

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294

Memo

www.tno.nl

Aan [REDACTED], Ministerie van Defensie

@tno.nl,

@tno.nl

Van [REDACTED]

Onderwerp SMR verkenningen

Datum

2 juli 2025

Onze referentie

TNO 2025 M11371

060.62510

Table of Contents

Afkortingen lijst.....	2
Management samenvatting	2
1. Inleiding.....	4
1.1. Doelstelling.....	4
1.2. Aanpak	4
1.3. Leeswijzer	5
2. Bijdrage kernenergie aan duurzaamheidsdoelstellingen.....	6
3. Militaire toepassingen van nucleaire energie.....	8
3.1. Strategische elektriciteit en warmteopwekking.....	9
3.2. Tactische elektriciteit- en warmteopwekking.....	10
3.3. Strategische e-fuel productie.....	11
3.4. Nuclear Marine Propulsion	13
3.5. Floating Nuclear Power Plants	13
3.6. Kleinschalige energieopwekking	14
3.7. State-of- the-Art technologieën voor strategische & tactische elektriciteit en warmteopwekking.....	14
4. Beleidsaspecten nucleaire energie voor Defensie.....	16
4.1. De bijdrage aan duurzaamheidsdoelstellingen van defensie	17
4.2. Modulariteit van energiesystemen voor Defensie	18
4.3. Bestuurlijke inbedding & maatschappelijk draagvlak.....	18
4.4. Ruimtelijke inbedding	18
4.5. Internationale afhankelijkheden.....	18
4.6. Veiligheid en gevolgen bij incidenten	19
4.7. Wat is de Nederlandse kennisbasis?.....	20
5. Conclusies & Aanbevelingen	21
6. Referenties	24

Signatures	25
Appendix 1: Notities flipover workshop 30042024	26
Appendix 2: Technische aspecten van Nucleaire Energie	28
1. Introductie van nucleaire fysica	28
2. Overzicht nucleaire reactor technieken	30
2.1 Light Water Reactor	32
2.2 Graphite-Moderated Reactor	33
2.3 Fast Reactor	35
2.4 Heatpipe Reactor	36
3 Formaat van nucleaire reactoren	36
3.1 Grote conventionele reactor (GCR)	37
3.2 Small Modular Reactor (SMR)	37
3.3 Microreactoren	40

Afkortingen lijst

EDA	European Defence Agency
FOAK	First of a Kind (prototype) SMR
NATO STO	NATO Science and Technology Organization
SMR	Small Modular Reactor

Management samenvatting

Middels het project ‘SMR verkenningen’ wordt een eerste inventarisatie gemaakt van de aspecten die afgewogen moeten worden bij beleidskeuzes omtrent nucleaire energie voor de krijgsmacht.

De doelstelling van het project is het op objectieve wijze verkrijgen van een eerste kwalitatief inzicht in de (on)mogelijkheden van inzet van SMR's op militaire terreinen in Nederland en in missies en operaties aan de hand van de volgende vragen:

- op welke wijze zou kernenergie bij kunnen dragen aan de gestelde duurzaamheidsdoelstellingen van Defensie?
- wat zijn de voor- en nadelen van het gebruik van SMR's op de volgende toepassingsgebieden:
 - op militaire terreinen van defensie in Nederland.
 - in het militair operationele domein (zoals in missies en operaties).

- welke state-of-the-art SMR technologieën zijn waar in ontwikkeling?
- wat doen NATO-partners in relatie tot dit energietransitie thema?
- wat is de huidige kennisbasis in Nederland (en Europa) in relatie tot de ontwikkeling en inzet van SMR's?
- welke adviezen kunnen gegeven worden aan Defensie?

Beschrijving van de werkzaamheden

De aanpak van het project bestaat uit 4 stappen; literatuurstudie naar (state-of-the-art) SMR technologieën, stand van zaken NATO Science and Technology Organization (NATO STO) en European Defence Agency (EDA) in kaart brengen middels een questionnaire, een workshop met Defensie stakeholders om de belangrijkste aspecten zijn die een rol spelen in de besluitvorming vast te stellen en een eerste - hoog over - assessment van de voor- en nadelen van de inzet van SMR's op militaire terreinen in Nederland of in het operationele domein.

Resultaten en conclusies

Kernenergie is een mogelijk pad om de duurzaamheidsdoelstellingen te realiseren, maar is geen hernieuwbare bron. Kernenergie kan een bijdrage leveren aan het verminderen van het gebruik van fossiele brandstoffen in het operationeel domein, echter alleen schepen en kampeementen kunnen direct gebruik maken van kernenergie. Voor vliegtuigen zal kernenergie eerst omgezet moeten worden in een chemische vorm.

Er is een overzicht gemaakt van de state-of-the-art SMR technologieën en de landen waar deze ontwikkeling plaatsvindt.

De belangrijkste voordelen van het gebruik van SMR's op militaire terreinen van Defensie in Nederland en het gebruik in missies en operaties zijn dat het kan bijdragen aan de duurzaamheidsdoelstellingen van Defensie, de SMR technologie is modulair en opschaalbaar, SMR's hebben een kleine footprint en de ruimtelijk inbedding is hierdoor makkelijker, reactoren met TRISO brandstof brengen een relatief laag risico met zich mee, de CO₂ uitstoot per kWh voor kernenergie is lager dan voor zon- en windenergie en vergelijkbaar met waterkracht en nucleaire energie zorgt voor een robuuster voortzettingsvermogen dus kan onder crisis omstandigheden mogelijk goedkoper zijn dan energie op basis van fossiele brandstoffen.

De meeste nadelen van SMR's zijn geïdentificeerd voor het gebruik in missies en operaties. De belangrijkste nadelen zijn dat de discussie over het gebruik in missies en operaties nog nauwelijks gevoerd wordt en daardoor is er nog weinig aandacht voor de bestuurlijke inbedding en het maatschappelijk draagvlak, de infrastructuur in de nucleaire waarde keten is beperkt in Nederland, nucleaire kennis in Nederland is schaars en zal zonder investeringen in kennis en opleidingen nog schaarser worden vanwege het voornemen om 2 nieuwe kerncentrales te bouwen.

Er wordt geadviseerd om vanwege de beperkte kennis in Nederland omtrent nucleaire energie technologie en militair gebruik van kernenergie is het voor Nederland en Defensie belangrijk om zo snel mogelijk te investeren in kennisopbouw. Daarnaast wordt aangeraden om de samenwerkingsmogelijkheden met Frankrijk op het vlak van infrastructuur in de nucleaire waarde keten uit te zoeken. Het wordt aanbevolen om gericht interviews af te nemen bij SME's (Subject Matter Experts) van bondgenoten waar een civiele SMR ontwikkeling plaatsvindt om

informatie over internationale samenwerking te krijgen. Tot slot is het aan te raden om in het kader van veiligheid met name bij operationele inzet van mobiele reactoren dat er een beter inzicht ontstaat in de effecten van gevechtsschade.

1. Inleiding

Vanwege de klimaatverandering, wordt wereldwijd gekeken naar hoe de energietransitie kan worden vormgegeven. Dit heeft tot een hernieuwde interesse in nucleaire energie geleid.

Ook het Nederlandse Ministerie van Defensie heeft zich tot doel gesteld om de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen [1], wat verder uitgewerkt is in de roadmap 'Energie Transitie Defensie' [2] en in de Uitvoeringsagenda Duurzaamheid Defensie [3]. Nucleaire technologieën bieden een reeks technische oplossingen die een bijdrage kunnen leveren aan de komende energietransitie van de Nederlands krijgsmacht.

Met name de ontwikkelingen rondom Small Modular Reactors (SMR), waarvan de ontwikkelaars ook expliciet naar militaire toepassingen kijken, kan hierin relevant zijn. Middels het project 'SMR verkenningen' wordt een eerste inventarisatie gemaakt van de aspecten die afgewogen moeten worden bij beleidskeuzes omtrent nucleaire energie voor de krijgsmacht.

1.1. Doelstelling

De doelstelling van het project is het op objectieve wijze verkrijgen van een eerste kwalitatief inzicht in de (on)mogelijkheden van inzet van SMR's op militaire terreinen in Nederland en in missies en operaties aan de hand van de volgende vragen:

- op welke wijze zou kernenergie bij kunnen dragen aan de gestelde duurzaamheidsdoelstellingen van Defensie?
- wat zijn de voor- en nadelen van het gebruik van SMR's op de volgende toepassingsgebieden:
 - op militaire terreinen van defensie in Nederland.
 - in het militair operationele domein (zoals in missies en operaties).
- welke state-of-the-art SMR technologieën zijn waar in ontwikkeling?
- wat doen NATO-partners in relatie tot dit energietransitie thema?
- wat is de huidige kennisbasis in Nederland (en Europa) in relatie tot de ontwikkeling en inzet van SMR's?
- welke adviezen kunnen gegeven worden aan Defensie?

1.2. Aanpak

De aanpak van het project bestaat uit 4 stappen:

- 1) Literatuurstudie naar (state-of-the-art) SMR technologieën:
 - a. Vaststellen TRL niveau SMR technologieën en welke entiteiten leidend zijn in de ontwikkeling ervan;
 - b. Nagaan welke kennisbasis in Nederland momenteel aanwezig is in relatie tot kernenergie in het algemeen en SMR's in het bijzonder.

- 2) Stand van zaken NATO Science and Technology Organization (NATO STO) en European Defence Agency (EDA):
 - a. Opstellen questionnaire in afstemming en in samenwerking met Defensie
 - b. Defensie biedt questionnaire aan NATO partners met tot doel om vast te kunnen stellen welke prioriteit NATO partners aan dit vraagstuk geven en om vast te stellen welke ontwikkelingen waar plaatsvinden.
- 3) Workshop met Defensie stakeholders:
 - a. vaststellen wat de belangrijkste aspecten zijn die een rol spelen in de besluitvorming om wel of niet SMR's in te zetten op militaire terreinen in Nederland of in het operationele domein.
 - b. Vaststellen van de voor- en nadelen van deze belangrijkste aspecten. Deze aspecten zullen de basis vormen van een uitgebreidere (kwantitatieve) Multi-Criteria Analyse die in een volgende fase van het onderzoek uitgevoerd kan worden.
- 4) Eerste - hoog over - assessment van de voor- en nadelen van de inzet van SMR's op militaire terreinen in Nederland of in het operationele domein en opstellen van deze memo.

1.3. Leeswijzer

Deze memo is als volgt opgebouwd:

- In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de bijdrage van kernenergie aan de duurzaamheidsdoelstellingen.
- Hoofdstuk 3 wordt het toepassen van nucleaire energie voor defensie toepassingen besproken, welke nucleaire technologieën geschikt zijn voor de twee gekozen use cases Strategische & Tactische elektriciteit en warmteopwekking en waar deze technologieën in ontwikkeling zijn.
- Hoofdstuk 4 richt zich op de beleidsaspecten, die voor Defensie belangrijk zijn bij de afweging van het toepassen van SMR's, en de voor- en nadelen van het gebruik van SMR's in twee gekozen use cases.
- Tenslotte zijn de belangrijkste conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 5 samengevat.

2. Bijdrage kernenergie aan duurzaamheidsdoelstellingen

Defensie heeft zich tot doel gesteld om de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te verminderen. Binnen het Plan van Aanpak Energietransitie Defensie[4] zijn daarvoor de volgende streefdoelen geformuleerd:

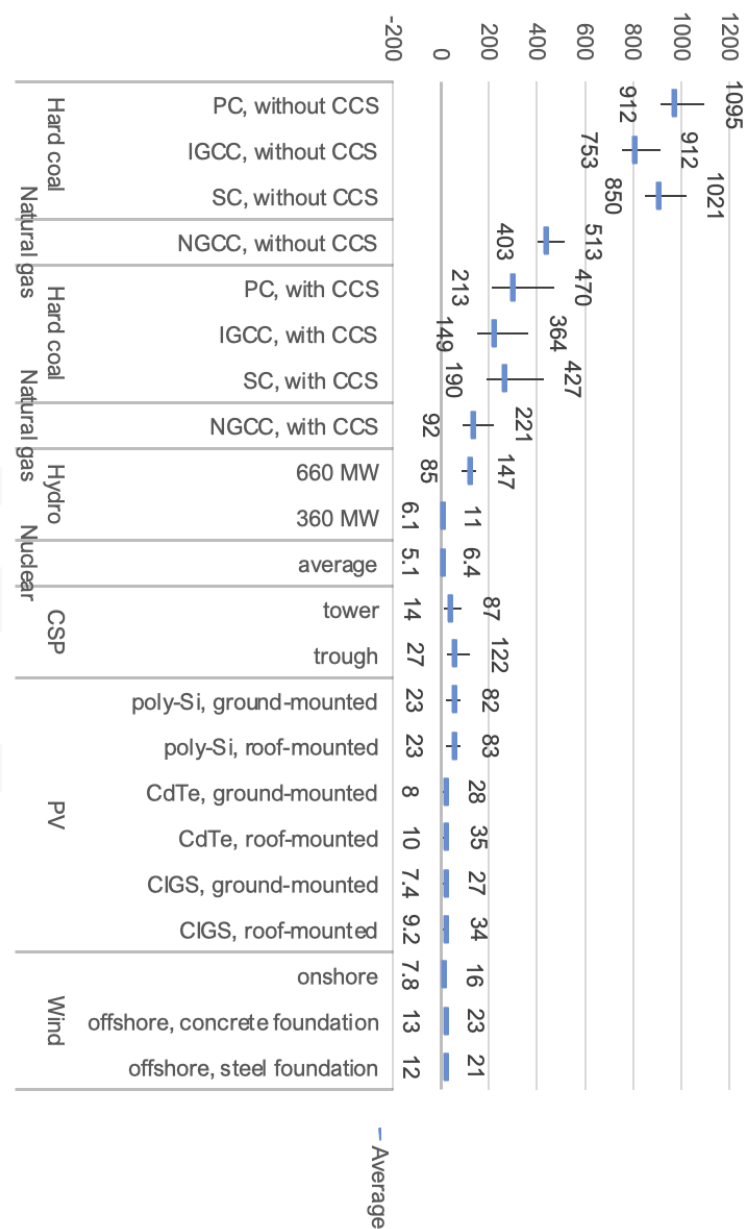
- In 2030 is de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen met ten minste 20% gereduceerd ten opzichte van 2010.
- In 2050 is de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen met ten minste 70% gereduceerd ten opzichte van 2010

Daarnaast zijn voor kampementen de volgende specifieke doelstellingen geformuleerd:

- In 2030 wordt de benodigde energie voor de Defensiekampementen voor 50% duurzaam opgewekt.
- In 2050 zijn de kampementen van Defensie volledig zelfvoorzienend op energiegebied.

