-reductie; (vrijwel) zelfvoorzienend; zeer geringe im-/exporten; energie-intensieve industrie blijft gelijk aan de huidige omvang; grote nationale projecten, wind op zee (en zonneweides en wind op land); circulariteit belangrijk voor goederen en voedselproductie).
- **Europese $CO_2$-sturing** (Europa haalt $CO_2$-doelen en is daarin koploper in Europa; klimaatneutraal; algemene CO2-heffing, importheffingen en compensatie aan de grenzen van Europa; energie-intensieve industrie groeit; wereldwijde waterstof- en biomassamarkt, groen gas import; fossiel met CCS krijgt veel ruimte).
- **Internationale sturing** (gehele wereld streeft naar $CO_2$-doelen, fossiel wordt sterk beperkt; 100% $CO_2$-reductie; vrije handel wordt gestimuleerd; handelsinfrastructuren worden sterk bevorderd; energie-intensieve industrie groeit; wereldwijde waterstof- en biomassamarkt; CCS krijgt ruimte).

Zie ook Tabel 2 voor enkele parameter-waarden van deze scenario's, tevens in vergelijking met "ADAPT" en "TRANSFORM" van TNO [4,12] (zie tevens sectie "Schepers, TNO").

Het is de bedoeling van de auteurs [2] om deze Integrale Infrastructuur Verkenning periodiek te actualiseren op basis van nieuwe inzichten en meer specifieke gegevens uit o.a. Cluster Energie Strategieën (CES), de Regionale Energie Strategieën (RES-sen), Transitie Visie Warmte (TVW), Nationale Agenda Laadinfrastructuur (NAL), Provinciale systeemstudies en ontwikkelingen op de Noordzee.

De hoofdconclusies van de studie zijn dat:

1. de infrastructuur voor elektriciteit zeer fors moet worden uitgebreid, dat er een landelijk dekkend waterstoftransportnetwerk nodig is en dat infrastructuur voor warmte en CO2 moet worden aangelegd;
2. voor alle energiedragers (elektriciteit, waterstof, groen gas, warmte) ook op grote schaal flexibiliteitsmiddelen nodig zijn. Bestaande, maar zeker ook nieuwe vormen;
3. zowel de kosten als de benodigde ruimte sterk toenemen, voor zowel infrastructuur als voor flexibiliteitsmiddelen;
4. locatiekeuze van groot belang is. De elektriciteitsinfrastructuur wordt effectiever inzetbaar en goedkoper als de plaats en capaciteit van flexibiliteitsmiddelen en die van vraag en aanbod goed op elkaar aansluiten.
5. er meer snelheid nodig is. De huidige doorlooptijden voor netaanpassingen leiden tot knelpunten. De beschikbaarheid van voldoende en gekwalificeerd personeel zal moeten meewegen bij de strategische keuzes;
6. langetermijnperspectief noodzakelijk is. De keuzes voor een nieuw integraal energiesysteem zijn bepalend voor een efficiënte transitie naar een betrouwbare en klimaat-neutrale energievoorziening. Een langetermijnperspectief is ook van belang om noodzakelijke maatregelen tijdig te identificeren en - parallel aan de toenemende maatschappelijk vraag ernaar - tijdig te kunnen realiseren.

De mogelijkheid van de inzet van kernenergie na 2030 is beperkt meegenomen in een parallelstudie door Berenschot en Kalavasta [6], als variant op het "Europese sturing" scenario, waarbij wind op zee gedeeltelijk wordt vervangen door kernenergie. Bij zowel "II3050" als bij de parallelstudie is het Energie Transitie Model van Quintel Intelligence toegepast [13]. De conclusies uit deze studie zijn (quote): "*We hebben geconstateerd dat 9 GW Nucleaire derde generatie elektriciteitscentrales van het type EPR de volgende systeemeffecten hebben in het Europees 2050 Scenario voor Nederland in de verschillende varianten met een technologie-specifieke publiek-private WACC (7% voor nucleair, 4.3% voor zon en wind) en een maatschappelijke (uniforme publieke) WACC (3% voor alle technologieën)*:

- *Variant 1: 9 GW Nucleair draait mee in de merit order in het scenario. Dit lijkt technisch onwaarschijnlijk omdat het aantal uren dat de centrale onder een load van 50% of 20% komt te hoog is. Daarnaast zijn de kosten van dit systeem (waarbij 9 GW nucleair ook meteen 9 GW gasgestookt back-up vermogen vervangt) hoger dan die van het referentie Europese scenario voor 2050, voor beide WACC varianten.*
- *Variant 2: 9 GW Nucleair draait mee in de merit order in het scenario maar is ook gekoppeld aan 4.5 GW elektrolyzers. Dit is technisch wel mogelijk, maar de daarmee geproduceerde waterstof is te duur gegeven de alternatieve waterstofproductie in het scenario met groene stroom & elektrolyzers en aardgas via SMR/ATR met CCS. Ook de stroomkosten liggen hoger dan in het referentie scenario zonder nucleaire centrales. In dit scenario kan een investering in 9 GW aan groen gas gestookt back-up vermogen worden vermeden. Echter de totale optelsom van extra investeringen in elektrolyzers en vermeden investeringen in back-up vermogen is negatief. Deze variant is minder duur dan variant 1, maar de kosten van deze variant liggen boven die van de kosten in het referentiescenario zonder nucleair voor beide WACC varianten.*
- *Variant 3: 9 GW Nucleair draait als "must run" Deze optie is ook technisch mogelijk, maar ook deze optie is qua systeemkosten duurder dan het referentiesysteem zonder nucleair bij een technologie-specifieke publiek-private WACC. De 9 GW nucleaire centrales zouden 9 GW gasgestookt back-up vermogen vervangen, alsook hernieuwbare stroomproductie van een omvang van de additionele productie van nucleair (hier 9 GW offshore wind). De kosten van dit systeem liggen bij deze WACC dan echter nog steeds hoger dan dat van het referentie scenario. Bij een maatschappelijke (uniforme publieke) WACC en indien bepaalde kostenreducties (korte bouwtijd en learning effect op kosten) bewerkstelligd kunnen worden dan zou deze subvariant op vergelijkbare nationale kosten kunnen uitkomen als het referentiescenario zonder nucleair.*
- *Variant 4: 9 GW Nucleair draait alleen voor de productie van waterstof (via electrolyzers). Dit is technisch ook mogelijk, maar de daarmee geproduceerde waterstof is te duur gegeven de alternatieve waterstofproductie in het scenario met groene stroom en elektrolyzers of aardgas via SMR/ATR met CCS. De kosten van deze variant zijn hoger dan het referentie scenario zonder nucleair voor beide WACC varianten.*"

De auteurs van II3050 [2] bevelen aan om de "*flexibiliteitsanalyse verder te verdiepen. Er is geen energiemarktsimulatie of economische optimalisatie uitgevoerd. Het is sterk aanbevolen om deze analyse nader te verdiepen, en dan met een methode of model waarmee een integraal economisch optimum gevonden kan worden.*"
(unquote).

N.B. De CE Delft [14] heeft de II3050 studie geregionaliseerd voor de provincie Limburg, waarin Chemelot natuurlijk een grote impact heeft op het hele systeem in Limburg.

## B.3 VEENSTRA, LI EN MULDER, UNIVERSITEIT GRONINGEN

Veenstra, Li en Mulder leggen in hun studie "Economic Value of Nuclear Power in Future Energy Systems - Required subsidy in various scenarios regarding future renewable generation and electricity demand" [3] de nadruk op de benodigde subsidie (waaronder inbegrepen investering voor infrastructuur die niet bij de afnemers in rekening wordt gebracht; bij de huidige offshore wind is dat bijvoorbeeld een aanzienlijk deel van de kosten die via overheidsuitgaven worden gefinancierd) voor het mogelijk maken van een niet-negatieve Net Present Value (NPV) voor de investeerder in een nieuw te realiseren installatie voor het opwekken van elektrische energie. Hierbij stellen de auteurs dat:

- de groei van hernieuwbare energie zal waarschijnlijk niet voldoende zijn om de koolstofemissies te verminderen in de mate die nodig is om de klimaatdoelstellingen te halen, ook omdat de vraag naar elektriciteit zal toenemen als gevolg van elektrificatie en productie van waterstof;
- het is de vraag in hoeverre kernenergie past binnen elektriciteitsmarkten die worden gekenmerkt door een hoog aandeel van intermitterende opwekking.

Om meer licht op dit onderwerp te werpen, verkennen zij de economie van een investering in een kerncentrale van 1000 MW op de Nederlandse elektriciteitsmarkt wanneer er al een groot geïnstalleerd vermogen van hernieuwbare energie is.
De economische waarde van een kerncentrale hangt in principe af van vier factoren:

a. de kenmerken van de installatie, met inbegrip van de bouwkosten en de bouwduur, de levensduur, de operationele kosten en de onderhoudskosten, de brandstofkosten, de beperkingen voor het opvoeren en opslaan van afval, en de ontmantelingskosten;
b. de mate van benutting (die de capaciteitsfactor wordt genoemd);
c. de afvangprijs ("capture price"; de gemiddelde elektriciteitsprijs die de installatie daadwerkelijk ontvangt), en;
d. de bijdrage aan de vermindering van de koolstofemissies.

De auteurs beoordelen de winstgevendheid van een investering in een kerncentrale in vergelijking met de winstgevendheid van investeringen van vergelijkbare omvang (in termen van productie) in hernieuwbare technologieën.

Omdat de bevordering van hernieuwbare opwekking en mogelijk ook kernenergie gerelateerd is aan klimaatbeleidsdoelstellingen, drukken zij de benodigde subsidies per technologie uit in termen van de gerealiseerde reducties in koolstofemissies (de zogenaamde reductie-uitgaven gemeten in euro per ton koolstofemissiereductie). Deze emissiereductie is het gevolg van de vervanging van gascentrales door een van de andere technieken (kernenergie, zonnepanelen, wind op land of wind op zee).

In de studie zijn onder andere de volgende aannames gedaan:

- De kosten van elke vereiste netwerkuitbreiding worden niet meegerekend, in het besef dat deze kosten heel verschillend kunnen zijn voor verschillende generatietechnologieën.
- De nu toenemende netknelpunten worden opgelost door uitbreiding van de netcapaciteit;
- Er kan in 7 jaar tijd (nadat de vergunningsprocedures zijn afgerond) een kerncentrale gebouwd worden voor 4,2 miljoen euro/MW, terwijl de centrale 60 jaar in bedrijf kan zijn. Na die periode moet de centrale worden ontmanteld tegen 15 procent van de initiële investeringskosten;
- Er wordt een gedeeltelijk uurlijk evenwichtsmodel van een elektriciteitsmarkt toegepast, met winstmaximalisatie van producenten en nutsmaximalisatie van consumenten, die beide reageren op marktprijzen. Dit model is gekalibreerd op de Nederlandse marktsituatie in 2019 (qua prijzen en marktomvang);
- Als de operationele winst stijgt door hogere prijzen, wordt ervan uitgegaan dat er meer gasgestookte capaciteit komt, en andersom, en;
- Aanwezigheid van een internationale energiehandelaar.

De bekeken scenario's zijn (zie Tabel 1):

- Baseline
- Medium Renewables (met Low Increase Demand, Medium Increase Demand en High Increase Demand).
- High Renewables (met Low Increase Demand, Medium Increase Demand en High Increase Demand)

De conclusies uit de studie zijn de volgende (vertaalde Quote uit [3]; highlights toegevoegd):

1. "De economische waarde van een kerncentrale hangt in principe af van vier factoren: a) de kenmerken van de centrale, waaronder de bouwkosten en de bouwduur, operationele en onderhoudskosten, levensduur, oplopende beperkingen, kosten voor de behandeling en opslag van afval en ontmantelingskosten b) de mate van gebruik (die de capaciteitsfactor wordt genoemd), c) de afvangprijs (wat de gemiddelde elektriciteitsprijs is die de installatie daadwerkelijk ontvangt), en d) de bijdrage aan de vermindering van koolstofemissies. Terwijl de eerste factor kan worden gezien als een exogene factor, houden de andere sterk verband met de kenmerken en de werking van de elektriciteitsmarkt. In dit artikel hebben we geanalyseerd hoe zowel het gebruik van een nieuwe kerncentrale als de afvangprijs ervan verband houden met de hoeveelheid hernieuwbare opwekking en de omvang van de elektriciteitsvraag. Daarnaast hebben we de impact op de vermindering van koolstofemissies door het elektriciteitssysteem geanalyseerd. Om deze effecten te beoordelen, vergelijken we de resultaten met vergelijkbare toenames in zonne-PV, onshore wind en offshore wind, rekening houdend met de verschillen in de respectieve capaciteitsfactoren.
2. Met behulp van een partieel evenwichtsmodel van een elektriciteitsmarkt, dat is gekalibreerd op de Nederlandse marktsituatie in 2019, zien we dat de capaciteitsfactor van een kerncentrale sterk wordt verminderd, van ongeveer 90 naar ongeveer 60 procent, wanneer de elektriciteit in de markt wordt gekenmerkt door een hoog aandeel hernieuwbare opwekking. Dit effect wordt gedeeltelijk verzacht wanneer de vraag naar elektriciteit sterk toeneemt. In absolute termen is de vermindering van de capaciteitsfactor van een kerncentrale groter dan de vermindering voor een vergelijkbare (extra) toename van de zonne- of windcapaciteit, die verband houdt met het feit dat de capaciteitsfactoren van hernieuwbare energiebronnen aanzienlijk kleiner zijn. Relatief gezien is de afname van de capaciteitsfactoren voor deze technologieën redelijk vergelijkbaar.
3. De afvangprijs van de kerncentrale is echter minder gevoelig voor de hoeveelheid hernieuwbare energie in het systeem dan de afvangprijzen van zon en wind. In een scenario met een hoge hoeveelheid wind- en zonne-opwekking, de afvangprijs van een nieuwe kerncentrale verlaagt van de huidige 40 naar ongeveer 35 euro/MWh. De afvangprijzen voor zon en wind (ook inclusief de prijs voor groene-stroomcertificaten) dalen echter van ongeveer 50 naar 10 euro/MWh wanneer er al een hoog aandeel hernieuwbare energie op de markt. De reden dat de kerncentrale een veel kleinere daling van zijn afvangprijs ervaart wanneer er een grote hoeveelheid hernieuwbare energie is geïnstalleerd, is dat hij kan profiteren van hoge (schaarste) prijzen wanneer zonne-PV en/of windturbines niet in staat zijn om te produceren vanwege (ongunstige) weersomstandigheden.
4. Aan de hand van externe informatie over de bouw-, exploitatie- en ontmantelingskosten, duur en levensduur, alsmede de modelresultaten met betrekking tot bezettingsgraad en afvangprijzen, zijn we in staat om de contante waarde van een investering in een kerncentrale te bepalen en deze te vergelijken met de vergelijkbare maatstaf voor zonne-PV, onshore wind en offshore wind. Het lijkt erop dat al deze technologieën externe subsidies nodig hebben om hun investeringskosten volledig terug te verdienen. Dit lijkt op het feit dat alle hernieuwbare bronnen momenteel subsidies ontvangen voor de exploitatie ervan. Voor de huidige kenmerken van de (Nederlandse) elektriciteitsmarkt zien we dat een kerncentrale meer subsidie nodig heeft dan een onshore windturbine, maar minder dan een PV-installatie en een offshore windpark. In een scenario met een hoog aandeel hernieuwbare energie hebben ook onshore windturbines meer subsidies nodig dan een kerncentrale, wat verband houdt met de sterke daling van de afvangprijs van hernieuwbare energiecentrales.
5. Uit deze resultaten volgt ook dat commerciële investeerders zonder enige overheidssteun waarschijnlijk niet zullen investeren in een kerncentrale, omdat in alle scenario's een dergelijke investering verlieslatend is.
6. Aangezien de bevordering van hernieuwbare opwekking en mogelijk ook kernenergie gerelateerd is aan klimaatbeleidsdoelstellingen, drukken we de benodigde subsidies per technologie uit in termen van de gerealiseerde reducties in koolstofemissies (de zogenaamde reductie-uitgaven). Deze reductie is het gevolg van de vervanging van gascentrales door een van de andere technieken (kernenergie, zon-PV, wind op land of wind op zee). Het lijkt erop dat in een scenario met een grote hoeveelheid (reeds) geïnstalleerde hernieuwbare energiebronnen, de reductie-uitgaven (in euro/ton koolstof) voor kernenergie aanzienlijk lager zijn dan voor wind- en zonne-opwekking. Dit hangt samen met de relatief sterke daling van de afvangprijs voor de hernieuwbare technologieën.
7. Hoewel het verstrekken van subsidies voor een verlieslatende technologie een kostenpost voor de samenleving vormt, zijn er enkele groepen die hiervan profiteren, zoals elektriciteitsverbruikers die profiteren van lagere elektriciteitsprijzen. Als we alle economische effecten in de samenleving opsommen, krijgen we de algemene welvaartseffecten. Door deze welvaartseffecten uit te drukken in termen van de gerealiseerde reductie van koolstofuitstoot, ontstaan de sociale reductiekosten. De conclusie van de sociale reductiekosten is vergelijkbaar met de vorige conclusie: de kosten per ton koolstofemissiereductie voor kernenergie zijn het laagst in een scenario met grote hoeveelheden hernieuwbare capaciteit.

8. Ook blijkt dat kerncentrales meer profiteren van hogere gas- of koolstofprijzen dan windmolens en zon-PV. Vanwege hun hoge beschikbaarheidsfactor kunnen kerncentrales elektriciteit produceren wanneer gasgestookte elektriciteitscentrales de elektriciteitsprijs bepalen en dus ontvangen ze hogere elektriciteitsprijzen wanneer de kosten van gasgestookte elektriciteitscentrales stijgen.
9. Vanuit het perspectief van elektriciteitsverbruikers is er echter geen duidelijk verschil tussen de technologieën om hen te beschermen tegen hoge gas- en koolstofprijzen. Hernieuwbare technologieën lijken net zo nuttig te zijn als kerncentrales om de gemiddelde uurprijs van elektriciteit, d.w.z. de prijs die consumenten betalen, minder gevoelig te maken voor (extreme) brandstofprijzen, Dus investeringen in zowel nucleaire als hernieuwbare energiebronnen als wind- en zonne-energie maken de gemiddelde elektriciteitsprijs minder sterk gerelateerd aan deze prijzen.
10. De resultaten zijn uiteraard gevoelig voor de gemaakte aannames. Wanneer de bouw- en ontmantelingskosten van kernenergie twee keer zo hoog zijn als gedacht, is de benodigde subsidie voor kernenergie hoger dan de subsidie die nodig is voor zon-PV. Minder dramatische stijgingen van de veronderstelde bouwkosten veranderen echter niets aan bovenstaande conclusies. Ook vinden we dat de bouwkosten van PV met meer dan 50 procent moeten dalen om tot een vergelijkbaar benodigd subsidie niveau te komen als voor een kerncentrale. Het veranderen van de aanname met betrekking tot de levensduur van de kerncentrales heeft niet echt invloed op de uitkomsten. De resultaten lijken ook robuust te zijn voor verschillende waarden van de disconteringsvoet. Bovendien veranderen de resultaten niet significant wanneer we uitgaan van een grotere mate van flexibiliteit binnen de elektriciteitsmarkt, wat in de toekomst kan gebeuren als gevolg van investeringen in opslag en verdere internationale integratie van markten." (Unquote)

Bij de studie dienen wel enkele kanttekeningen te worden gemaakt. Er moet voorzichtig worden gedaan met aannames over toekomstige marktwerking. Het gebruikte model is gekalibreerd op de huidige markt- en energiebalanssituatie en dus ook gebaseerd op het huidige systeem. Het onderzoek zelf focust op economische optimalisatie vanuit de productie kant (zon, wind, gascentrales en kernenergie) en de vergelijking tussen deze productietechnieken. De energievraag zou wel eens onderbelicht kunnen zijn. Het onderzoek houdt weinig rekening met de groei in demand side response en bijna geen rekening met de karakteristieken van P2X en batterijen die in de toekomst de vraagkant fundamenteel anders kunnen maken vergeleken met het huidige systeem, waar het onderzoek op is gebaseerd.

Hierdoor moet voorzichtig worden omgegaan met overnemen van absolute waardes (zonder vergelijking met andere technieken) voor bijvoorbeeld LCOE en capacity factors.

Overigens zit er behoorlijk verschil tussen finale elektriciteitsvraag aangenomen bij Veenstra, Li, Mulder (120-180 TWh) in vergelijking met de hogere aannames in II3050 (210-260 TWh). Een sneller groeiende elektriciteitsvraag zal de door Veenstra, Li en Mulder [3] berekende effecten naar verwachting verder versterken.

Tabel 1. Geïnstalleerd vermogen per technologie (MW) en (toename in) vraag (TWh en %) per scenario. [3].

| Scenario | Technology | | | | | Yearly load TWh (increase in %) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Solar | Onshore wind | Offshore wind | Gas | Nuclear | |
| Baseline[B] | 3937 | 3669 | 957 | 15570 | 486 | 113 (0%) |
| Medium Renewables-Low Increase Demand[M1] | 14300 | 3700 | 11500 | 14000 | 486 | 120 (5.6%) |
| Medium Renewables-Medium Increase Demand[M2] | 14300 | 3700 | 11500 | 16000 | 486 | 140 (23.5%) |
| Medium Renewables High Increase Demand[M3] | 14300 | 3700 | 11500 | 21000 | 486 | 180 (59.8%) |
| High Renewables-Low Increase Demand[H1] | 38000 | 11000 | 38000 | 11500 | 486 | 132 (16.7%) |
| High Renewables-High Increase Demand[H2] | 38000 | 11000 | 38000 | 17000 | 486 | 180 (59.8%) |

Notes:
*B*: Installed capacities and demand based on 2019 levels.
M1 : Installed capacities of renewables based on Climate Agreement, demand as in 2030 without extra electrification, see Moraga and Mulder (2018).
M2 : Installed capacities of renewables based on Climate Agreement, demand as in 2030 with extra electrification, see Moraga and Mulder (2018).
M3 : Installed capacities of renewables based on Climate Agreement, demand as in 2050 with extra electrification.
H1 : Installed capacities of renewables based on climate studies of Cleijne et al. (2020) and Berenschot and Kalavasta (2020), demand as in 2050 without extra electrification, see Moraga and Mulder (2018).
H2 : Installed capacities renewables based on climate studies of Cleijne et al. (2020) and Berenschot and Kalavasta (2020), demand as in 2050 with extra electrification, see Moraga and Mulder (2018).

(Referenties in [3])

## B.4 SCHEEPERS, TNO

Een derde, zeer interessante en tevens zeer recente scenariostudie voor het Nederlandse energiesysteem op weg naar klimaatneutraliteit is tenslotte "Een Klimaatneutraal Energiesysteem voor Nederland - Nieuwe Verkenning toont Grenzen Mogelijkheden" van M. Scheepers, TNO [4]. In deze studie worden de eerder geïntroduceerde scenario's "ADAPT" en "TRANSFORM" [12] geactualiseerd. Zowel in het originele als de geactualiseerde TRANSFORM is het (toenemende) gebruik van kernenergie mogelijk. In Tabel 2 is een overzicht te vinden van de scenario's ADAPT en TRANSFORM, inclusief een vergelijking met de 4 basis-scenario's van II3050 [2]. In beide scenario's is het streven verwerkt om de afhankelijkheid van (Russisch) aardgas te verminderen.

ADAPT - In het ADAPT-toekomstbeeld bouwt Nederland voort op zijn huidige sterktes, maar zorgt het er wel voor dat de CO2-emissies dalen. In de afgelopen decennia hebben olie, kolen en gas gezorgd voor een sterke industrie, een sterke transport- en logistieke sector, een betrouwbare elektriciteitsvoorziening en comfortabel verwarmde huizen. In dit toekomstbeeld kiezen de Nederlanders voor zekerheid: behoudt van werkgelegenheid en van de huidige comfortabele levensstijl. Duurzaamheid wordt minder belangrijk gevonden. Dat vraagt om energiedragers die lijken op wat we nu hebben, maar dan CO2-neutraal. Het huidige systeem wordt aangepast en geoptimaliseerd, terwijl de impact op energiegebruikssectoren relatief beperkt is. Nationale en lokale overheden nemen het voortouw en sturen burgers en bedrijven bij het maken van keuzes ten aanzien van de energietransitie met concrete beleidsmaatregelen. De mobiliteitsvraag en ook de industriële productie blijven groeien. Voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de broeikasgasemissies buiten de nationale doelstelling vallen, wordt gestreefd naar een halvering van de broeikasgasemissies. In dit scenario zijn geen grote maatschappelijke bezwaren tegen gebruik van fossiele brandstoffen in combinatie met CO2-afvang en -opslag. Ook wordt een ruime import voor biomassa geaccepteerd.

TRANSFORM - In het TRANSFORM-toekomstbeeld loopt Nederland en Europa voorop in de strijd tegen klimaatverandering en voor duurzaamheid. Met zijn sterke kennisinfrastructuur en innovatieve bedrijfsleven is Nederland ideaal gepositioneerd om een nieuwe schone, energiezuinige economie op te bouwen. De bewustheid van de Nederlanders van hun energiegebruik en hun CO2-voetafdruk leidt tot een gedragsverandering en allerlei duurzame initiatieven. Nieuwe technologieën worden enthousiast omarmd. De overheid heeft hier een stimulerende en voorwaardenscheppende rol en is niet bang om verstrekkende beslissingen te nemen. Doordat burgers meer milieubewust zijn en daar ook naar handelen, neemt de energievraag af, verandert de mobiliteitsvraag (bijv. meer gebruik van openbaar vervoer en fiets) en de vraag naar milieubelastende industriële en agrarische producten (bijv. dalende vleesconsumptie). Ook bedrijven nemen initiatieven tot een ambitieuze transformatie door bestaande processen te vervangen door duurzame alternatieven. De industrie wordt minder energie-intensief, er worden zoveel mogelijk gerecyclede en duurzaam verkregen grondstoffen ingezet en een deel van de economische activiteit verschuift naar de dienstensector die daardoor groeit. Ook leidt de maatschappelijke verandering tot aanpassingen in de agrarische sector, zoals meer duurzame landbouw en minder veeteelt. Voor de internationale luchtvaart en scheepvaart, waarvan de broeikasgasemissies buiten de nationale doelstelling vallen, geldt een 95% reductiedoelstelling. CO2-opslag wordt slechts beperkt toegepast en biomassa wordt vooral ingezet voor toepassingen waarvoor geen alternatieven zijn.

