

# Going Nuclear

Mogelijkheden voor nucleaire voortstuwing  
binnen de scheepvaart



's Werelds grootste vliegkampschip,  
het nucleair aangedreven USS *Gerald R. Ford*, onderweg in de Atlantische  
Oceaan, november 2024 (foto: MC2  
M. Orlovsky | U.S. Navy Photo)



De maritieme sectoragenda 2023 *No Guts, no Hollands Glorie!* is er duidelijk over: kernenergie gaat een rol spelen aan boord van Nederlandse schepen.<sup>1</sup> In dit intentiedocument staan vijf koploperprojecten omschreven, waaronder de nucleaire voorstuwing van schepen met als doel 'binnen 10 jaar een gestandaardiseerde, modulaire nucleaire reactor te ontwikkelen voor integratie aan boord van schepen'.<sup>2</sup> Voor een land als Nederland, dat niet bekend staat om zijn nucleaire expertise is dit een ambitieus project. Tegelijkertijd zijn de voordelen van kernenergie groot en worden er al belangrijke stappen gezet om bovengenoemd doel te realiseren. Dit artikel analyseert waarom in ons land nu kernenergie serieus wordt overwogen, hoever de huidige ontwikkelingen zijn en welke reactor- en conversie techniek er bovenuit springt voor maritieme toepassingen.



LEES VERDER →



## Waarom is kernenergie nu een hot item voor de maritieme sector?

De hernieuwde interesse voor kernenergie voor schepen komt op een cruciaal moment. De wereldwijde scheepvaartsector, verantwoordelijk voor bijna 3% van de mondiale CO<sub>2</sub>-uitstoot,<sup>3</sup> staat voor de uitdaging haar ecologische voetafdruk te verkleinen. Hoewel kernenergie strikt genomen niet hernieuwbaar is, behoort het wel tot de meest CO<sub>2</sub>-arme energiebronnen. Over de volledige levenscyclus stoot kernenergie een vergelijkbare hoeveelheid CO<sub>2</sub> uit als wind- en zonne-energie.<sup>4</sup>

Binnen de maritieme sector wordt inmiddels volop gekeken naar alternatieve energiebronnen zoals wind, zon en nieuwe brandstoffen als methanol. Deze opties kennen een lagere energiedichtheid dan conventionele fossiele brandstoffen. Tegelijkertijd zal de energiebehoefte van schepen, en vooral van marinevaartuigen, naar verwachting toenemen. Denk hierbij aan de inzet van nieuwe technologieën zoals geavanceerde radarsystemen, onbemande vaartuigen en mogelijke toekomstige wapensystemen zoals railguns.<sup>5</sup> Hierdoor ontstaat een groeiende 'energie-onbalans': de vraag naar energie stijgt, terwijl de energiedichtheid van de beschikbare alternatieven afneemt. Het gevolg is dat het benodigde volume voor het gehele energiepark exponentieel toeneemt. Kernenergie kan deze onbalans herstellen dankzij de hoge energiedichtheid, terwijl tegelijkertijd de uitstoot van de maritieme sector kan afnemen.

Naast deze bijdrage aan de decarbonisatie van de maritieme sector biedt kernenergie ook operationele voordelen. Doordat een nucleaire installatie langdurig een stabiel en hoog vermogen levert, kunnen schepen gedurende lange periodes autonoom opereren zonder afhankelijk te zijn van brandstofbevoorradingen. Dit maakt het mogelijk over een lange periode grote afstanden af te leggen en langdurig actief te blijven in gebieden die ver van de kust liggen.

Voor marineschepen betekent dit dat zij hogere snelheden kunnen aanhouden zonder dat dit ten koste gaat van hun inzetduur. Waar conventioneel aangedreven schepen regelmatig bevoorrading behoeven, kunnen nucleair aangedreven schepen weken tot maanden operationeel blijven met slechts beperkte logistieke ondersteuning. Hierdoor zijn ze veel meer stand-by en kunnen ze sneller reageren op onvoorziene situaties, grotere afstanden overbruggen en langer in een operatiegebied blijven. De combinatie van bereik, snelheid en zelfstandigheid vergroot de ma-

ritiem-strategische mogelijkheden en versterkt de inzetbaarheid van de eigen vloot.