Alhoewel nucleaire energie niet telt als hernieuwbaar (er wordt gebruik gemaakt van eindige voorraden splijtstoffen) kan het wel een belangrijke bijdrage leveren in de reductie van het gebruik van fossiele brandstoffen en aan de daarmee gepaard gaande CO₂ uitstoot. Kernenergie is daarmee een duurzame energievorm.

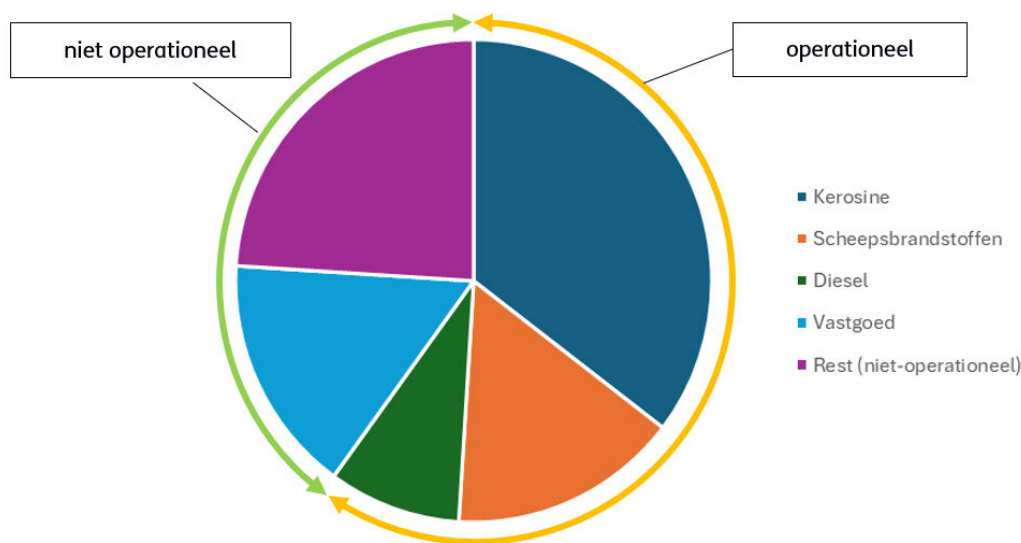
Volgens het United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) [5] is over de totale levenscyclus, de CO₂ uitstoot per kWh voor kernenergie lager dan voor zon- en windenergie en vergelijkbaar met waterkracht (zie Figuur 2.1).



Figuur 2.1: Lifecycle greenhouse gas emission in Lifecycle GHG emissions, in g CO₂ eq. per kWh, source [5]

Naast dat kernenergie duurzaam is, heeft kernenergie nog een voordeel. Door de zeer hoge energiedichtheid van splijtstoffen is er relatief weinig brandstof nodig om lange tijd energie op te kunnen wekken. De intervallen waarop brandstofelementen vervangen moeten worden ligt in de orde van jaren. Hiermee biedt kernenergie in de basis een mogelijkheid om lange tijd zelfvoorzienend te zijn in energie opwekking.

Echter energiebronnen, die fossiele brandstoffen gebruiken, zijn niet voor iedere toepassing 1-op-1 te vervangen door een nucleaire energiebron. Afhankelijk van het type eindgebruiker zal hier een specifiek nucleair (concept) oplossing geformuleerd moeten worden. Figuur 2.2 geeft een globaal overzicht van het energiegebruik binnen defensie.



Figuur 2.2: Verdeling Energiegebruik Defensie 2019/2020, gebaseerd op [2], [4]

Niet-operationele gebruikers staan voor 40% van het energiegebruik van defensie. Dit omvat zowel defensie vastgoed als de categorie 'rest'. De rest categorie bevat grotendeels (civiele) voertuigen. Voor defensie vastgoed geldt dat warmte en elektriciteit rechtstreeks geleverd kan worden vanuit een (kleine) kerncentrale. Voor de energiegebruikers uit de categorie Rest (zie Figuur 2.2) kan voor een elektrisch wagenpark wordt gekozen. Met dit 'strategische energie en warmte' concept kan de energiebehoefte voor het niet operationele domein door nucleaire energie worden afgedekt.

Voor vliegtuigen, die nu kerosine gebruiken als brandstof, is een 1-op-1 nucleair alternatief niet voorhanden. Aircraft Nuclear Propulsion (ANP) is vanwege SWaP-C factoren nooit van de grond gekomen. Nucleaire productie van SAF (Sustainable Aviation Fuel) bijvoorbeeld op luchtmacht-basissen, zou hier wel een uitkomst kunnen bieden die de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen sterk terugbrengt en daarmee de energiezekerheid en voortzettingsvermogen versterkt. Dit 'Strategische e-Fuel productie' concept biedt dus een mogelijkheid om de luchtmacht op nucleaire energie te laten overstappen.

Voor grote schepen is het mogelijk om af te stappen van scheepsbrandstoffen en op nucleaire voortstuwing over te stappen (Nucleair Marine Propulsion). Voor kleine vaartuigen zal, uitgaande van nucleaire energie, echter een chemische tussenstap nodig blijven (Strategische e-Fuel productie).

Voor landoptreden, waar men diesel als brandstof gebruikt, moet ook meer in detail gekeken worden naar de inpasbaarheid van Nucleaire energie opwekking omdat ook hier geen 1-op-1 vervanging mogelijk is. Voor kampementen is het toepassen van een microreactor een mogelijkheid (Tactische elektriciteit en warmte opwekking). Voor zware/gepantserde voertuigen zal echter gekeken moeten worden naar een chemische tussenstap, bijvoorbeeld via het Strategische e-Fuel productie concept. Voor lichtere platformen zou nog naar elektrificatie gekeken kunnen worden of naar radio-isotop bronnen (Kleinschalige energieopwekkings concept). Tenslotte bestaat er nog de mogelijkheid om, indien er een haven aanwezig is, gebruik te maken van een Floating Nuclear Power Plant.

De wijze waarop nucleaire energie ingezet kan worden voor de duurzaamheidsdoelstellingen van defensie is samengevat in **Tabel 2.1**. De 6 nucleaire concepten zijn verder uitgewerkt in paragraaf 3.

Tabel 2.1: Wijze waarop Nucleaire energie kan bijdragen aan defensie duurzaamheidsdoelstellingen: Legenda{ X:kan volledige oplossing bieden, D: kan gedeeltelijke oplossing bieden, S: kan suboptimale oplossing bieden (conversie verliezen, extra logistiek), *: in combinatie met lokale e-Fuel productie}

Nucleaire concepten	Kerosine	Scheeps brandstof	Diesel	Vastgoed	Rest
Strategische Elektriciteit & Warmte				X	X
Strategische e-Fuel productie	X	X	X	S	S
Nuclear Marine Propulsion		X	D	D	D
Floating Nuclear Power Plant	X*	X*	D/X*	D	D
Tactische elektriciteit en warmte opwekking			D/X*	S	X
Kleinschalige energieopwekking			D		

3. Militaire toepassingen van nucleaire energie

Om vast te stellen wat de belangrijkste aspecten zijn die een rol spelen bij defensie rondom het toepassen van SMR's (en nucleaire energie in bredere zin) is er op 30 oktober 2024 een workshop georganiseerd om deze aspecten te identificeren. Er was een vertegenwoordiging aanwezig van 6 van de 7 organisatiedelen van het ministerie van Defensie, zijnde Marine, Landmacht, Luchtmacht, DOSCO, COMMIT en de bestuursstaf.

Vanuit de workshop is in twee ronden een inventarisatie gemaakt van aspecten die beleidskeuzes over nucleaire energie beïnvloeden.

In de eerste ronde is een uiteenzetting gegeven van de technische mogelijkheden en onmogelijkheden van toepassing van nucleaire energietechnieken. Doordat er uiteenlopende

toepassingen zijn voor nucleaire energie was het noodzakelijk deze eerst verder uit te splitsen in specifieke use-cases. Hiervoor zijn er door TNO 6 use-cases (zie Tabel 3.1) opgesteld, die tijdens de workshop met Defensie zijn besproken.

In de tweede ronde zijn de 2 use-cases (degene waar de meeste interesse voor bestond) geselecteerd om de aspecten te identificeren en te prioriteren die relevant zijn voor beleidskeuzes.

Tabel 3.1: Militaire use-cases voor gebruik van nucleaire energie

Use-case nucleaire energie	Beschrijving	Interesse
Strategische elektriciteit en warmte	productie van elektriciteit en warmte voor defensie locaties in Nederland • off-site • on-site	6
Tactische elektriciteit en warmte opwekking	Levering van stroom en warmte voor kampementen in strategisch support area's / Main Operating Bases buiten Nederland Geen complexe infrastructuur vereisen. Snel op te zetten en af te bouwen	3
Strategische e-Fuel productie	Productie van brandstoffen zoals e-Diesel en e-SAF • off-site • on-site	2
Nuclear Marine Propulsion	Voortstuwing van schepen en onderzeeboten Leveren van (nood)stroom via haven infrastructuur	2
Floating Nuclear Power Plant	Levering van (nood) stroom via haven infrastructuur Levering van stroom aan MOB, ROB grenzend aan zee Levering van stroom voor ontzilting Levering van stroom voor e-fuel generatie	0
Kleinschalige energieopwekking	Vervangen van kleinere diesel aggregaten en batterijen in het operationele domein	0

In de volgende paragrafen zijn de genoemde use-cases voor nucleaire energie verder uitgewerkt, waarbij een vertaling wordt gegeven naar de mogelijke technische oplossingsrichtingen en beperkingen die daaraan zijn gekoppeld, en de meest relevante aspecten voor beleidskeuzes.

3.1. Strategische elektriciteit en warmteopwekking

Het concept gaat uit van de statische plaatsing van een SMR op een militaire terrein in Nederland, om hier elektriciteit en mogelijk warmte te leveren. 5.1.1.b

Gedurende de workshop werd aangegeven dat de primaire functie gezien werd in het leveren van noodstroom, waar een typisch vermogen van 20 MWe voor wordt voorzien.

Kleine SMR's (statisch geplaatste microreactoren) worden ontworpen om onbemand te kunnen functioneren, op basis van remote monitoring voor een periode van 3-10 jaar.

Met een SMR kan volledige voorzien worden in de behoefte van niet-operationele verbruikers (zie Figuur 2.2) op militaire terreinen van defensie. Daarmee kan Defensie in +/- 40% van haar

energiegebruik voorzien zonder gebruik te maken van fossiele brandstoffen. Bovendien worden militaire terreinen volledige zelfvoorzienend voor niet-operationele energie verbruikers.

Afhankelijk van het SMR's ontwerp is het mogelijk om meerdere modules toe te voegen als de energiebehoefte groeit. Een voorbeeld wordt gegeven in Figuur 3.1. Dimensionering/schaalbaarheid zijn daarmee een sterk punt van SMR's in vergelijking met conventionele kerncentrales.



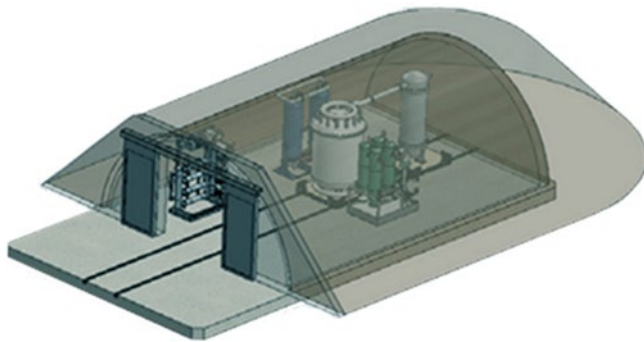
Figuur 3.1: Voorbeeld van een SMR ontwerp waarbij het aantal reactor-modules kan worden aangepast aan de energiebehoefte, bron: NuScale Power Reactor

De kosten van kernenergie zitten vooral in de hoge initiële kapitaalinvesteringen. Vervolgens zijn de kosten voor het gebruik relatief laag. De LCOE (Levelized Cost Of Electricity) voor SMR's wordt geschat tussen de 42 €/MWh en 110 €/MWh[6]. De kosten van nucleaire energie zullen tijdens een crisis of militair conflict in de basis niet veranderen. Nucleaire energie zorgt daarmee voor een robuuster voortzettingsvermogen en kan onder crisis omstandigheden mogelijk goedkoper zijn dan energie op basis van fossiele brandstoffen omdat de kosten vooraf zijn gemaakt.

3.2. Tactische elektriciteit- en warmteopwekking

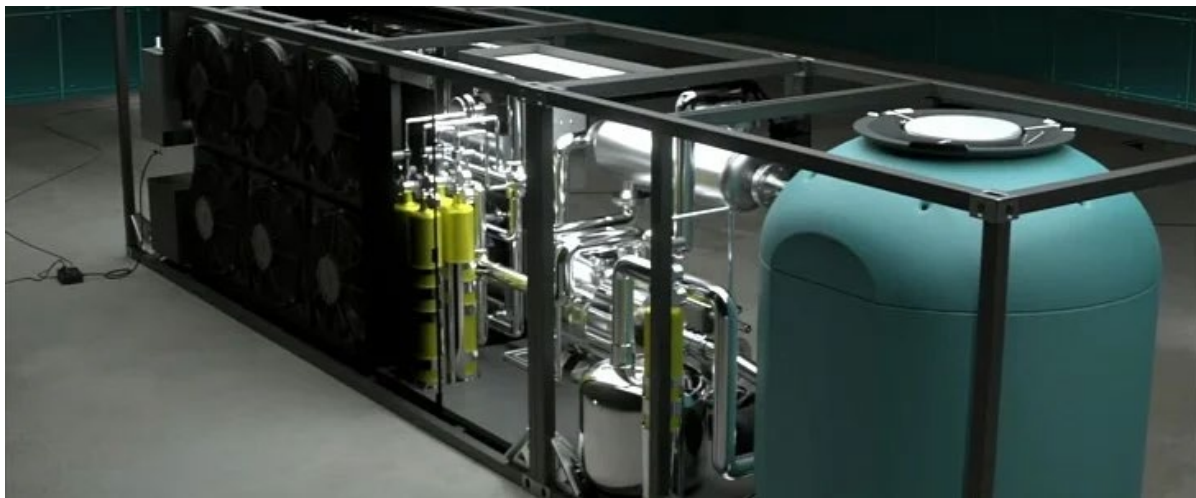
Bij tactische elektriciteit en warmte ontwikkeling wordt gekeken naar kernreactoren die grote dieselgeneratoren kunnen vervangen. Er zijn twee concepten te onderscheiden: transporteerbare en mobiele microreactoren.

Bij een transporteerbare ontwerp wordt een sterke reductie van de benodigde infrastructuur nagestreefd. Een voorbeeld is het BANR-concept van BWXT. Het BANR-concept vereist dat alle modules per spoor, vrachtwagen en schip kunnen worden vervoerd en in shelter/bunker kunnen worden samengevoegd. Dit concept vergt dus een minimale infrastructuur die ter plaatse moeten wordt gebouwd. Als de vraag naar stroom toeneemt, kan er een relatief snel een extra module worden bijgeplaatst.