Waar in de II3050 scenariostudies gestreefd wordt naar een CO2-neutraal energiesysteem, gaan de ADAPT en TRANSFORM scenario's daarin verder door tevens neutraliteit na te streven voor de overige broeikasgassen.

De scenario's zijn gekwantificeerd m.b.v. het energiesysteem model OPERA (Option Portfolio for Emissions Reduction Assessment) [4,12]. (Quote) "Met het OPERA-model kunnen analyses worden uitgevoerd voor het geïntegreerde energiesysteem van Nederland. Het model bestrijkt het energiesysteem van alle sectoren (energieproductie, industrie, transport, gebouwde omgeving, agrarische sector en bunkerbrandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart) en het gehele broeikasgassysteem (naast CO2 ook bijv. CH4 en N2O-emissies) van Nederland, inclusief de emissies voor landgebruik, veranderingen in landgebruik en bosbouw (LULUCF). Energie-uitwisseling met het buitenland is ook opgenomen in het model. Verder houdt het model rekening met pieken en dalen in vraag en aanbod van energie en wordt rekening gehouden met beperkingen in energietransport tussen verschillende regio's in Nederland. Bij bepalen van investeringen wordt rekening gehouden met investeringen die gedaan zijn in de voorgaande jaren en de technische levensduur.

Tabel 2. Vergelijking van de scenario's "ADAPT" en "TRANSFORM" van TNO [4,12] met "Regionaal", "Nationaal", "Europees", en "Internationaal" uit II3050 [2].

| | | II3050 | | | | TNO | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Regionaal | Nationaal | Europees | Inter-nationaal | ADAPT | TRANS-FORM |
| **Elektriciteitsproductie**[2] | TWh | 312 | 403 | 228 | 211 | 315 | 621 |
| **w.v. wind op zee**[2] | TWh | 162 | 269 | 157 | 144 | 192 | 386 |
| **w.v. wind op land** | TWh | 45 | 45 | 23 | 23 | 33 | 54 |
| **w.v. zon-PV** | TWh | 105 | 89 | 48 | 44 | 51 | 120 |
| **w.v. kernenergie** | TWh | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43 |
| **Import elektriciteit** | TWh | 12 | 10 | 21 | 22 | 53 | 8 |
| **Waterstof** | PJ | 342 | 518 | 500 | 1048 | 257 | 738 |
| **Biomassa** | PJ | 310 | 194 | 947 | 443 | 945 | 854 |
| **Geothermie** | PJ | 108 | 47 | 4 | 4 | 58 | 88 |
| **Fossiele brandstoffen** | PJ | 374 | 511 | 1073 | 734 | 1415 | 125 |
| **$CO_2$-opslag** | Mton | 5 | 6 | 27 | 26 | 50 | 15 |

[1] Netbeheer Nederland, Het Energiesysteem van de Toekomst - Integrale Infrastructuurverkenning 2030 -2050 (II3050), April 2021
[2] De impact die brandstoflevering aan internationale lucht- en zeevaart is voor de II3050 studie wel apart onderzocht. Hiervoor is 40% extra windvermogen op zee nodig. De cijfers voor wind op zee zijn in de tabel hiervoor aangepast.
[3] De impact van kernenergie op de II3050 scenario's zijn onderzocht door Berenschot en Kalavasta in 'Systeemeffecten van nucleaire centrales in Klimaatneutrale Energiescenario's 2050,' 2020

*Het OPERA-model is een optimalisatiemodel: het model rekent het energiesysteem en de bijbehorende emissies uit, gegeven bepaalde doelen (bijv. broeikasgasreductiedoel) en randvoorwaarden, tegen de laagste maatschappelijke kosten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de nationale kosten-batenanalysemethode. Er worden in beginsel zo weinig mogelijk randvoorwaarden opgelegd. De enige randvoorwaarden die zijn toegepast hebben te maken met de veronderstellingen in de scenario's (bijv. beperkte CO2-opslag en biomassabeschikbaarheid) en fysieke limitering (bijv. transport van warmte of elektriciteit) of beleidsmatige technologie uitsluiting (bijv. geen kolencentrales). Voor een aantal opties wordt een maximaal technisch potentieel gehanteerd dat bij de optimalisatie niet kan worden overschreden. Deze potentiëlen hebben te maken met fysieke of beleidsmatige beperkingen. Maximale potentiëlen gelden voor: wind-op-land, wind-op-zee, zon-PV, geothermie, kernenergie, CO2-opslag en biomassa uit binnen- en buitenland.*

*Voor de techno-economische optimalisatie gebruikt het model een doelstelling. In dit geval een maximale emissie van broeikasgassen. Andere inputvariabelen zijn: technische en economische data van technologie-opties (er zijn meer dan 600 technologieën waaruit het model kan kiezen, waaronder ook energiebesparingsopties en kerncentrales). Er wordt rekening gehouden met leereffecten, dat wil zeggen dat de technologiekosten naar beneden gaan en de prestaties verbeteren als gevolg van innovatie en het op steeds grotere schaal toepassen van de technologie. Dit zijn ook invoervariabelen. Verder bevat het model prijzen van energie- en energiedragers die worden geïmporteerd (olie, gas, kolen, biomassa, etc.) en de vraag naar energie (warmte, elektriciteit) van de verschillende eindgebruikerssectoren, productievolumes in de industrie (staal, ammoniak, chemicaliën) en vervoerskilometers in de transportsector.*

*Het OPERA-model levert een gedetailleerde kwantificering op van het energiesysteem. Er zijn twee typen resultaten: uitkomsten die het fysieke energiesysteem beschrijven (bijv. energieaanbod en energievraag per sector opgedeeld naar verschillende soorten energiedragers, capaciteit van energieproductie, import/export van energie, resterende broeikasgasemissies) en economische resultaten (bijv. systeemkosten, investeringskosten).*

*Bij het bepalen van de totale systeemkosten worden alle kosten van de in het energiesysteem gebruikte technologie-opties bij elkaar opgeteld. Die kosten bestaan uit geannualiseerde investeringskosten op basis van de technische levensduur en een nationale (maatschappelijke) discontovoet van 2.25%, jaarlijkse operationele kosten en energiekosten. Het gaat daarbij niet alleen om technologieën voor productie of gebruik van energie, maar ook om energiebesparingsopties en kosten van infrastructuur, zoals kosten voor energietransport en -opslag. Bij de totale systeemkosten spelen belastingen en subsidies geen rol.*" (unquote)

Naast het basis TRANSFORM-scenario, waarbij de hoeveelheid kernenergie gemaximeerd is op +2,5 GW in 2040 en nog eens 2,5 GW in 2050 (vanwege praktische grenzen aan de snelheid waarmee nieuwe kerncentrales kunnen worden gerealiseerd) is er tevens gerekend aan TRANSFORM scenario's:

- zonder kernenergie: de totale systeemkosten in deze scenariovariant zonder kernenergie zijn hoger dan in de basisvariant (+8% in 2050).
- met meer mogelijke kernenergie (12 i.p.v. 5 GWe in 2050): deze verschuiving leidt tot lagere totale systeemkosten (-5% t.o.v. het basisscenario).

De algemene conclusies uit de studie zijn als volgt (Quote):

1. *"Nederland is in staat om in grote mate zelf te voorzien in de toekomstige energievraag met hernieuwbare energiebronnen. Wind- en zonne-energie zijn de belangrijkste bronnen en afhankelijk van de groei van de energievraag zal kernenergie deel kunnen uitmaken van de energiemix. Wel blijft Nederland voor fossiele brandstoffen van importen afhankelijk in de periode waarin het Nederlandse energiesysteem nog niet volledig is verduurzaamd. Er is ook een energiesysteem mogelijk waarin fossiele brandstoffen in 2050 een rol blijven spelen, en dat toch aan de Europese broeikasgasreductiedoelen voldoet.*
2. *Een toekomstig energiesysteem met ambitieuze duurzaamheidsambities hoeft niet duurder te zijn dan een energiesysteem waarmee Nederland wel voldoet aan de in Europa afgesproken reductiedoelen, maar waarin de transitie minder ver is doorgevoerd bij onder andere gebruik van duurzame grondstoffen en productie van duurzame brandstoffen voor lucht- en scheepvaart.*
3. *De elektriciteitsvraag groeit fors van 110 TWh nu naar ruim 300 TWh tot mogelijk meer dan de 500 TWh in 2050. Naast elektrificatie van energiegebruik in alle eindgebruikerssectoren is de groei vooral afhankelijk van de vraag naar waterstof vanuit de industrie en in hoeverre deze in Nederland uit groene stroom wordt geproduceerd. De vraag naar groene waterstof kan zeer groot worden als de grondstoffen in de industrie verder worden verduurzaamd en duurzame brandstoffen voor lucht- en scheepvaart in Nederland worden geproduceerd.*
4. *Voor het produceren van duurzame chemicaliën en kunststoffen zijn, naast gerecyclede plastics, biogrondstoffen nodig. Biogrondstoffen zijn ook nodig voor biobrandstoffen voor onder meer de luchtvaart. Biogrondstoffen moeten voor een deel worden geïmporteerd, omdat Nederland zelf hier onvoldoende in kan voorzien.*
5. *Negatieve emissies zijn nodig om bepaalde moeilijk te reduceren broeikasgasemissies te compenseren en zo in 2050 broeikasgasneutraliteit te bereiken. Negatieve emissies kunnen worden gerealiseerd door CO2 afkomstig uit biomassa of uit de lucht op te slaan in lege gasvelden, of bijvoorbeeld meer bomen aan te planten die CO2 uit de lucht vastleggen.*" (Unquote)

## B.5 CONCLUSIE

Hoewel in eerste instantie uit de II3050 [2] en Kalavasta studies [10] is gebleken dat kernenergie over het algemeen niet economischer is dan duurzame energiebronnen, dient dit beeld te worden bijgesteld wanneer er in meer detail en met (economische) optimalisatie naar de scenario's, en in het bijzonder de totale systeemkosten, wordt gekeken [3,4]. De besproken studies hebben zich vooralsnog beperkt tot kernenergie voor (grootschalige) elektriciteitsopwekking. De mogelijke inzet van (fabrieksmatig gebouwde) SMR's, ook voor (industriële proces-) warmte, kan het beeld eventueel nog gunstiger maken.

Daarnaast dient te worden opgemerkt dat in bovengenoemde studies is uitgegaan van gasprijzen zoals die in 2019 nog gebruikelijk waren. In de huidige -en verwachte toekomstige- situatie, waar de gasprijzen eerder rond de 90 Euro per MWh liggen (ongeveer overeenkomend met de variant van een 5x zo hoge gasprijs bij Li, Veenstra en Mulder [3]), wordt het beeld voor kernenergie, zowel voor grote LWR's als kleinere SMR's, naar verwachting nog gunstiger.

## B.6 REFERENTIES


1. Morilhat, P., Feutry, S., Le Maitre, C., and Favennec, J. M. (2019). Nuclear power plant flexibility at edf. Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie, 64(3):131–40.
2. "Het Energiesysteem van de Toekomst - Integrale Infrastructuurverkenning 2030 -2050" + bijlagen, april 2021.
3. Arjen Veenstra, Xinyu Li en Machiel Mulder, "Economic Value of Nuclear Power in Future Energy Systems - Required subsidy in various scenarios regarding future renewable generation and electricity demand", april 2022.
4. Martin Scheepers, "EEN KLIMAATNEUTRAAL ENERGIESYSTEEM VOOR NEDERLAND NIEUWE VERKENNING TOONT GRENZEN MOGELIJKHEDEN", TNO Whitepaper, april 2022.
5. Berenschot en Kalavasta, "Klimaatneutrale energiescenario's 2050 - Scenariostudie ten behoeve van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050", 61689 – Openbaar, maart 2020.
6. Berenschot en Kalavasta, " Systeemeffecten van nucleaire centrales in Klimaatneutrale Energiescenario's 2050" 9 maart 2020.
7. Martin Scheepers e.a., "De rol van kernenergie in de energietransitie van Noord-Brabant", TNO 2020 P12092, 1 februari 2021.
8. eRisk Group, "De rol van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem De ontwikkeling naar een CO2 neutrale energieen grondstoffenvoorziening in 2050", november 2020. (file: 20201199_eRisk_De-rol-van-kernenergie_20201202-1.pdf) [6]
9. IEA, "The Netherlands 2020 - energy Policy Review", 2020.
10. Kalavasta, "Vergelijking van twee rapporten over de kosten van nucleaire en zon- & windstroom in het Nederlandse energiesysteem, die Minister Wiebes in april en september 2020 naar de Tweede Kamer heeft gestuurd", 24 september 2020.
11. Netbeheer Nederland, "Aanpassingen klimaatneutrale energiesysteem scenario's 2050 - Documentatie van wijzigingen in de scenario's, de flexibiliteitsmiddelen, de uurlijkse inzet, en de regionalisering, als input voor de infrastructuuranalyses in de II3050", 10 juli 2020.
12. Martin Scheepers, André Faaij en Ruud van den Brink, "SCENARIO'S VOOR KLIMAATNEUTRAAL ENERGIESYSTEEM - SLIMME COMBINATIES VAN ENERGIE-OPTIES LEIDEN TOT DUURZAME EN BETAALBARE ENERGIEHUISHOUDING", TNO Whitepaper, mei 2020.
13. Quintel Intelligence, "Energy Transition Model", https://quintel.com/etm.
14. CE Delft (2020). "Systeemstudie energie-infrastructuur Limburg" + bijlagen.

# Levenscyclus-analyse kernenergie

Een levenscyclusanalyse (LCA) is een gestandardiseerde beoordelingsmethode om een milieubeoordeling van een systeem (proces, dienst, installatie, bedrijf, innovatie) uit te voeren over de gehele levenscyclus van dit systeem. De beoordelingsmethode omvat meerdere criteria en laat, gezien de eenduidige definiëring van dergelijke criteria alsook de bijhorende analyse methodologie, om dergelijke LCA uit te voeren voor verschillende systemen en aldus vergelijking tussen verschillende systemen of opties toe te laten. Dit laatste is hierbij essentieel aangezien een LCA een belangrijke input is in een Milieu Effecten Rapportering (MER) tevens conform de EU Richtlijn/Directive 2001/42/EC [1].

Plannen en programma's in de zin van de SEA/MER-richtlijn moeten worden opgesteld of vastgesteld door een autoriteit (op nationaal, regionaal of lokaal niveau) en worden vereist door wettelijke, regelgevende of administratieve bepalingen. Een SEA is verplicht voor plannen/programma's die:

- • zijn voorbereid voor landbouw, bosbouw, visserij, energie, industrie, transport, afval-/waterbeheer, telecommunicatie, toerisme, ruimtelijke ordening of landgebruik en die het kader vormen voor toekomstige ontwikkelingsvergunningen voor projecten die in de MER-richtlijn worden vermeld, of;
- • zijn vastgesteld dat een beoordeling op grond van de habitatrichtlijn vereist is.

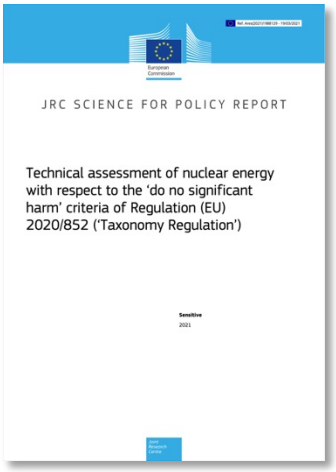
Elk actie betreffende energie en dus kernenergie valt onder SEA/MER-richtlijn.

Niettemin is deze addendum niet bedoeld om de nodige input te leveren aan dergelijke SEA/MER omtrent het onderwerp van dit rapport, i.e. (Mini-)SMRs. Dit addendum is evenwel ter beschikking gesteld om factuele informatie te bezorgen omtrent de LCA van kernenergie en dus de positionering van kernenergie, groot en klein, in de huidige en toekomstige energiemix te kaderen vanuit deze criteria welke tevens heel belangrijk zijn in het maatschappelijke debat omtrent dergelijke toekomstige en de wenselijkheid van kernenergie.

Verschillende studies omtrent levenscyclus-analyse werden reeds uitgevoerd waarbij recent een complete samenvattende studie werd gepubliceerd door de Europese Commissie Joint Research Center (JRC) [2] waarbij deze analyse tevens werd geverifieerd door een onafhankelijk wetenschappelijk comité [3]. Deze 'technical assessment' werd ondernomen in het kader van de EU Taxonomy besprekingen en meer bepaald indien kernenergie voldoet aan de principes van "Do not Significant Harm" als criterium in de EU Taxonomy.

De volgende pagina's vatten de voornaamste elementen van deze levenscyclus-analyse samen doch wordt de geïnteresseerde lezer naar het originele rapport verwezen voor meer gedetailleerde informatie. Verschillende figuren worden in deze addendum rechtstreeks vanuit het originele document gebruikt zonder vertaling doch met de nodige begeleidende uitleg om de figuren te kunnen interpreteren in dit rapport.

## C.1 ALGEMENE CONCLUSIE




Als algemene conclusie betreffende LCA voor kernenergie in vergelijking met andere energie-technologieën geldt dat:

- Kernenergie, hydroelektrische en (offshore) wind-productie de laagste GHG-emissies alsook stikstof en zwavel emissies vertonen;
- Dit evenzeer geldt voor de impact op fauna en flora;
- Het gebruik van fossiele brandstoffen het laagste is voor kernenergie, wind en zon doch dat enkel kernenergie het laagste gebruik van natuurlijke bronnen vraagt van alle niet-fossiele energie-technologiën en bovendien kan voorzien in een heel grote graad aan circulaire economie;
- De hoeveelheid land benodigd per energieproductie is het laagst voor kernenergie;
- Het aantal fatiliteiten (gezondheid alsook overlijdens) zijn het laagst voor kernenergie, hydroelektriciteit (dammen) en wind-energie;
- De economische competitviteit van kernenergie is goed en nog meer zo indien systeemkosten worden in rekening gebracht.

## C.2 GHG-EMISSIES

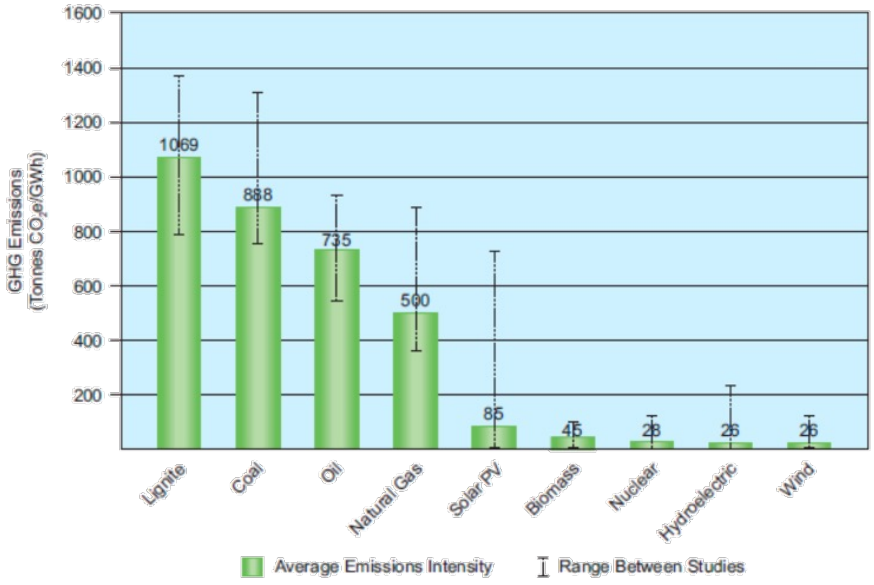
Een voornaam criterium is reeds de GHG-emissies en zeker in een context van decarbonisering van onze energiemix. Figuur C.1 toont de vergelijking van dergelijke GHG-emissies voor verschillende energie-technologieën waarbij kernenergie bij de laagste scoort met een GHG-emissie van 28 gram $CO_{2eq}$ per kWh. Een recente studie door EdF bepaalt dat deze GHG-emissie voor kernenergie in de Franse context eerder slechts 4 gram $CO_{2eq}$/kWh bedraagt [4].

Om dit in perspectief te plaatsen:

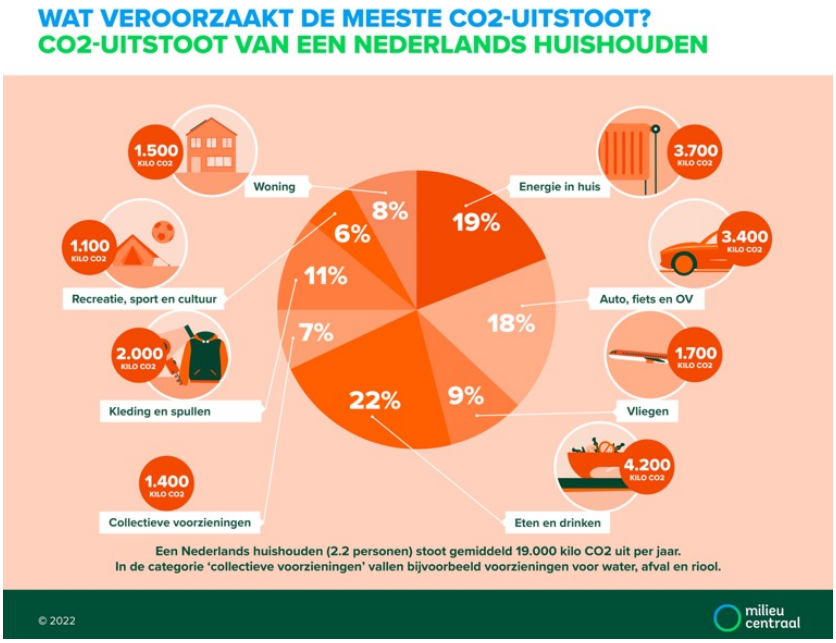
- de Europese Commissie's richtlijn voor personenwagens streeft naar een GHG-emissie van 95 gram $CO_2$ per km;
- In Nederland is de gemiddelde verplaatsing zo'n 12900 km per jaar (CBS-data van 2019, i.e. pré-corona) [5]
  - Wat dus resulteert in een toekomstige $CO_2$-emissie van 1,225 miljoen gram per gemiddelde personenwagen per jaar of dus 1,225 ton $CO_2$
  - Het gemiddeld elektriciteitsverbruik door een Nederlands gezin bedraagt zo'n 2 760 kWh per jaar
  - En dus, indien dit geheel door kernenergie zou worden beleverd zo'n 77,280 kg $CO_2$ per jaar en voor een gezin in Frankrijk zou dit slechts 11 kg $CO_2$ betekenen.
- Heden bedraagt dit gemiddeld in Nederland, wat betreft het geheel van de woning dus ook inclusief verwarming zo'n 3700 $CO_2$ per jaar (zie figuur C.2).

Stellen we dit in perspectief dan zou het geheel aan jaarlijkse elektriciteit verbruikt door een Nederlands gezin via kernenergie het equivalent zijn als een jaarlijkse rit van 810 km rijden met uw toekomstige wagen, i.e. het equivalent van even een weekendje naar Parijs bijvoorbeeld.

Figuur C.1 GHG-emissies voor energie-technologieën



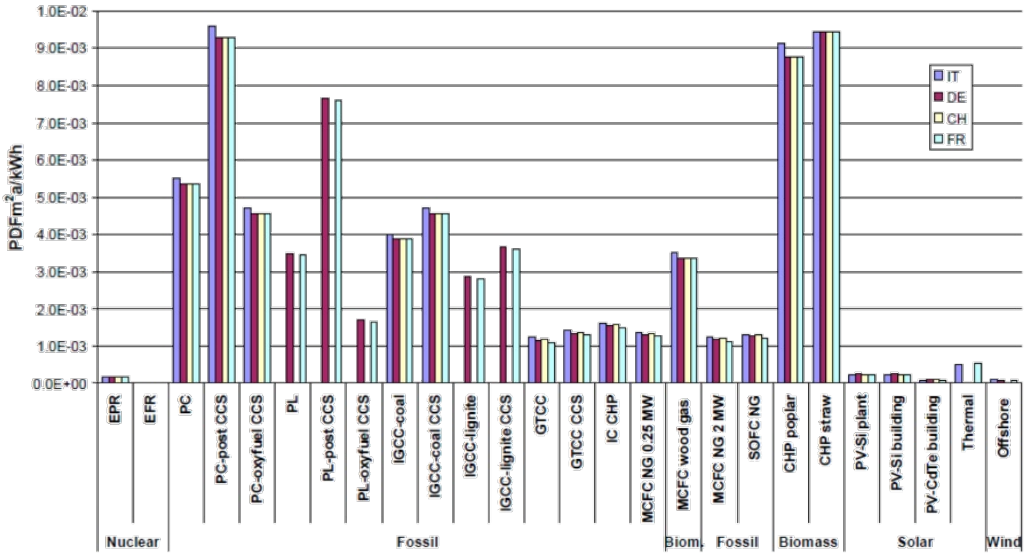

Gemiddelde $CO_2$-uitstoot van een Nederlands gezin



## C.3 IMPACT OP FAUNA EN FLORA

De impact op fauna en flora wordt uitgedrukt in als 'Potentially Disappeared Fraction' (PDF) of dus "Potentieel Verdwijnende Fractie" van fauna & flora op 1 $m^2$ gedurende één jaar kWh elektriciteitsproductie. De figuur C.3 duidt deze aan voor verschillende elektriciteitsproductie-technologieën alsook met enige differentiatie naar verschillende landen (IT = Italië; DE = duitsland; CH = Zwitserland; FR = Frankrijk) doch met een continue constatatie dat kernenergie net zoals offshore-wind de laagste impact of fauna en flora teweeg brengt.