Ook voor de civiele scheepvaart opent kernenergie nieuwe perspectieven. Schepen die langdurig ver op zee opereren, zoals schepen voor *deep-sea mining* of offshore schepen die werkzaamheden uitvoeren aan onderzeese infrastructuur, kunnen profiteren van een energievoorziening die onafhankelijk is van conventionele brandstoflogistiek. Hierdoor zijn beduidend minder brandstof transporten nodig om schepen in afgelegen gebieden operationeel te houden, wat niet alleen economische voordelen oplevert, maar ook de CO<sub>2</sub>-uitstoot door deze ondersteunende reizen aanzienlijk vermindert.

## Gebruik kernenergie anno nu

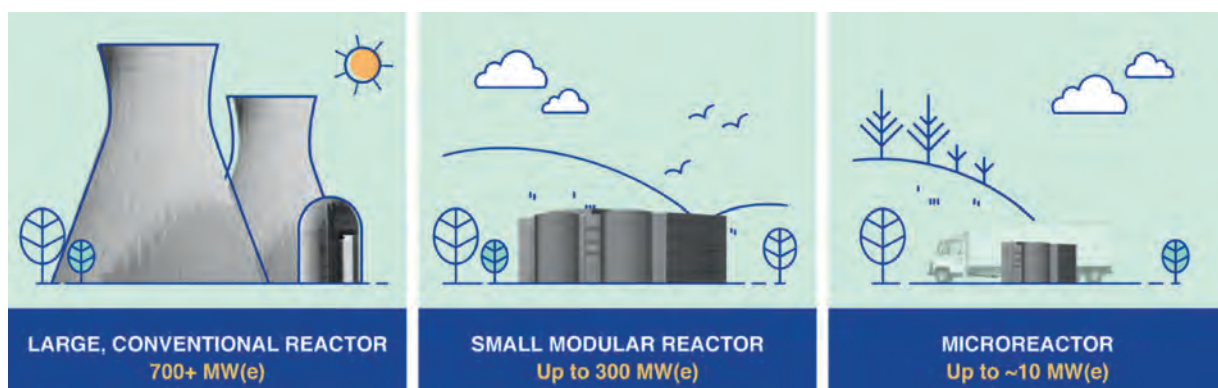
Al decennialang leveren kernreactoren wereldwijd een stabiele en schone energiebron. Momenteel zijn er ruim 400 reactoren actief in 31 landen, die samen jaarlijks circa 2600 TWh elektriciteit opwekken, goed voor ongeveer 10% van de wereldwijde elektriciteitsproductie.<sup>6</sup> De grootste producenten zijn de Verenigde Staten (30%), China (16%) en Frankrijk (14%), waarbij laatstgenoemde relatief gezien het grootste deel van zijn elektriciteit uit kernenergie betreft (67%).<sup>7</sup> In Nederland speelt kernenergie (nog) een bescheiden rol; zo'n 3.5% van de nationale elektriciteit productie, waarbij alleen de reactor in Borssele elektriciteit produceert middels het splijten van uraniumatomen.<sup>8</sup> Dit zal vermoedelijk veranderen aangezien de overheid van plan is vier nieuwe kerncentrales te bouwen en verder onderzoek gaat doen naar zogenaamde Small Modular Reactors (SMR's).<sup>9</sup>

Voor de maritieme sector zijn vooral de ontwikkelingen rondom SMR's van belang. In tegenstelling tot traditionele grote kerncentrales, met vermogens tot ruim 1000 megawatt elektrisch (MWe), zijn SMR's veel kleiner (tot 300 MWe per eenheid) en makkelijker schaalbaar (figuur 1). Bovendien bestaan er al reactorontwerpen die zelfs minder dan 10 MWe produceren; zogenoemde microreactoren welke nog beter geschikt zijn voor toepassing op schepen. Hoewel er inmiddels meer dan 80 ontwerpen en concepten voor SMR's en microreactoren bestaan, is er slechts een handvol in een vergevorderd stadium van realisatie.<sup>10</sup> Dit benadrukt de noodzaak voor verdere ontwikkeling en onderzoek, zeker wanneer gekeken wordt naar de maritieme context waar andere aspecten als ruimte, gewicht en variabele vermogensvraagstukken cruciaal zijn.