Figuur 3.2: BWTX's Advanced Nuclear Reactor (BANR) modulair concept

Het mobiele concept streeft naar een zo flexibel mogelijk inzet. Uitgaande van de lijst van eisen die DARPA aan mobiele kernreactoren voor het operationele domein (zie paragraaf 3.3) stelt, wordt o.a. als streefdoel gesteld dat een mobiele microreactor binnen 72 uur geïnstalleerd en in gebruik kan worden genomen. Voor het uitschakelen, afkoelen, demonteren en transporteren wordt 7 dagen aangehouden. Deze technische tijden zijn duidelijk langer dan wat met diesel generatoren mogelijk is.



Figuur 3.3: Voorbeeld van een mobiele reactor (Kaleidos), bron: Radiant Technologies

3.3. Strategische e-fuel productie

Bij de use-case strategische e-Fuel productie, wordt uitgegaan dat een SMR statisch geplaatst wordt op een militair terrein in Nederland, primair voor het produceren van drop-in fuels zoals e-Diesel of e-SAF.

De productie van e-fuel doorloopt altijd meerdere processtappen; deze zijn: waterstofproductie, syngas productie en tenslotte de omzetting naar vloeibare koolwaterstoffen. Waterstof kan gemaakt worden door elektrolyse van water. Als wordt uitgegaan van een nucleaire energiebron, moet de thermische energie uit een reactor eerst omgezet worden in elektriciteit voordat deze gebruikt kan worden voor de elektrolyse van water.

Waterstof kan echter ook op basis van zwavel-jodiumcyclus worden verkregen, wat een

thermochemische proces is. Deze directe omzetting van thermische naar chemische energie is veel efficiënter, maar vraagt wel om een proceswarmte boven de +/- 700° C[6].

Ook de opvolgende stappen om van waterstof gas vloeibare koolwaterstoffen te maken kan op basis van thermochemische processen vorm worden gegeven. Een overzicht van de chemische proces stappen voor e-fuel productie zijn opgesomd in **Tabel 3.2**, inclusief een indicatie van de proces temperatuur voor die specifieke stap.

Tabel 3.2:Thermochemische processtappen voor e-fuel productie

Stap	Proces		Chemische omzetting	Proces temperatuur
1	Bunsen Reactie		$2H_2O + SO_2 + I_2 \rightarrow H_2SO_4 + 2HI$	+/- 120° C
2	Fase Scheiding	H_2SO_4	HI	200-300° C
3a	Zwafelzuur thermolyse	$H_2SO_4 \rightarrow 2SO_2 + 2H_2O + O_2$		> 830° C
3b	Waterstof-jodide ontleding		$2HI \rightarrow I_2 + H_2$	+/- 400 °C
4	Fase scheduling	H_2	I_2	<180 °
5	Reverse water-gas shift reactie (RWGS)	$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$		750° C - 900° C
6	Fischer-Tropsch proces	$(2n + 1)H_2 + nCO \rightarrow C_{nH_{2n+2}} + nH_2O$		150° C - 300° C

Niet iedere nucleaire reactor werkt op de temperaturen die nodig zijn voor efficiënte e-fuel generatie. Voor watergekoelde reactoren (BWR, PWR, iPWR en SCWR) kan worden uitgesloten dat de benodigde proces-temperaturen gehaald wordt en is daarom minder geschikt voor efficiënte e-fuel generatie. Een nucleaire reactor van het VHTR (Very High Temperature Reactor) type is wel in staat deze procestemperatuur te leveren en is daarmee ook de meest geschikte kandidaat. Het temperatuurbereik van gas en lood gekoelde snelle reactoren komt ook in de buurt van de benodigde proceswarmte voor e-fuel productie (zie **Tabel 3.2**), al zal dit een meer gedetailleerde analyse nodig hebben om tot definitieve conclusies te kunnen komen over de geschiktheid.

Uitgaande van een hypothetische efficiëntie van 40% (thermisch vermogen naar e-SAF) zou een SMR met een elektrisch vermogen van 20 MWe ongeveer 2000 liter kerosine per uur kunnen opleveren. Hierbij is aangenomen dat een SMR die 20 MWe elektrisch vermogen kan leveren, over 60 MWt thermisch vermogen beschikt, en dat kerosine een energiedichtheid van 12 kWh per liter heeft.

3.4. Nuclear Marine Propulsion

Nuclear Marine Propulsion is een van de eerste toepassingen van nucleaire energie die teruggaat tot 1940. Tegenwoordig maken meer dan 160 schepen gebruik van deze technologie en er is ook op veiligheidsgebied een trackrecord opgebouwd[7]. Nucleaire propulsie is toegepast bij vliegdekschepen, strategisch en tactische onderzeeboten en kruisers. De technologie is op meerdere plaatsen ontwikkeld. De VS heeft zijn technologie gedeeld met het VK. Frankrijk, Rusland China en India beschikken ieder over hun eigen technologie.

Nucleair aangedreven schepen beschikken over hoge vermogens, waardoor een hogere topsnelheid kan worden behaald dan gebruikelijk bij een conventionele aandrijving. Daarnaast kan deze snelheid voor langere tijd worden volgehouden, wat tot een veel grotere actieradius leidt. Een nucleair voortgestuwd schip kan lange tijd onafhankelijk zijn van brandstofbevoorrading.

Daar staat tegenover dat de bouw en het onderhoud van nucleair aangedreven schepen aanzienlijk duurder en complexer is dan bij conventionele schepen. Ondanks de goede trackrecord op veiligheidsgebied van nucleaire voortstuwingssystemen, zijn er aanzienlijke veiligheidsrisico's verbonden aan het gebruik van kernenergie. De mogelijkheid van nucleaire ongevallen creëert een noodzaak voor strikte veiligheidsprotocollen om stralingslekken te voorkomen.

Nucleair aangedreven schepen moeten voldoen aan strenge internationale en nationale regels, die niet overal uniform zijn. Dit levert beperkingen op aan de inzet van deze schepen, die niet gelden voor conventionele voortgestuwde schepen.

Ook op het vlak van publieke perceptie zal rekening gehouden moeten worden met weerstand.

Bij NMP wordt vrijwel zonder uitzondering gebruik gemaakt van PWR's die op hoog verrijkt uranium (HEU) werken, al is er trend gaande richting een lagere verrijkingsgraad[7]. Met de ontwikkeling van 4^{de} generatie kernreactoren, komen hier echter nieuwe mogelijkheden naar boven. Vanuit een perspectief van de Koninklijke Marine is het verstandig om voldoende kennis op te bouwen om deze alternatieven te kunnen beoordelen. Hierbij zal gekeken moeten worden naar de compactheid van reactorontwerp en naar mogelijkheden om laag verrijkte brandstoffen te gebruiken.

3.5. Floating Nuclear Power Plants

Een Floating Nuclear Power Plant (FNPP) is een kerncentrale geplaatst op een drijvend platform. Deze technologie biedt de mogelijkheid om elektriciteit, warmte en drinkwater (d.m.v. ontzilting) te leveren aan afgelegen gebieden, offshore-installaties en kuststeden zonder de noodzaak van grote infrastructuur op het land.

In Nederland is er commerciële interesse in het gebruik van dit soort installaties in de offshore industrie. Offshore operaties vinden vaak plaats op afgelegen locaties en duren vaak vele weken. De hogere kosten die kernenergie met zich meebrengen wegen hier op tegen de extra kosten die gemaakt moeten worden voor de bevoorrading van brandstoffen.

Een FNPP levert kan ook een rol spelen bij rampenbestrijding. Door de mobiliteit kunnen ze snel worden verplaatst naar gebieden die getroffen zijn door (natuur) rampen om daar noodstroom te leveren.

De fysieke veiligheid van drijvende kerncentrales kan worden beheerst door de mogelijkheid om de installatie te verplaatsen bij dreigende gevaren. Een FNPP heeft altijd toegang tot water dat gebruikt kan worden als koelwater, ook in het geval van incidenten. In extreme gevallen biedt water ook een effectieve afscherming voor gammastraling, in het geval dat een FNPP zinkt.

3.6. Kleinschalige energieopwekking

Bij kleinschalige nucleaire energieopwekking wordt specifiek gekeken naar apparaten die het verval van radioactief materiaal gebruiken voor het leveren van warmte of elektriciteit. Deze apparaten hebben een hoge energiedichtheid en kunnen gedurende een lange periode stroom en/of warmte leveren. Vermogens tot enkele tientallen kW's zijn mogelijk, maar de technieken zijn te miniaturisering tot chip-scale.

Het Amerikaanse Defense Science Board verklaarde dat nucleaire batterijen “het potentieel bieden voor baanbrekende prestaties op het gebied van het uithoudingsvermogen van power packs” en verder ontwikkeld moeten worden voor militair gebruik[8].

Ter vervanging van kleine dieselgeneratoren zou specifiek naar Stirling Radio-isotopic Generators (SRG) gekeken moeten worden, vanwege de relatief hoge power-density.

De kosten voor deze technologie zijn echter heel hoog en het voornaamste toepassingsgebied ligt in de ruimtevaart en onbemande systemen in moeilijk bereikbare locaties.

Proliferatie risico's zijn lager, omdat de gebruikte radioactieve stoffen geen splijtstoffen hoeven te bevatten.

3.7. State-of- the-Art technologieën voor strategische & tactische elektriciteit en warmteopwekking

Voor strategische elektriciteit -en warmteopwekking zijn, afhankelijk van de behoefte, reactoren in de SMR of microreactor categorie geschikt. Modules van de SMR kunnen naar behoefte worden toegevoegd. Ook is het mogelijk meerdere reactoren aan te sluiten op het lokale elektriciteitsnetwerk. Tegen de tijd dat de reactor door zijn brandstof heen is, wordt de betreffende reactor module in zijn geheel terug naar de fabriek gebracht voor onderhoud en refueling. SMR technologieën zijn verder uitgelegd in Appendix 2.

Een SMR wordt in principe statisch geplaatst op een locatie. Voor het tactische domein bestaat de aanvullende behoefte dat de reactor compact is, en relatief snel in gebruik kan worden genomen. Microreactoren zijn hierom beter geschikt voor tactische elektriciteit -en warmteopwekking. Microreactor technologieën zijn verder uitgelegd in Appendix 2.

In **Tabel 3.3** staan de reactortypen aangegeven die voor strategische en tactische elektriciteit -en warmteopwekking gebruikt kunnen worden.

Tabel 3.3: Reactor typen (technologieën) voor strategische en tactische elektriciteit -en warmteopwekking. Informatie uit Appendix 2 sectie 2.

Use case	Reactor Type	Splijtstof	Koelmiddel	Temperatuur (°C)	Landen
Strategische elektriciteit -en warmteopwekking (SMR)	Boiling Water Reactor	^{235}U (<5%), Pu	Water	285	5.1.2.a
	Pressurized Water Reactor	^{235}U (<5%), Pu	Water	315	
	Pressurized Heavy Water Reactor	^{235}U (<5%), Pu, natuurlijk uranium	Zwaar water	290	
	Molten Salt Fast Reactor	UF	Gesmolten zout (Fluor zout)	700	
Strategische en tactische elektriciteit -en warmteopwekking (SMR en microreactoren)	Lead-Cooled Fast Reactor	^{238}U	Lood	500-600	
	Sodium-Cooled Fast Reactor	^{238}U	Natrium	500-600	
	High Temperature Gas Cooled Reactor	TRISO	Helium	800	
Tactische elektriciteit -en warmteopwekking (microreactoren)	Very High Temperature Reactor	TRISO	Helium	800-1000	
	Heatpipe Reactor	TRISO, UN, UO_2 , UZrH , UMo	Heatpipes met gas (He, Ammonia) of vloeibaar metaal (Hg, Cs, Rb, K, Na, Li, Ca, Pb, In, Ag)	650-1500	

4. Beleidsaspecten nucleaire energie voor Defensie

Vanuit de workshop zijn de volgende aspecten naar boven gekomen die relevant werden geacht voor beleidskeuzes:

- Duurzaamheidsdoelstellingen
- Dimensionering/schaalbaarheid van energiesystemen van Defensie (modulariteit)
- Bestuurlijke inbedding, maatschappelijk draagvlak, en hoe deze te creëren
- Ruimtelijke inbedding
- Internationale afhankelijkheden
- Fysieke veiligheid en specifiek de gevolgen bij incidenten
- De beschikbare kennisbasis (Minimale kennisbasis / kennis ecosysteem / COI)
- Technische robuustheid & personeelsbelasting
- Kosten en lifecycle analyse

In Tabel 4.1 staat een overzicht van de voor- en nadelen van het gebruik van SMR's voor de in de workshop geselecteerde use cases Strategische elektriciteit en warmteopwekking (defensie locaties in NL) en Tactische elektriciteit en warmteopwekking (missies & operaties) op basis van de beschrijving gegeven in paragrafen 3.1 hierboven en 3.2 hierboven.

Tabel 4.1: Beoordeling voor en nadelen van de geselecteerde use-cases voor militaire nucleaire energieopwekking. (* sterk afhankelijk van de gekozen technieken, zie appendix 2)

Relevante aspecten	Strategische elektriciteit en warmteopwekking (defensie locaties in NL)	Tactische elektriciteit en warmteopwekking (missies & operaties)
Duurzaamheidsdoelstellingen	+	+
Dimensionering/schaalbaarheid van energiesystemen van Defensie (modulariteit)	+	+/-
Bestuurlijke inbedding, maatschappelijk draagvlak, en hoe deze te creëren	+/-	-
Ruimtelijke inbedding	+	+
Internationale afhankelijkheden	+/-	-
Fysieke veiligheid en specifiek de gevolgen bij incidenten	+(*)	?(*)
De beschikbare kennisbasis (Minimale kennisbasis / kennis ecosysteem / COI)	+/-(*)	-
Technische robuustheid & personeelsbelasting	+/-	?
Kosten en lifecycle analyse	+	+

In de volgende paragrafen wordt op deze geïdentificeerde aspecten iets dieper ingegaan.

4.1. De bijdrage aan duurzaamheidsdoelstellingen van defensie

Defensie heeft zich tot doel gesteld om de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen te vermindern. Voor het operationele domein moet dit tenminste 70% zijn ten opzichte van het gebruik van 2010. Kampementen moeten in 2050 volledig zelfvoorzienend zijn[3]. De energiemix van het operationeel materieel in 2020 is verdeeld in ^{5.1.1.b} kerosine, ^{5.1.1.b} scheepsbrandstoffen en ^{5.1.1.b} diesel [1]. Nucleaire energie is relatief duur in vergelijking met alternatieven. Zo zijn de kosten per MWh voor nucleaire energie 4 keer zo duur vergeleken met fossiele brandstoffen.