Figuur C.3 PDF criterium voor elektriciteitsproductie

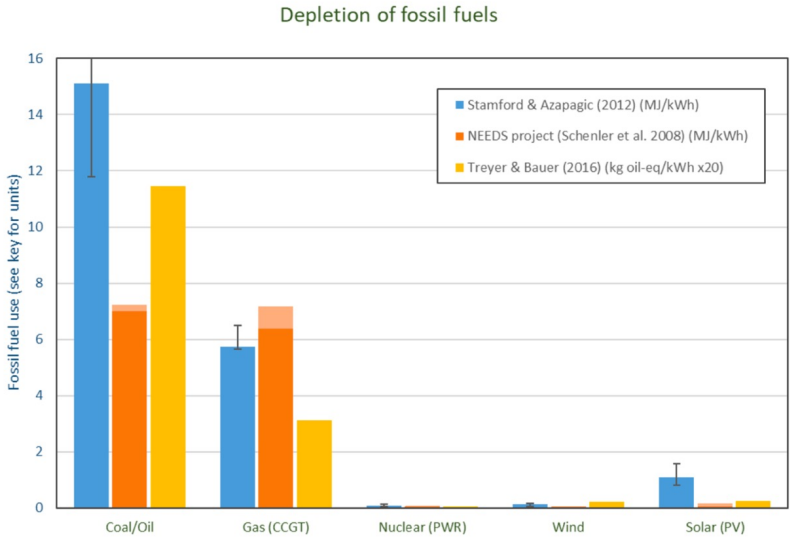



## C.4 GEBRUIK VAN EINDIGE EN/OF KRITISCHE MATERIALEN

Het gebruik van eindige en/of kritische materialen is recent meer en meer in de aandacht gekomen gezien het kritische karakter van sommige van deze materialen duidelijk zichtbaar werd tijdens de CORONO-crisis alsook nog meer tijdens de recente geo-politieke ontwikkelingen waar een combinatie van protectionisme alsook beperktere performantie van internationale logistieke ketens tot stijgende prijzen of zelfs onbeschikbaarheid leiden.

De in figuur C.4 weergegeven uitputting van fossiel brandstoffen is uiteraard geheel voordelig voor kernenergie, wind en in iets midenre mate zonnepanelen doch overal zijn deze laatsten beduidend beter dan voor kolen en gas.

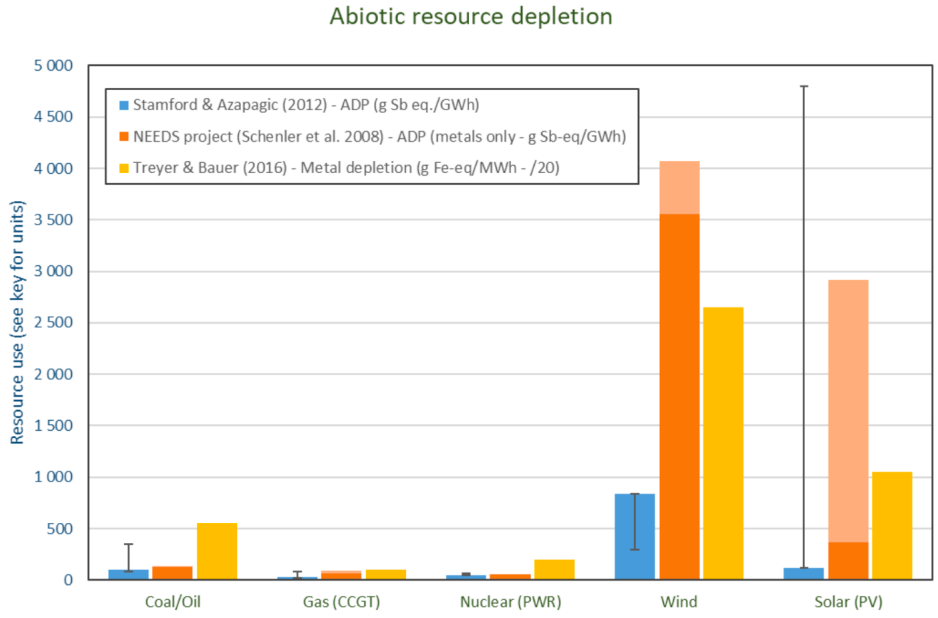
Figuur C.4 Uitputting van fossiele brandstoffen




Het abiotisch, i.e. primair, materiaal gebruik is weergegeven in figuur C.5 waar dus een geheel ander beeld wordt weergegevens en waar dus, ondanks het hoge fossiele brandstof gebruik, kolen en gas beter noteren dan wind en zonnepanelen.

Aldus dient geconcludeerd dat kernenergie op basis van zowel fossiel brandstof als abiotisch primair materiaal verbruik het best scoort en vanuit dit oogpunt tevens het duurzaamst dien beschouwd.

Figuur C.5 Abiotisch materiaal gebruik




## Wat dan omtrent de beschikbaarheid aan uranium?

Een tweejaarlijks rapport door IAEA en OESO Nucleair Energie agentschap (NEA) evalueert het aanbod alswel geprojecteerde vraag naar uranium waarbij het meest recente gepubliceerde rapport in 2020 een beschikbaarheid aan natuurlijk uranium (aan een prijs lager dan 260 USD/kg) voorziet voor de volgende 135 jaar voor het huidige en toekomstige kerncentrale park wereldwijd. De twee voornaamste categorieën van natuurlijk uranium bronnen bedragen in totaal zo'n 8,1 miljoen ton te vergelijken met heden 60 000 ton uranium verbruik per jaar.

Aldus is er op korte termijn, althans tot midden deze eeuw, geen bezorgdheid omtrent de hoeveelheid uranium ter beschikking. De exploratie van uranium is een continue activiteit waarbij heden reeds kennis is van zo'n 5,6 miljoen ton uranium bovenop bovenstaande 8,1 miljoen ton.

E r kan redelijkerwijze verwacht worden dat, indien de rol voor kernenergie in een duurzame energievoorziening wordt bevestigd, dat de vraag naar natuurlijk uranium vanaf de komende decennia beduidend kan toenemen waarbij finaal vier grote opties bestaan voor de uitbreiding in bevoorrading aan splijtstof voor kernenergie, i.e.:

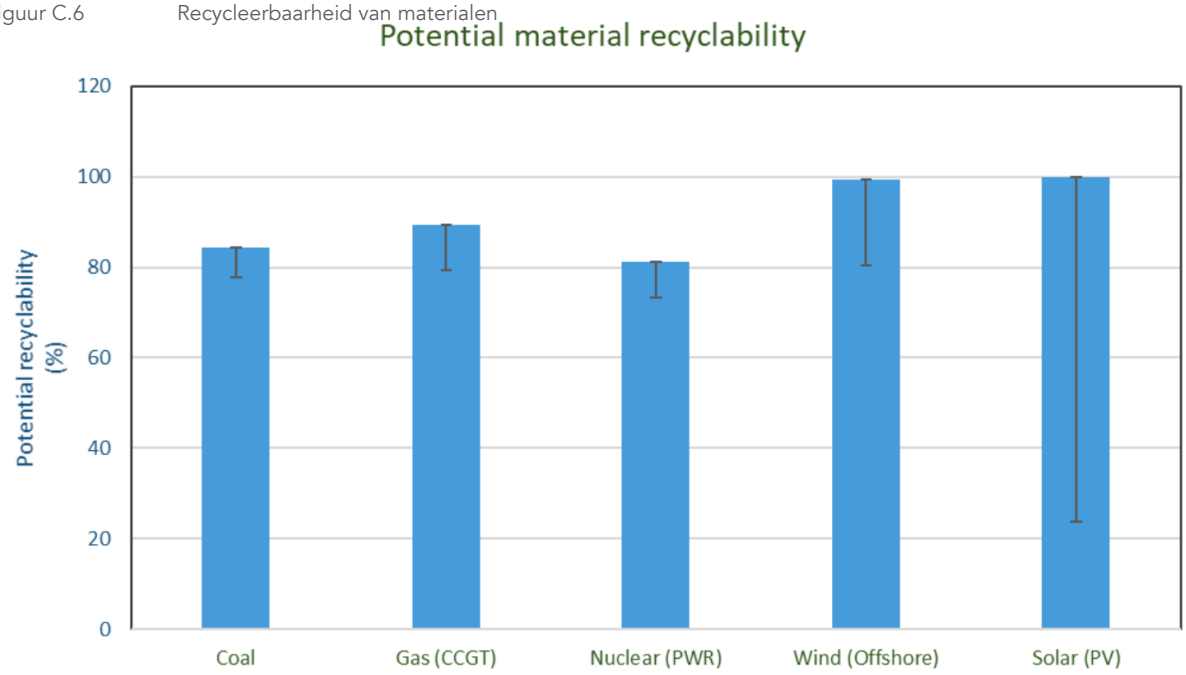
- Vooreerst brengt een grotere vraag tevens een reactie naar verhoogde exploratie en investering in nieuwe bronnen teweeg waarbij, zoals hoger gemeld, reeds beduidende hoeveelheden heden voorzien worden ter beschikking te zijn indien nodig;
- Ten tweede kan, zoals reeds in Nederland uitgevoerd, overgegaan naar een circulaire economie van het uranium (en gecreëerde nucleaire materialen) waarin heropwerking en recyclage van het uranium alswel het gecreëerde plutonium wordt voorzien en reeds, in huidige reactoren, toelaat tot een economie van zo'n 20% in benodigd natuurlijk uranium;
- De introductie van snel-spectrum reactoren (FR) laat toe om het plutonium doch veelal ook het verarmd uranium komende van eerdere aanrijking van natuurlijk uranium te hergebruiken en om te zetten en bruikbare splijtstof. Op deze manier bekomen we een zowat onuitputtelijke hoeveelheid nucleair materiaal welke als splijtstof kan worden gebruikt en dit voor duizenden jaren. De kennis en reeds gedegen ervaring is er reeds met deze kerncentrales zoals in Frankrijk (Phénix en Superphénix) alswel Russische Federatie (BN-600 en BN-800) alsook Japan, China en Indië waar tevens lange R&D werd ondernomen in deze reactoren door heel wat landen. Nederland was hierbij tevens partner in het Kalkar project welke de realisatie van dergelijke reactor bewerkstelligde doch om socio-politieke redenen werd beëindigd;
- Er is tevens nog de mogelijkheid om op termijn te schakelen naar het gebruik van thorium. Thorium is zowat 3 à 4 maal beschikbaar vergeleken met natuurlijk uranium doch evenwel eerder exploiteerbaar in combinatie met andere rare metalen extracties. De omschakeling naar thorium in specifieke reactoren waaronder gesmolten zout reactoren zou hierbij nogmaals meerdere millennia aan kernenergie opleveren.

Het is van belang op te merken dat de heel beperkte hoeveelheid aan splijtstof welke benodigd wordt in kerncentrale en waarbij dus de elektriciteitskost van kernenergie slechts voor enkele % in de totale kostprijs waar zelfs een verdubbeling van de natuurlijk uranium prijst zicht vertaalt in zo'n 5% toename in elektriciteitsprijs. Dergelijke grote prijs-inelisticiteit voor natuurlijk uranium maakt tevens dat de voorheen gemelde opties naar meer geavanceerde splijtstofcycli economisch meer haalbaar zijn dan bijvoorbeeld de koppeling van kolen/gas-centrales aan koolstof opvang en stockage en dit omwille van de beduidend kleinere volumes aan natuurlijk materialen benodigd in kernenergie.

Heel wat van de geavanceerde nucleaire energie-systemen leiden tot een 5 tot 15% elektriciteits-kost toename waar zelfs de meest geavanceerde technologieën inclusief zogenoemd afscheiding en partitie van nucleaire nucliden zou leiden tot ca 25% toename aan productie-kost.

Recycleerbaarheid als onderdeel van een circulaire economie is uiteraard van groot belang waar figuur C.6 aanduidt dat de energie-technologieën allen een hoge graad aan recycleerbaarheid van materialen inhoudt of moeten inhouden (omwille van ecologische impact). Offshore winde en zonnepanelen kunnen hier heel hoog scoren doch zijn heden de benodigde installaties nog niet (voldoende) voorhanden.

Figuur C.6 Recycleerbaarheid van materialen

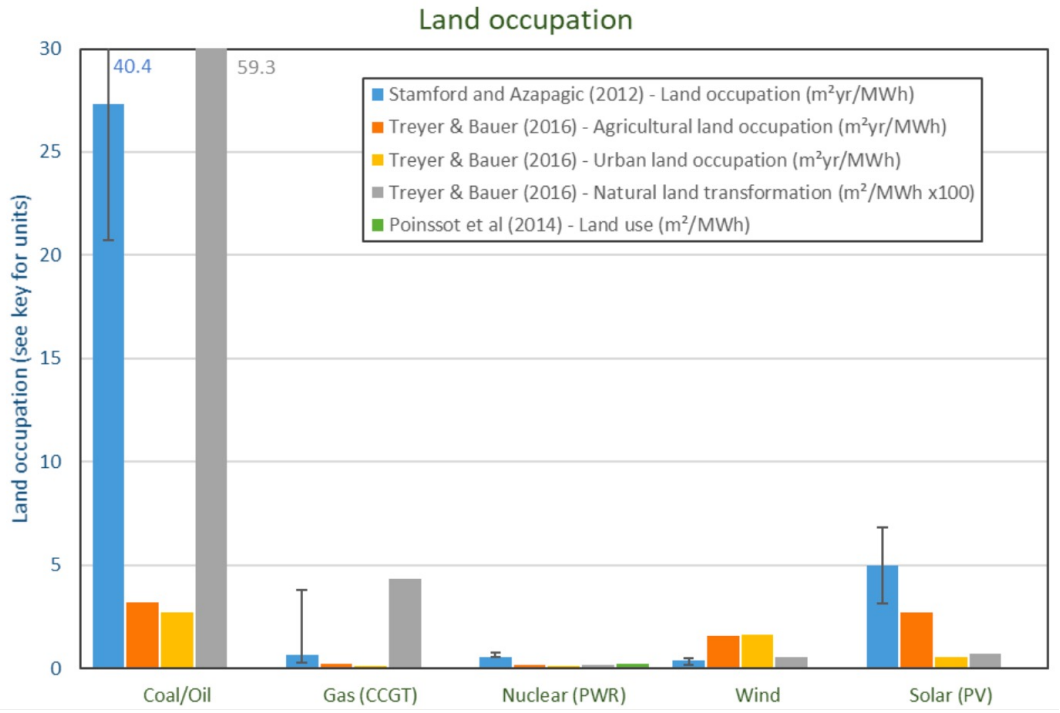



## C.5 BENODIGDE LAND-OPPERVLAKTE

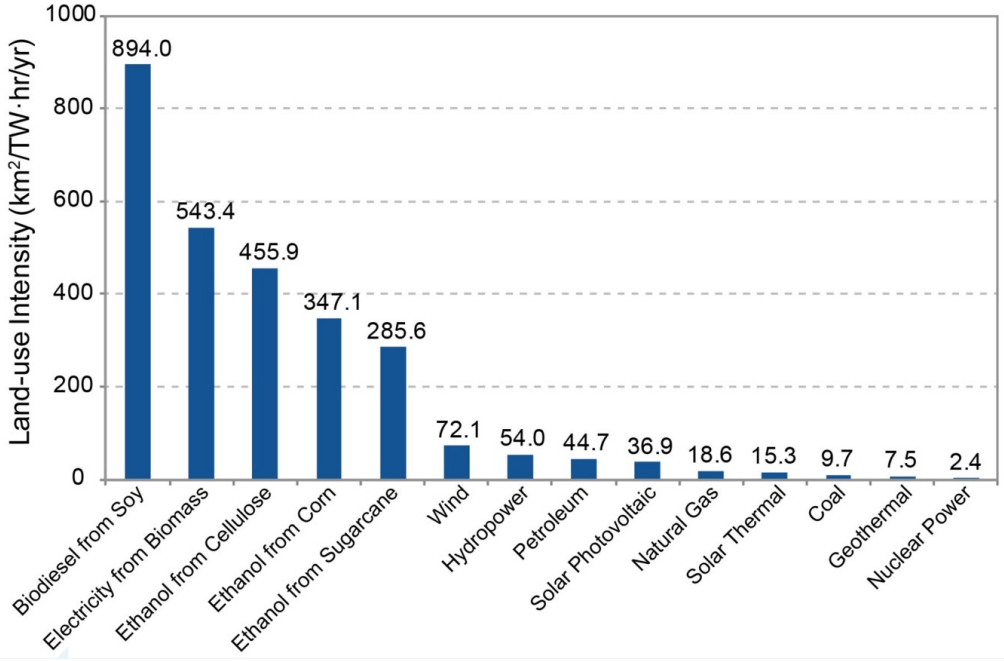
De hoge energie-dichtheid van kernenergie leidt tevens tot een heel beperkte land-oppervlakte welke door een kerncentrale en aanverwante installaties wordt benodigd. En dit zelfs indien incident/accident scenarios worden in rekening gebracht. De figuren C.7 en C.8 brengen hieromtrent een samenvatting van verschillende studies.

Voor de in dit rapport vermelde Mini-SMRs vertaalt zich dit in een nucleaire zonde ter grooteorde van een voetbalveld en voor SMRs in zowat 5-tal voetbalvelden waar zelfs voor grote kerncentrale de hoeveelheid land heel beperkt blijft.

Figuur C.7 Land-oppervlakte noden voor energie-



Figuur C.8 Land-gebruik voor verschillende technologieën

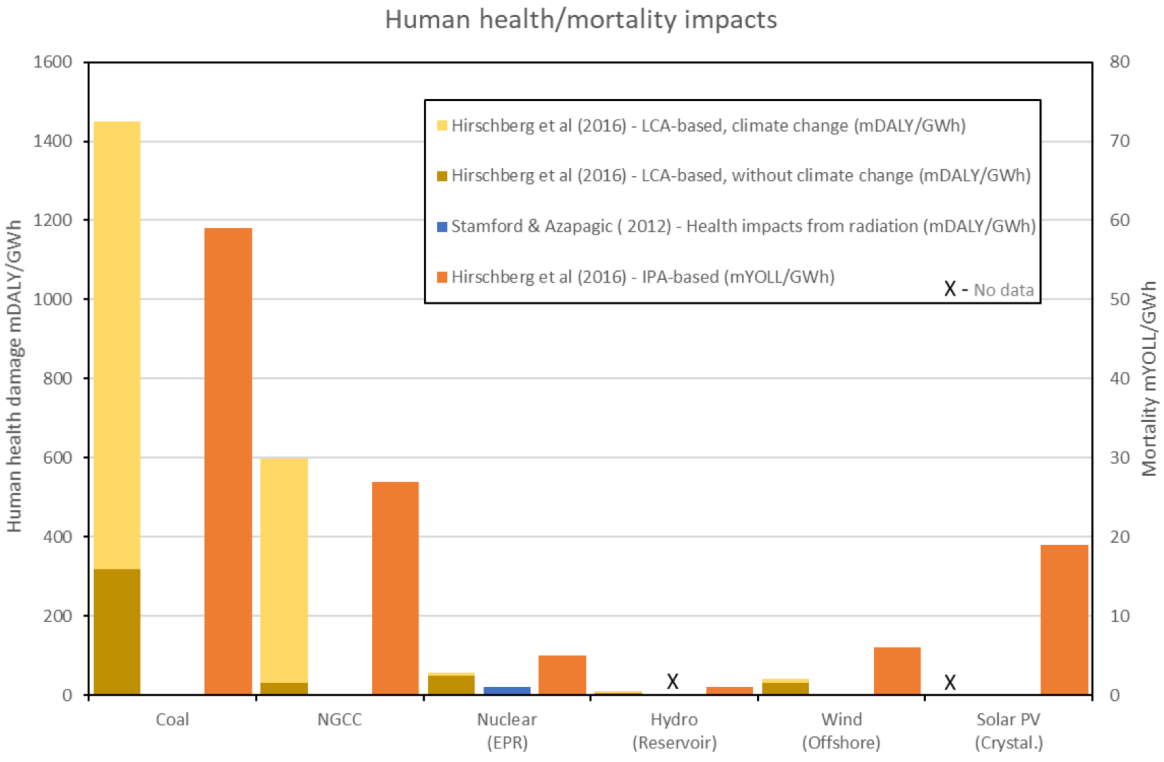



## C.6 VEILIGHEID

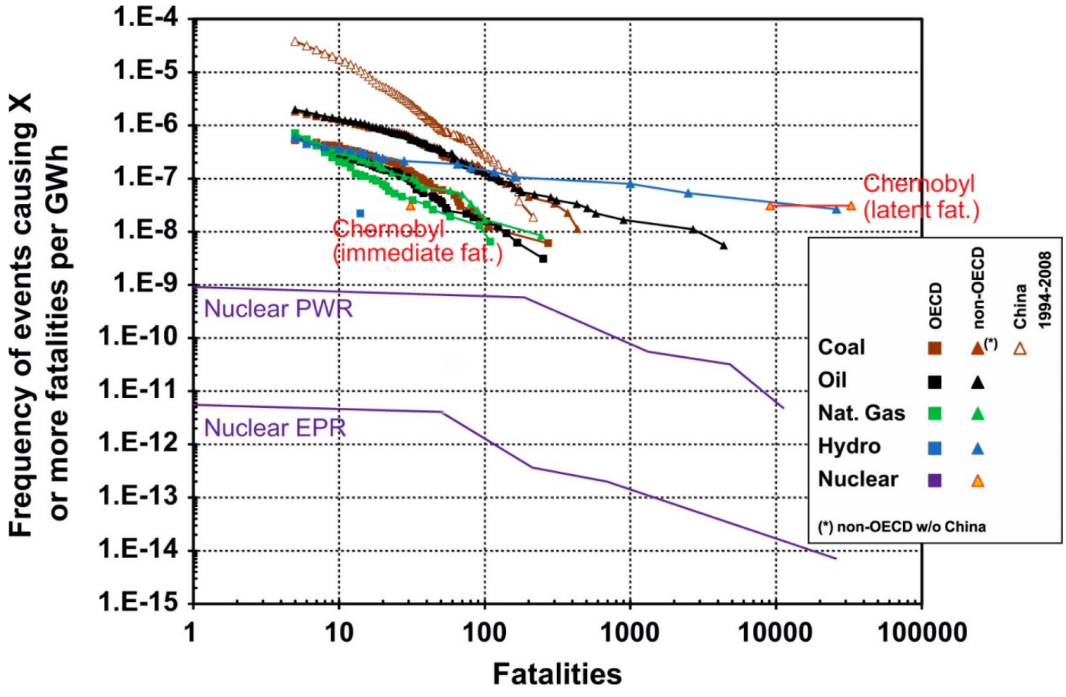
De veiligheid is uiteraard een cruciaal gegeven en zeker zo voor kernenergie. Verschillende studies werden hieromtrent uitgevoerd waarbij figuur C.9 hieromtrent een samenvatting brengt, i.e.:

- Kernenergie vertoont een heel lage gezondheidsimpact en mortaliteit waarbij waterkracht hierbij het best scoort.
- Qua fataliteiten ten opzichte van de frequentie (zie figuur C.10) van voorkomen zijn de fossiele brandstoffen omwille van hun ontginning de meeste fatale technologieën waarbij kernenergie een heel lage frequentie hebben doch kunnen gepaard gaan met een grotere fataliteit. De recentere kerncentrale-ontwerpen zoals EPR alsook SMRs voorzien, mede gezien nieuwe inzichten om nog hogere veiligheids-objectieven te behalen, voorzien in een beduidende daling in frequentie maar heel belangrijk in een structureel kleinere risico op fataliteiten.
    - De zogenoemde exclusie-zone, zelfs in accident scenarios, voorziet dat een ongevalszone beperkt blijft tot de interne structuur van de kerncentrale zelf alswel de evacuatiezone beperkt blijft tot de terreinen van de kerncentrale en geenszins omliggende terreinen dienen geëvacueerd te worden.