## Hoe wordt kernenergie gebruikt binnen de maritieme sector?

Kernenergie voor scheepsvoortstuwing is bepaald geen nieuw concept. Het wordt al decennia toegepast in de militaire sector, met nucleair aangedreven onderzeeboten, vliegkampschepen en kruisers. Landen als China, Frankrijk, India, Rusland, het VK en de VS beschikken al over nucleaire marineschepen, en ook andere landen werken aan programma's om dergelijk aangedreven vaartuigen te ontwikkelen. Brazilië bouwt bijvoorbeeld de nucleaire onderzeeboot *Álvaro Alberto*, terwijl Australië samenwerkt met het VK en de VS aan nucleaire onderzeeboten voor hun vloot.<sup>11</sup> Onlangs maakte president Donald Trump bekend dat Zuid-Korea nucleaire subs mag bouwen op Amerikaanse werven.

**‘De combinatie van bereik, snelheid en zelfstandigheid vergroot de maritiem-strategische mogelijkheden en versterkt de inzetbaarheid van de eigen vloot’**

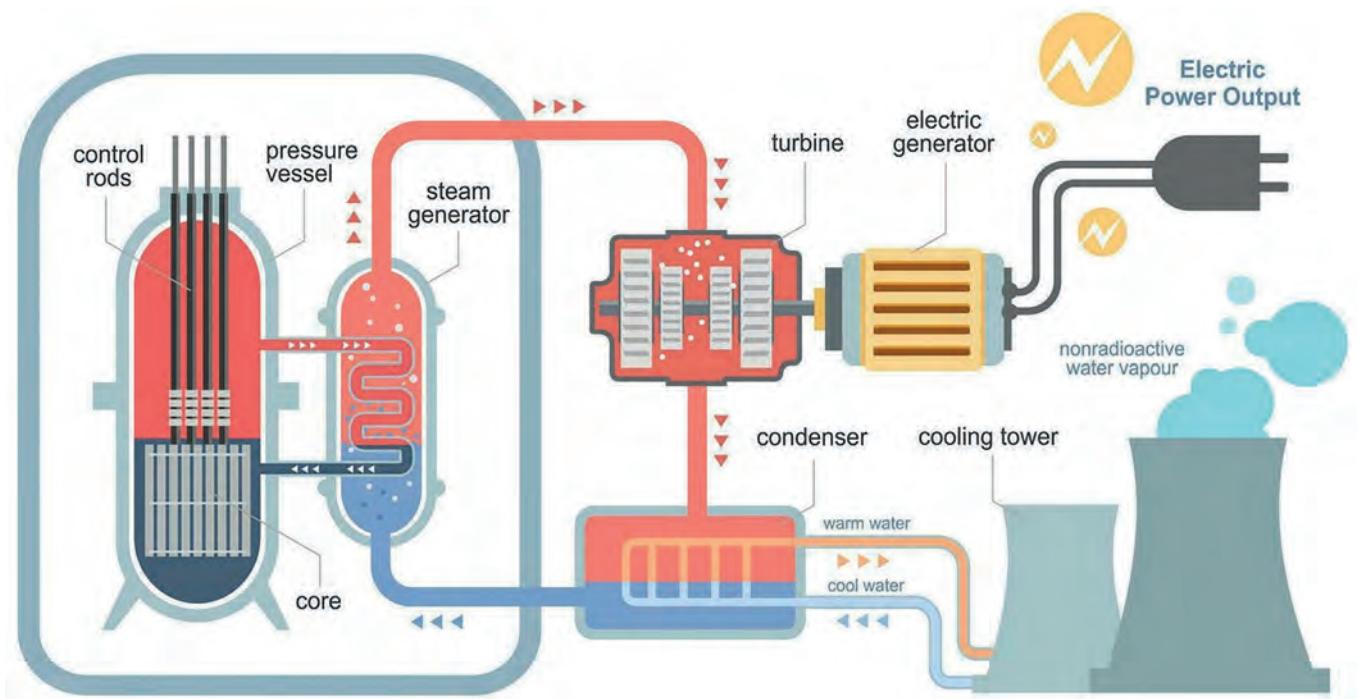


Figuur 1. Overzicht van de verschillende reactorgroottes en hun vermogensproductie (afbeelding: A. Vargas | IAEA)