Scheepsbrandstoffen

Scheepsbrandstoffen kunnen vervangen worden door de overstap te maken naar nucleaire voorstuwing. De technologie kent een lange historie en heeft een goede trackrecord qua veiligheid.

Kerosine

Met de introductie van het gevechtsvliegtuig de F-35, die veel meer brandstof nodig heeft dan de F-16, en de snel verslechterende veiligheidssituatie in de wereld, is het aannemelijk dat de energie consumptie van de luchtmacht sterk gaat toenemen. Het is niet realistisch dat vliegtuigbrandstoffen sterk gaan veranderen; batterij-elektrisch vliegen is door de lage energiedichtheid van batterijen niet realistisch voor grotere platformen. Datzelfde geldt voor waterstof. Waterstof heeft een lage energiedichtheid, moet onder hoge druk of cryogeen worden meegenomen, opslag en gebruik brengt risico's met zich mee en waterstof vergt een complexere infrastructuur.

Om de defensie duurzaamheidsdoelstellingen te kunnen halen zal ingezet moeten worden op Sustainable Aviation Fuel (SAF). Bio-kerosine kan gemaakt worden op basis van plantaardige materialen, door middel van elektrochemische omzetting van water en kooldioxide of basis van thermochemische omzetting van water en kooldioxide. Nucleaire energie kan, met name in die laatste variant, relatief efficiënt omgezet worden in SAF. Dit vergt echter een kernreactor die proceswarmte op hoge temperatuur kan leveren (zie paragraaf 3.3). Ook voor SAF op basis van kernenergie geldt dat HTR technologie de beste kaarten in handen heeft.

Het CO₂ vrij produceren van kerosine (e-SAF) kan een belangrijke bijdrage leveren aan de duurzaamheidsdoelstellingen van Defensie. Kerosine levert de grootste bijdrage aan de CO₂ uitstoot van Defensie.

Diesel

Diesel wordt nu zowel gebruikt voor voertuigen en kampementen. Kernenergie kan bijdragen aan de doelstelling om militaire basissen en kampementen zelfvoorzienend te krijgen.

Elektriciteit en gas

Voor de vaste infrastructuur van Defensie in Nederland, wordt gebruik gemaakt van gas en elektriciteit die ten dele met hernieuwbare bronnen wordt opgewekt. Omdat zon en windenergie fluctueren in opbrengst, blijft er een behoefte aan een energiebron die op ieder gewenst moment kan blijven leveren. Kernenergie vormt hierin een optie, die moet worden afgewogen

tegen fossiele oplossingen en energie opslag concepten. Aspecten zoals kosten, veiligheid en operationele beperkingen zullen van geval tot geval verschillen. Er kan van uit gegaan worden dat er verschillende oplossingen gekozen kunnen worden. Microgrid technologieën zullen echter, ongeacht deze afweging, belangrijker worden. Inpasbaarheid van SMR's in microgrids als eis worden meegenomen.

4.2. Modulariteit van energiesystemen voor Defensie

Dimensionering/schaalbaarheid van energiesystemen van Defensie is noodzakelijk om flexibel in te kunnen spelen op veranderende omstandigheden. In tegenstelling tot conventionele kerncentrales, kunnen SMR's deze modulariteit bieden. Microgrid technologieën hierin ook behulpzaam zijn.

4.3. Bestuurlijke inbedding & maatschappelijk draagvlak

Maatschappelijk draagvlak voor kernenergie is aan het toenemen door de toenemende zorgen over klimaatverandering en lag in 2021 op 60%[9].

De ontwikkeling van SMR's is in een gevorderd stadium, maar moet zich nog commercieel bewijzen. Een trekkende rol vanuit Defensie zou Nederland een voortrekkersrol kunnen verschaffen in de commerciële exploitatie van de SMR's. Dit zou o.a. versterkend kunnen zijn voor de Nederlandse offshore industrie (zie paragraaf 3.5) en de Nederlandse (petro-) chemische industrie (zie paragraaf 3.3).

Om maatschappelijk draagvlak te kunnen behouden (en mogelijk te versterken) zou overwogen kunnen worden om mogelijke toepassing van SMR's op defensie terreinen in een publiek private constructie vorm te geven, zodat ook in de omgeving van een defensie locatie burgers en bedrijven kunnen profiteren van lokaal opgewekte kernenergie. De rol van kernenergie zou hier bijvoorbeeld complementair kunnen zijn aan lokaal (privaat) opgewekte elektriciteit uit zon en windenergie.

4.4. Ruimtelijke inbedding

Nucleaire reactoren, en met name SMR's, hebben een kleine footprint vergeleken met duurzame alternatieven als zon- of wind- energie, en zijn daarmee geometrisch eenvoudiger in te passen in het Nederlandse landschap.

Ditzelfde geldt ook voor de inpasbaarheid van microreactoren in het operationele domein. Daarbij is een bijkomend voordeel dat sterk bespaard kan worden op brandstof logistiek.

In militaire operaties van de afgelopen decennia (o.a. Afghanistan, Russische invasie van Oekraïne) is brandstoflogistiek kwetsbaar gebleken. Nucleaire reactoren kunnen jarenlang energie genereren voordat er verse splijtstoffen nodig zijn. De verminderde afhankelijkheid van brandstoflogistiek is niet alleen uit te drukken in financiële termen maar ook in mensenlevens.

4.5. Internationale afhankelijkheden

De Nederlandse krijgsmacht is afhankelijk van de import van fossiele brandstoffen, waardoor de leveringszekerheid onder druk kan komen te staan bij het uitbreken van politieke/militaire conflicten. 5.1.1.b

Kernenergie kan de afhankelijkheid van geïmporteerde fossiele brandstoffen verminderen. Nucleaire energie heeft als voordeel dat de splijtstoffen zeer energiedicht zijn, en er relatief eenvoudig een grotere voorraad aangehouden kan worden. Het is mogelijk voorraden aan te leggen voordat de escalatieladder wordt bewandeld, waardoor verstoringen in de toeleveringsketen geen directe effecten heeft op de leveringszekerheid van de energie. Met andere woorden: kernenergie levert een schokbestendige en onafhankelijke energievoorziening.

Nederland biedt een beperkte infrastructuur in de nucleaire waarde keten. Alhoewel Nederland wel over een verrijkingsfabriek (Urenco) en een afvalverwerkingsfaciliteit beschikt (Covra) beschikt, zijn er geen uranium mijnen of nucleaire brandstof producenten. Frankrijk, als EU en NAVO partner, heeft wel een nucleaire brandstof producent (Orano). Het wordt aangeraden om de samenwerkingsmogelijkheden met Frankrijk op dit vlak uit te zoeken. Ook daar waar het om winning van uranium gaat, zijn Canada en Australië grote en betrouwbare producenten. Ook zit er uranium in winbare hoeveelheden in de Nederlandse bodem, al is dit commercieel niet aantrekkelijk.

Om een eerste overzicht te verkrijgen wat NAVO partner landen van plan zijn met het inzetten van SMR's voor defensie toepassingen is door TNO een enquête opgesteld, die vervolgens via het Ministerie van Defensie is verspreid via de relevante NAVO kanalen. Helaas was de response op deze enquête te laag om conclusies te kunnen trekken. Dit resulteert in de aanbeveling om het uitvragen van onze NAVO partners te laten plaatsvinden door het plannen van interviews met nucleaire subject matter experts (SME's) binnen de verschillende defensieorganisaties van de NAVO partner landen. Hierbij zou de prioriteit moeten liggen bij NAVO landen met lopende (commerciële) SMR ontwikkelingen, zoals 5.1.2.a

Daarnaast zijn de ontwikkelingen rond de DARPA (5.1.2.a) interessant omdat het expliciet om reactoren voor Defensie toepassing gaat (zie paragraaf 3.3).

4.6. Veiligheid en gevolgen bij incidenten

Vanwege de compactheid van SMR's worden ze eenvoudiger ontworpen dan bestaande nucleaire centrales. De veiligheidsconcepten zijn daardoor ook veel meer berust op passieve veiligheid (lager vermogen, lagere werkdruk, etc) en hoge automatiseringsgraad. Systemen kunnen zichzelf uitschakelen zonder menselijke tussenkomst en vergen een minimale bemanning. Het Canadese StarCore Nuclear gaat zelfs uit van remote control via satellietverbindingen[10].

De verschillen tussen civiel en militair gebruik van SMR's liggen in het risico's van gevechtsschade. SMR's die geplaatst worden op Nederlandse defensie terreinen, mits op enige afstand geplaatst van munitiedepots, lopen geen significant grotere risico's op gevechtsschade dan civiele reactoren, er van uitgaande dat Nederlandse defensie terreinen op grote afstand liggen van de frontlinies van toekomstige conflicten (oost Europa), en dat deze terreinen van afdoende lucht en raketverdedigingsmiddelen zijn voorzien.

Voor SMR's die gebruikt worden in het militair operationele domein zijn deze aannames minder hard te maken. Hier zal dus specifiek rekening gehouden moeten worden met gevolgen van gevechtsschade (blast en penetratie) op de stralingsveiligheid. Deze risico's spelen nadrukkelijk

ook tijdens het transport (IED's). De mogelijk incidenten stellen eisen aan de supply-chain in de zin van bergingscapaciteit, reparatie van gevechtsschade en vervanging/productie van nieuwe middelen. Kosten en voortzettingsvermogen moeten expliciet tegen de escalatieladder worden uitgezet.

Door de grote verschillen in SMR technieken zijn er ook grote verschillen in de effecten die optreden bij het openbreken van een reactorvat (zie paragraaf 2). Op basis van primaire effecten zouden HTGR's bij gevechtsschade minder gevolgschade moeten opleveren dan bijvoorbeeld natrium (heftige chemische reacties) of water gekoelde (hoge druk) reactoren.

De stralingsafscherming van nucleaire reactoren, doorgaans geconstrueerd m.b.v. lood, verarmd uranium (U-238), staal en/of beton, biedt van nature een betere ballistische bescherming dan wat mogelijk is bij duurzame alternatieven als zon- of wind- energie. Het is aannemelijk dat een militaire SMR's voldoende bescherming zou moeten kunnen bieden tegen klein kaliber wapens en verschervende munitie. Bij het in kaart brengen de effecten van gevechtsschade zou de focus op zwaardere wapens moeten liggen.

Het wordt aangeraden om, bij toepassing van SMR's in het operationele domein, een goed en kwantitatief beeld op te bouwen van de mogelijke gevolgen van gevechtsschade en de procedures om hier mee om te gaan.

Ook Nucleaire proliferatie blijft een aandachtspunt, specifiek voor defensie toepassingen waar nucleaire reactoren buiten Nederland worden geplaatst.

4.7. Wat is de Nederlandse kennisbasis?

Door decennia aan uitblijven van investeringen in nucleaire energie, is de Nederlandse kennisbasis op dit gebied op een dieptepunt gekomen[11]. Met het voornemen om weer 2 nieuwe kerncentrales te bouwen[12] is het aannemelijk dat er concurrentie gaat ontstaan om het schaarse personeel met een achtergrond in nucleaire energie technologie.

Onderzoek naar SMR's vindt in Nederland plaats bij de TU Delft en bij NRG. De TU Delft zich heeft gericht op HTGR's (o.a. U-Battery microreactor concept) en MSR-technologie. NRG heeft onderzoek gedaan naar lichtwater-SMR's, HTGR's, LFR's en MSR's. De TU Delft heeft zich met name op reactor concept ontwikkeling gericht, waar NRG zich meer op veiligheids- en techno-economische analyse heeft gericht [11].

De commerciële opwekking van nucleaire energie moet concurreren met andere vormen van energieopwekking, zoals wind- en zonne-energie, op basis van kostprijs. De kostprijs van nucleaire energie opgewekt met SMR's is echter nog speculatief, wat een drempel vormt voor commerciële partijen om hierin te investeren. Investeringsbeslissingen worden door commerciële partijen doorgaans uitgesteld tot een prototype reactor (FOAK, First-of-a-kind) beschikbaar is [11].

Voor Defensie is de beschikbaarheid van energie, vooral in crisissituaties, belangrijker dan de kostprijs. In tijden van crisis kan de levering van energie uit traditionele bronnen onzeker zijn. Vanuit een Defensie perspectief is de leveringszekerheid van kernenergie belangrijker dan een mogelijk hogere kostprijs en is dus vanuit dat perspectief eerder een aantrekkelijke investering.

Een voortrekkersrol in het in gebruik nemen van een prototype SMR (FOAK) zou hiermee goed passen bij Defensie. Door te investeren in en te experimenteren met SMR's, kan Defensie ook praktische kennis opbouwen in Nederland. Deze kennis kan vervolgens worden gedeeld met commerciële partijen, waardoor de drempel voor bredere toepassing van SMR's in de commerciële sector wordt verlaagd. Bovendien kan Nederland zich hiermee positioneren als een leider op het gebied van innovatieve nucleaire technologieën, wat zowel economische als strategische voordelen kan opleveren.

5. Conclusies & Aanbevelingen

De verkennende studie heeft de onderstaande conclusies opgeleverd met betrekking tot door defensie gestelde vragen.

Op welke wijze zou kernenergie bij kunnen dragen aan de gestelde duurzaamheidsdoelstellingen van Defensie?

Gebruik van (fossiel) kerosine levert de grootste bijdrage in de CO₂ uitstoot van defensie. De duurzaamheidsdoelstellingen van Defensie zijn niet haalbaar als dit zo blijft. Kernenergie is een mogelijk pad om de duurzaamheidsdoelstellingen toch te realiseren, waarbij dan primair gericht kan worden op de productie van kerosine (SAF) op basis van nucleaire energie. Door de hoge temperatuur die een HTGR reactor kan bereiken, zou dit de best passende nucleaire technologie zijn om de duurzaamheidsdoelstelling te halen.

Kernenergie kan een bijdrage leveren aan het verminderen van het gebruik van fossiele brandstoffen in het operationeel domein, echter alleen schepen en kampementen kunnen direct gebruik maken van kernenergie. Voor vliegtuigen zal kernenergie eerst omgezet moeten worden in een chemische vorm. Bij voertuigen zal een omzetting naar elektriciteit en/of chemische vorm nodig zijn, waarbij kan worden aangetekend dat gepantserde/zware voertuigen flink zouden inleveren op prestaties als deze batterij-elektrisch zouden worden gemaakt. Diesel-hybride technologie lijkt hier op kwalitatieve gronden de beste kaarten te hebben.

Kernenergie is geen hernieuwbare bron, maar kan het gat dichten tot kernfusie beschikbaar komt. Het inzetten op energie waarde ketens waar thermochemische omzettingen een rol spelen, zou op de langere termijn goed kunnen aansluiten bij de overstap op kernfusie als belangrijkste energiebron.