Figuur C.9 Gezondheid en mortaliteit impact kan energie-technologieën



Figuur C.10 Zogenoemd farmer curve van fataliteiten versus hun frequentie van verwacht voorkomen




Source Hirschberg et al [3.5-1]

## C.7 ECONOMIE VAN KERNENERGIE

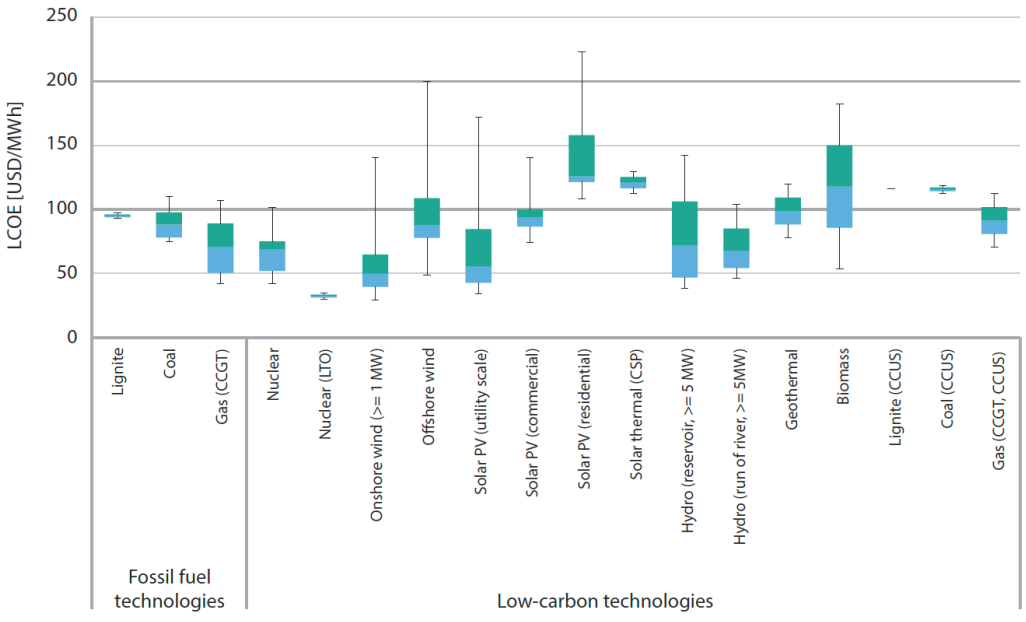
De elektriciteits-productie kost voor verschillende energie-technologieën wordt door het OESO Internationaal Energie Agentschap geanalyseerd en gepubliceerd als het « Projected Cost of Generating Electricity » [6] Figuur C.11 toont hier het voornaamste overzicht waar :

- Bedrijfsduurverlenging van bestaande kerncentrales als de laagste productie kost wordt genalyseerd
- Nieuwbouw kerncentrales heel competitief kunne zijn te vergelijken met gasgestookte centrales alsook grote offshore wind installaties net zoals waterkrachtcentrales alsmede grootschalige industriële zonnepaneel-installaties.

Niet alleen deze levelized cost is en indicator doch meer en meer tevens de waarde-gecorrigeerde levelized cost waar tevens rekening wordt gehouden met de systeemkosten welke door een energie-technologie wordt geïnduceerd in het elektriciteits-systeem.

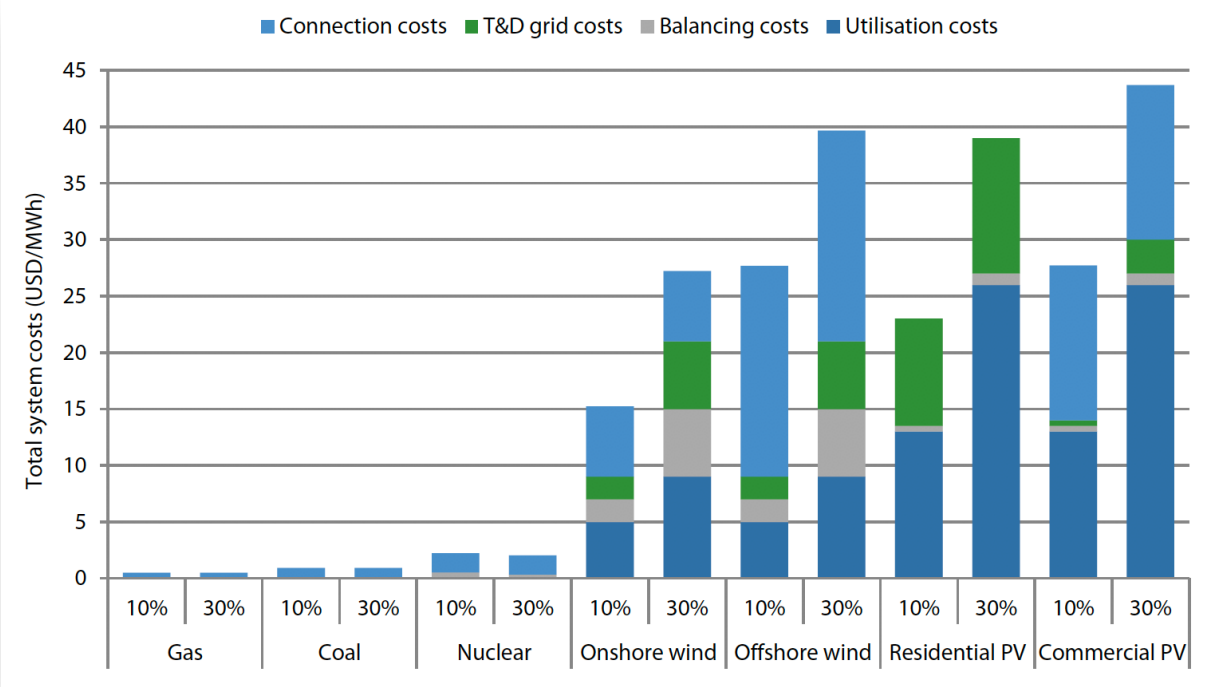
Dergelijke systeemkosten worden in figuur C.12 weergegeven waarbij deze dus voornamelijk omwill van het intermitterend karakter van zon en wind energie beduidend toenemend aangezien deze elektrciteit dient ondersteund met back-up capaciteit wat meestal gas-centrales betreffen. Dergelijke nood is er niet voor regelbaar vermogen zoals gas of kolen-gestookte centrales of kernenergie (alsook waterkracht).

Figuur C.11 Levelised cost for electricity generation




Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.

Figuur C.12 Systeem-kosten voor verschillende energie-technologieën




De competitiviteit van kernenergie hangt niet alleen van kernenergie-specifieke factoren doch evenals van markt-context

- Lokale markt-condities en energie-systeem compositie
- Financiële schemas voor energie investeringen
- Expertise and infrastructuur beschikbaarheid en maturiteit
- Systeem kosten dienen geheel geïntegreerd in energie beleid (zoals weergegevens in figuur 38)
- Naast kosten tevens rekening houden met risico's
  - Deze risico's kunnen heel belangrijk zijn, zoniet hoger dan de kosten
  - Financiële evaluatie van energie investeringen hangt meer en meer af van de financiële risicos en hoe deze te beheersen

**Deze addendum beoogde geen volledigheid doch een beknopt overzicht te brengen van voornaamste elementen uit een levenscyclusanalyse en hierbij, in de context van dit rapport, louter bedoeld als informatie om de technisch-economische elementen omtrent kernenergie aan te brengen.**

Meer informatie kan de geïnteresseerde lezen vinden in:

- United Nations Commission for Europe, "Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Lice-Cycle Assessment of Electricity Sources", March 2022, Geneva, Switzerland
- Een international referentie omtrent LCA betreft Paul Scherrer Institute in Zwitserland
- In Nederland voert onder andere TNO LCA-studies uit

## C.8 REFERENTIES


1. Commision, E. (2022, 07 15). Strategic Environmental Assessment - SEA. Opgehaald van European Commission: https://ec.europa.eu/environment/eia/sea-legalcontext.htm
2. Center, E. C.-J. (2021, 03 29). Nuclear Energy Assessment. Opgehaald van EC-JRC: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment_en.pdf
3. European Commission - Scientific Committe on Health, E. a. (2021, 06 29). SCHEER review of the JRC report on Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation'). Opgehaald van SHEER REview of the JRC Report on Technical Assessment of Nuclear Energy: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/210629-nuclear-energy-jrc-review-scheer-report_en.pdf
4. EdF. (2022, 07 14). Analyse Cycle de Vie du kWh nucléaire d'EDF. Opgehaald van EdF: https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/notre-vision/analyse-cycle-de-vie-du-kwh-nucleaire-dedf
5. Centraal Bureau Statistiek. (2022, 07 14). CBS. Opgehaald van Hoeveel rijden personenauto's?: https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/verkeer-en-vervoer/verkeer/verkeersprestaties-personenautos
6. OESO IEA. (2022, 07 14). Projected Costs of Generating Electricity. Opgehaald van OESO Internationaal Energie Agentschap: https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020

# Regelgevende context voor SMRs

Deze addendum behandelt de regelgevende context voor SMRs aangezien dit een onderwerp is welk heden uiteraard als een heel belangrijk aspect wordt beschouwd met oog op hun realisatie alsook met de vraag naar meer harmonisatie op internationale schaal voor dergelijke regelgeving.

Het addendum is opgemaakt in engelse taal gezien de internationale context alsook dat deze text als referentie kan beschouwd worden door en voor verschillende regelgevende instanties.

## D.1 NUCLEAR SAFETY IN THE NETHERLANDS – THE AUTHORITY FOR NUCLEAR SAFETY AND RADIATION PROTECTION (ANVS) SAFETY GUIDELINES

Reference [1] describes the current licensing policy of the Nuclear Safety and Radiation Protection Authority (ANVS) and provides, among other things, an overview of the related regulatory documents. The document addresses the following issues: Chapter 1 deals with the purpose and field of work of the ANVS and the organization of the granting of permits. Chapter 2 describes the legal framework within which the ANVS performs its tasks. Chapter 3 outlines the guiding principles that the ANVS applies when granting permits. Chapter 4 deals with the type of permits, the content and structure of these permits and the permit decision. Chapter 5 describes the working method of the ANVS regarding testing and assessment. Chapter 6 outlines the procedures involved in the granting of authorisations. Chapter 7 is about evaluating and justifying. The most important legal framework for nuclear safety and radiation protection is the Nuclear Energy Act (KeW), as last amended in 2009 (Stb.[i] 1963, No. 82) and the regulations based on it. This legislation and the permits based on it constitute the legal guarantee of nuclear safety and radiation protection. The Nuclear Energy Act is a framework law that comprises approximately 80 articles. The most important instrument of the Nuclear Energy Act is a licensing system. The KeW indicates for which activities a Nuclear Energy Act permit is required.

- Article 15(a): operations with fissile materials and ores, namely: permits for transport, possession, introduction or cause to be brought into or out of Dutch territory or the disposal of fissile materials.
- Article 15(b): various nuclear installations, namely: permits for erecting, putting into service, keeping in service, decommissioning, decommissioning or modifying an establishment in which nuclear energy can be released, fissile materials are manufactured, processed or processed or fissile materials are stored.
- Article 29: operations with radioactive substances, namely: permits for preparing, transporting, possessing, applying, bringing or having brought into or out of Dutch territory, or getting rid of radioactive substances.
- Article 34: the use of appliances (prohibition of appliances): the permit requirement is not in the Kew, but is based on the Decree on basic safety standards for radiation protection.
- Article 67: the implementation of Euratom regulations, the necessary licensing system is laid down in the Decree on the import, export and transit of radioactive waste.

Where the Nuclear Energy Act is relatively compact, the regulations based on the Nuclear Energy Act are extensive. General administrative measures, ministerial regulations and a number of generally effective decrees and ANVS regulations are based on the Nuclear Energy Act. In addition, the law contains a large number of delegation provisions. On the one hand, these are intended to elaborate the (basic) standards included in the law that, due to this norm-setting character, also have significance for the granting of permits. This includes (but is not limited to):

- Decree on nuclear installations, fissile materials and ores (Bkse).
- Decree on basic safety standards for radiation protection (Bbs).
- Decree on the transport of fissile materials, ores and radioactive substances (Bvser).
- Decree on the import, export and transit of radioactive waste and irradiated nuclear fuels (Biudrabs).
- Regulation on basic radiation protection safety standards (Rbs).
- ANVS Regulation on basic safety standards for radiation protection (Vbs).
- Regulation radiation protection occupational exposure.
- Nuclear safety regulation for nuclear installations.
- Decree on the reimbursement of the Nuclear Energy Act.

i Stb. = Bulletin of acts, orders and decrees

The applicable nuclear legislation is also presented within the reference OECD/NEA Nuclear Legislation in OECD and NEA Countries – Netherlands and in particular the section on "Licensing and inspection, including nuclear safety" [2].
The reference [3] "Handleiding VOBK", delivered in October 2015 by the Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS), presents the Safety Guidelines which set out the Dutch Safety Requirements (DSR) for the safe design and operation of light water-cooled nuclear reactors. The reference provides guidelines to support the preparation of a licence application, as required under the Nuclear Energy Act (cf. above).

These Safety Guidelines also serve as a reference document to which authorized parties can turn for information about the latest developments and insights relevant to the safety of nuclear reactors even if the reactor is not of the light water type, and should be followed on an analogous basis[i].

As indicated explicitly, the Safety Guidelines do not have the status of (ministerial) Regulations and do not therefore define any legal requirements, nevertheless licence applications will be assessed on the basis of their safety requirements, and this is why it is considered that its content is essential to define the framework of the task materialized by this document.

Following the reference [3], the requirements are consistent with the safety standards of the International Atomic Energy Agency (IAEA - SF-1 Fundamental Safety Principles [4], Specific Safety Requirements 2/1 [5][ii] and 2/2 [6][iii] , etc.) and with the positions of the Western European Nuclear Regulators Association (WENRA –[7]) and may, "where applicable and necessary", serve as a basis for formulating the conditions attached to licenses for new reactors. The main principles of the WENRA have been incorporated into the DSR (e.g. the fundamental role of the Defense in Depth – DiD[iv] ) and key commonly accepted objectives are adopted (e.g. Core-melt frequency not exceedingly once in a million years and the practical elimination of early and large releases). The lessons from the Fukushima disaster and the WENRA recommendations have been taken into account.

As a matter of example, the content of Table D.1, which define the approach for the definition of the Safety Case of a nuclear installation and the implementation of the DiD, is identical to the one presented by WENRA [7].

The text indicates that the Safety Guidelines apply to the design and operation of light water-cooled nuclear reactors, however a "graded approach" can be adopted for application to other installations. The reference refers explicitly to research reactors but it seems reasonable to consider that the indication can be extrapolated to the SMR.

---

i Despite the fact that, as indicated by the reference [3], the Safety Guidelines "should be updated once every five years, and more often if the need arises", as far as the authors knows, no updated versions have been published since 2015.
ii The Revision 1 of this reference was not yet available in 2015 but the consistency is globally guaranteed
iii The Revision 1 of this reference was not yet available in 2015 but the consistency is globally guaranteed
iv DiD : The safety of nuclear reactors is assured on the basis of the defence-in-depth concept: a safety concept involving multiple levels of defence, intended to prevent accidents or minimize their impact. The concept involves the integrated deployment of structural, technical and organizational systems

Table D.1. The defense in depth concept as suggested by

| Levels of defence in depth | Associated plant condition categories | Objective | Essential means | Radiological consequences |
|---|---|---|---|---|
| Level 1 | Normal operation | Prevention of abnormal operation and failures | Conservative design and high quality in construction and operation, control of main plant parameters within defined limits | Regulatory operating limits for discharge |
| Level 2 | Anticipated operational occurrences | Control of abnormal operation and failures | Control and limiting systems and other surveillance features | |
| Level 3 | Level 3.a<br>Postulated single-failure initiating events | Control of accident to limit radiological releases and prevent escalation to core-melt conditions | Safety systems, accident procedures | No off-site radiological impact or only minor radiological impact |
| | Level 3.b<br>Postulated multiple-failure events | | Additional safety features and accident procedures | |
| Level 4 | Postulated core-melt accidents | Control of core-melt accidents to limit off-site radiological releases | Complementary safety features and accident procedures | Limited protective measures in area and time |
| | Release of significant amounts of radioactive material | Mitigation of radiological conse-quences | Off-site emergency response<br>Intervention levels | Off-site radiological impact necessitating protective measures |

The text of [3] indicates that "human activity deliberately intended to threaten a nuclear facility or its processes (i.e. the security aspects) are outside the scope of the DSR". Such matters must obviously be addressed but are regulated by the "Nuclear Facilities and Fissionable Materials Security Regulation" (Ref. [8]).

Security and safeguards are in charge to the ANVS which oversees the security of nuclear facilities and radioactive materials. Concerning more specifically the safeguards, the ANVS checks to ensure that nuclear energy, nuclear materials and associated information are not being used for non-peaceful purposes. Sections 7.1 and 7.2 of the reference [9] describe qualitatively the approach of ANVS to address such concerns. The detailed analysis of the Regulation (Ref. [8]) is out of scope of this report but the concerns related to security, as well as those related to safeguards, are succinctly addressed below (cf. sections D.2.6, D.2.7 and D.5).

The Safety Guidelines [3] advises to apply goal- (i.e. objective)-based requirements as far as possible, rather than means-based requirements . Concerning such requirements it is interesting to note that, following the logic that enable new nuclear reactors to satisfy more ambitious objectives than existing reactors, the ref. [3] contains a number of requirements more stringent compared to those applicable for the reactors actually in operation; those regarding radiological objectives reflect the increased capabilities associated with technological progress and the recommendations made by the WENRA. As a matter of example, the table D.2 links the maximum allowable doses to the frequency with which accidents without core melt which are liable to occur.

Table D.2. Frequencies of occurrence and maximum allowable doses for accidents without core-melt.

| **Occurrence frequency (F) per year8** | **Maximum allowable effective dose per person (over a 70-year period)** |
|---|---|
| $F \geq 10^{-2}$ | 0.1 mSv |
| $10^{-2} > F \geq 10^{-3}$ | 1 mSv |
| $F < 10^{-3}$ | 10 mSv |

N.B. This Table D.2 is a practical application of the so called iso risk "Farmer curve" where the greater the probability of an accident without core melt occurring, the lower the dose associated with such an accident shall be.

For accidents with core melt it is essential to maintain the integrity of the containment. The design shall incorporate complementary features to limit the consequences of such accident. Hence, the containment and the core melt control systems shall be designed to minimize releases during the core-melt process. The requirements summarized in Table 3 shall be met.

The Figure D.1 shows the Zones and intervention levels for postulated core-melt accidents.

As indicated by the text "*The zones specified in the requirements are intended for use during the design of a new reactor, not in emergency response*[i]*. The National Plan for Nuclear and Radiological Emergencies ("Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten") and the regional emergency response plans specify the action to be taken in the event of an accident and the associated preparation zones. Hence, an applicant shall demonstrate that, in the event of any postulated core-melt accident, the requirements will be met. The analyses shall of course take account of the local weather conditions*". Quantitative indication on applicable objectives are provided by the reference [10].
Finally, an essential principle adopted by the Guidelines [3] is that of "Practical Exclusion" of accidents leading to early and/or large releases. Such accidents have a specific status within the safety approach for the design and the assessment of new concepts. The practical exclusion criterion is satisfied if:

- the design makes such accidents physically impossible, or
- the probability of such an accident can be determined with a high degree of reliability as sufficiently small such that this accident is deemed highly unlikely.

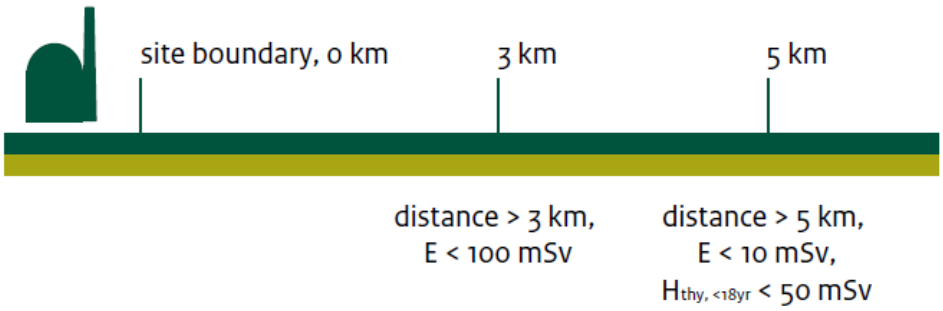
The Guidelines [3] point out that "*In order to minimize uncertainty and ensure that the facility is sufficiently robust, the practical exclusion criterion should preferably be satisfied by making accidents of the relevant type physically impossible*".

i "not in emergency response": the statement deserves explanation for on one side the figures are presented as being applicable for "postulated core-melt accidents" and, on the other side, not applicable in "emergency response". The applicable rules and the actions to be taken in the event of an accident as well as the associated preparation zones for emergency response at the actual site, are set in the National Plan for Nuclear and Radiological Emergencies ("Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten") and the regional emergency response plans.

Table D.3. Design requirements for a core-melt accident that cannot be practically excluded.

| Protective action | Evacuation zone (< 3 km) | Sheltering zone (< 5 km) | Beyond sheltering zone |
|---|---|---|---|
| Permanent evacuation | No | No | No |
| Evacuation | May be needed | No | No |
| Sheltering | May be needed | May be needed | No |
| Iodine prophylaxis[10] | May be needed | May be needed | No |

Figure D.1. Zones and intervention levels for postulated core-melt accidents.




## D.2 INTRODUCTION OF SMRS IN THE PROVINCE OF LIMBURG

Considering the panoply of SMR concepts offered internationally, one can consider that there are no "a priori" prohibitive characteristics that would prevent the installation of SMR in the province. Of course, the Technology Readiness Level (TRL) of the different technologies and or concepts is not the same but, given the relatively stretched schedule, it is reasonable to think that, when the time comes, most of the technologies will be available for implementation. The problem arises rather in terms of optimization, i.e. what is the best technology for the province. The choice must be made on the basis of criteria and metrics of different nature: Expression of needs (i.e. objectives of use), economy, safety, etc. (the details of the Gen IV objectives can serve as a framework, be taken up and adapted: Sustainable Nuclear Energy, Competitive Nuclear Energy, Safe and Reliable Systems, Proliferation Resistance and Physical Protection). In this regard, it is essential that the province quickly draws up and publishes a "Cahier des Charges" which takes up and details all of these criteria.

Below are general considerations for SMRs; they address on the one hand the requirement of harmonization of regulatory approaches to facilitate the deployment of these concepts and, on the other hand, some specific aspects of safety, security and safeguards. Beyond the generic information, it is important to consider that the selection of possible technologies for the province of Limburg cannot ignore these aspects because, in their practical implementation, the role of the customer / operator is essential.

### D.2.1 THE SMALL MODULAR REACTORS – SMR – GENERAL

According to the International Atomic Energy Agency (IAEA) [International Atomic Energy Agency, [cf. the Web page "IAEA Small Modular Reactors: flexible and affordable power generation", (available at https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors)] and Nuclear Energy Institute [cf. the Web page "Nuclear Energy Institute (NEI), Small Modular Reactors. Nucl. Energy Inst.", a Small Modular Reactor (SMR) is defined as "*a nuclear reactor, generally 300 MWe equivalent or less, designed with modular technology using module factory fabrication, pursuing economies of series production and short construction times.*"

According to the IAEA, "*Global interest in small and medium sized or modular reactors has been increasing due to their ability to meet the need for flexible power generation for a wider range of users and applications and replace ageing fossil fuel-fired power plants. They also display an enhanced safety performance through inherent and passive safety features, offer better upfront capital cost affordability and are suitable for cogeneration and non-electric applications. In addition, they offer options for remote regions with less developed infrastructures and the possibility for synergetic hybrid energy systems that combine nuclear and alternate energy sources, including renewables*". Many SMRs can be made in factories and transported by truck or rail.

SMR designs incorporate innovative approaches to achieve simplicity, modularity and speed of build, implementation of passive safety features, proliferation resistance, and reduced financial risk. They are envisaged to meet various needs ranging from electricity production to cogeneration with, for example, non-electrical applications (industrial heat, production of fresh water, production of hydrogen, etc.). In general, they can represent a suitable solution for isolated regions or regions with limited infrastructure.

Increased performances in terms of safety are highlighted by designers thanks, among other things, to favorable intrinsic characteristics and or the use of passive systems. Simplifying the design and limiting the construction time through modular construction, standardization and the series effect can, in the opinion of the designers, lead to a reduction in costs to achieve economic competitiveness. Their small size leads to considering modular plants with the installation of several modules and the pooling of certain support systems.

Interesting insights to be considered within the framework of preselection phase can be found within the references [11] (Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors) and [12] (Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors). Indications concerning the practical deployment of the SMR (i.e. the Technology Roadmap) are available within the reference [13]. Following this reference The driving forces in the development of such reactors are the following:

- Meeting the need for flexible power generation for a wider range of users and applications.
- Replacing existing ageing fossil fuel fired power plants or enhancing a grid which contains more intermittent renewables. This may be feasible technically but a challenge from the perspective of the economics involved.
- Enhancing safety performance through inherent and passive safety features.
- Offering better financial affordability.
- Ensuring suitability for non electric applications.
- Providing options for remote regions with less established electricity grid infrastructures.
- Offering possibilities for synergetic energy systems that combine nuclear and alternative energy sources.

## D.2.2 SMRS AROUND THE WORLD

Dozens of concepts are proposed throughout the world (cf. the IAEA ARIS database[i]). Details concerning more specifically SMR are provided by the reference [14]. Table 6 presents the key characteristics of the concept described within the reference[14].

A few SMRs are in operation, e.g. the Akademik Lomonosov, a floating barge equipped with two KLT-40S reactors of 35 MWe each (Pevek, Siberia, Russian Federation), as well as the HTR-PM, twin HTGR reactors with 200MWe in total (Shidao Bay, China), a few others are at an advanced design stage (USA, China, South Korea, etc.)). The American Nuscale reactor, of the pressurized water reactor (PWR) type, which can comprise up to 12 independent 50 MWth modules, was recently certified in the United States and Canada. In France, EDF is developing a reactor concept called NUWARD of the PWR type, which includes higher power modules (540 MWth), intended for export.
Many other concepts, including concepts based on technologies other than light water technologies, are under development (molten salt, lead, sodium reactors, high temperature reactors, etc.). The level of maturity of these concepts generally remains below the level of maturity expected to initiate an authorization process . The reference [15] briefly lists the main differences that characterize these concepts compared to high-power reactors:

1. Reduced power, modular manufacture and construction.
2. Reduced capital costs and operating budgets.
3. Increasing automation and remote operation.
4. Advanced technologies, fuel materials , fuel cycles.
5. Greater flexibility in siting and deployment options.
6. Wider range of developers and business models.