Minder bekend is dat kernenergie ook gebruikt wordt voor civiel-maritieme toepassingen. Naast vele Russische ijsbrekers zijn er historisch gezien vier civiele schepen geweest die nucleaire voortstuwing kenden; de Amerikaanse *NS Savannah* (1962) als demonstratieproject, de Duitse *Otto Hahn* (1968) met meer dan 600.000 zeemijlen aan onderzoeks- en transportdiensten, de Japanse *Mutsu* (1972) die na een incident politiek werd stopgezet, en de Russische *Sevmorput* (1988), het enige schip dat voor lange tijd commercieel succesvol bleef, hoewel het sinds 2023 tegen de kade ligt. Daarnaast wordt kernenergie steeds vaker overwogen voor zogeheten Floating Power Platforms (FPP's), drijvende installaties met een kleine kerncentrale die warmte en elektriciteit kunnen leveren in afgelegen gebieden. Dit concept, dat al in de praktijk is toegepast<sup>12</sup> en internationaal uitgebreid wordt onderzocht,<sup>13</sup> zou een eerste stap kunnen vormen voor de Nederlandse maritieme sector richting een eigen nucleaire maritieme installatie.

Ons land heeft nooit nucleaire schepen gehad, al werden er in de jaren zestig en zeventig wel (vergeefse) pogingen gedaan nucleaire onderzeeboten te verwerven in samenwerking met de VS en Frankrijk.<sup>14</sup> De interesse in deze techniek, specifiek voor SMR's, lijkt nu dus weer nieuw leven te krijgen met onder andere het koploperproject binnen de eerdergenoemde maritieme sectoragenda: 'Met name de offshore sector en de Koninklijke Marine kunnen de vruchten plukken van de voordelen die deze technologie biedt'.<sup>15</sup> De verantwoordelijkheid van het koploperproject ligt daarom vanuit de overheid bij het Ministerie van Defensie in samenwerking met het Ministerie van Economische Zaken en vanuit de maritieme sector bij Nederland Maritiem Land (NML).

Vanuit de sector is hieruit het consortium 'NuclearDrive' ontstaan, wat ruim twintig Nederlandse bedrijven omvat, die samen onderzoek plegen naar de mogelijkheden



Figuur 2: schematisch overzicht van een kernreactor (afbeelding: Vectors)

van kernenergie aan boord van schepen.<sup>16</sup> Eén daarvan is het bedrijf Allseas, een Zwitsers-Nederlands offshore bedrijf, wat als doel heeft 'een geavanceerd nucleair energiesysteem te ontwikkelen, speciaal ontworpen voor energie-intensieve offshore vaartuigen en industriële clusters aan land'.<sup>17</sup> Allseas focust zich op een 25 MWe Hoge-Temperatuur Gas-Reactor (HTGR) welke in vijf jaar op het land operationeel moet zijn, om daarna aan boord van offshore schepen te kunnen opereren. Hierbij staat niet alleen de implementatie binnen de maritieme sector centraal, maar wordt ook gekeken naar het produceren van warmte voor de industriële sector, een erg moeilijk te verduurzamen sector.

### Hoe komt kernenergie tot stand?

Kernenergie kan op twee manieren worden opgewekt: via splijting of via fusie. Bij splijting vindt splitsing van een zwaar atoom in kleinere kernen plaats, waarbij een grote hoeveelheid energie vrijkomt. Fusie daarentegen werkt andersom: hierbij worden meerdere atomen samengevoegd tot één atoom, eveneens met een enorme energievrijgave. Op dit moment maken alle commercieel gebruikte kernreactoren gebruik van splijting. Fusie bevindt zich nog in de onderzoeksfase en is vooralsnog niet praktisch toepasbaar voor energieopwekking. Het wordt daarom niet geschikt geacht voor korte termijn implementatie op een schip.

Voor het opwekken van kernenergie wordt doorgaans uranium-235 als brandstof gebruikt. Dit is een isotoop dat van nature onstabiel is. Wanneer zo'n uranium kern een neutron opneemt, valt de kern uiteen in twee of meer lichtere kernen. Tegelijkertijd komen er meerdere nieuwe neutronen vrij, die de kettingreactie kunnen voortzetten, en zal er energie vrijkomen. De hoeveelheid energie wordt bepaald aan de hand van het massaverschil tussen het oorspronkelijke uraniumatoom en de lichtere bijproducten. Volgens Einsteins vergelijking  $\Delta E = \Delta mc^2$  wordt het kleine massaverschil omgezet in een aanzienlijke hoeveelheid energie, wat de fundamentele basis is voor kernenergie.