Welke state-of-the-art SMR technologieën zijn waar in ontwikkeling?

In de onderstaande tabel staat een overzicht van de state-of-the-art SMR technologieën en de landen waar deze ontwikkeling plaatsvindt.

Use case	Reactor Type	Landen
Strategische elektriciteit -en warmteopwekking (SMR)	Boiling Water Reactor	5.1.2.a
	Pressurized Water Reactor	
	Pressurized Heavy Water Reactor	

Use case	Reactor Type	Landen
	Molten Salt Fast Reactor	5.1.2.a
Strategische en tactische elektriciteit -en warmteopwekking (SMR en microreactoren)	Lead-Cooled Fast Reactor	
	Sodium-Cooled Fast Reactor	
	High Temperature Gas Cooled Reactor	
	Very High Temperature Reactor	
Tactische elektriciteit -en warmteopwekking (microreactoren)	Heatpipe Reactor	

Wat zijn de voor- en nadelen van het gebruik van SMR's op de volgende toepassingsgebieden:

- op militaire terreinen van defensie in Nederland.
- in het militair operationele domein (zoals in missies en operaties).

De belangrijkste voordelen van het gebruik van SMR's op militaire terreinen van Defensie in Nederland (use case 1) en het gebruik in missies en operaties (use case 2) zijn:

- nucleaire energie kan bijdragen aan de duurzaamheidsdoelstellingen van Defensie;
- de SMR technologie is modulair en opschaalbaar;
- SMR's hebben een kleine footprint en de ruimtelijk inbedding is hierdoor makkelijker;
- reactoren met TRISO brandstof brengen een relatief laag risico met zich mee, gezien de splijtstof klein verpakt is;
- over de totale levenscyclus is de CO₂ uitstoot per kWh voor kernenergie lager dan voor zon- en windenergie en vergelijkbaar met waterkracht;
- ondanks dat de kosten per MWh voor nucleaire energie 4 keer zo duur zijn vergeleken met fossiele brandstoffen, zorgt nucleaire energie voor een robuuster voortzettingsvermogen en kan onder crisis omstandigheden mogelijk goedkoper zijn dan energie op basis van fossiele brandstoffen omdat de investeringskosten vooraf zijn gemaakt.

De meeste nadelen van SMR's zijn geïdentificeerd voor het gebruik in missies en operaties (use case 2). De belangrijkste nadelen zijn:

- de discussie over het gebruik in missies en operaties wordt nog nauwelijks gevoerd en daardoor is er nog weinig aandacht voor de bestuurlijke inbedding en het maatschappelijk draagvlak;
- de infrastructuur in de nucleaire waarde keten is beperkt in Nederland. Nederland heeft een verrijkingsfabriek (Urenco) en een afvalverwerkingsfaciliteit (Covra), maar er zijn geen uranium mijnen of nucleaire brandstof producenten;
- nucleaire kennis in Nederland is schaars en zal zonder investeringen in kennis en opleidingen nog schaarser worden vanwege het voornemen om 2 nieuwe kerncentrales te bouwen.

Wat doen NATO-partners in relatie tot dit energietransitie thema?

Het middels een enquête in kaart brengen van ontwikkelingen rond militaire inzet van SMR's bij NAVO partner landen heeft onvoldoende informatie opgeleverd. Er ligt wel een concept Food-for-Thought rapport van de European External Action Service over het logistiek gebruik van

nucleaire energie voor klimaatverandering en energie onafhankelijkheid. De toekomstige discussie rond dit rapport zal meer informatie opleveren.

Wat is de huidige kennisbasis in Nederland (en Europa) in relatie tot de ontwikkeling en inzet van SMR's?

Kennis omtrent nucleaire energie technologie is schaars in Nederland en gaat schaarser worden. De oorzaak ligt in enkele decennia aan uitblijvende investeringen in nucleaire technologie in combinatie met de planning van twee nieuwe kerncentrales in Nederland, waardoor concurrentie gaat ontstaan om het schaarse personeel.

Er is momenteel geen praktische kennisopbouw m.b.t. militair gebruik van kernenergie. Defensie zal altijd een minimale kennisbasis op nucleair gebied nodig hebben om op een verantwoorde manier beslissingen te kunnen nemen over het gebruik daarvan, ook als het niet de gewenste oplossing vormt. De HTTR in Japan heeft een grote bijdrage geleverd aan de praktische kennisopbouw van het gebruik van een HTGR. De HTGR (en de VHTR) is om, onder andere, deze reden een goede kandidaat voor een eerste testreactor voor militair gebruik in Nederland.

Welke adviezen kunnen gegeven worden aan Defensie?

Uit de verkennende studie komen de volgende adviezen en aanbevelingen:

- Vanwege de beperkte kennis in Nederland omtrent nucleaire energie technologie en militair gebruik van kern energie is het voor Nederland en Defensie belangrijk om zo snel mogelijk te **investeren in kennisopbouw**. De HTGR (en de VHTR) is om die reden een goede kandidaat voor een eerste testreactor voor militair gebruik in Nederland.
- Vanwege de beperkte infrastructuur in de nucleaire waarde keten in Nederland, wordt aangeraden om de samenwerkingsmogelijkheden met Frankrijk op dit vlak uit te zoeken.
- Tijdens deze verkennende studie is er niet voldoende informatie verkregen over **internationale samenwerking** en de nucleaire supply chain. Het wordt aanbevolen om **gericht interviews** af te nemen bij SME's (Subject Matter Experts) van bondgenoten waar een civiele SMR ontwikkeling plaatsvindt.
- In het kader van **veiligheid** met name **bij operationele inzet van mobiele reactoren** is het aan te raden dat er een beter **inzicht** ontstaat **in de effecten van gevechtsschade**. Er kan van uit gegaan worden dat de effecten sterk verschillen afhankelijk van het type van de reactor. Er is **meer onderzoek nodig over de kwetsbaarheid van alle typen kernreactoren in militaire context**. Vanuit het ontwerp en onderdelen van een kernreactor kan een kwalitatieve analyse gemaakt worden van de gevolgen van gevechtsschade met de aanname dat de inhoud (brandstof, afval etc.) van een reactor wordt blootgesteld aan de omgeving. Hoewel het aannemelijk is dat militaire bescherming van een SMR voldoende is tegen klein kaliber munitie zullen de specifieke ballistische effecten van klein en groot kaliber munitie en explosieven op (onderdelen van) kernreactoren nader moeten worden onderzocht.

6. Referenties

- [1] Schreinemaker, “Defensie Energie en Omgeving Strategie 2019-2022,” *Tweede Kamer der Staten-Generaal*, vol. 32 851, no. 71, pp. 1–8, 2021, [Online]. Available: <https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/moties/detail?id=2021D47333&did=2021D47333>.
- [2] Ministerie van Defensie *et al.*, “Roadmap Energietransitie (operationeel) Materiaal Defensie,” 2021. [Online]. Available: <https://www.defensie.nl/downloads/publicaties/2023/01/31/roadmap-energietransitie-materieel>.
- [3] “Uitvoeringsagenda Duurzaamheid Defensie.”
- [4] Ministerie van Defensie, “Plan van Aanpak Energietransitie Defensie,” 2020.
- [5] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), “Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources,” p. 108, 2022, [Online]. Available: <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf>.
- [6] NRG, “Marktanalyse Small Modular Reactors 2023.” 2023.
- [7] World Nuclear Association, “Nuclear Powered Ships.” <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships> (accessed Feb. 07, 2025).
- [8] Defense Science Board, “Final Report of the Defense Science Board 2012 Summer Study on Technology and Innovation Enablers for Superiority in 2030,” 2013.
- [9] P. Klapwijk, “Klimaatonderzoek voor Prinsjesdag 2021,” no. september, 2021.
- [10] World Nuclear Association, “Small Nuclear Power Reactors.” <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors> (accessed Feb. 10, 2025).
- [11] NRG, “Kleine modulaire kernreactoren (SMR).”
- [12] Rijksoverheid, “Projectprocedure nieuwe kerncentrales van start,” 2024. <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2024/02/19/projectprocedure-nieuwe-kerncentrales-van-start> (accessed Feb. 07, 2025).
- [13] gen-4 international forum, “Generation IV International Forum.” <https://www.gen-4.org/>.
- [14] IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World*, No. 2., no. 2. 2024.
- [15] C. RAJU and R. D. Kale, “Techniques for Extinguishing Sodium Fires,” 1979.
- [16] B. H. Yan, C. Wang, and L. G. Li, “The technology of micro heat pipe cooled reactor: A review,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 135, 2020, doi: 10.1016/j.anucene.2019.106948.
- [17] Z. Tian *et al.*, “A review of liquid metal high temperature heat pipes: Theoretical model, design, and application,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 214, 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124434.
- [18] IAEA, “PRIS.” <https://pris.iaea.org/PRIS/> (accessed Feb. 10, 2025).
- [19] IAEA, “Small Modular Reactors,” vol. 143, no. 8, pp. 24–27, 2022, doi: 10.1201/9781315373829-9.

Signatures



Appendix 1: Notities flipover workshop 30042024

Strategische Elektriciteit & Warmte generatie

Aspecten besluitvorming

- Afweging Nucleair vs Alternatieven inclusief duurzaamheidsaspecten.
- Dimensionering/behoefte → is niet helder → dit ondersteund een voorkeur voor modulair
- Primair: Nucleair voor noodstroom (3-20 MWe) → microreactoren

Aspecten om rekening mee te houden

- Veiligheid
- Hoeveel (dimensionering)
- Wat zijn de meerkosten
- Hoe is het maatschappelijk draagvlak en hoe hier mee om te gaan?
- Hoe gaat de ruimtelijke inbedding worden vormgegeven?
- Hoe moet de bestuurlijke inbedding worden vormgegeven?

Tactische Elektriciteit & Warmte generatie

(technologie lijkt beperkt tot HTGR/HPR)

Aspecten besluitvorming

- Omvang/**Schaalbaarheid**
- Regelbaarheid van het vermogen
- **Kosten** (in relatie tot andere energie bronnen)
- **Personeel**(opleiding/specialisatie)
- Toekomst
- **Commercieel**
 - Kopen?
 - Ontwikkelen?
- Internationaal (EDA/NAVO)
 - Partnership
 - Standaarden?
 - Interoperabiliteit?
- Bescherming
- **Redundancy**
 - Hoeveel onderhoud? → afhankelijkheid met personeel
- Regelgeving
 - Bestaande regels?
- Veiligheid
 - Infrastructurele
- Omgeving, terrein
- Milieu, circulariteit, herbruikbaarheid

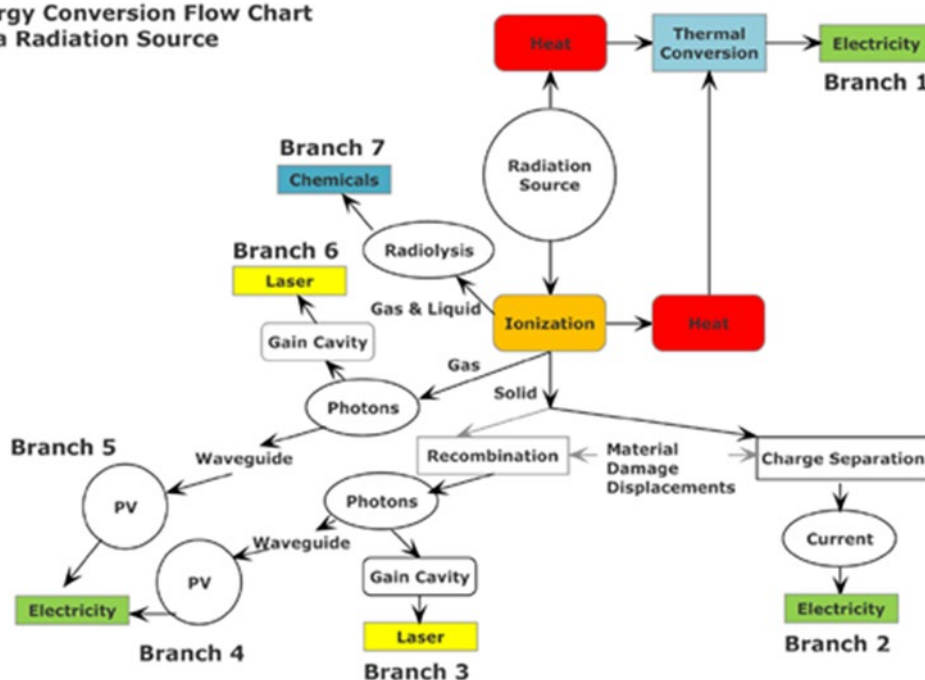
Appendix 2: Technische aspecten van Nucleaire Energie

In deze appendix worden de technische achtergronden uiteengezet op basis waarvan de onderzoeksvragen beantwoord kunnen worden. Paragraaf 1 behandelt de natuurkundige principes van kernsplijting, gevolgd door een uiteenzetting van de verschillende nucleaire reactor technieken in 2. Tenslotte worden enkele engineering aspecten behandeld in paragraaf 3.

1. Introductie van nucleaire fysica

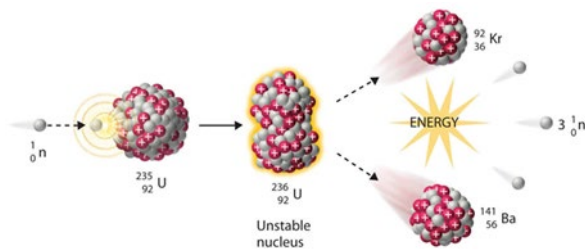
Nucleaire energietechnologieën kunnen gebruik maken van verschillende omzettingsprincipes (zie Figuur 0.1) om van nucleaire stralingsbronnen tot bruikbare warmte en elektriciteit te komen.

Energy Conversion Flow Chart for a Radiation Source



Figuur 0.1: Energie conversie methoden voor stralingsbronnen.