## D.2.3 SMRS AND THE 3S APPROACH: SAFETY, SECURITY, SAFEGUARDS

The deployment of SMRs is partially conditioned by the strengthening of reflection on what is considered important, and even essential, for the future of nuclear technology, namely what is qualified with the acronym 3S - Safety , Security & Safeguards – and for which it is recommended an integrated and simultaneous treatment of these three domains in order to achieve what is called "Safety by Design", "Security by design" and "Safeguard by design", i.e. the integration, at the design level, of all the challenges generated by these three areas and their mutual interactions/interfaces.

It is interesting to point out that among the conclusions of the reference [16] there is the recommendation to widen the scope of the WENRA Safety Objective O5 which address the Safety - Security interface to also cover Safeguards, leading to the 3S approach (cf. also section D.3.6)

i As indicated by the IAEA web site, "Member States, both those considering their first nuclear power plant and those with an existing nuclear power programme, are interested in having ready access to the most up-to-date information about all available nuclear power plant designs, as well as important development trends. The IAEA's Advanced Reactors Information System (ARIS) - developed to meet this need - is a web-accessible database that provides Members States with balanced, comprehensive and up-to-date information about advanced nuclear plant designs and concepts. ARIS includes reactors of all sizes and all reactor types, from evolutionary nuclear plant designs for near term deployment, to innovative reactor concepts still under development. ARIS can be used conjointly with the IAEA's document "Nuclear Reactor Technology Assessment for Near Term Deployment" (NE Series NP-T-1.10) to enable Member States to perform an informed reactor technology assessment."

Section D.5 develops the subject by giving indications which make it possible to appreciate the importance of the subject with, in particular, the requirement of a commitment from the customer / operator both for the selection of the technology as well as once the choice of the concept has been finalized.

## D.2.4 HARMONIZATION OF THE REGULATORY FRAMEWORK AND THE PARADIGM SHIFT

The harmonization of the regulatory context is one of the essential conditions and universally recognized for the deployment of SMRs on an international scale and this is why it is important that the potential customer / operator, who will have to select among the offer, be aware about the progress of the reflection.
Efforts for this harmonization have been underway for several tens of years and significant progress has been made (e.g. with the IAEA safety standards) but the process has not yet been completed.

In parallel with work carried out on a permanent basis, for example by the Reactor Harmo¬nization Working Group (RHWG) of WENRA, the need for a "paradigm shift" has been recognized recently, cfr. CNSC President Ms. Rumina Velshi " *…I think the time is now to think boldly and look critically at regulatory frameworks and be open to the need to re-engineer them. It may be time for a paradigm shift in the regulatory space.*"

All the stakeholders involved in nuclear technologies are engaged in an effort to improve the conditions for harmonization on a worldwide scale. A good level of consensus already exists on the applicable generic terminology, on the Safety Objectives and on the Principles, also generic, but differences still exist as regards to the interpretation of their content and the ways for their implementation (e.g. Notion of Risk; defence in depth content & implementation, etc.). The need for a deepest technology neutral approach for the safety related design & assessment (i.e. independent from the technology, the size, the type of installation, etc.) is pointed out to go further compared with the currently available set of approaches and requirements.

The objective – extremely ambitious – is to build a universally accepted paradigm for the safety / security / safeguards of nuclear installations, that is to say a "model of thought" which organizes and directs the analysis. The development of a new paradigm necessarily involves both compromises on current positions and, where appropriate, the introduction of new tools to facilitate this development.

Obviously, the reflection primarily concerns designers and regulators, but potential customers /operators must follow the work in progress to understand its objectives, challenges and progress with a view to a pertinent evaluation/ selection among the concepts available on the market.

## D.2.5 SAFETY REQUIREMENTS FOR SMRS

A recurring topic of debate concerns the safety requirements applicable to SMRs; in the opinion of some stakeholders, the safety requirements should be adapted (i.e. reduced) due to the intrinsic safety characteristics inherent in these concepts.

In the opinion of the author, beyond the harmonization of the requirements mentioned in the previous paragraph, there is no reason to respond favorably to this request because this could have negative repercussions, in particular at the level of communication. with public opinion.

On the contrary, for the sake of clarity and transparency, it is advisable to keep the same top tier requirements applicable to all nuclear installations, knowing that the response to these requirements will be made in a specific manner for each of the installations and being aware that the simplification and the intrinsic or passive characteristics of the safety provisions will benefit the safety level, and in particular the robustness of the demonstration. Technology-neutral and goal-based requirements are in agreement with this approach.

That being said, due to their low power and small size, SMRs allow for a variety of design choices, some of which are objectively favorable to safety. However, the implementation of innovative technical solutions, the feasibility and effectiveness of which have yet to be demonstrated, requires a detailed examination in order to assess the possible gains in terms of safety compared to higher power reactors.

Concerning more specifically the safety objectives one can anticipate that the review performed by the WENRA/RHWG [16] (cf. section D.3.6) shows that even though there is a wide variety of SMR designs currently under development, the safety objectives issued by WENRA in 2010 can also be used for SMRs. Meanwhile, WENRA considers these objectives to be the minimum requirement for SMRs; higher safety requirements should reasonably be expected, particularly when considering the potential for such modern technologies to provide significant improvements in safety performance.

Section D.5 provides some details and examples concerning the favorable safety characteristics due to low power to help achieving the Safety by design.

### D.2.6 NUCLEAR SECURITY BY DESIGN

As for all the nuclear installations and as outlined above, the design of SMR should take into account the needs of nuclear security. To fit with the notion of "security by design" (SeBD) the measures required to meet applicable regulatory nuclear security requirements should be integrated into the overall design during the design stage.

As outlined by the reference [17], implementing such approaches may lead to reduced physical protection costs over the lifetime of the nuclear facility, and it may simplify the task of maintaining an effective physical protection system over the lifetime. Further details are given within the section D.5.

### D.2.7 SPECIFIC CHALLENGES IN TERMS OF SAFEGUARDS

The Proliferation resistance is defined as being "*…that characteristic of a nuclear energy system that impedes the diversion or undeclared production of nuclear material or misuse of technology by the Host State seeking to acquire nuclear weapons or other nuclear explosive devices*"[18]. Safeguards provide independent verification that the objective is achieved ("safeguardability", i.e. the aptitude to facilitate the design of nuclear safeguards is one aspect of proliferation resistance). Further details are given in section D.5.

As for the safety and the security discussed above the customer / operator play an essential role in guaranteeing the safeguardability of the installation.

## D.3 INTERNATIONAL DEVELOPMENTS IN (HARMONIZATION) REGULATIONS

The following sections succinctly review the most significant documents which summarize the reflections and recommendations of international bodies concerning SMRs, both on the side of manufacturers and on the side of regulators:

- IAEA,
- OECD/AEN,
- Electric Power Research Institute (EPRI) Utility Requirements Document (URD) and NRC,
- European Utility Requirements Organization and WENRA,
- Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP).

Current activities, objectives and timing are thus discussed.

### D.3.1 IAEA ACTIVITIES FOR THE SMR

The IAEA is heavily engaged for the deployment of the SMR supporting both the designers and the regulators.

A Technical Working Group on Small and Medium Sized or Modular Reactors (TWG-SMR) is operating at the IAEA since 2018. The TWG-SMR provides advice, recommendations and support to the IAEA for the programmatic planning and implementation related to technology development, design deployment and economics of SMRs that can be used for the production of electricity and/or industrial process heat in both expanding and embarking countries. The following areas are covered :

- Research, technology development and innovation;
- Development of generic technical requirements for user countries;
- Technology assessment approaches for advanced SMR designs;
- Reliability, safeguardability, and constructability;
- Codes and design standardization of structures, systems and components;
- Industrialization of SMRs, covering design, engineering, manufacturing and supply chain;
- Site characterization;
- Economic competitiveness, financial considerations, market needs and cost analysis;
- Capacity building for embarking and expanding nuclear countries;
- International cooperation.

Three technical subgroups are operating:

- SG-1: Development of generic user requirements and criteria;
- SG-2: Research, technology development and innovation; codes and standards;
- SG-3: Industrialization, design engineering, testing, manufacturing, supply chain, and construction technology.

A key role is played by the SMR Regulators' Forum, created under the aegis of IAEA in March 2015, which provides enabling discussions among Member States and other stakeholders to share SMR regulatory knowledge and experience. As indicated by the official SMR Regulators' Forum WEB site : "The Forum enhances nuclear safety by identifying and resolving common safety issues that may challenge regulatory reviews associated with SMRs and by facilitating robust and thorough regulatory decisions". The Forum's work is expected to result in:

- Position statements on regulatory issues;
- Suggestions for revisions to or new IAEA documents;
- Information to help regulators enhance regulatory frameworks;
- Reports on regulatory challenges with discussion on paths forward; and
- Suggestions for changes to international codes and standards.

Several documents have been published during the Phase 1 of the activity (2015 – 2017); they present the position of the Forum on generic SMR concerns: the Principles of Graded Approach and Defence-in-Depth and the definition of Emergency Planning Zones.

Upon successful completion of the Phase 1 working groups have been created in the areas of Licensing Issues, Design and Safety Analysis, and Manufacturing, Commissioning and Operations . The corresponding reports are also available. The same groups continue their work for the current Phase 3.

## D.3.2 OECD/NEA ACTIVITIES FOR THE SMR

An important report has been recently published by OECD/NEA to address challenges and opportunities related to the deployment of SMR [2].

The first part of the document is devoted to the factual analysis of the state of the art in terms of SMR development. The report identifies and comments on the two main families of SMR pointing out the different level of maturity:

- the most mature SMR concepts being proposed by vendors are evolutionary variants of light water Generation II and Generation III/III+ reactors (LWR-SMRs) operating worldwide, and these benefit from many decades of operating and regulatory experience. They represent approximatively 50% of the SMR designs under development.
- the other 50% of SMR designs corresponds to Generation IV reactors (Gen IV SMR) that incorporate alternative coolants (i.e. liquid metal, gas or molten salts), advanced fuel and innovative system configurations. While Generation IV-based designs do not have the same levels of operating and regulatory experience as that of LWRs, and additional research is still needed is some areas, they nevertheless benefit from an extensive history of past research and development upon which developers and regulators may draw.

The specific topics covered by these IAEA working groups are:

The Licensing Issues Working Group:

- Key Regulatory Interventions during a Small Modular Reactor Lifecycle
- Potential issues related to the licensing process for a First of a Kind vs Nth of a Kind design
- Licensing of new build projects with multiple module/unit facilities

The Design and Safety Analysis Working Group:

- Multi-unit/Multi-module aspects specific to SMRs
- Considerations in the use of passive and inherent safety features in SMR designs
- Aspects of beyond design basis analysis relevant to SMRs

The Manufacturing, Commissioning and Operations Working Group:

- Manufacturability, supply chain management and commissioning of SMRs
- Collection and Use of Experience in the Lifecycle of Small Modular Reactor facilities
- Conduct of Maintenance in an SMR
- Conduct of Co-activities and Combined Activities on a Multiple Unit Small Modular Reactor Facility Site

The report stresses the fact that to overcome the handicap of the smaller size and the corresponding loss of the economies of scale, the "series construction" will become an imperative. At the same time, the smaller size and the prediction of shorter delivery times could reduce upfront investment needs for SMRs compared to larger reactors with the corresponding lower financial risk for potential customers and investors. Other features that enhance the attractiveness of the SMR value proposition are related to SMR flexibility capabilities (both enhanced load-following and non-electric applications) that could bring system-cost benefits and new market opportunities.
Concerning more specifically the safety aspects (but the considerations can be extrapolated to the 3S (Safety, Security, Safeguards), the document recognizes the need to review the regulatory and legal framework.
The role is outlined of the goverment to support the development and the deployment of SMR through cost-sharing support to selected SMR companies via public-private partnerships and or financial support, as part of the technology portfolio necessary to reach carbon neutrality objective.

The challenges ahead for large-scale SMR deployment are discussed:

- a mass production will allow achieving the economic benefits but the market shall be able to absorb the production and this let thinking that only a small subset of the many designs under development may ultimately be able to establish such a global market. The key role of the harmonization discussed above is stressed.
- SMRs introduce a series of untested innovations that may also lead to additional technology risks. The construction of demonstrators will allow mitigating the risks and increasing the interest from potential customers.
- The supply chain is recognized as being a key factor to ensure the timely availability of factory-fabrication capabilities.
- Lastly – and here also there is a direct relation with the safety concerns - since several of these SMRs attempt to minimise evacuation zones and place the reactors closer to large population centres, additional challenges may arise in terms of public engagement.

The last section discusses the government support and international collaboration identified as being key enablers for SMR deployment. Government support and international collaboration will play a key role especially for the Public engagement, the Construction of FOAK SMR demonstration units and learning, the Harmonisation of licensing regimes and the Development of manufacturing capabilities.

### D.3.3 THE NRC AND THE SMALL MODULAR REACTORS

Within the NRC structured approach and activities there is a clear distinction between SMR-LWR designs and SMR-Non-Light Water designs. For the first, the NRC is engaged in varying degrees of pre-application activities with several SMR designers over the past several years. In August of 2020, the NRC approved a design for an SMR from NuScale Power, LLC.

Table D.4 is a summary of the reactor designers and potential license applicants with whom the NRC has engaged with in pre-application, design certification and standard design approval activities.

More generically, for the SMR and for the Non-Light Water Reactor, Technical and Policy Issues are discussed within the reference [19]:

- Licensing Process Issues for Small Modular Nuclear Reactors
- Issues Concerning Design Requirements for Small Modular Nuclear Reactors
- Operational Issues for Small Modular Nuclear Reactors
- Financial Issues for Small Modular Nuclear Reactors

The Key Documents Concerning Policy, Licensing, and Key Technical Issues of Small Modular Reactors are presented within the Attachment 2 of reference [19].

The document is regularly updated and the table available on their web site lists the open and the resolved issues

Table D.4. Reactor designs for which NRC has engaged standard design approval activities

| Design | Application Type | Applicant |
|---|---|---|
| NuScale DCA | Design Certification | NuScale Power, LLC |
| NuScale SDA-600 | Standard Design Approval SDA-600 | NuScale Power, LLC |
| NuScale NPM-20 | Standard Design Approval (SDA), Pre-Application | NuScale Power, LLC |
| NPM-20 at Idaho National Laboratory Site | Pre-Application for a Combined License | Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) / Carbon Free Power Project (CFPP)<br><br>Licensing Lead: NuScale Power, LLC |
| BWXT mPower™ | Pre-Application | BWXT mPower, Inc. |
| SMR-160 | Pre-Application | SMR, LLC, a subsidiary of Holtec International |
| Clinch River Nuclear Site | Early Site Permit | Tennessee Valley Authority (TVA) |
| BWRX-300 | Pre-Application | GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH) |

## D.3.4 ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI) AND THE SMR

A key product of EPRI is the Utility Requirement Document (URD)[i] that can be used throughout a nuclear power plant project's lifetime – before, during, and after technology selection – to support successful project execution.
In conjunction with the U.S. Department of Energy, the key activity of EPRI's Advanced Nuclear Technology Program concerns the URD which has been expanded to include Small Modular Reactors in order to identify and address the unique attributes associated with SMRs based on light water reactor technology [20].

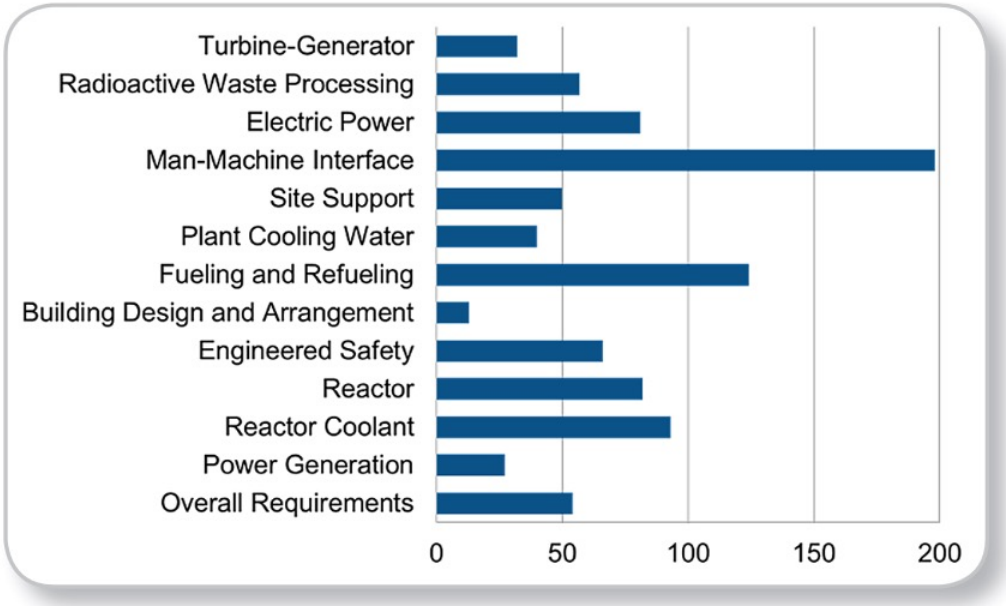
The report [21] covers the scope and content of the URD, the process used to revise the URD to include Small Modular LWR (SMLWR) requirements, a summary of the major changes to the URD to include SMLWR, and how to use the URD as revised to achieve value on new plant projects.

Following the reference [20], much of the content in earlier versions of the URD is applicable to SMRs. "After detailed review of the 40,000 technical and project functional requirements in the URD, EPRI identified 1,243 requirements where changes or clarifications were required to account for the potential unique characteristics of SMRs. For example, the 93 changes in the reactor coolant system section resulted primarily from several unique aspects associated with SMRs, including the use of natural circulation instead of reactor coolant pumps; planned provisions to flood the containment; the presence of fewer components and less piping than conventional designs; new integral steam generator designs; and no in-containment refuelling water storage tanks."

Figure D.2 presents the number of changes by topical area.

[i] The URD is a declaration of owner/operator requirements for new nuclear plants, large or small. It defines owner/operator expectations for organizations creating new plant designs and proposing new projects. It was originally developed in the early 1990s to identify what conditions and plant capabilities would enable industry decision-makers to consider new nuclear in the future.

Figure D.2. Number of changes by topical area in Revision 13 of Utility Requirements Document [20].




## D.3.5 EUROPEAN UTILITIES REQUIREMENTS (EUR) AND THE SMR

Since its establishment in 1991, the European Utility Requirements (EUR) Association has gathered various European utilities with the goal of harmonizing requirements for new mid-and large-size Light Water Reactor designs across Europe and worldwide. The EUR Association has issued several Revisions of a report entitled "the EUR Document" which consists of a comprehensive set of requirements covering the whole Nuclear Power Plant and encompasses safety, performance and competitiveness aspects.

To deal with the increasing interest from its members and stakeholders on SMR technology and considering the EUR members' knowledge based on Light Water Reactor (LWR) technology, and the higher level of technical readiness of some models of Small Modular Light Water Reactors (SMLWR), the EUR Organization has developed "EUR Key Positions" (EUR-KPs) that are currently focused on Small Modular Light Water Reactors (SMLWR) and currently limited to the case of water cooled and land-based SMR. These EUR KPs should be taken into account for designing and assessing SMLWRs to be built in Europe, as a complement of the "EUR Document Revision E" issued in December 2016[i].

The EUR KPs are intended to support interactions with the EUR members' stakeholders. They will be considered in the frame of the next revision of the EUR Document which will be applicable to SMLWRs.

The EUR Chapter 1.5 Revision E2 May 2021 presents the "High-Level Requirements on Small Modular Light Water Reactors" [22].

As indicated by the reference [22], "*the EUR Key Positions should be considered for designing SMLWR to be built in Europe, complementarily with the Volume 2 of the EUR Document; they take into account specific features of SMLWR such as, for example, integrated Reactor Pressure Vessel, passive Safety Systems and, for some of them, a configuration called multi-module Unit. They are intended to support interactions with external stakeholders, such as IAEA, regulators (WENRA, SMR Regulators' Forum), European Commission, non-EUR utilities and vendors*".

The table D.5 shows the list of the EUR 26 Key Positions (KP) on SMLWR. The EUR KPs are formulated in terms of high-level requirements structured by Topics and Technical Items. For the different Technical Items, the high-level requirements are expressed with "shall" or "should" and comments are provided for additional explanations or specific definitions.

i One major objective of Revision E was the harmonisation of the EUR requirements with the new updated international safety standards and Fukushima Lessons Learned., especially with the new WENRA and IAEA texts. The conditions of delivery of the EUR Document (Vol 1, 2 & 4) and the fee to be paid are defined according to the requesting organisation category.

Table D.5. List of the EUR 26 Key Positions (KP) on SMLWR [22].

| Topic A: Safety | Topic B: Systems and Components | Topic C: Performance | Topic D: Operation and Maintenance | Topic E: Cost and Constructability |
|---|---|---|---|---|
| KP 1 – Probabilistic Design Targets<br>KP 2 – Emergency Planning Zone<br>KP 3 – Defence-in-Depth* Approach<br>KP 4 – Complex Sequences* (DEC)<br>KP 5 – Autonomy Objectives<br>KP 6 – External Hazards*<br>KP 7 – Safety of multi-module Units* | KP 8 – Innovative Components<br>KP 9 – Passive Systems<br>KP 10 – Containment and HVAC Systems<br>KP 11 – Main Control Room* and I&C Systems<br>KP 12 – Turbine and Conventional Island | KP 13 – Availability Factor Targets<br>KP 14 – Flexibility<br>KP 15 – Fuel Cycle Management<br>KP 16 – Boron-free Concept<br>KP 17 – Spent Fuel Storage and Handling | KP 18 – Maintainability<br>KP 19 – Staffing in multi-module Units*<br>KP 20 – Remote Shutdown Panel* and Emergency Control Room*<br>KP 21 – Emergency Response Organisation<br>KP 22 – Decommissioning | KP 23 – Construction Methods<br>KP 24 – Standardisation<br>KP 25 – Staggered Deployment<br>KP 26 – Load Following* and Cogenerating Capabilities |

## D.3.6 WESTERN EUROPEAN NUCLEAR REGULATOR ASSOCIATION (WENRA) AND THE SMR

In 2010, WENRA issued safety objectives for new nuclear power plants (NPPs) [23]. These objectives were developed on the basis of a systematic review of the IAEA Fundamental Safety Principles and formulated in a qualitative rather than quantitative manner. WENRA stated that these safety objectives should be used as a reference for identifying reasonably practicable safety improvements for existing plants during periodic safety reviews. These safety objectives were the basis for drafting the Article 8a of the Directive 2014/87/EURATOM of 8 July 2014 amending the Directive 2009/71/Euratom and establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations, concerning the nuclear safety objective for nuclear installations.

Ten (10) years after their publication, the WENRA's Reactor Harmonization Working Group (RHWG) has performed a review [24] to check whether the safety objectives for new NPPs needed to be updated considering advances in scientific knowledge and technology. The result is that WENRA considers that the safety objectives issued in 2010 still reflect the current state of the art in nuclear safety and, as a consequence, no change or update of these safety objectives is necessary.

WENRA Safety Objectives for new NPPs should, in principle, be applicable to all types of reactors. However, considering the growing interest in Small Modular Reactors (SMRs), and more specifically for this category of plants, WENRA asked the RHWG to confirm their applicability to SMRs.

An ad-hoc subgroup was established in May 2019 with the task to evaluate the impacts of different safety features of SMRs on the Safety Objectives for new NPPs. The review performed by the RHWG [16] shows that even though there is a wide variety of SMR designs currently under development, the safety objectives issued by WENRA in 2010 can also be used for SMRs. WENRA considers these objectives to be the minimum requirement for SMRs. Higher safety requirements should be expected, particularly when considering the potential for such modern technologies to provide significant improvements in safety performance.

It is interesting to point out that among the conclusions of the analysis there is the recommendation to widen the scope of the WENRA Safety Objective O5 which address the Safety - Security interface to also cover Safeguards, leading to the 3S approach discussed above.