### Hoe werkt zo'n nucleaire reactor?

Bij kernsplijting komen meer neutronen vrij dan strikt nodig is om een kettingreactie in stand te houden. Zonder controle zou dit leiden tot een exponentiële toename van splijtingen en geproduceerde energie. Een kernreactor is daarom zo ontworpen dat dit proces beheerst kan worden, waardoor het aantal splijtingen en de energieproductie stabiel blijft. De reactor bestaat uit verschillende onderdelen die samen zorgen voor een veilige en gecontroleerde productie van warmte. De meeste reactoren hebben twee gescheiden circuits, zoals te zien is in figuur 2.

**‘De huidige experimentele fase maakt het mogelijk een generatie IV reactor op relatief korte termijn te implementeren’**

In het primaire circuit bevinden zich de splijtstofstaven met uranium, waarin de kernsplijting plaatsvindt. Regelstaven bepalen de hoeveelheid splijtingen: hoe dieper ze in de kern zitten, hoe minder reacties plaatsvinden, en vice versa. Het koelmiddel voert de warmte af naar het secundaire circuit, terwijl een schild de omgeving beschermt tegen radioactieve deeltjes. In het secundaire circuit wordt de warmte gebruikt om een turbine aan te drijven. De draaiende turbine levert mechanische energie die een generator omzet in elektriciteit, bijvoorbeeld voor het hotelbedrijf van het schip of via de elektromotor voor voortstuwing.<sup>18</sup> Het gas dat de turbine verlaat is afgekoeld, maar om de thermodynamische cyclus te voltooien, moet de restwarmte nog worden afgevoerd. Op land gebeurt dit met koeltorens,<sup>19</sup> maar op een schip wordt het omliggende water gebruikt om de resterende warmte op te nemen.

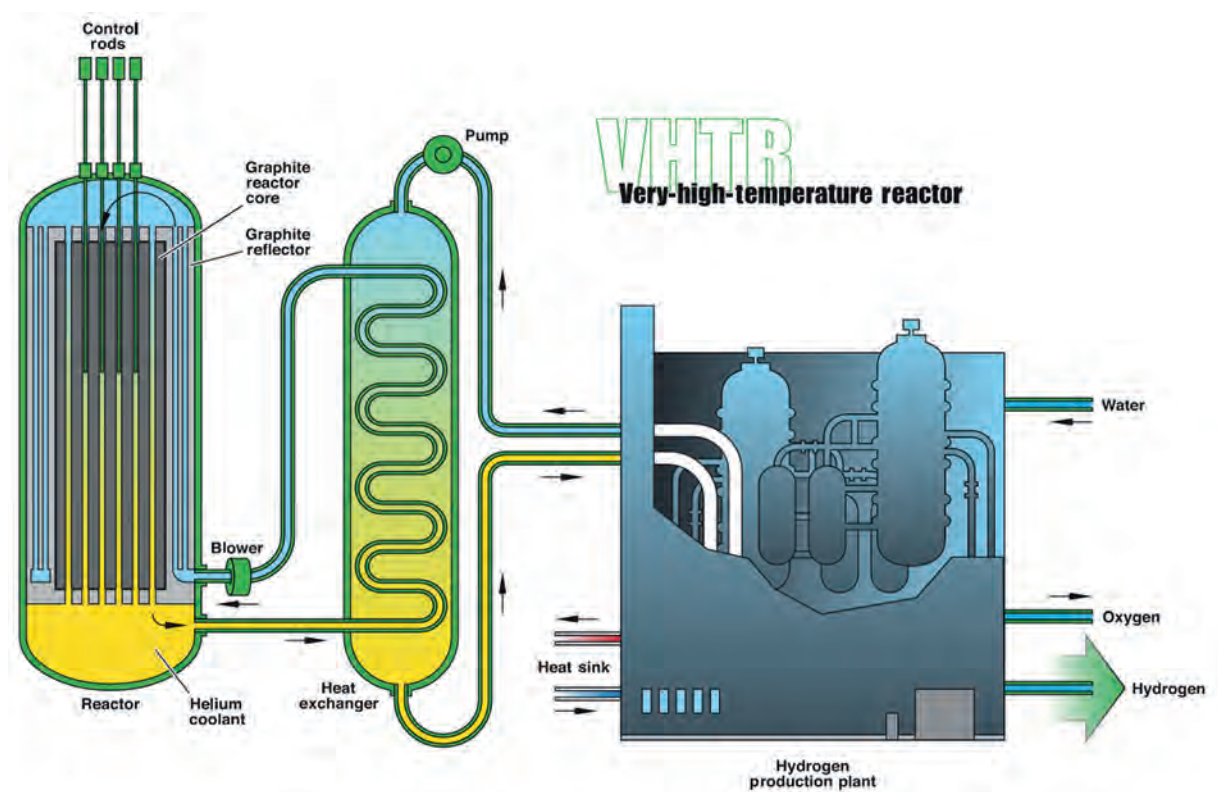
### Wat is dan zo'n Hoge-Temperatuur Gas-Reactor?