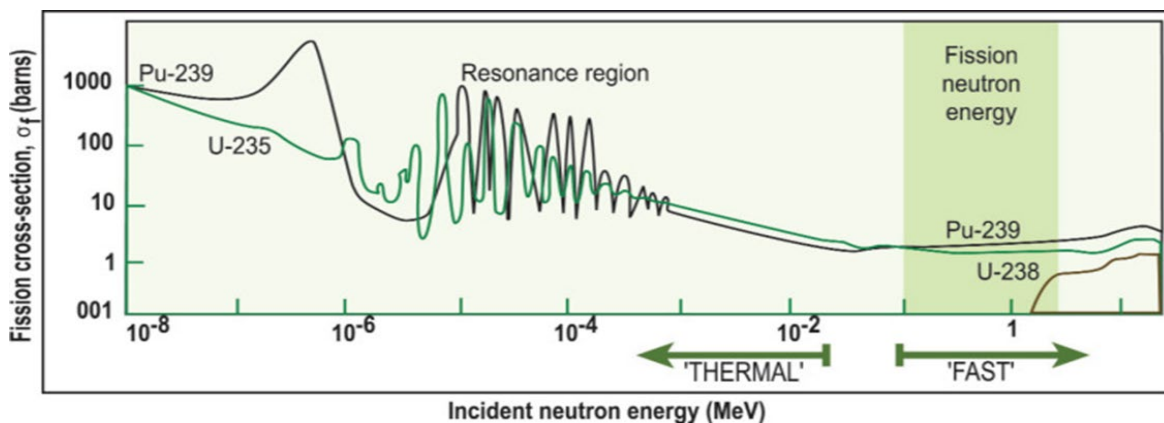
De stralingsbronnen kunnen ingedeeld worden in het mechanisme waarmee de straling wordt opgewekt, zoals natuurlijk verval, kernsplijting of kernfusie. Bij natuurlijk verval komt straling vrij door het spontaan uiteenvallen van instabiele atoomkernen. Kernsplijting is het proces waarbij de kern van een zwaar atoom, zoals uranium of plutonium, wordt gesplitst in twee lichtere kernen, waarbij een aanzienlijke hoeveelheid energie vrijkomt. Het zware atoom wordt hierbij instabiel gemaakt door de kern te bombarderen met een neutron. Kernfusie daarentegen betreft het samenvoegen van lichte atoomkernen, zoals die van waterstof, tot een zwaardere kern, waarbij eveneens veel energie vrijkomt.



Figuur 0.2: Kernsplijtingsproces van uranium-235 (^{235}U).

Bij kernsplijting splitst de zware atoomkern in lichtere fragmenten, neutronen, elektronen, neutrino's en fotonen. Alle fragmenten dragen energie, die uiteindelijk omgezet worden in warmte. Een schematische weergave van een typische kernsplijtingsreactie is te zien in **Figuur 0.2**.

De kern van een atoom is klein vergeleken met het volume van een atoom. Een neutron dat door het volume van een atoom beweegt, heeft een kleine kans om met de kern te botsen. Deze kans wordt uitgedrukt als de werkzame doorsnede (of “fission cross-section”). De werkzame doorsnede vertoont grote variatie tussen verschillende isotopen en is sterk afhankelijk van de snelheid van het inkomende neutron. **Figuur 0.3** maakt duidelijk dat langzaam bewegende neutronen tot 1000 keer vaker een kernsplijting in gang zetten, uitgaande van de isotopen ^{239}Pu en ^{235}U , dan snel bewegende neutronen. Langzaam bewegende neutronen worden ook wel ‘thermisch’ genoemd.



Figuur 0.3: Werkzame doorsnede als functie van de snelheid van de invallende neutron.

De neutronen die vrijkomen bij een kernsplijting zijn in de regel snel bewegend. Om beschikbaar gekomen neutronen efficiënt te gebruiken voor het op gang houden van een nucleaire reactie, kunnen de snelle neutronen worden vertraagd tot het thermische regime (zie **Figuur 0.3**). Het vertragen (modereren) van snelle neutronen kan worden bereikt door gebruik te maken van lichte atomen met een grote verstrooiingsdoorsnede en een kleine absorptiedoorsnede, zoals waterstof, koolstof of beryllium. Het gebruik van zo'n moderator vereist echter ruimte en voegt ook gewicht toe aan de constructie van een reactor. Dit principe wordt gebruikt bij conventionele nucleaire reactoren.

Daarnaast bestaan er reactoren die gebruik maken van snelle neutronen. Deze reactoren kunnen compacter worden gebouwd omdat er geen/weinig moderatoren nodig zijn. Dit vergt

echter wel dat er een overschot aan neutronen geproduceerd moet worden om het splijtingsproces op gang te houden. Uitgaande van Uranium als brandstof, kan dit worden gerealiseerd door de verrijkingsgraad te verhogen. Uranium zoals dat in de natuur wordt gevonden bestaat voor 99.27% uit Uranium-238, 0.72% Uranium-235 en een zeer klein beetje Uranium-234. Uranium-235 is de enige splijtbare nuclide die in grotere hoeveelheden voorkomt in de aardkorst en heeft van nature dus een verrijkingsgraad van 0.72%. Door het Uranium-235 fractie te verhogen (te verrijken) kan in een nucleaire reactor ook de neutronen dichtheid verhoogd worden. Snelle reactoren vereisen daarom brandstoffen met een hogere verrijkingsgraad.

Deze hogere verrijkingsgraad zorgt voor beperkingen door wetgeving omtrent nucleaire proliferatie. Uranium met een verrijkingsgraad boven de 20%, ook wel 'Weapons grade' of High Enriched Uranium (HEU) kunnen gebruikt worden voor de constructie van nucleaire wapens. Een verrijking tot 90% is echter meer gebruikelijk voor deze toepassing. Voor conventionele kerncentrales is een verrijking tussen de 3% en 5% echter al voldoende. Laag verrijkt uranium (LEU) heeft een verrijkingsgraad onder de 20%. Snelle reactoren hebben baat bij een hogere verrijkingsgraad, maar blijven wel onder de 20% om te kunnen voldoen aan het non-proliferatie verdrag.

Een voordeel van snelle reactoren is dat deze in staat zijn om nieuwe splijtstoffen te produceren (kweken). Uranium-238 kan door het invangen van een extra neutron worden omgezet in Plutonium-239, dat daarna weer als splijtstof ingezet kan worden. Snelle reactoren zijn daarmee efficiënter in het gebruik van de beschikbare uranium. Daarnaast kunnen snelle reactoren ingezet worden om langlevende nucleaire afvalstoffen (actinoiden) om te zetten (ook wel transmutatie genoemd), zonder dat dit een groot negatief effect heeft op de neutronen economie. Reactoren in het thermische regime doen dit niet.

2. Overzicht nucleaire reactor technieken

Een nucleaire reactor zet de energie die opgeslagen ligt in atoomkernen om naar bruikbaar vermogen; Afhankelijk van het reactortype en ontwerp kan dit bruikbare vermogen zowel thermisch, elektrisch, mechanisch of chemisch zijn. In dit hoofdstuk behandelen we de meest gangbare nucleaire reactor technieken inclusief een aantal aspecten die relevant zijn voor militaire inzet, zoals de kwetsbaarheid/bescherming voor gevechtsschade, militaire logistieke processen zoals transport en schadeherstel en personele belasting. Bij gevechtsschade wordt hier bedoeld de perforatie van reactor onderdelen door externe technische invloeden (b.v. klein kaliber wapens zoals kogels, fragmenten of explosieven). Deze schade veroorzaakt een Depressurized Loss Of Forced Cooling (DLOFC) event en de gevolgen hiervan worden per reactor techniek beschreven.

De IAEA rapporteert elke 2 jaar een overzicht van alle bestaande operationele nucleaire centrales in de wereld. De drukwaterreactor (PWR, Pressurized Water Reactor) is verreweg de meest gangbare techniek, gevolgd door de BWR (Boiling Water Reactor) en de PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor). Daarnaast zijn er sinds 2000 een aantal nieuwe reactor types in ontwikkeling [13]. Veel Small Modular Reactors (SMR's) maken gebruik van deze nieuwe ontwerpen. De meest gebruikte reactor typen staan in de volgende tabel:

Tabel 0.1: Kerncentrales in gebruik op 31 dec 2023 volgens IAEA[14] en nieuwe ontwerpen voor kerncentrales (generation IV reactor types) [13].

Reactor Type	Splijfstof	Koelmiddel	Landen	Temperatuur (°C)
Light Water Reactors				
Boiling Water Reactor	²³⁵ U (<5%), Pu	Water	5.1.2.a	285
Pressurized Water Reactor	²³⁵ U (<5%), Pu	Water		315
Pressurized Heavy Water Reactor	²³⁵ U (<5%), Pu, natuurlijk uranium	Zwaar water		290
Super Critical Water Cooled Reactor	²³⁵ U (<5%), Pu	Kritisch water		374.1
Graphite-Moderated Reactors				
Light Water Graphite Reactor	²³⁵ U (<5%), Pu	Water	5.1.2.a	284
Gas-Cooled Reactor	Natuurlijk uranium	CO ₂ gas		800
High Temperature Gas Cooled Reactor	TRISO	Helium		700-950
Very High Temperature Reactor	TRISO	Helium		800-1000
Fast Reactors				
Fast Breeder Reactor	UO ₂ , PuO ₂	Natrium	5.1.2.a	500 - 550
Molten Salt Fast Reactor	UF	Gesmolten zout (Fluor zout)		700
Lead-Cooled Fast Reactor	²³⁸ U	Lood		500 – 600
Sodium-Cooled Fast Reactor	²³⁸ U	Natrium		500 – 600
Gas-Cooled Fast Reactor	²³⁸ U	Helium		800
Heatpipe Reactors				
Heatpipe Reactor	TRISO, UN, UO ₂ , UZrH, UMo	Heatpipes met gas (He, Ammonia) of vloeibaar metaal (Hg, Cs, Rb, K, Na, Li, Ca, Pb, In, Ag)	5.1.2.a	650 - 1500

2.1 Light Water Reactor

Een Light Water Reactor maakt gebruik van gedemineraliseerd water als koelmiddel. Er bestaan verschillende varianten van dit type reactor. De energie die vrijkomt in de reactor kern wordt in de vorm van stoom getransporteerd. Het water in de BWR staat onder een druk van +/-75 atmosfeer en bereikt een kooktemperatuur van 285 °C. Koud water wordt doormiddel van een pomp naar de reactor kern gebracht waar het wordt opgewarmd zodat stoom wordt geproduceerd. De stoom wordt vervolgens naar turbines geleid om deze aan te drijven. Hierna wordt de stoom gekoeld in een condensator waar deze weer vloeibaar wordt. Het water kan vervolgens worden hergebruikt in de cyclus. De turbines zijn gekoppeld aan een generator waar thermisch en/of elektrisch vermogen gegenereerd wordt. De nucleaire brandstof voor BWRs bestaat uit staven laag verrijkt (<5%) uranium-235 mogelijk met toegevoegd plutonium.

De Pressurized Water Reactor (PWR) gebruikt zoals een BWR ook water om de energie ontstaan in de reactor kern te transporteren. In de PWR wordt water onder hoge druk (150 atmosfeer) naar de reactor kern gebracht waar het wordt opgewarmd door de neutronen van kernsplijting. De temperatuur van het water in een PWR bereikt in de kern 315 °C. Door de hoge druk van het water zal het vloeibaar blijven onder hoge temperaturen. Dit hete water wordt uit de reactor kern getransporteerd. Het hete water wordt in indirect contact gebracht met koel water uit een aparte tweede cyclus. Het koele water wordt opgewarmd door het hete water totdat stoom wordt geproduceerd in de tweede cyclus. De stoom volgt vervolgens hetzelfde pad als bij de BWR zodat thermisch en/of elektrisch vermogen gegenereerd wordt. Ook hier wordt het afgekoelde water hergebruikt. Er bestaan ontwerpen waar de primaire cyclus geïntegreerd is in de reactor kern. Dit ontwerp wordt ook de “integral Pressurized Water Reactor” (iPWR) genoemd. Net als bij de BWR bestaat de brandstof van een PWR uit staven laag verrijkt (<5%) uranium-235 mogelijk met plutonium. Een variant op de PWR is de Pressurized Heavy-Water Reactor (PHWR). De PHWR maakt in plaats van water gebruik van zwaar water (D₂O). In dit type reactor is het niet nodig om verrijkte brandstoffen te gebruiken. De energie huishouding van de reactor is verbeterd ten opzichte van de PWR wegens de lage mate van neutronen absorptie van zwaar water.

De Super Critical Water cooled Reactor (SCWR) is een type LWR dat op een druk boven het kritisch punt van water werkt. Het kritieke punt van water is 374.1 °C bij een druk van 217.1 atmosfeer. Water bevindt zich hier in de kritieke fase waar er geen onderscheid bestaat tussen vloeibaar en gas. In deze fase kan het water overgaan naar superkritisch stoom zonder te koken. Superkritisch stoom heeft een temperatuur boven het kookpunt van water maar is nog vloeibaar. Hierdoor zijn onderdelen als stoom generatoren (zoals bij de PWR) of drogers (zoals bij de BWR) niet nodig en hebben de reactoren een relatief simpeler ontwerp. Net als bij de BWR bestaat de brandstof van een SCWR uit staven laag verrijkt (<5%) uranium-235 of plutonium. Verder is de SCWR efficiënter dan een BWR doordat het geen bubbels laat ontstaan. Dit verlaagt de onvoorspelbaarheid van de verdeling van energie in de reactor. De nucleaire brandstof voor de SCWR bestaat uit plutonium en uraniumoxide mengsels.

LWR: Effecten van schade

Bij de inzet van nucleaire reactoren voor energie opwekking binnen defensie is veiligheid een cruciaal onderdeel. Hier beschrijven we het gevolg van schade aan een reactor met BWR of PWR technologie.

De reactor kern bevat alle nucleaire brandstof. Bij perforatie van de reactor kern, wanneer deze in gebruik is, kunnen water en stoom uit de reactor kern vrijkomen in een DLOFC event. Dit water en stoom kan besmet zijn met radioactief materiaal uit de kern. Hierdoor komt radioactief materiaal vrij en vormt het een gevaar voor de omgeving van de reactor.

Verder maken de BWR en PWR gebruik van leidingen om water of stoom onder druk te transporteren. In geval van perforatie van deze leidingen kan water en stoom ontsnappen. Stoom uit leidingen bevat geen radioactief materiaal uit de reactor kern. Maar schade aan deze onderdelen verstoren het proces van de reactor en kunnen leiden tot verdere schade aan andere eventueel kritieke onderdelen (zoals bijvoorbeeld de kern) van de reactor.

De PWR maakt gebruik van een secundaire cyclus. Als onderdelen van de secundaire cyclus beschadigd zijn, heeft dat relatief minder invloed op eventuele vervolgschade aan kritieke onderdelen. Als de transporterende onderdelen geïntegreerd zijn (zoals bij de iPWR) kan perforatie van leidingen door externe elementen enkel plaatsvinden als de reactor kern zelf ook geperforeerd is. Elke vorm van perforatie van reactor onderdelen moet worden gevolgd door een directe uitschakeling van de gehele reactor. Ook moet de omgeving worden ontruimd.