Table D.6 Design and Status of SMRs included within Ref. [14] (edition 2020).
N.B. At the moment of writing of this report (June 2022) HTR-PM (Shidao Bay, China) has been connected to the grid, with one of its two reactors in operation and the second one being commisioned

| Design | Output MW(e) | Type | Designers | Country | Status |
|---|---|---|---|---|---|
| **PART 1: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (LAND BASED)** | | | | | |
| **CAREM** | 30 | PWR | CNEA | Argentina | Under construction |
| **ACP100** | 100 | PWR | CNNC | China | Detailed Design |
| **CANDU SMR** | 300 | PHWR | Candu Energy Inc (SNC-Lavalin Group) | Canada | Conceptual Design |
| **CAP200** | 200 | PWR | SNERDI/SPIC | China | Conceptual Design |
| **DHR400** | 400 MW(t) | LWR (pool type) | CNNC | China | Basic Design |
| **HAPPY200** | 200 MW(t) | PWR | SPIC | China | Detailed Design |
| **TEPLATOR™** | 50 MW(t) | HWR | UWB Pilsen & CIIRC CTU | Czech Republic | Conceptual Design |
| **NUWARD** | 2 × 170 | PWR | EDF, CEA, TA, Naval Group | France | Conceptual Design |
| **IRIS** | 335 | PWR | IRIS Consortium | Multiple Countries | Basic Design |
| **DMS** | 300 | BWR | Hitachi-GE Nuclear Energy | Japan | Basic Design |
| **IMR** | 350 | PWR | MHI | Japan | Conceptual Design |
| **SMART** | 107 | PWR | KAERI and K.A.CARE | Republic of Korea, and Saudi Arabia | Certified Design |
| **RITM-200** | 2 × 53 | PWR | JSC "Afrikantov OKBM" | Russian Federation | Under Development |
| **UNITHERM** | 6.6 | PWR | NIKIET | Russian Federation | Conceptual Design |
| **VK-300** | 250 | BWR | NIKIET | Russian Federation | Detailed Design |
| **KARAT-45** | 45 - 50 | BWR | NIKIET | Russian Federation | Conceptual Design |
| **KARAT-100** | 100 | BWR | NIKIET | Russian Federation | Conceptual Design |
| **RUTA-70** | 70 MW(t) | PWR | NIKIET | Russian Federation | Conceptual Design |
| **ELENA** | 68 kW(e) | PWR | National Research Centre "Kurchatov Institute" | Russian Federation | Conceptual Design |
| **UK SMR** | 443 | PWR | Rolls-Royce and Partners | United Kingdom | Conceptual Design |
| **NuScale** | 12 × 60 | PWR | NuScale Power Inc. | United States of America | Under Regulatory Review |
| **BWRX-300** | 270 - 290 | BWR | GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi GE Nuclear Energy | United States of America, Japan | Pre-licensing |
| **SMR-160** | 160 | PWR | Holtec International | United States of America | Preliminary Design |
| **W-SMR** | 225 | PWR | Westinghouse Electric Company, LLC | United States of America | Conceptual Design |
| **mPower** | 2 × 195 | PWR | BWX Technologies, Inc | United States of America | Conceptual Design |
| **PART 2: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (MARINE BASED)** | | | | | |
| **KLT-40S** | 2 × 35 | PWR in Floating NPP | JSC Afrikantov OKBM | Russian Federation | In Operation |
| **RITM-200M** | 2 × 50 | PWR in FNPP | JSC Afrikantov OKBM | Russian Federation | Under Development |
| **ACPR50S** | 50 | PWR in FNPP | CGNPC | China | Conceptual Design |
| **ABV-6E** | 6-9 | PWR in FNPP | JSC Afrikantov OKBM | Russian Federation | Final design |
| **VBER-300** | 325 | PWR in FNPP | JSC Afrikantov OKBM | Russian Federation | Licensing Stage |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **SHELF** | 6.6 | PWR in Immersed NPP | NIKIET | Russian Federation | Detailed Design |
| **PART 3: HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS** | | | | | |
| **HTR-PM** | 210 | HTGR | INET, Tsinghua University | China | Under Construction |
| **StarCore** | 14/20/60 | HTGR | StarCore Nuclear | Canada/UK/US | Pre-Conceptual Design |
| **GTHTR300** | 100 - 300 | HTGR | JAEA | Japan | Pre-licensing |
| **GT-MHR** | 288 | HTGR | JSC Afrikantov OKBM | Russian Federation | Preliminary Design |
| **MHR-T** | 4 × 205.5 | HTGR | JSC Afrikantov OKBM | Russian Federation | Conceptual Design |
| **MHR-100** | 25 – 87 | HTGR | JSC Afrikantov OKBM | Russian Federation | Conceptual Design |
| **PBMR-400** | 165 | HTGR | PBMR SOC Ltd | South Africa | Preliminary Design |
| **A-HTR-100** | 50 | HTGR | Eskom Holdings SOC Ltd. | South Africa | Conceptual Design |
| **HTMR-100** | 35 | HTGR | Steenkampskraal Thorium Limited | South Africa | Conceptual Design |
| **Xe-100** | 82.5 | HTGR | X-Energy LLC | United States of America | Basic Design |
| **SC-HTGR** | 272 | HTGR | Framatome, Inc. | United States of America | Conceptual Design |
| **HTR-10** | 2.5 | HTGR | INET, Tsinghua University | China | Operational |
| **HTTR-30** | 30 (t) | HTGR | JAEA | Japan | Operational |
| **RDE** | 3 | HTGR | BATAN | Indonesia | Conceptual Design |
| **PART 4: FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS** | | | | | |
| **BREST-OD-300** | 300 | LMFR | NIKIET | Russian Federation | Detailed Design |
| **ARC-100** | 100 | Liquid Sodium | ARC Nuclear Canada, Inc. | Canada | Conceptual Design |
| **4S** | 10 | LMFR | Toshiba Corporation | Japan | Detailed Design |
| **microURANUS** | 20 | LBR | UNIST | Korea, Republic of | Pre-Conceptual Design |
| **LFR-AS-200** | 200 | LMFR | Hydromine Nuclear Energy | Luxembourg | Preliminary Design |
| **LFR-TL-X** | 5~20 | LMFR | Hydromine Nuclear Energy | Luxembourg | Conceptual Design |
| **SVBR** | 100 | LMFR | JSC AKME Engineering | Russian Federation | Detailed Design |
| **SEALER** | 3 | LMFR | LeadCold | Sweden | Conceptual Design |
| **EM²** | 265 | GMFR | General Atomics | United States of America | Conceptual Design |
| **Westinghouse LFR** | 450 | LMFR | Westinghouse Electric Company, LLC. | United States of America | Conceptual Design |
| **SUPERSTAR** | 120 | LMFR | Argonne National Laboratory | United States of America | Conceptual Design |
| **PART 5: MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS** | | | | | |
| **Integral MSR** | 195 | MSR | Terrestrial Energy Inc. | Canada | Conceptual Design |
| **smTMSR-400** | 168 | MSR | SINAP, CAS | China | Pre-Conceptual Design |
| **CA Waste Burner 0.2.5** | 20 MW(t) | MSR | Copenhagen Atomics | Denmark | Conceptual Design |
| **ThorCon** | 250 | MSR | ThorCon International | International Consortium | Basic Design |
| **FUJI** | 200 | MSR | International Thorium Molten-Salt Forum: ITMSF | Japan | Experimental Phase |
| **Stable Salt Reactor - Wasteburner** | 300 | MSR | Moltex Energy | United Kingdom / Canada | Conceptual Design |
| **LFTR** | 250 | MSR | Flibe Energy, Inc. | United States of America | Conceptual Design |
| **KP-FHR** | 140 | Pebble-bed salt cooled Reactor | KAIROS Power, LLC. | United States of America | Conceptual Design |
| **Mk1 PB-FHR** | 100 | FHR | University of California at Berkeley | United States of America | Pre-Conceptual Design |
| **MCSFR** | 50 - 1200 | MSR | Elysium Industries | USA and Canada | Conceptual Design |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **PART 6: MICRO MODULAR REACTORS** | | | | | |
| **Energy Well** | 8 | FHTR | Centrum výzkumu Řež | Czech Republic | Pre-Conceptual Design |
| **MoveluX** | 3~4 | Heat Pipe | Toshiba Corporation | Japan | Conceptual Design |
| **U-Battery** | 4 | HTGR | Urenco | United Kingdom | Conceptual Design |
| **Aurora** | 1.5 | FR | OKLO, Inc. | United States of America | Conceptual Design |
| **Westinghouse eVinci** | 2 -3.5 | Heat Pipe | Westinghouse Electric Company, LLC. | United States of America | Under Development |
| **MMR** | 5-10 | HTGR | Ultra Safe Nuclear Corporation | United States of America | Preliminary Design |

## D.3.7 THE SUSTAINABLE NUCLEAR ENERGY TECHNOLOGY PLATFORM (SNETP) AND THE SMR

The Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNETP) was established in September 2007 as a R&D&I platform **to support and promote the safe, reliable and efficient operation of Generation II, III and IV civil nuclear systems**.

An important reference for the platform is the last Strategic Research and Innovation Agenda delivered in July 2021 (SRIA 2021) [25].

Section 3.3 of the reference [25] analyses succinctly the characteristics of the technologies of the Next Generation of Nuclear Fission Reactors. The section 3.4 is devoted to the SMR.

Due to the difference among the Advanced Modular Reactors it is recognized that their technology is either, well proven and does not require any generic R&D, or it requires similar R&D as larger scale alternatives. Specific research and development are, however, needed for some SMR applications which generates specific challenges related to :

- Simplification of the design
  - Benefits from small power and never-melting fuel;
  - Simplified shutdown systems;
  - Containment vs confinement, simplified reactor building, etc.
- Compactness of the design
- Making design suitable for manufacturing
- Using commodity components
- A set of challenges emerges from coupling to industrial (e.g. chemical) installations:
- Decoupling of accidents and accident initiators in nuclear and industrial parts
  - Ensuring that nothing in industrial part can influence operation of the nuclear part and vice versa
- • Following variable power demand of industrial installation
  - Load following mode;
  - Heat storage (to enable the reactor to run full power all the time);
  - Varying the ratio of produced heat and electricity.

The reference [25] stresses the fact that such research should be done in close cooperation with regulators and potential users.

Concerning more specifically the plant safety and risk assessment some challenges and related R&D topics are as follows:

- New approaches to safety assessment
- Development of safety requirements, criteria and rules for passive systems
- Development of more sophisticated instrumentation and control systems for safety applications
- In-vessel corium/debris coolability
- Ex-vessel corium/debris interactions and coolability
- Mitigation of gas explosion risk in containment
- Source term assessment and mitigation
- Severe accidents linkage to environmental impact and emergency situations
- Management of severe accident scenarios

Making the synthesis of the reference's content, the main R&D&I priorities which are recognized in the areas small modular reactors are the following.

- Safety assessment of existing concepts: Feasibility and benefit of inherent safety features (e.g. natural convection cooling and passive decay heat removal);
- Review of safety classification of components;
- Development and qualification of components (e.g. compact heat exchangers) and associated fabrication processes;
- Human factors when employing multi-module SMR plants monitored in a single control room or remotely;
- Cost reduction through Design simplification, compactness, and modularity;
- Advanced manufacturing, assembly and digitalisation of processes;
- Economics and Financing (e.g. effect of in-series production on affordability, required threshold for orders, analysis of financing options);
- Site availability (water vs. air-cooling);
- Licensing (standardization and simplification);
- Acceptance of modularity aspects;
- Hybrid Energy Systems, hydrogen production, energy buffering/storage and cogeneration;
- Facilitation of demonstration.

## D.4 EUROPEAN REGULATIONS AND (IM-) POSSIBILITIES FOR FOAK/NOAK SMRS

Following the analysis done there are no "a priori" prohibitive conditions that would prevent the implementation of SMR in the province of Limburg. Assuming that specifications ("Cahier des Charges") are quickly drawn up (cf. section D.2), and given that the regulatory requirements exist, it is a question of seeing which, among the available technologies, responds in an optimized manner to these boundary conditions. For this it is important to break down the requirements into more detailed technical specifications and it is at this stage that any difficulties may arise, the main cause being the relative lack of harmonization in the field (cf. section D.2.4).

As indicated an effort for this harmonization is underway at the international level. For this, a number of topics are addressed simultaneously with efforts to achieve the desired harmonization: standardized industrial approaches for design, manufacturing, construction, commissioning and operation of SMRs as well as generic user requirements and criteria.

It is difficult to imagine that all the themes will be completed with the same timing and it is reasonable to think that for some of them (e.g. Codes & Standards) harmonization will require more time. Moreover, as discussed section D.2.4 in the context of this search for harmonization, some consider that a fundamental paradigm shift is needed. In terms of safety approach for the design and assessment, proposals exist to help achieving this harmonization and, from this point of view, their implementation within the context of the experience of the province of Limburg can play a pilot role.

## D.5 SMRS AND THE 3S APPROACH: SAFETY, SECURITY, SAFEGUARDS

As indicated within the previous sections, the deployment of SMRs is partially conditioned by the strengthening of reflection on what is considered important, and even essential, for the future of nuclear technology, namely what is qualified with the acronym 3S - Safety , Security & Safeguards – and for which it is recommended an integrated and simultaneous treatment of these three domains in order to achieve what is called "Safety by Design", "Security by design" and "Safeguard by design", i.e. the integration, at the design level, of all the challenges generated by these three areas and their mutual interactions/interfaces.

Figure D.3 taken from reference [26] summarizes the interactions between these three domains and in particular the interfaces which, at first glance, can generate conflicts and which must be dealt with, as much as possible at the design level, and at the level of the operation.

As stressed by the reference [28]: "Focusing on interactions between technologies, processes, and procedures related to safety, safeguards, and security mitigations identified several instances where traditional assumptions of independence did not fully capture likely SMR operational realities. Though seemingly obvious, these interdependencies (Table D.7) are not often accounted for in individual technical analyses".
Similarly, Figure D.4 from the reference [27] indicates both, the themes specific and those common to the three domains.

What is essential to consider is that, in this 3S logic, the responsibilities are shared between the designer, the regulator and the customer / operator. It is for this reason that it is important, and even crucial, that the potential customer/operator be aware of this from the start of the process of reflection for the deployment of any nuclear installation.

For example, reference [29] presents the "Common Basic Principles in Safety Security Interfaces for Research Reactors with SMR" - which, in the opinion of the author, are widely applicable to any kind of SMR - that list succinctly several responsibilities in charge to the customer / operator (cf. Figs. 5 and 5 bis).

The following paragraphs list in a succinct manner the characteristics and or approaches for safety, security and safeguards of SMRs which can help materializing the 3S concept.

Figure D.3. Interfaces between Safety Security and Safeguards [26]

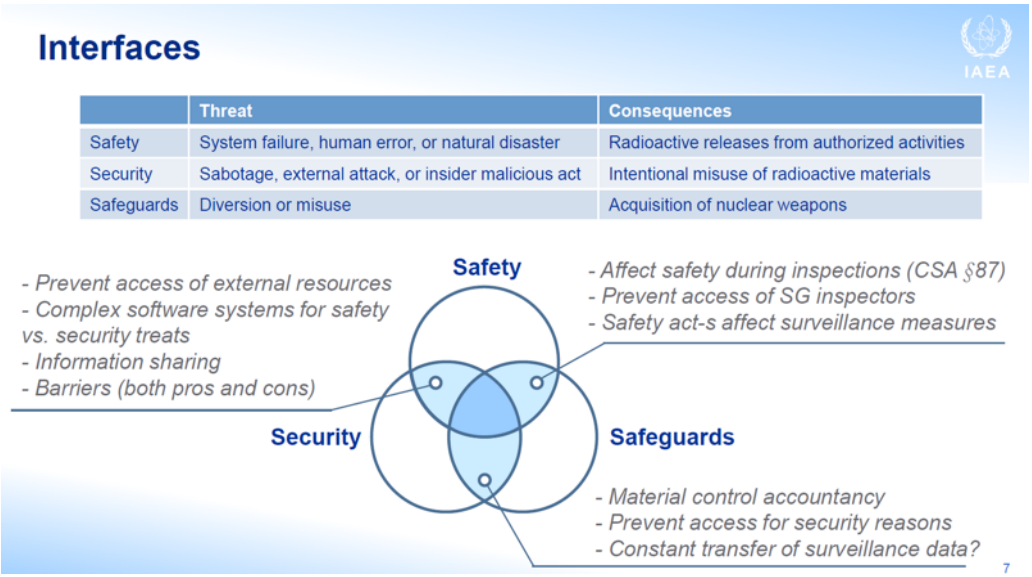



Figure D.4. Specific and common themes for the three domains Safety Security and Safeguards.

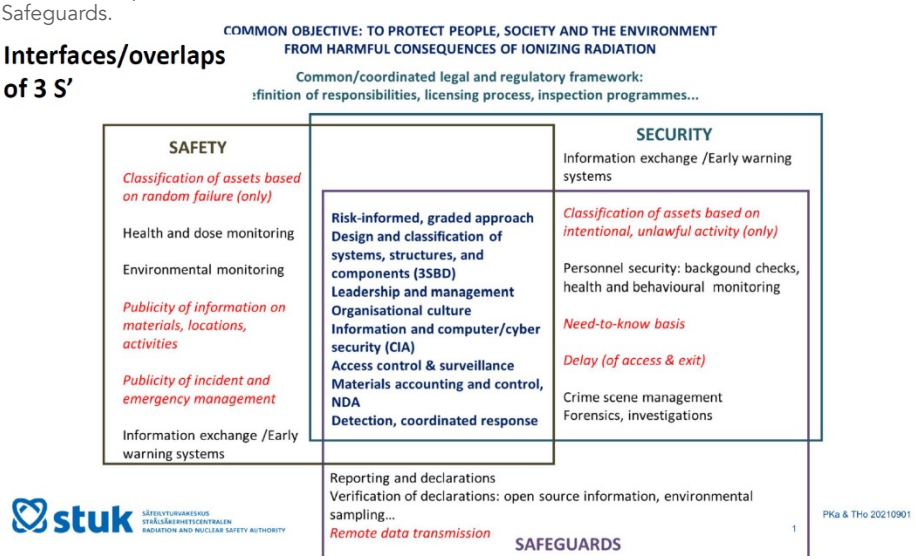



Figure D.5. Common Basic Principles in Safety Security Interfaces for Research Reactors with SMR [29].

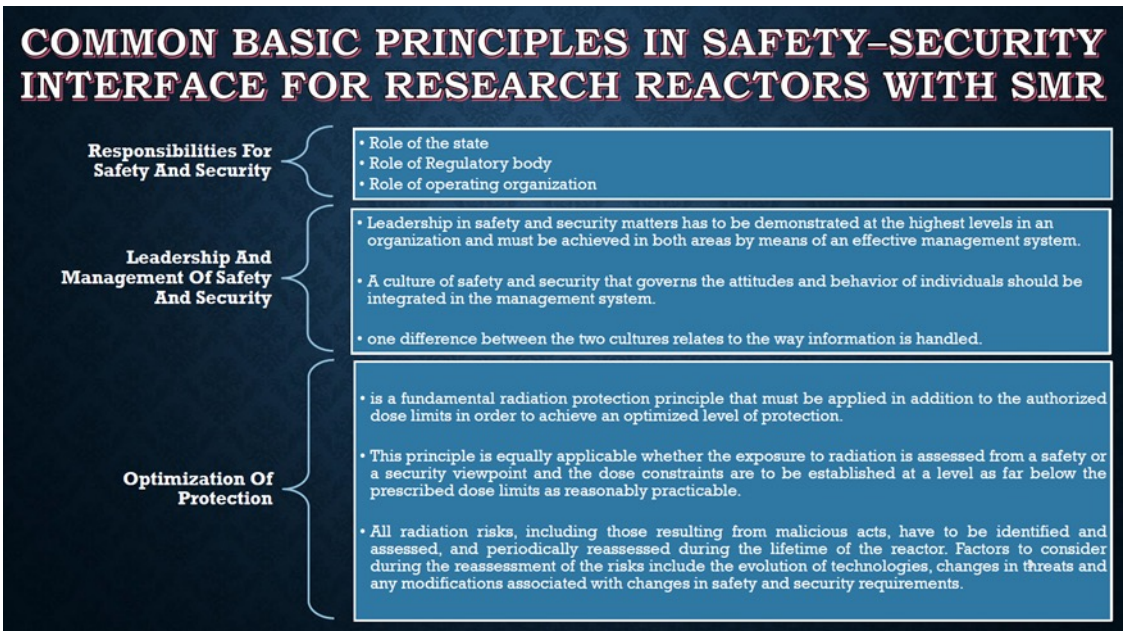
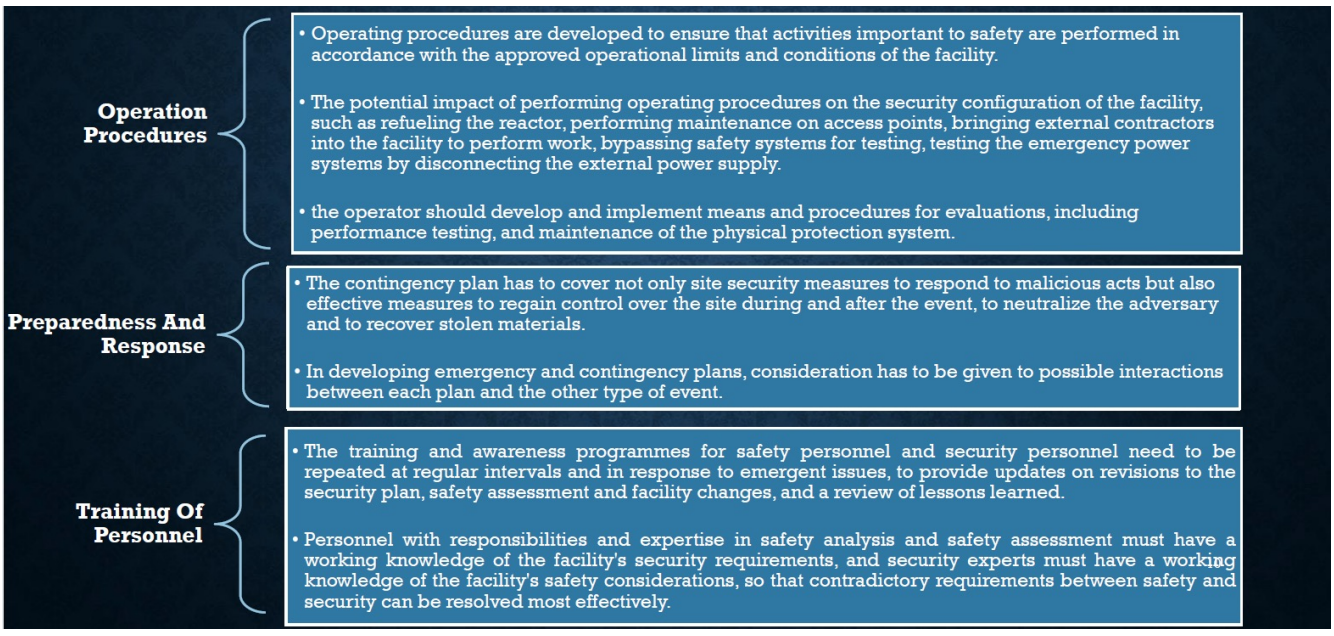


Table D.7. Points of Interdependence between Safety, Safeguards, and Security for SMRs.

| Safety Effects | Security Effects | Safeguards Effects | Explanation |
|---|---|---|---|
| **Passive vs. active safety systems** | New potential targets, vulnerabilities, and needed mitigations | N/A | Reliance on passive safety systems reduces the chances of a safety incident, *while simultaneously* changing the possible targets by which to damage SMR operations |
| **Physical separation of reactor trains** | Requires greater movement of adversaries to sabotage plant | Potential to conceal sections of facility from inspections | Tradition of physically separating trains to reduce common cause failures in safety *simultaneously* increases the distance attackers would need to travel to sabotage a plant AND increases the complexity (and footprint) of the plant layout—thereby making it easier for a proliferator to guide an inspector around sections of a facility |
| Challenges operator actions during a severe accident | **Strict access control procedures** | Can provide assurance to safeguards inspector that rooms have not been entered inappropriately | Access control both provides an additional barrier to overcome and limits the opportunity for insiders *while simultaneously* increasing assurance of appropriate safeguards-related access AND challenging the ability for emergency personnel to respond to accidents |
| N/A | Increases attractiveness of material storage locations | **Consolidation of locations storing nuclear material** | Reducing the number of locations where nuclear material is stored or processed minimizes the opportunity of proliferators to divert materials *while simultaneously* increasing the attractiveness of individual location—and, perhaps, requiring more security |
| N/A | Improved insider threat mitigation* | **Increased frequency of safeguards inspections** | Increased safeguards inspections frequency (including surprise inspections) reduces opportunities for diversion *while simultaneously* increasing the difficulty for an insider adversary to perpetrate a malicious act |

* There is another possible interpretation of this security/safety interaction—that by allowing inspectors more frequent access, they gain more knowledge of the facility, including its security posture, which increases opportunities for inspector to be an insider adversary.

Figure D.5bis. Common Basic Principles in Safety Security Interfaces for Research Reactors with



## D.5.3 FAVORABLE SAFETY CHARACTERISTICS DUE TO LOW POWER – SAFETY BY DESIGN

The potential source term, i.e. quantity of potentially mobilizable radioactive materials, is more limited in a small reactor compared to large power reactors. Furthermore, for a given technology, there may be a scale effect depending on the power of the reactor on the safety related characteristics.
Thus, by way of example, for core neutronics and its response in an abnormal situation, small size sodium-cooled fast neutron reactors can present a negative or zero vacuum effect, which is favorable in the event of a power/temperature excursion. For light water reactors, for which this effect is less marked, the possibility of designing boron-free cores is an advantage in terms of safety because the risk of dilution accidents is eliminated and the production of effluents is limited in normal operation.

Similarly, and applicable to all technologies, the decay heat to be evacuated in a normal or accidental shutdown situation (i.e. a given fraction of the nominal power) being less, one can believe that the implementation of passive systems[i] to achieve the function will be easier.

Thanks, among other things, to a safety architecture capable of integrating these passive systems and or these intrinsic characteristics, many designers display grace periods for their installation, i.e. the period for which, in the event of an accident, no intervention is necessary, of the order of several days, or even unlimited (this is the case for certain gas-cooled concepts). In these conditions, certain parameters that characterize the performance of the concepts in a severe accident situation such as, for example, the Core Damage Frequency (CDF) or the Large Early Release Frequency (LERF), can be noticeably/significantly reduced. Similarly, the management of severe accident situations can allow the implementation of innovative approaches with, for example for the heat exchange with an external cold source, thanks to a favorable volume to surface ratio, the "in vessel retention" of damaged core. Reduced-volume containment can make inerting easier, reducing or excluding, where applicable, the risks of a hydrogen explosion.

Similar reasoning can be made with regard to the reliability, in the generic sense of the term, of the installation. The compactness of SMRs leads to limiting the size of components, some of which are particularly important for safety, and this facilitates control of manufacturing quality; on the other side, the feasibility of inspection during manufacturing and in operation for certain components with complex geometry (integrated design of certain components) could require the development of suitable inspection and inspection means in order to validate the displayed reliability levels. The possibility of using standard components, sometimes put forward by designers, must necessarily lead to verification that codes and standards that can guarantee nuclear quality are respected.

In any case, the validation of these innovative systems will very likely require carrying out experiments on representative mock-ups and collecting data in operation on the First of a Kind modules.