Niet elke reactor is hetzelfde, en wereldwijd worden verschillende concepten gebruikt voor het produceren van energie. De meestvoorkomende reactortechnologie is een zogenoemde Pressurised Water Reactor (PWR), een generatie II en III reactor (zie figuur 2). Deze technologie wordt door meer dan 70% van alle op land gesitueerde reactoren gebruikt en voor vrijwel alle nucleaire schepen.<sup>20</sup> Het koelmiddel in het primaire circuit is water wat onder hoge druk rond wordt gepompt. Dit verhindert stoomvorming en zorgt dat het water vloeibaar blijft onder hoge temperaturen (tot  $\pm 330^\circ\text{C}$ ). Zowel Allseas als de maritieme sector kijken daarentegen naar een ander type reactortechnologie, namelijk de Hoge-Temperatuur Gas-Reactor (HTGR). Dit is een generatie IV reactor welke verschillende voordelen heeft ten opzichte van oudere generaties. Zo zijn ze veiliger, efficiënter, produceren ze minder radioactief afval en zijn de proliferatierisico's kleiner. In vergelijking met andere generatie IV reactoren bezit de HTGR een relatief hoge Technology Readiness Level (TRL). Er zijn ongeveer 20 SMR-ontwerpen welke deze techniek gebruiken<sup>21</sup> en enkele reactoren bevinden zich al in een experimentele fase.<sup>22</sup> De huidige experimentele fase maakt het mogelijk een generatie IV reactor op relatief korte termijn te implementeren.

Zoals de naam suggereert is deze reactor specifiek ontworpen om te opereren op hoge temperaturen ( $750-1000^\circ\text{C}$ ). Hierdoor kan water niet meer effectief gebruikt worden als koelmiddel en gebruikt men helium om de warmte vanuit de kern over te brengen naar het secundaire circuit. Ook de splijtstaven met nucleaire brandstof zijn speciaal ontworpen om te opereren op deze temperaturen. Ze maken gebruik van TRISO-brandstof, wat bestaat uit kleine balletjes aan uranium, welke omsloten zijn met drie beschermingslagen tegen hoge temperaturen.

Deze extra complexiteit ten opzichte van de standaard PWR is niet voor niets. De hoge temperaturen zorgen dat er een hogere efficiëntie behaald kan worden bij het produceren van elektriciteit.<sup>24</sup> Het geeft daarnaast ook de mogelijkheid om warmte te produceren op hoge temperaturen, wat niet alleen hoognodig is voor het verduurzamen van de industriële sector, maar ook gebruikt kan worden om





Figuur 3: schematisch overzicht van een Hoge-Temperatuur Gas-Reactor (HTGR), welke in deze configuratie waterstof kan produceren<sup>23</sup>