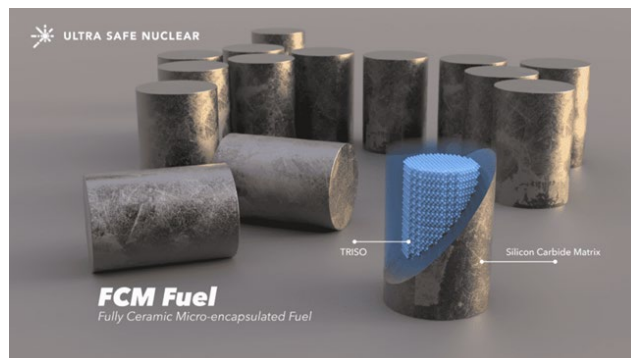
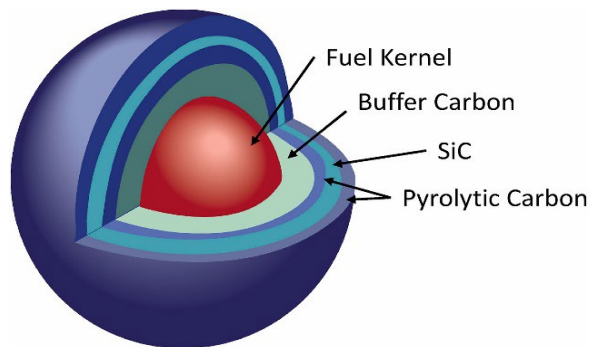
Gezien de SCWR onder zeer hoge druk opereert zijn er grotere risico's als gevolg van schade. Als het reactorvat of de buizen die het superkritieke water transporteren geperforeerd ontstaat er een groot drukverschil. Het superkritieke water zal overgaan naar stoom en ontsnappen door de opening ontstaan door de schade. Het drukverschil is groter dan bij schade aan een PWR.

Om perforatie te voorkomen is bescherming nodig. De reactor kernen van reactoren met BWR en PWR technologie hebben een stalen behuizing met een typisch dikte van meerdere inches. Dit beschermt de reactor kern vermoedelijk tegen klein kaliber dreigingen (mits deze een relatief lage snelheid hebben) maar dit zou verder uitgezocht moeten worden.

2.2 Graphite-Moderated Reactor

In een Graphite-Moderated Reactor (GMR) wordt grafiet gebruikt als moderator. Grafiet heeft een mate van neutronen absorptie lager dan dat van zwaar water en kan dus toe met een lagere verrijkingsgraad aan brandstof. Er bestaan meerdere varianten van GMRs. De Light Water Graphite Reactor (LWGR) werkt op een vergelijkbare manier als de BWR en PWR met water als koelmiddel. Het water in een LWGR bereikt een temperatuur van 284 °C en druk van 67.8 atmosfeer. De Gas-Cooled Reactor (GR) gebruikt grafiet als moderator en CO₂ gas als koelmiddel. Dit type reactor kan ook gebruik maken van natuurlijk uranium als brandstof. Het gas in een GR heeft een temperatuur van 800 °C en een opereert onder een druk van 70 atmosfeer. De High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) gebruikt helium gas als koelmiddel en werkt onder temperaturen tussen 700 °C en 950 °C en het gas heeft net als de GR een druk van 70 atmosfeer. De brandstof van een HTGR bestaat uit 'verpakte' deeltjes. Deze deeltjes bestaan uit een kern van uranium dioxide met lagen van poreus materiaal. Een voorbeeld van deze brandstof

zijn Tristructural-isotropic (TRISO) deeltjes (zie **Figuur 0.4**). De Very High Temperature Reactor (VHTR) is een HTGR waarin eventueel hogere temperaturen gehaald kunnen worden. Reactoren met een hoge operationele temperatuur (zoals de HTGR) kunnen gebruikt worden voor e-fuel generatie (zie paragraaf 3.3).



Figuur 0.4: TRISO fuel schematisch (boven) en TRISO fuel Pellets (onder) (source: Ultra Safe Nuclear)

GMR: Effecten van schade

De veiligheid omtrent GMR in geval van schade hangt sterk af van het specifieke ontwerp van de GMR. Het grafiet wat gebruikt wordt als moderator heeft een thermische traagheid (ook wel 'specifieke warmtecapaciteit per volume-eenheid' genoemd) van $1.534 \text{ JK}^{-1}\text{cm}^{-3}$. Het is bestand tegen zeer hoge temperaturen.

De LWGR is in principe een BWR (of PWR). De schade aan een LWGR reactor en waar rekening moet worden gehouden staat beschreven in 'LWR: Effecten van schade'. De GR werkt met gas onder lagere druk. Dit betekent dat in een DLOFC event het gas relatief minder snel ontsnapt en verspreidt. De reactor moet nog wel worden uitgeschakeld. De HTGR maakt gebruik van gas op hoge temperaturen. Als de reactor beschadigd is kan het hete helium gas ontsnappen. Dit gas is inert en bevat geen radioactieve elementen. De brandstof (TRISO) bestaat uit verpakte deeltjes met meerdere lagen (zie Figure 1). Mochten deze, in geval van schade aan de reactor, ontsnappen vormen ze geen substantieel gevaar voor de omgeving. Het splijtstofproducten blijven ingevangen binnen de siliconcarbon schil van de TRISO bolletjes en kunnen zich niet door de lucht verspreiden.

Het verwerken van afgewerkte brandstof elementen is een complex vanwege het scheidingsproces van de uranium uit de SiC schilletjes. Dit nadeel heeft wel als voordeel dat het de

proliferatie van nucleaire materialen remt. Verwerken van afgewerkte TRISO fuel moet plaatsvinden in gespecialiseerde faciliteiten.

2.3 Fast Reactor

Fast reactoren (FR) maken gebruik van kernsplijting dmv neutronen die op hoge snelheid. Hiervoor kan een reactor compacter gebouwd worden omdat er minder ruimte nodig is voor moderatoren. In vergelijking met een BWR of PWR, moeten echter een veel hogere neutronen dichtheid worden gehandhaafd om een kernreactie gaande te houden. De kans dat een snelle neutron met een splijtstof botst is namelijk veel kleiner. Een Fast reactor zal doorgaans een brandstof met een hogere verrijkingsgraad nodig hebben dan een BWR of PWR.

Voordeel van een Fast Reactor is dat snelle neutronen langlevende radioactieve stoffen (transurane elementen /actinoiden) ook kan splijten. Een Fast Reactor is daarmee in staat om nucleaire afvalstoffen op te branden.

Er bestaan verschillende varianten van fast reactoren. Een Fast Breeder Reactor (FBR) is een type fast reactor waarin per kernsplijting meer dan 1 neutron geproduceerd wordt. De overmaat aan snelle neutronen zorgt voor een omzetting van het niet splijtbare Uranium-238 naar het wel splijtbare Plutonium-239. Een FBR kan daarmee meer splijtstoffen produceren dan het verbruikt.

De temperatuur van een FBR ligt tussen 500 °C en 550 °C [10] onder atmosferische druk. De brandstof van een FBR bestaat vooral uit staven gemixte oxide stoffen zoals plutonium dioxide (PuO_2) of uranium dioxide (UO_2). De Molten Salt Fast Reactor (MSFR) is een type FR met gesmolten fluoride zouten als koelmiddel en heeft net als de PWR twee cycli. Het gesmolten zout kan ook worden gebruikt om de brandstof in op te slaan. De temperatuur van een MSFR is 700 °C onder atmosferische druk. Onder de Liquid Metal-Cooled Reactor (LMR) typen bestaat de Lead-Cooled Fast Reactor (LFR). Dit type reactor heeft geen moderator en gebruikt gesmolten lood als koelmiddel. Een LFR werkt met temperaturen tussen 500 °C en 600 °C met de mogelijkheid op hogere temperaturen (~800 °C). Ook de LFR gebruikt atmosferische druk[13]. De Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) is een type LMR dat natrium gebruikt als koelmiddel en werkt met dezelfde temperatuur en druk als de LFR. Er bestaat ook een gas-cooled variant onder de fast reactoren: de Gas-Cooled Fast Reactor (GFR). Deze gebruikt net als de HTGR ook helium als koelmiddel en werkt met dezelfde temperatuur en druk als de GR.

FR: Effecten van schade

Net als bij de BWR, PWR en GMR zijn de risico's en veiligheidsaspecten van de fast reactoren afhankelijk van het specifieke ontwerp. De temperaturen van een fast reactor is gemiddeld hoger dan dat van een LWR. Maar de fast reactoren werken met een aanzienlijk lagere druk in vergelijking met een LWR of een GMR. In het algemeen geldt hierdoor dat bij een DLOFC event bij een FR het schadegebied kleiner is dan in het geval van schade aan een LWR of GMR. De koelmiddelen eventueel inclusief de nucleaire brandstof kunnen uit de reactor lekken. Deze zijn een gevaar voor de directe omgeving van de reactor maar verspreiden zich zeer traag. De schade aan verdere omgeving kan relatief snel worden beperkt. Bij de SFR is extra voorzichtigheid vereist. Het natrium reageert exotherm met zuurstof en water. Dit betekent dat er snel

brand kan ontstaan als het vloeibare natrium uit de SFR lekt in het geval van schade. Voor het bestrijden van natrium branden is een speciale aanpak nodig[15].

2.4 Heatpipe Reactor

De heatpipe reactor (HPR) [16] maakt gebruik van zogeheten ‘heatpipes’ om de warmte van de kernsplijting naar buiten te leiden. Een heatpipe is een buis van metaal gevuld met gas[17]. Het gas transporteert de warmte door de buis. Er bestaan 3 categorieën van heatpipe ontwerpen:

1. Zwaartekracht geassisteerde heatpipes
2. Capillair aangedreven heatpipes
3. Roterende heatpipes

Bij een HPR staan de heatpipes gedeeltelijk in contact met het splijtingsmateriaal. De warmte kan direct via de heatpipes weg worden geleid. Het ontwerp van een heatpipe reactor verschilt sterk van andere typen reactoren zoals de LWR, GMR of de FR. Een HPR maakt geen gebruik van pompen om koelmiddelen te transporteren. De reactor kern van een HPR is compact en bevat de brandstof (staven met uranium, TRISO deeltjes), omringende heatpipes en een reflector. De reflector zorgt dat de warmte binnen de kern blijft.

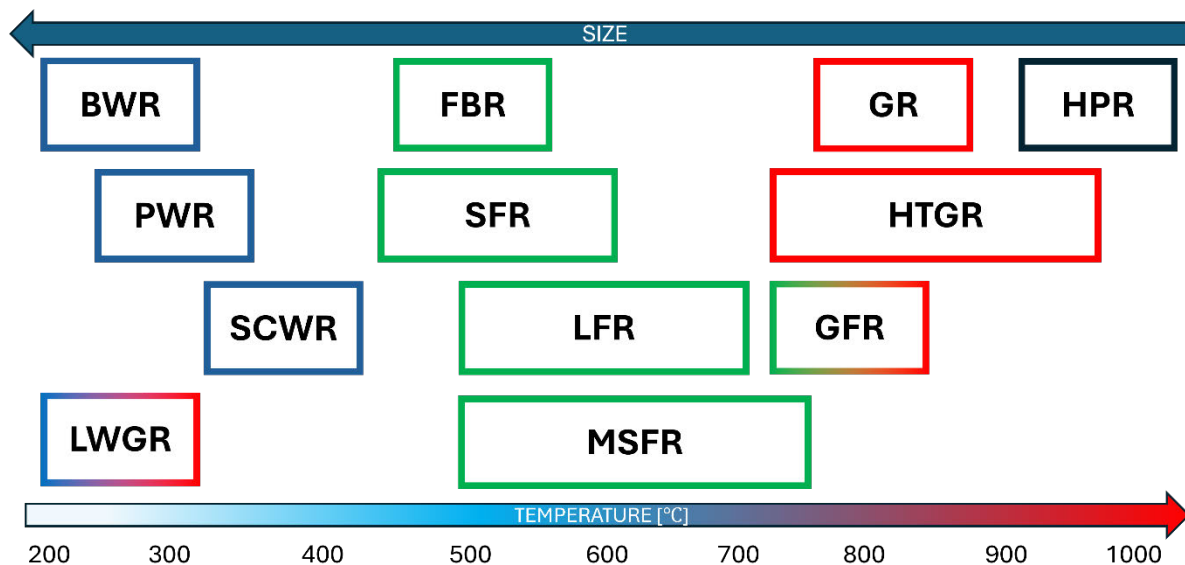
Een HPR heeft in het algemeen een compacter ontwerp vergeleken met een LWR of GMR. HPR's zijn zo ontworpen dat er bij incidenten geen actieve systemen nodig zijn om de reactor uit te schakelen.

HPR: Effecten van schade

Een HPR bevat, afhankelijk van het ontwerp en formaat, meerdere heatpipes. De heatpipes bevatten gas dat niet onder hoge druk staat. Deze kunnen vormen geen dreiging voor de omgeving in een DLOFC event gezien het gas zelf geen radioactief materiaal bevat. De brandstof kan uit staven of TRISO deeltjes bestaan. Staven met radioactieve brandstof kunnen in geval van schade in contact komen met de omgeving. Dit is schadelijk voor de omgeving en hier moet rekening mee gehouden worden. Als de brandstof van de HPR bestaat uit TRISO deeltjes vormen deze, in geval van schade aan de reactor kern, minder gevaar in de directe omgeving. Door de hoge smelttemperatuur van verbandstoffen, is het aannemelijk dat de effecten bij incidenten beperkt blijft tot de directe omgeving.

3 Formaat van nucleaire reactoren

Het formaat van nucleaire reactoren is afhankelijk van de operationele temperatuur en specifiek ontwerp. In het algemeen geldt: reactoren met hoge operationele temperaturen hebben een kleiner ontwerp. Een overzicht van de relatieve formaten en temperaturen van de verschillende reactortechnieken is weergegeven in **Figuur 0.5**.



Figuur 0.5: Relatieve formaten en operationele temperaturen per reactortechniek. Light Water reactoren (zie hoofdstuk 2.1) zijn met blauw aangegeven. Graphite-moderated reactoren (zie hoofdstuk 2.2) zijn met rood aangegeven. Fast reactoren (zie hoofdstuk 2.3) zijn met groen aangegeven. De heatpipe reactor (zie 2.4) is in zwart aangegeven.

3.1 Grote conventionele reactor (GCR)

De grote conventionele reactoren hebben een energiec capaciteit tussen 700 MW_e en 1000 MW_e. Dit type reactor is een onderdeel van een grote kerncentrale waarvan het terrein een omvang van meer dan 0.2 vierkante kilometer kan hebben. De meest gebruikte technieken in een GCR zijn de BWR en PWR. De reactor en onderdelen van de centrale worden op locatie gefabriceerd en geïnstalleerd. Ook kan de reactor worden aangesloten op het lokale elektriciteitsnetwerk. De reactor wordt onderhouden op de locatie.

GCR: Technologische gereedheid

De GCR is een van de oudste reactor typen en wordt wereldwijd veel gebruikt. 5.1.2.a heeft het grootste aantal (94) reactoren[18]. Met name 5.1.2.a hebben geïnvesteerd in de bouw en ontwikkeling van GCR. Voor GCR is de internationale regelgeving met betrekking tot bouw en transport gestandaardiseerd. Ook voor het transport van de brandstof (laag verrijkt uranium of plutonium) is de regelgeving internationaal gestandaardiseerd. Voor zowel de strategische als tactische inzet van nucleaire reactoren is de omvang van de GCR buiten het bereik en behoefte binnen het militaire domein.