Finally, but the list is not necessarily exhaustive, compactness can make it possible to consider buried or semi-buried concepts, giving the facilities greater robustness than that of high-power reactors with respect to certain hazards (earthquake, plane crash, extreme weather conditions, etc.); other hazards that such configurations potentially make more likely (e.g. flooding) remain to be dealt with.

i It should nevertheless be considered that the concept of passive system is not in itself an absolute guarantee as regards the real reliability of the system. For this, as for any active system, it is necessary to consider the requirement of verification of both physical performances, i.e. the ability to perform the required function, and the reliability in real operating conditions. For example, the evacuation of heat by natural convection can be disturbed by stratification phenomena, the evacuation by radiation can be disturbed by an emissivity of the emitting surface altered by the presence of dust, etc. ; certain devices using gravity could see their operation disturbed by the presence of friction generated by specific accidental situations (deformations, presence of oxides, etc.)

## D.5.4 NUCLEAR SECURITY BY DESIGN

As for all the nuclear installations and as outlined above, the design of SMR should take into account the needs of nuclear security. To fit with the notion of "security by design" (SeBD) the measures required to meet applicable regulatory nuclear security requirements should be integrated into the overall design during the design stage. mplementing such approaches may lead to reduced physical protection costs over the lifetime of the nuclear facility, and it may simplify the task of maintaining an effective physical protection system over the lifetime.

Security by design is implemented through a structured approach in which a State's nuclear security objectives are considered in design decisions for the entire lifetime of the facility, it starts with the planning of the facility and continuing through the design, construction, operational and decommissioning phases.

The designer will look for minimizing potential conflicts between safety and security measures during the design stage but the siting and the specific layout of the facility may influence the design and effectiveness of physical protection systems.

As a matter of example several challenges shall be addressed (their practical content is detailed within the reference [17]) for which the operator, behind the designer and for some of these challenges, plays an important role:

- SeBD to Counter Unauthorized Removal establishing a security zones around the nuclear facility
- Implementation of Design against Sabotage
- Implementation of Backup Systems
- Implementation of Defense in Depth (DiD) which is a key concept of security by design that is shared with safety.
- Implementation of Delay Function to increase adversary time to complete a malicious act by introducing impediments along any path the adversary might choose
- Design for the Lifetime of the Facility : Planning, siting, design, construction, commissioning, operation, cessation of operation and decommissioning.
- Security of the Nuclear Supply Chain
- Design of Multi-purpose Central Alarm Station (CAS) and Secondary Alarm Station (SAS) which play a critical role in security by design.
- Protection of Sensitive Design Information

## D.5.5 SPECIFIC CHALLENGES IN TERMS OF SAFEGUARDS

The Proliferation resistance is defined as being "…that characteristic of a nuclear energy system that impedes the diversion or undeclared production of nuclear material or misuse of technology by the Host State seeking to acquire nuclear weapons or other nuclear explosive devices." [18]. Safeguards provide independent verification that the objective is achieved ("safeguardability", i.e. the aptitude to facilitate the design of nuclear safeguards is one aspect of proliferation resistance).

The reference [30] succinctly lists the characteristics of SMRs that should be considered in the context of the "safeguards":

- New fuels and fuel cycles: Th/U-233, RepU, MOX, TRU fuels, higher enrichment, pyroprocessing, other new processes
- New reactor designs: molten salt, fast reactors, pebble bed, …
- Longer operation cycles: continuity of knowledge between refuelling, high excess reactivity of core (target accommodation)
- New supply arrangements: factory sealed cores, transportable power plants, transnational arrangements (need for design verification and sealing)
- New spent fuel management: storage configurations, waste forms
- Diverse operational roles: district heating, desalination, hydrogen + electricity
- Remote, distributed locations: access issues, lack of "unannounced" visit deterrence, cost-benefit issues

## D.6 REFERENCES


1. ANVS. Vergunningenbeleid ANVS 2019. Den Haag : s.n., 2019.
2. OECD, NEA. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities NEA 7560. 2021.
3. ANVS, Autority for Nuclear Safety and Radiation Protection -. Safety Guidelines - Guidelines on the Safe Design and Operation of Nuclear Reactors. 2015.
4. IAEA. Safety Standards Series N° SF-1: Fundamental Safety principles. 2006.
5. —. Safety of Nuclear Power Plants: Design; Specific Safety Requirements No. SSR-2/1 (Rev. 1). 2016.
6. —. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation ; Specific Safety Requirements No. SSR-2/2 (Rev. 1).
7. WENRA-RHWG. Safety of new NPP designs - Study by WENRA Reactor Harmonization Working Group. March 2013.
8. Minister of Economic Affairs, Agriculture and Innovation. Regulation of the Minister of Economic Affairs, Agriculture and Innovation of 7 December 2010, No. WJZ/10183066 containing rules on the securitysecurity of nuclear facilities and nuclear materials (Nuclear Facilities and Nuclear Materials (SecuritySecurit. 2013.
9. ANVS. Guide for Readers National Policy for nuclear safety and radiation protection. 2018.
10. Ministerie_van_Infrastructuur_en_Waterstraat. National Radiation Crisis Plan (Landelijk Crisisplan Straling). April 2021.
11. IAEA. Benefits and Challenges of Small Modular Fast Reactors TECDOC-1972 2021. 2021.
12. —. Considerations for Environmental Impact Assessment for Small Modular Reactors IAEA-TECDOC-1915 2020. 2020.
13. —. Nuclear Energy Series Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment No. NR T 1.18 2021. 2021.
14. —. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition.
15. Dr Ross Peel, King's College London. Nuclear Security and Safeguards Considerations for Evolutionary and Innovative Reactor Designs (EID). Technical Meeting on Safety, Security and Safeguards by Design for SMRs,. 1 –3 June 2022, Vienna.
16. WENRA. Applicability of the Safety Objectives to SMRs. January 2021.
17. IAEA_MAFA-NSNS_Kristof_Horvath_Tariq_Majeed. Nuclear Security Practical Solutions in Design. Technical Meeting on Safety, Security and Safeguards by Design for SMRs, 1 –3 June 2022, Vienna.
18. GIF, Proliferation Resistance and Physical Protection Group. Evaluation Methodology for Proliferation Resistance and Physical Protection of Generation IV Nuclear Energy Systems Revision 6. September 2011.
19. NRC. Potential Policy, Licensing and key Technical Issues for Small Modular Nuclear Reactor Design SECY-10-0034 . 2010.
20. EPRI. Utility Requirements Document Expanded to Include Small Modular Reactor https://www.epri.com/4092bb7f-bcf9-441a-8005-b0ca833ad4a0.
21. —. Advanced Nuclear Technology: Advanced Light Water Reactors Utility Requirements Document Small Modular Reactors Inclusion Summary 3002003130 . 2014.
22. EUR_Organization. EUR Chapter 1.5 Revision E2 May 2021 High-Level Requirements on Small Modular Light Water Reactors. 2021.
23. WENRA. Statement on Safety Objectives for New Nuclear Power Plants 0. November 201.
24. —. Safety Objectives for New Nuclear Power Plants and WENRA Report on Safety of new NPP designs – RHWG position on need for revision . September 2020.
25. SNETP. Strategic Research and Innovation Agenda. July 2021.
26. POGHOSYAN Shahen, IAEA NS/NSNI/SAS. IAEA activities on 3S interfaces and challenges for innovative reactors . Technical Meeting on Safety, Security and Safeguards by Design for SMRs, 1 –3 June 2022, Vienna.
27. 27. Sanja Simic, Canadian Nuclear Safety Commission. Key considerations related to safety, security and safeguards by design: SMR Regulators' Forum . Technical Meeting on Safety, Security and Safeguards by Design for SMRs, 1 –3 June 2022, Vienna .
28. Adam D. Williams, Brian Cohn & Doug Osborn Sandia National Laboratories, USA. Security, Safety, and Safeguards (3S) Risk Analysis for Small Modular Reactors SAND2019-6657C. 2019.
29. Mohamed A. Elsaied, EAEA Egipt. Interfaces between Nuclear Safety and Nuclear Security for Research Reactors in operation as well as SMR . Technical Meeting on Safety, Security and Safeguards by Design for SMRs, 1 –3 June 2022, Vienna .
30. Jeremy Whitlock IAEA Department of Safeguards SGCP. Safeguards by Design: focus on SMRs. Technical Meeting on Safety, Security and Safeguards by Design for SMRs –Vienna, 1-3 June 2022.

ADDENDUM E

# Ons Consortium - Experten Team

Deze studies werd uitgevoerd door een consortium bestaande uit Nuclear-21, Evocati Consulting Alliance, Stork en DNV. Zij brengen ervaren experts uit België, Frankrijk en Nederland samen welke de hoofdvraag en deelvragen van Provincie Limburg op een geïntegreerde wijze hebben benaderd met de garantie dat alle experts in gehele vrijheid hun expertise kunnen uiten en dus de beste geïntegreerde expertise aan Provincie Limburg leveren.

Ons team heeft uitgebreide ervaring en referenties betreffende de verschillende aspecten van de vraagstelling en meer bepaald omtrent de expertise in technische, juridische, en planologische eisen die van invloed zijn op inpassing van een kerncentrale in EURATOM-lidstaten en/of Verenigd Koninkrijk en zelfs daarbuiten.

Nuclear-21 is een niche experten adviesbureau dat bestaat uit ervaren senior experts die in verschillende landen zijn geregistreerd en die samenwerken en, vaak, als een virtueel team aan specifieke projectopdrachten werken. Nuclear-21's diensten omvatten technologie-naar-business analyses omvattende strategisch analsyes, martk en technologie projecties en bijhorende (energie-markt-simulaties alswel een uitgebreide expertise en ervarignin zowat alles aspecten van kerncentrale ontwikkeling, splijststofcycles and radioactief afval beheer. Daarnaast worden tevens studies in domein van nucleaire radioisotopen productie en nucleaire geneeskunde uitgevoerd.

- Luc Van Den Durpel, Jim Kuijper, Gian-Luigi Fiorini en Gerard Troost brachten bijdrages aan deze studie.

EVOCATI Consulting Alliance is de vereniging van drie experten in de nucleaire industrie wiens parallelle en complementaire carrières hen in staat hebben gesteld om gedurende enkele decennia de kennis, ervaring en het vermogen te verzamelen om nieuwe innovatieve ideeën te promoten die nuttig zijn voor de uitbreiding van deze industrie.

- Jean-Jacques Gautrot, Claude Jaouen en Philippe Pradel brachten allen bijdrages aan deze studie.

DNV is een globale toonaangevende onderneming van onafhankelijke energiedeskundigen en technische adviseurs welke de overheid en de industrie helpt bij het navigeren door de vele complexe, onderling samenhangende, transities die wereldwijd en regionaal plaatsvinden in de energiesector. We commiteren ons aan het realiseren van de doelstellingen van de Klimaatakkoord van Parijs en ondersteunen onze klanten om sneller over te schakelen naar een sterk gedecarboniseerde energiesector. Door middel van onze advies-, monitoring-, verificatie- en certificeringsdiensten bieden we zekerheid aan de gehele energiewaardeketen - van opwekking en productie, transmissie en distributie tot en met het eindgebruik.

- Thijs Slot, Martijn Duvoort, Sander Scheper en Kristien Wiegersma brachten bijdrages aan deze studie

Stork is een wereldwijde speler op gebied van asset management maar ook in de middelgrote tot zware energie opwekking en transport waaronder nucleaire installaties en grote fossiele en groene elektriciteitscentrales. Uit haar roots als Stork Ketel- en apparatenbouw bestaat nog Stork Thermeq, service provider in olie&gas, chemie, afvalverbranding/biomassa en conventionele elektriciteitsopwekking. We zijn OEM van onder andere nieuwbouw ketels en een wereld marktleider op gebied van ontgassers voor onder andere nucleaire installaties. Hierbij zijn we onder andere een belangrijke huisleverancier van Siemens.

- Jan Schipper, Martijn Hinderdael en Joris Grimbergen brachten bijdrages aan deze studie

# NOTAS

# CONTACTEER ONS

Verder overleg omtrent dit rapport kan via:


| | | |
|---|---|---|
| Primaire contacten: | Luc Van Den Durpel | vddurpel@nuclear-21.net |
| | Jim Kuijper | kuijper@nuclear-21.net |
| Partner contacten: | Martijn Duvoort | martijn.duvoort@dnv.com |
| | Jean-Jacques Gautrot | jean-jacques.gautrot@evocati-alliance.com |
| | Joris Grimbergen | joris.grimbergen@stork.com |

Groenstraat - 35
B-9250 Waasmunster
Belgium

121 Champs Elysees
F-75008 Paris
Frankrijk

Louis Couperus plein 2
2595 DA The Hague
The Netherlands

info@nuclear-21.net
Cell. +32 (0)473 865647

IAEE International Association for Energy Economics
www.iaee.org
World Nuclear Association
AACE International
ANS
ENS European Nuclear Society
Stichting KernVisie
Begunstiger

BUSINESS CONFIDENTIEEL

# TECHNISCHE (ON-)MOGELIJKHEDEN VOOR KERNENERGIE IN DE PROVINCIE LIMBURG

Samenvattende Presentatie aan
Provinciale Staten Provincie Limburg
16 September 2022

# Context voor deze studie

- Start kader is de Provinciale Energie Strategie (PES)
  - *"De Limburgse energiemix bestaat richting 2030 en verder uit steeds meer verschillende bronnen en energiedragers. We kunnen ons nu niet veroorloven slechts op enkele paarden te wedden noch uitgaan van de huidige energiemix. Het zal een zoektocht zijn met verschillende ontwikkelings- en toepassingssnelheden. Wet- en regelgeving, de snelheid van innovaties en opschaling evenals de kracht van regionale en euregionale/nationale samenwerkingsverbanden en draagvlak in de regio zijn daarin belangrijke factoren".*
- Nederland en de Provincie Limburg hebben groeiende nood aan op afroep beschikbaar en regelbaar vermogen
  - Kernvraag of kernenergie een optie zou kunnen zijn?
  - Dit betreft een technisch studie omtrent de (on-)mogelijkheden voor kernenergie
  - De recente energie-markt ontwikkelingen sinds de start van de studie hebben bijkomende (technische) elementen aangebracht doch voornamelijk de context voor de toekomstige energiemix opties gewijzigd:
    - ✓ Internationale energie-markt en geo-politieke ontwikkelingen
    - ✓ Netcongestie in Nederland en meer bepaald Provincie Limburg
    - ✓ Strategische waarde voor
      - *(Voldoende) Energie-onafhankelijkheid*
      - *Stabiele en competitieve energie-kosten*
    - ✓ Groeiende nood aan (lokaal) op afroep beschikbaar en regelbaar vermogen

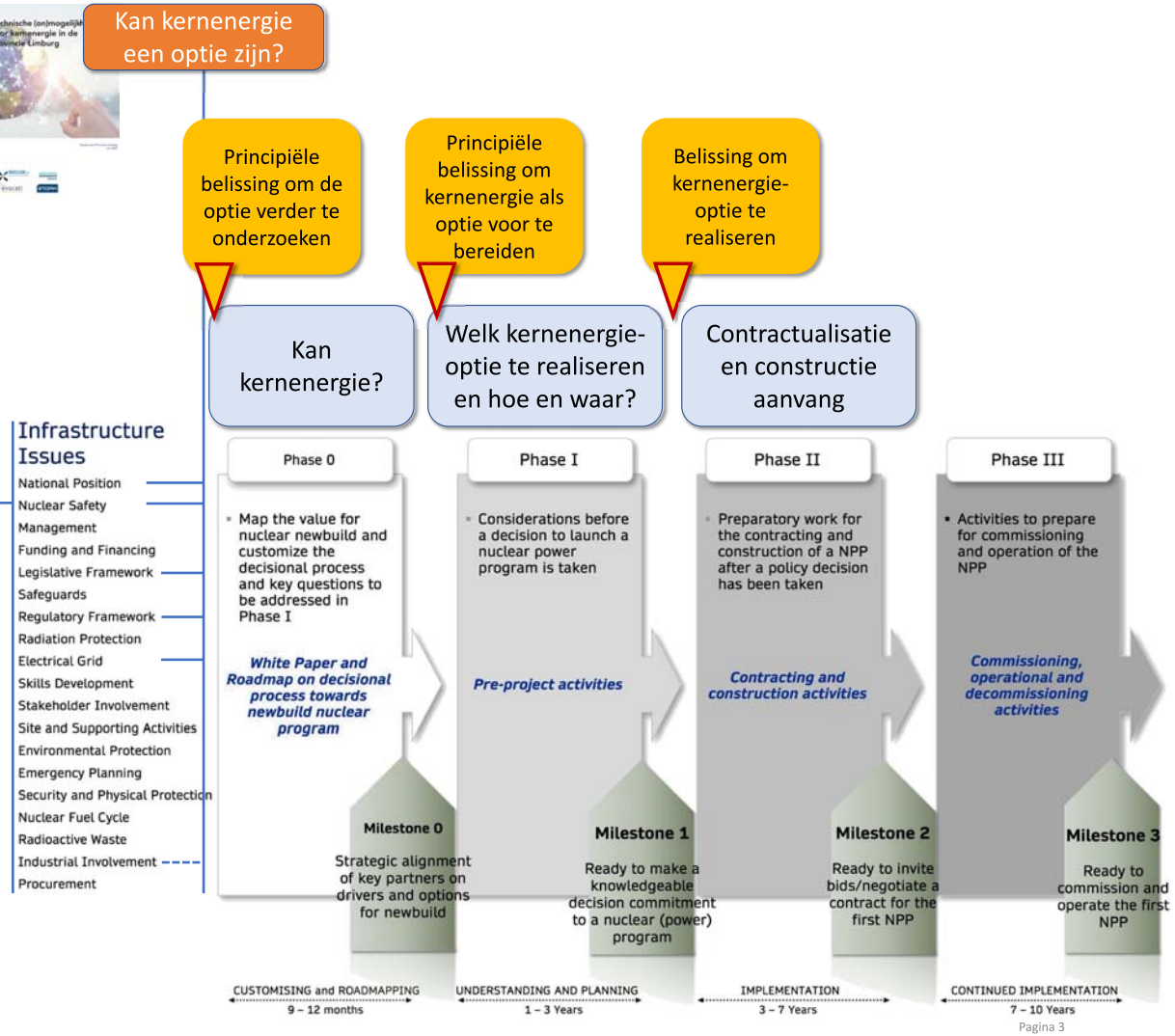
BUSINESS CONFIDENTIEEL

BUSINESS CONFIDENTIEEL

# Positionering van deze studie

- **Deze studie behandelt 'slechts' de technische vraag of kernenergie een optie zou kunnen zijn?**
  - En zo ja, welke kernenergie-opties bieden zich aan?

- **Deze studie is een input tot een methodologisch proces (cfr. IAEA) naar de uitbouw van kernenergie indien hiertoe wordt besloten**
  - Niet alle domeinen van 'Infrastructure Issues' worden in deze studie behandeld
  - Noch werd een stakeholder interactie-proces uitgevoerd wat essentieel is in een eventuele vervolg "Phase 0"
    - ✓ d.w.z. een gehele haalbaarheidsstudie, nl.:
      - *Technisch*
      - *Economisch*
      - *Regelgevend*
      - *Kennis-capaciteit*
      - *Rol voor regional industrie*
      - *…, en*
      - *Socio-maatschappelijke aanvaarding*



BUSINESS CONFIDENTIEEL

# Studie-aanpak

- **Studie uitgevoerd gedurende de periode 20 April – 20 Juli ‘22**

- **Focus op**
  - zo compleet mogelijke informatie omtrent verschillende essentiële aspecten
  - diverse uitgangspunten van partners te convergeren naar een consensueel rapport met ééndrachtigheid qua uitkomst
  - tevens interactie met belangrijke partijen:
    - ✓ EZK – Energiemix scenario studie
    - ✓ ANVS – vergunnings-traject
    - ✓ Energie-intensieve industrie Provincie Limburg

- **Een vrijwel continue interactie met Provincie Limburg gezien**
  - de wijzigende energie-markt context gedurende de looptijd
  - de complexiteit van de materie en dus behoefte aan duidelijke (en tussentijdse) rapportering

BUSINESS CONFIDENTIEEL

# Finaal rapport gestructureerd in 5 delen beantwoordend aan hoofd en deelvragen

I. Inleiding en studie-aanpak verduidelijking

II. Energie-markt in Provincie Limburg en verwachtingen naar energie-behoeften

III. Mogelijke rol voor kernenergie en uitdagingen alsook de technologische opties voor Provincie Limburg

IV. Technische (on)mogelijkheden voor (Mini-)SMR-opties in de Provincie Limburg en randvoorwaarden voor hun realisatie

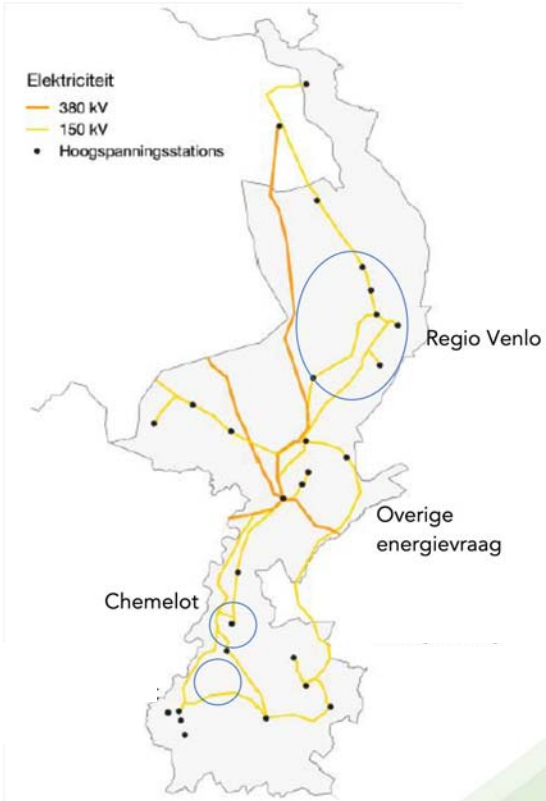
V. Planologische, geo-technische randvoorwaarden en regelgeving voor (Mini-)SMRs

VI. (Mini-)SMR routeplan voor Provincie Limburg en Nederland

NUCLEAR 21 evocati DNV STORK

# Energie-behoeften voor/in de Provincie Limburg

- Energie-behoeften voor/in Provincie Limburg duiden op
  - Nood aan decarbonisatie
  - Groeiende elektrificatie
  - De haalbaarheid én noodzakelijkheid om 380kV HS-lijn connectie Graethede 2028/29 te realiseren
  - Waterstofnet (“hydrogen backbone”) ontwikkeling
  - Geprojecteerde energie-behoeften gebaseerd op bestaande en recente (scenario) studies
    - ✓ Gebouwde omgeving
    - ✓ Industriële clusters
    - ✓ LEA bedrijven



# Energie-behoeften voor/in de Provincie Limburg

- Uitdagingen en knelpunten waarbij de belangrijkste en robuuste knelpunten zich voorstellen als :
  - Onvoldoende capaciteit van de huidige elektriciteitsnetten (hoog- én laagspanning) voor het voorziene aanbod van vooral zonneparken alsook voor de energievraag van gebouwde omgeving, elektrisch vervoer en industrie;
  - Onvoldoende elektriciteitsproductie en het onvoldoende beschikken over vrij regelbaar vermogen;
  - Vooralsnog geen transportcapaciteit van waterstof naar industrie en elektriciteitscentrales;
  - Afhankelijk van politieke en maatschappelijke ontwikkelingen is er behoefte aan meer warmtebronnen en warmtetransportnetten, waterstofdistributie en $CO_2$-infrastructuur;
  - Oplossingen vanuit Duitsland en België niet realistisch gezien hun eigen knelpunten.