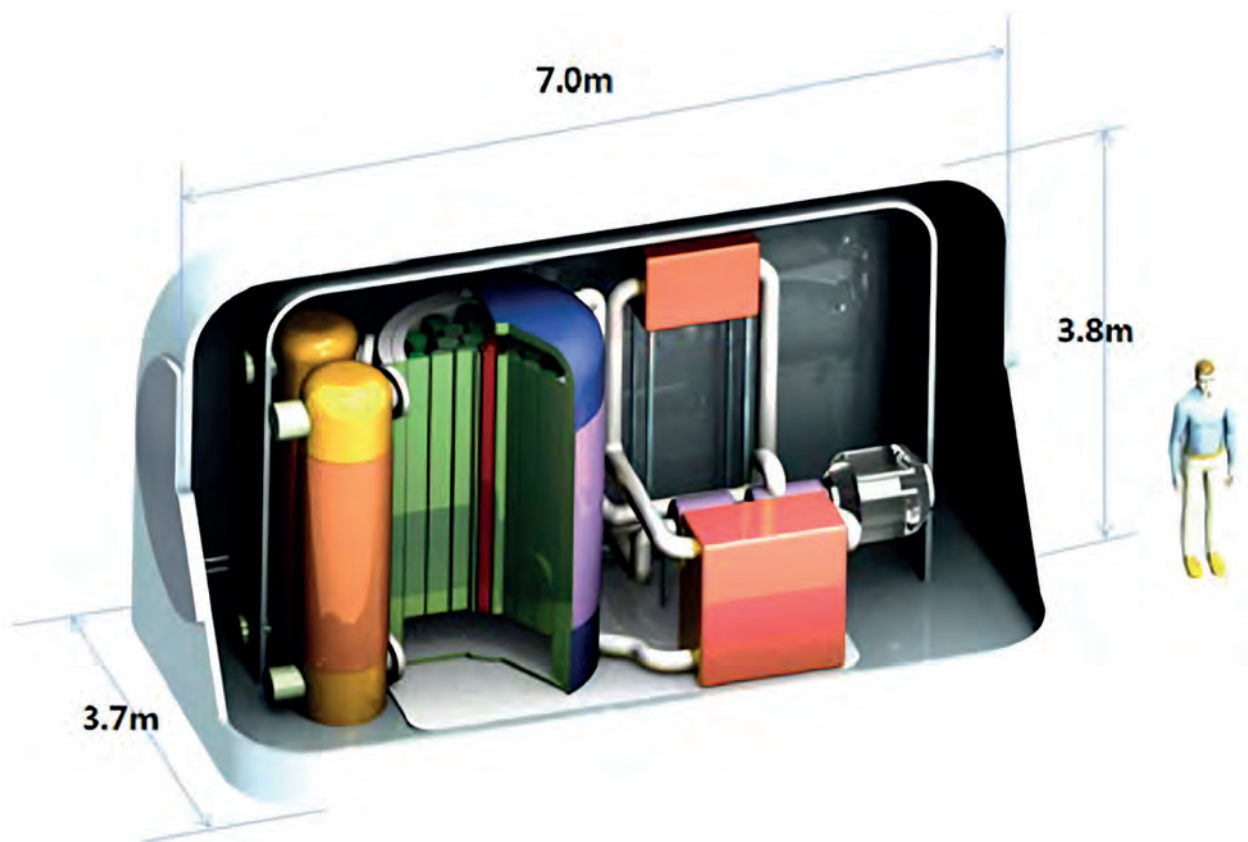
bijvoorbeeld waterstof of synthetische brandstoffen te maken. Aangezien de Nederlandse maritieme sector nog niet beschikt over de benodigde nucleaire kennis en infrastructuur is het raadzaam te streven naar een reactorontwerp dat toegepast kan worden binnen andere sectoren, om brede samenwerking te bevorderen.

### Welke conversiecyclus kan er dan het beste gebruikt worden?

Hoewel de reactor de energie en warmte produceert, is de omzetting van deze warmte naar elektriciteit minstens zo belangrijk. Dit gebeurt in het zogenoemde secundaire circuit. Meestal worden hiervoor stoomturbines ingezet,



Figuur 4: de 16 MW sCO<sub>2</sub> turbine van het STEP project<sup>25</sup>



Figuur 5: ontwerp van een nucleaire sCO<sub>2</sub> cyclus, specifiek ontworpen voor toepassing binnen de transportsector<sup>27</sup>

die de warmte van stoom omzetten in mechanisch vermogen. Voor een HTGR, die op zeer hoge temperaturen werkt, is stoom minder efficiënt. Daarom ligt het voor de hand alternatieve methoden te overwegen. Een van de meest veelbelovende opties is de superkritische koolstofdioxide (sCO<sub>2</sub>) cyclus. CO<sub>2</sub> bevindt zich in een superkritische toestand wanneer de temperatuur en druk boven het kritisch punt liggen. In deze toestand vertoont de stof tegelijkertijd eigenschappen van zowel een vloeistof als een gas, waardoor het voordelige thermodynamische eigenschappen heeft, zoals een vloeistofachtige dichtheid en een gasachtige viscositeit. Hierdoor kan een HTGR in combinatie met een sCO<sub>2</sub> cyclus een efficiëntie bereiken van ongeveer 50%, terwijl een conventionele nucleaire reactor rond de 33% efficiëntie haalt.