3.2 Small Modular Reactor (SMR)

Kleine modulaire reactoren, beter bekend onder hun Engelse naam 'small modular reactor' (SMR). Small slaat op een energiec capaciteit tussen 20 MW_e en 300 MW_e. Modular slaat op de filosofie dat de reactor in componenten in de fabriek gefabriceerd wordt. Vervolgens worden de onderdelen naar de locatie van de centrale getransporteerd en daar geassembleerd. Modules van de SMR kunnen naar behoefte worden toegevoegd. Ook is het mogelijk meerdere reactoren aan te sluiten op het lokale elektriciteitsnetwerk. Tegen de tijd dat de reactor door zijn brandstof heen is, wordt de betreffende reactor module in zijn geheel terug naar de fabriek gebracht voor onderhoud en refueling.

Een SMR maakt gebruik van een van de volgende technieken: BWR, PWR, MSFR, LMFR, HTGR. Vergeleken met een GCR neemt een SMR veel minder ruimte in dan een conventionele centrale en is daarmee makkelijker in te passen in de omgeving.

SMR: Technologische gereedheid

Er zijn 4 operationele SMR in de wereld 5.1.2.a

Naast de operationele SMR en SMR onder constructie zijn er 44 SMR in de ontwerpfase. De IAEA geeft elke twee jaar een overzicht van de SMR ontwerpen die bekend zijn. Het meest recente overzicht komt uit 2024[19]. Voor een indicatie van de ontwikkelingsduur van een SMR bekijken we 2 voorbeelden: NuScale Power Module en HTTR. Uitgebreide informatie van de NuScale Power Module en de HTTR is te vinden in de SMR catalogus van 2024.

De NuScale Power Module is een SMR met iPWR technologie dat ontwikkeld wordt in de . De brandstof van de NuScale Power Module bestaat uit een UO_2 pellet. De reactor moet 77 MW_e leveren. Mijlpalen in het ontwikkelproces van de NuScale Power Module staan in Tabel 0.2. Deze mijlpalen laten zien dat er ongeveer 7 jaar nodig was voordat het ontwerp van de 160 MW_{th} reactor was goedgekeurd en productie gestart kon worden. Goedkeuring voor het opwaarderen naar een hogere capaciteit (250 MW_{th}) duurt naar verwachting 3 jaar. Na de goedkeuring kunnen de onderdelen worden gebouwd.

Tabel 0.2: Mijlpalen in de ontwikkeling van de NuScale Power Module.

Jaar	Mijlpaal
2003	Ontwikkeling van het initiële concept. Integrale test faciliteit operationeel
2007	NuScale Power, LLC opgericht
2008	NRC pre-applicatie gestart
2011	NuScale wordt onderdeel van Fluor
2012	Opdracht voor een gesimuleerde controle kamer met 12 reactor modules wordt gegeven
2013	United States Department of Energy (U.S. DOE) SMR Cooperative Agreement getekend
2016	Ontwerp certificaat (voor 160 MW_{th}) ingeleverd bij de U.S. NRC
2020	Standard Design Approval (SDA) ontvangen van de U.S. NRC
2022	NPM productie begonnen van de 'forging dies' voor de Upper Reactor Pressure Vessel. NuScale's methodiek voor bepaling Emergency Planning Zone goedgekeurd door de U.S. NRC. Uprated Standard Design Approval ingeleverd bij de NRC om de maximale power output te verhogen naar 250 MW_{th} .
2023	160 MW_{th} volledig gecertificeerd door NRC. Productie gestart voor 6 reactor drukvaten en stoom generator leidingen.
2025	Verwachte goedkeuring voor 250 MW_{th} (77 MW_e)

De High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) is een SMR met HTGR technologie ontwikkeld in Japan. De brandstof bestaat uit TRISO deeltjes. Het thermisch vermogen dat de HTTR levert is 30 MW_{th}. De reactor is bedoeld om de toepassing van een HTGR te testen. Zowel de energieproductie als veiligheidselementen (inclusief een DLOFC event) worden onderzocht. Met de HTTR kan kennis en ervaring worden opgebouwd voor het gebruik van reactoren met HTGR technologie. In Tabel 0.3 zijn de mijlpalen in de ontwikkeling van de HTTR weergegeven. Er zat in totaal 29 jaar tussen het initiële ontwerp en de eerste keer dat de HTTR reactor werd aangezet. De bouw van de HTTR duurde 6 jaar.

Tabel 0.3: Mijlpalen in de ontwikkeling van de High Temperature Engineering Test Reactor.

Jaar	Mijlpaal
1969-1984	Conceptueel ontwerp (4 jaar), Systeemintegriteit ontwerp (6 jaar), Basis ontwerp (3 jaar)
1985-1990	Gedetailleerd ontwerp (3 jaar), Toepassing en toestemming voor de bouw (1 jaar)
1991-1997	Bouw
1998	Eerste keer reactor aan
2001-2002	Reactor koelmiddel temperatuur van 850 °C, Veiligheid demonstratie tests
2004	Reactor koelmiddel temperatuur van 950 °C
2007-2010	850 °C / 30 dagen, 950 °C / 50 dagen. Veiligheid demonstratie tests
2014	Review van de New Regulatory Requirements om de operatie voort te zetten.
2020	Toestemming om de HTTR te herstarten
2021	Herstart van de HTTR
2022-2024	Veiligheid demonstratie tests

De internationale regelgeving voor de bouw en transport van SMR onderdelen is minder ontwikkeld in vergelijking met de GCR. De kennisopbouw van SMR's binnen Nederland is vooral gericht op het civiele domein en het onderzoek naar de passieve veiligheidsaspecten en economische haalbaarheid[6]. Voor toepassingen in het militaire domein moet expliciet gekeken worden naar de effecten van gevechtsschade, omdat dit aspect niet wordt afgedekt door het civiele domein. Gezien de SMR een vaste locatie vereist zal de tactische inzet van een SMR, afhankelijk van het specifieke ontwerp en formaat, geen aannemelijke optie zijn. SMR's

De opgebouwde kennis van het toepassen van SMR's in het civiele domein kan gebruikt worden voor het strategisch inzetten van SMR's in het militaire domein.

3.3 Microreactoren

Microreactoren, ook 'very Small Modular Reactors' (vSMR) genoemd kunnen een elektrisch vermogen leveren tot 20 MW_e. Voor de vSMR zijn de meest gebruikte technieken de HTGR, LMFR en de HPR. De ontwerpen voor de vSMR kunnen worden ingedeeld in 3 categorieën:

- **Statisch:** De niet mobiele vSMR lijkt het meest op de SMR. De modules van de vSMR worden in een fabriek gebouwd en op de gebruikslocatie geassembleerd. Dit ontwerp is geschikt voor vaste infrastructuren met een relatief kleine energiebehoefte.
- **Transporteerbaar:** De transporteerbare vSMR vereist geen vaste infrastructuur. De onderdelen worden in een fabriek gebouwd. Vervolgens kunnen de onderdelen op de gebruikslocatie of elders worden geassembleerd. De complete vSMR kan in een bunker worden geplaatst en daar in gebruik worden genomen.
- **Mobiel:** De mobiele vSMR heeft de kleinste omvang van de vSMR reactor typen. Deze past in een container en is (relatief) snel in te zetten op de locatie. Voor de mobiele vSMR bestaat een verscheidenheid aan ontwerpen.

Microreactoren: Technologische gereedheid

De ontwikkeling van vSMR's vindt vooral plaats in de 5.1.2.a. Hier zijn 6 microreactoren in de ontwerpfase. Er is nog geen microreactor in gebruik. Ook 5.1.2.a hebben een microreactor in de ontwerpfase. Hier behandelen we drie microreactor ontwerpen: de HOLOS-Mono reactor, de StarCore HTGR en de Los Alamos National Laboratory (LANL) HPR.

De HOLOS-Mono reactor is een microreactor in ontwikkeling in de 5.1.2.a met HTGR technologie en een elektrisch vermogen van 10 MW_e. De brandstof bestaat uit TRISO deeltjes. De hoge temperatuur die de reactor levert kan gebruikt worden voor brandstof (waterstof) productie. Mijlpalen in de ontwikkeling van de HOLOS-Mono reactor zijn te zien in Tabel 0.4. Uitgebreide informatie van de HOLOS-Mono reactor is te vinden in[19].

Tabel 0.4: Mijlpalen in de ontwikkeling van de HOLOS-Mono reactor.

Jaar	Mijlpaal
2015-2017	Conceptueel ontwerp ontwikkeld door Fillipone & Associates LLC
2017-2018	Holos-Test-Assembly-1 (kleiner prototype) ontwikkeld en succesvol getest door HolosGen LLC
2018-2019	Fonds toegekend aan HolosGen door U.S. DOE ARPA-e MEITNER programma om veiligheidstesten te demonstreren.
2019-2022	Sealed Power Module (kleinere simulator) gebouwd. Deze is bedoeld om computer modellen te verifiëren en veiligheidstesten te doorlopen.
2022-2023	Preliminary Safety Analysis Report voltooid

Jaar	Mijlpaal
2023-2024	Een gedetailleerd stappenplan ontwikkeld voor een 30 MW _e Holos Power Station
2024-2027	Gepland: Het voltooien van een digitale tweeling en full-scale elektrische tweeling van de HOLOS-Mono configuratie
2027-2028	Gepland: Testen van First Of A Kind (FOAK) unit bij U.S. DOE
2029	Gepland: Omzetten van de FOAK unit naar een operationele unit

Zoals te zien in Tabel 0.4 is de HOLOS-Mono reactor sinds 2015 in ontwikkeling. Het HOLOS-Mono systeem/subsysteem model hebben een Technology Readiness Level (TRL) van 6. De reactor kan in zijn geheel worden getransporteerd in een standaard zeecontainer. De HOLOS-Mono is geschikt voor offshore productie van vermogen en het compenseren van de onderbrekingen in het vermogen van hernieuwbare energiebronnen (zon, wind).

Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) uit de 5.1.2.a heeft de inzet van microreactoren op de Forward Operating Base (FOB) onderzocht. Hun bevindingen zijn samengebracht in een rapport door de 5.1.2.a National Lab 5.1.2. De belangrijkste bevindingen van het 5.1. rapport staan in (de appendix van) het 5.1.2.a

Het Final Report bevat een lijst van belangrijke eigenschappen waaraan een microreactor dient te voldoen als deze ingezet wordt op een FOB. Deze lijst is hieronder vertaald weergegeven.

Lijst van belangrijke eigenschappen:

1. Transport van nieuwe en gebruikte brandstof (door de lucht, over zee, over het spoor of de snelweg).
2. Geen significante toevoeging aan het gevaar voor de FOB; vermijdt kritieke radiologische gevolgen.
3. Reactor transporteerbaar met een C-17 vliegtuig
4. Geïnstalleerd en operationeel binnen 72 uur.
5. Uitschakeling, afkoeling, loskoppeling en transport naar een andere locatie binnen 7 dagen.
6. Mogelijkheid op onmiddellijke uitschakeling en passieve koeling.
7. Geen significante verhoging van het gezondheidsrisico en veiligheidsrisico van het publiek, militair personeel of de omgeving/natuur.
8. Brandstof moet meer dan 1 jaar bruikbaar zijn voordat het vervangen moet worden.
9. Geen proliferatie risico's
10. Schaalbaarheid van vermogen; 2 tot 10 MW_e.

⁷ 5.1.2.a

Er zijn 2 kandidaat microreactoren (en 1 systeem met radioisotop elementen) die aan de belangrijke eigenschappen voldoen. Dit zijn de StarCore HTGR en de LANL HPR. De parameters van deze reactoren staan in Tabel 0..

Tabel 0.5: Parameters van de StarCore HTGR en de LANL HPR.

Parameter	StarCore HTGR	LANL HPR
Vermogen (MW_e)	5	2
Koeling bij uitschakeling (MW_{th})	<2 (rest hitte)	<0.8
Operationele temperatuur ($^{\circ}C$)	850 (uitgang)	675 (uitgang)
Brandstof type (TRL niveau)	UCO TRISO (TRL 5-6)	UO ₂ (TRL 9)
Brandstof omhulsel door-brand temperatuur ($^{\circ}C$)	>1650	~1450
LOCA hoogste reactor temperatuur ($^{\circ}C$)	~1250	~1200
Nood koeling	Passief	Passief
Operationele druk (MPa)	7.4	0
Brandstof	~800 kg U-235 (<20% verrijkt)	~880 kg U-235 (<19.75% verrijkt)
Radioactiviteit bij doorbraak	TRISO behoudt radioactieve elementen	Minimale uitstoot (atmosferische druk brandstof in SS blok)
Brandstof omhulsel	Siliciumcarbide	SS-316
Vervangingsperiode brandstof	Bij vervanging van reactor module: 2 jaar	Bij vervanging van reactor module: 5 jaar

Gezien beide reactoren splijtstoffen bevatten is er gespecialiseerde uitrusting en getraind personeel nodig om de radioactieve elementen op te slaan en te verwijderen. Hiernaast is er een overeenkomst nodig met het land om dergelijke splijtstoffen te transporteren.

Voor een energiecentrale met een capaciteit van 10 MW_e zijn typisch 50 diesel generatoren nodig. Om diesel generatoren te kunnen vergelijken met kernreactoren wordt er gekeken naar de 'footprint' van een centrale. Deze parameter geeft een indicatie van de grootte van het terrein dat wordt ingenomen door de reactor/generator, centrale voor vermogensomzetting en de hitte geleiders (om hitte weg te leiden). Een energiecentrale met 50 diesel generatoren heeft een footprint van ongeveer 372 vierkante meter. Om met een kerncentrale 10 MW_e te leveren

zijn 2 StarCore HTGR of 5 LANL HPR nodig. De footprint van de StarCore HTGR centrale is ruim 130 vierkante meter. Dit is 35% van de footprint van 50 diesel generatoren. De footprint van de LANL HPR centrale is 186 vierkante meter wat neerkomt op 50% van een 50 diesel generator. Zowel de HTGR als de HPR centrales hebben dus een kleinere footprint vergeleken met diesel generatoren.

Naast de footprint kan ook gekeken worden naar het aantal trucks dat nodig is om de brandstof aan te vullen. Hierbij wordt een operationele periode van 10 jaar gebruikt. Voor een diesel generator oplossing zijn vele duizenden trucks nodig. Voor de StarCore HTGR centrale zijn elke 2 jaar 12 trucks nodig. De LANL HPR vereist 15 trucks elke 5 jaar. Het aanvullen van de nucleaire brandstof vereist significant minder transportelementen en bijvulmomenten.