BUSINESS CONFIDENTIEEL

# Energie-behoeften projecties

- **Resterende en blijvende behoefte voor op afroep beschikbaar en regelbaar productie-vermogen met het oog op**
  - Optimalisatie van het gehele elektriciteits-net
  - Elektriciteit/energie garantie
  - Robuustheid van energie-levering
    - ✓ Continue belevering compatibel met bedrijfsprocessen
    - ✓ Economisch competitief
    - ✓ Risico minimalisatie m.b.t. bedrijfscontinuïteit
  - Betere/verdere integratie van elektriciteit/warmte koppeling in geïntegreerde energie-systemen
  - Prijs-competitiviteit en prijs-stabiliteit

- **De geprojecteerde energie-behoeften in 2050 bedragen het equivalent van zo'n 8 – 12 GWe benodigde generatie-capaciteit**
  - waarvan zo'n 4 – 8 GWe enkel reeds voor de elektriciteitsbehoefte voor de (gecentraliseerde) Chemelot-site en (gedecentraliseerde) LEA-bedrijven

Vertalend in een capaciteits-behoefte voor productie-eenheden per gebruikers-cluster van 20 MWe - > 1000 Mwe

# Er zijn geen harde praktische en/of fysieke beperking voor (Mini-)SMRs in de Provincie Limburg

- Er zijn drie kernenergie-opties op basis van LWR technologie welke zich aanbieden voor de Provincie Limburg:
  - Mini-SMRs (20 – 50 MWe) welke toepasbaar zijn vanaf 2030
  - SMRs (200 – 300 MWe) welke toepasbaar zijn vanaf 2035
  - Grote LWR-centrales (ca. 1000 MWe) welke toepasbaar zijn doch slechts indien in geïntegreerd energie-systeem na 2035
    - ✓ Grote LWR-centrales slechts te beschouwen indien netto restwarmte voor omgevingskoeling sterk beperkt wordt (en vergelijkbaar met STEG-centrale)

- Al deze opties genereren elektriciteit en warmte, die benut kan worden voor proceswarmte en warmtenetten
  - In analogie aan warmtekracht-centrales laten zijn een flexibele generatie toe met aanpassing van elektriciteit/warmte aan gebruikers

- Er zijn wel verschillen in de mogelijkheden en wensen qua plaatsing met betrekking tot de energie-behoeften en de aard van koelbehoefte

- Beïnvloedende factoren qua keuze omvatten ook beschikbaarheid van een 380 kV HS verbinding naar de Limburgse energie-intensieve industrie en finaal alle gebruikers

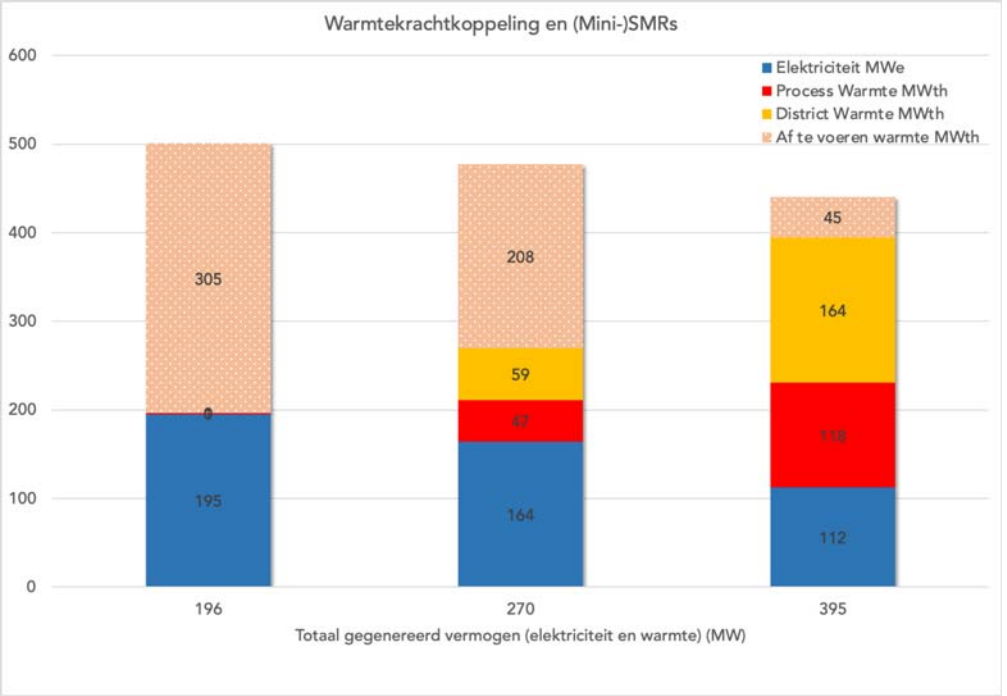
BUSINESS CONFIDENTIEEL

BUSINESS CONFIDENTIEEL

# (Mini-)SMRs: zowel elektriciteit als warmte

- Grote interesse om warmtekrachtkoppeling te voorzien met (Mini-)SMRs om:
  - De energie-behoeften van zowel elektriciteit als warmte te beleveren
  - Minimale hoeveelheid 'afval-warmte' te moeten koelen met beperktere nood aan koeltorens en dus meer locaties beschouwbaar
    - Op basis van eenheidsvermogens
      van ca. 20 MWe
      - Vanaf heden alsook blijvend voor verschillende LEA-bedrijven
      - Tevens gekoppeld met warmte (ca 40 MWth) voor proceswarmte/warmtenetten

      tot meerdere honderden MWe's benodigd
      - Voor industriële clusters welke decarboniseren via toenemende elektrificatie
      - Met eventuele voorkeur voor redundante generatie-capaciteit voor leverings-continuïteit/zekerheid
      - Na 2030/2035
  - Optimalisatie van uitbating (Mini-)SMRs in vollast met economische voordelen

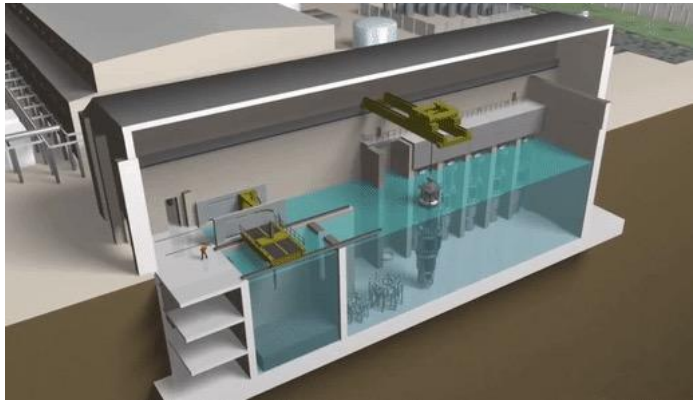



De schaalgrootte van (Mini-)SMRs laat een betere flexibiliteit toe naar gecombineerde elektriciteit en rest/district-warmte inzetbaarheid

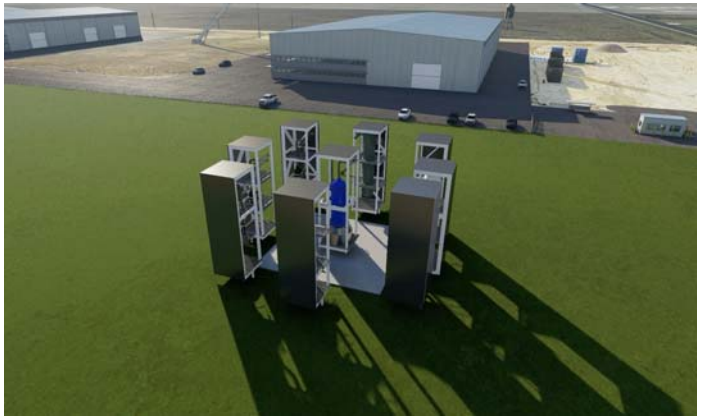
BUSINESS CONFIDENTIEEL

# (Mini-)SMRs brengen modulaire opties en oplossingen

- **"Klein" bepaalt voornamelijk de toepasbaarheid in verschillende energie-markten en locaties**
- **Modulariteit komt hoofdzakelijk in twee voorname vormen:**
  - Modulariteit in investering
    - ✓ Gefaseerde investering in productie-capaciteit
    - ✓ Kleinere investering per productie-eenheid doch (algemeen) verwachte hogere productie-kost
    - ✓ Van schaalgrootte-effect naar serie-productie door (kleinere) modules
    - ✓ Kleiner eenheids-vermogen laat eenvoudiger design toe alsook andere aanpak van veiligheids-garantie
    - ✓ Gestandaardiseerde modules met kleinere on-site bouw risico's
    - ✓ Modulariteit kan nieuwe fabricatie-technieken mogelijk maken met kosten-reductie
    - ✓ Versnelde ontwikkeling en kwalificatie door modulaire vervangbaarheid van kritische componenten
  - Modulariteit in uitbating
    - ✓ Bijkomende flexibiliteit voor deellast en vollast werking
    - ✓ Continuïteit en redundantie in verzekerde productie van elektriciteit en warmte
    - ✓ Modulariteit in onderhoud en vervanging met mogelijkheid tot verkorte onderhouds-periodes



Courtesy: NuScale



Courtesy: Last Energy

# Beschouwde kernenergie-opties in enig perspectief

| | Mini-SMR | SMR | AMR |
|---|---|---|---|
| Eenheidsvermogen (MWe) | 20 - 50 | 200 - 300 | 100 - 500 |
| Tijdslijn industriële realisatie in Nederland | 2030 | 2035 | >2040 |
| Technology type | LWR | LWR | voornamelijk non-LWR |
| Investering (M€) | 100 - 250 | > 1000 | > 1000 |
| Siting voorwaarden | . Actieve luchtkoeling mogelijk met dus ruimere locatie-keuze | . Actieve (water/)lucht- koeling (met koeltoren)<br>. Meer mogelijkheid tot warmtenet-gebruik ter reductie restwarmte | . Velen hanteren hogere werktemperaturen met lagere restwarmte en netto restwarmte koelbehoefte |
| $H_2$-productie | . Compatibel met brandstofcel oplossingen van enkele MW met tevens warmte gebruik<br>. Laat toe Mini-SMR in base-load uit te baten | . Compatibel met grotere $H_2$-productie units, alsook met warmte-toevoer door SMRs | • Eventueel hogere temperatuur (electrolyse) $H_2$- productie processen |
| Scenario | . Snelste gedecarboniseerde en op afroep beschikbare elektriciteitsproductie voor energie-intensieve industrie behoeften | • In competitie met grote LWRs en 380 kV alsook in toekomst met AMRs<br>• Optie voor industriële sites > 2035 met back- up via net | • Geïntegreerde nucleaire systemen met LWR/Mini-SMR en MSR voor splijtstof/ afval optimalisatie |

BUSINESS CONFIDENTIEEL

# Tijdigheid van (Mini-)SMRs?

- **Aanpassing van de Kernenergie Wet**
  - Vergunnings traject laat een realisatie naar 2030-2035 toe

- **De tijdige realisatie tijdens de periode 2030-2035 van (Mini-)SMRs vergt niettemin:**
  - Een versterkt Nederlands nucleair programma welke een de-risking van dergelijk nieuwbouw programma ondersteunt
  - Een initiatief gesteund door minimaal vier partijen:
    - *Provincie Limburg, in synergie met Rijksoverheid, als algehele coördinerende partner ter garantie van de nodige planologische en energie-systeem integratie*
    - *Energie-intensieve industrie als leidende markt-partij betreffende user-requirements*
    - *Investeerders*
    - *Een ervaren nucleaire operator, bijv. EPZ, met voornaam oog op de-risking*

✓ Tevens dient de mogelijkheid van een industrie consortium met oog op uitbouw van een toeleveringsketen en blijvende macro-economisch toegevoegde waarde in en voor Nederland/Limburg gestimuleerd

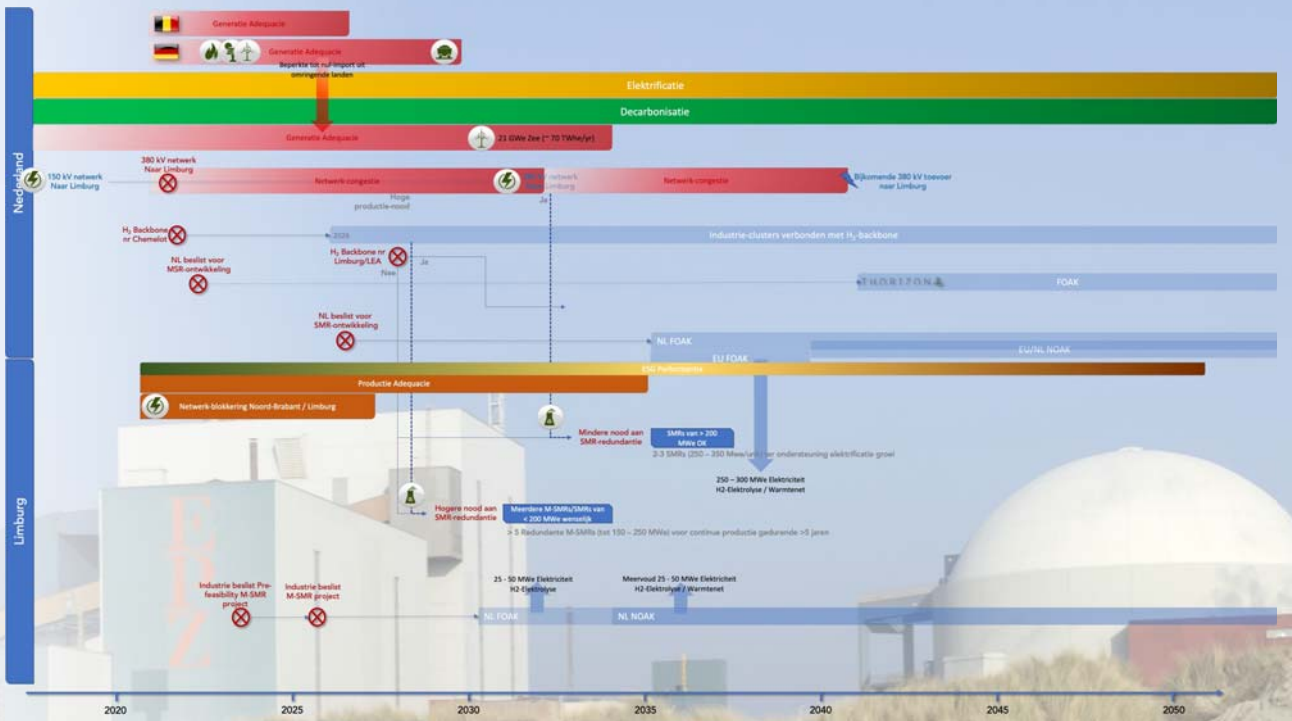
✓ Technologie-aanbieders zijn er volop, en op zoek naar mogelijkheden om hun project gerealiseerd te zien worden: "buyers' market" !

# Welke keuze ?
# Mini-SMR of SMR?

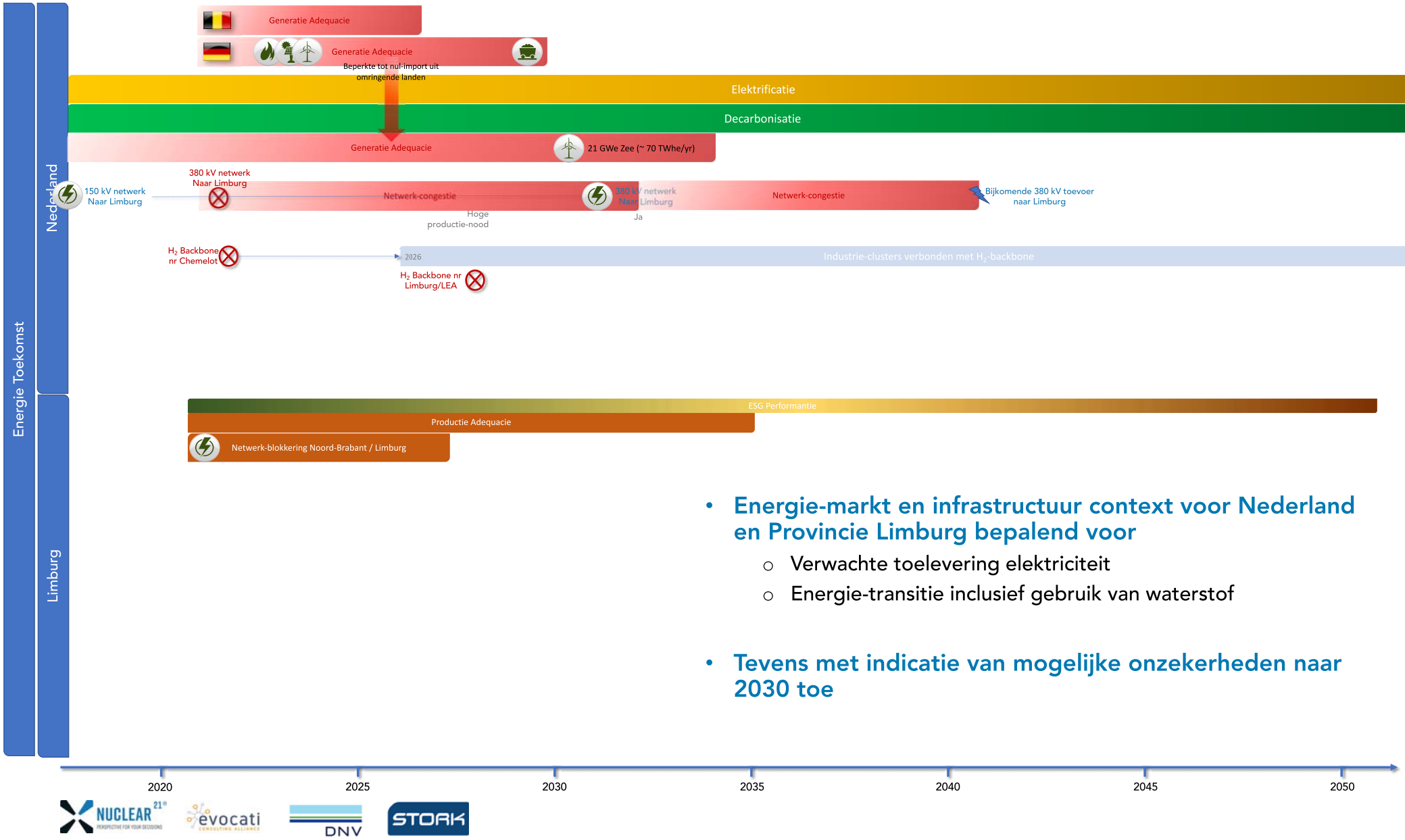
- **Gegeven de huidige en verwachte nucleaire programma-capaciteit in Nederland alsook de verwachte energie behoeftes in de Provincie Limburg worden zowel de Mini-SMR als de SMR optie als mogelijk beschouwd, met de keuze onder andere bepaald door:**
  - De urgentie van gedecarboniseerde energie-supply waarbij Mini-SMRs vanaf 2030 en SMRs vanaf 2035 als realiseerbaar worden geacht
  - Het risico-profiel welke de initiatief-nemers betreffende dergelijke nieuwbouw op zich wensen te nemen
  - De benodigde redundantie in energie-voorziening t.o.v. de energie-behoefte (vnl. energie-intensieve en kritische processen)
  - De markt-verwachtingen voor specifieke LWR (Mini-)SMR ontwikkelaars tijdens de komende drie - vijf jaar

# Routeplan

- **Een routeplan (“Roadmap”) werd opgemaakt resulterend in verschillende scenarios naar Mini-SMRs en/of SMRs**
    - Aanduiding van cruciale beslissingen
    - Randvoorwaarden
    - Beïnvloedende factoren omtrent Mini-SMR of SMR



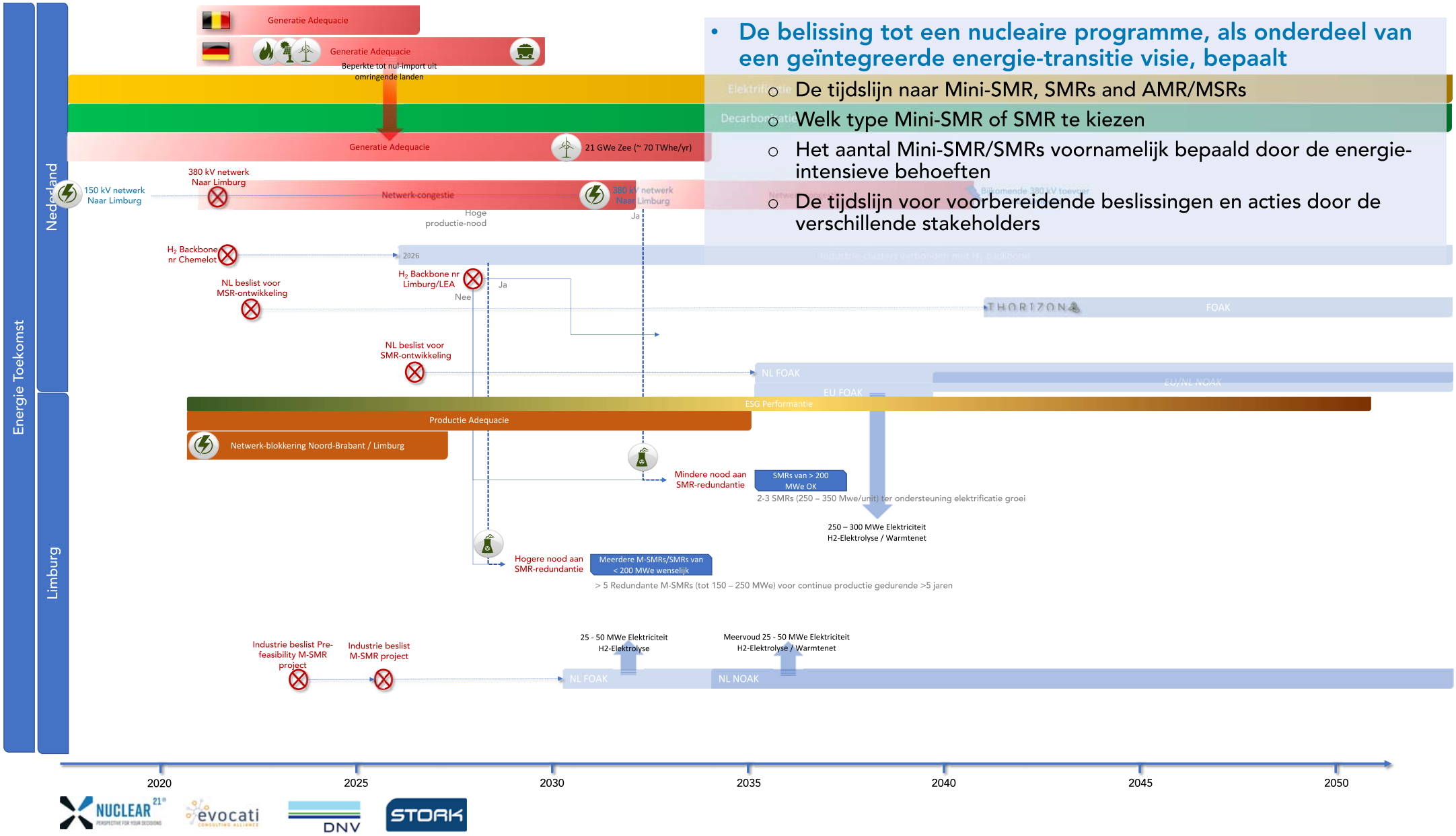
BUSINESS CONFIDENTIEEL




- **Energie-markt en infrastructuur context voor Nederland en Provincie Limburg bepalend voor**
  - Verwachte toelevering elektriciteit
  - Energie-transitie inclusief gebruik van waterstof

- **Tevens met indicatie van mogelijke onzekerheden naar 2030 toe**

BUSINESS CONFIDENTIEEL




- **De belissing tot een nucleaire programme, als onderdeel van een geïntegreerde energie-transitie visie, bepaalt**
  - De tijdslijn naar Mini-SMR, SMRs and AMR/MSRs
  - Welk type Mini-SMR of SMR te kiezen
    - Het aantal Mini-SMR/SMRs voornamelijk bepaald door de energie-intensieve behoeften
    - De tijdslijn voor voorbereidende beslissingen en acties door de verschillende stakeholders

# (Mini-)SMRs brengen verzekerde waarde aan de Provincie Limburg

***"Wat zijn voor Limburg, mede gelet op de uitdagingen qua netcongestie en het benodigde flexibele vermogen tussen 2030-2050, de meest logische varianten voor het aantal te plaatsen SMRs? Met andere woorden, wat past op realistische wijze op Limburgse schaal?"***

- Energie-intensieve industrie vraagt om een betrouwbare, redundante energie-belevering compatibel met het uitbatings-regime van hun processen (tijdsschaal 6-7 jaar). Dit kan door meerdere (Mini-)SMRs worden verwezenlijkt waarbij de beschikbaarheid van een 380 kV HS aansluiting bijkomende redundatie verzekert

- Niettemin blijft lokaal regelbaar vermogen gewenst en zelfs noodzakelijk
  - ✓ Elektriciteits-netwerk verlichten en dus systeemkosten verlagen
    - → *belangrijke kans voor Limburg en ook voor Tennet netbeheerder om structurele congestie (deels) op te lossen*
  - ✓ Warmte-kracht koppeling met beschikbaarheid van lokale elektriciteit en warmte generatie
  - ✓ Waterstofproductie als bijkomende productie in Hydrogen backbone

- Het aantal te plaatsen SMRs hangt af van de integratie met voornamelijk deze industriële noden en met de keuze tussen Mini-SMR (20 – 50 MWe) of SMR (200 -300 MWe)
  - ✓ Een 3-5 tal Mini-SMRs vanaf ca. 2030 laten versnelde serie-effecten toe en beantwoordend aan energie-behoeften en redundantie
  - ✓ Meerdere Mini-SMRs en/of SMRs te beschouwen na 2035

- (Mini-)SMR generatie levert een zeer grote economische waarde door reductie van gas-behoefte, vermijden van broeikasgas-emissies en nood aan certificaten, kosten-stabiliteit en energie-onafhankelijkheid naast lokale werkgelegenheid

# In conclusie

Mini-SMRs en SMRs kunnen beiden een optie zijn voor de Provincie Limburg m.b.t. de energie-transitie behoefte

- Er zijn geen geo-technische beperkingen welke locaties voor dergelijke (Mini-)SMRs onmogelijk maken
- De geprojecteerde energie-behoeften duiden op een nood aan op afroep beschikbaar en regelbaar vermogen waar deze (Mini-)SMRs een oplossing aanbieden

Mini-SMRs kunnen rond 2030 een mature optie zijn voor de Provincie Limburg, waarbij SMRs eerder rond 2035 dienen te worden voorzien

- Vandaar de keuze voor mature kerncentrale-technologie, nl. Licht-water reactoren (LWR)
- Meer geavanceerde (Mini-)SMRs te ontwikkelen voor behoeftes na 2040

Kortere tijdslijnen zijn te beschouwen enkel indien een gefocused nucleair programma in Nederland wordt versterkt en bestendigd

- Een duidelijke stabiele energie-politiek projecteert wat investerings-stabiliteit brengt
- Een nucleair programma “Neratoom 2.0” mede-ondersteund in privaat-publieke samenwerking
- Met het oog op capaciteits-versterking en business-waarde voor “Nuclear Nederland BV”

De keuze tussen Mini-SMR en SMR wordt door ‘urgentie’ voor regelbaar vermogen in energie-transitie bepaald en door risico-mitigatie voor toekomstige ontwikkelingen