**‘Nucleaire voortstuwing kan bijdragen aan een hogere mate van autonomie en efficiëntie bij activiteiten in meer afgelegen maritieme gebieden’**

De hoge dichtheid van sCO<sub>2</sub>, in vergelijking met stoom, zorgt dat de installatie zeer compact gebouwd kan worden. Over het algemeen is de sCO<sub>2</sub> cyclus zo'n tien keer kleiner dan een vergelijkbare installatie met stoomturbines. Figuur 4 toont de sCO<sub>2</sub> turbine van het STEP-project, een onderzoeksturbine die zich momenteel in een praktische testfase bevindt. Deze toont aan dat een sCO<sub>2</sub> turbine een vermogen van 16 MW kan leveren, terwijl het qua formaat vergelijkbaar is met een V8-motor uit een auto.<sup>26</sup>

De combinatie van een reactor en een sCO<sub>2</sub>-cyclus maakt het mogelijk een installatie te realiseren met een hoge efficiëntie en energiedichtheid. Hierdoor is veel vermogen opwekbaar uit een relatief klein volume. Dit voordeel komt duidelijk naar voren in het ontwerp van een nucleaire sCO<sub>2</sub>-cyclus, waarbij alle systemen die nodig zijn om elektriciteit uit kernenergie te produceren in een compacte container passen (zie figuur 5). Vanuit een container van 4x4x7 meter is zo 12,5 MWe aan vermogen leverbaar. Deze compactheid is vooral aantrekkelijk voor de maritieme sector, waar ruimte beperkt is, en illustreert de voordelen van een hoge energie- en vermogensdichtheid.

### Conclusie

Nucleaire voortstuwing kan bijdragen aan een hogere mate van autonomie en efficiëntie bij activiteiten in meer afgelegen maritieme gebieden. Dit maakt het aantrekkelijk voor zowel militaire als civiele toepassingen, vooral voor langdurige missies en operaties op grote afstand van de kust waar conventionele brandstofvoorziening, zeker

in tijden van crisis en oorlog, logistiek complex en kostbaar is. Door de hoge energiedichtheid en de verminderde CO<sub>2</sub>-uitstoot draagt kernenergie bovendien bij aan de bredere ambities om de maritieme sector te decarboniseren.

De lage uitstoot van CO<sub>2</sub> in combinatie met een hoge energiedichtheid verklaren de ambities van de Nederlandse sector om binnen tien jaar reactor aangedreven schepen te hebben. De gekozen Hoge-Temperatuur Gas- Reactor, vooral in combinatie met een superkritische CO<sub>2</sub>, geeft de mogelijkheid voor een compacte, langdurige energievoorziening die niet alleen binnen de maritieme sector, maar ook in andere sectoren toepasbaar is. Hiermee kan Nederland niet alleen de bijdrage aan klimaatverandering ver-

minderen maar kan het ook een unieke positie vervullen in de ontwikkeling van een nieuwe generatie nucleaire systemen die voor de weerbaarheid van ons land van belang zijn.

**LTZ3 (TD) ir. T.H. (Tom) Wien studeerde in 2024 cum laude af aan de TU Delft voor zijn master Werktuigbouwkunde. Tijdens zijn studie deed hij bij Allseas onderzoek naar de mogelijkheden van kernenergie op schepen en schreef hij, in samenwerking met Damen Naval, zijn scriptie over nucleaire voortstuwing voor marineschepen. Hiervoor ontving hij van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs (KIVI) de Kooy Prijs. Het artikel is op persoonlijke titel geschreven.**

## Noten

- 1 No guts, no Hollands Glorie! - sectoragenda maritieme maakindustrie, 26 oktober 2023. Zie: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/10/26/sectoragenda-mmi>
- 2 Sectoragenda maritieme maakindustrie, 26 oktober 2023, p. 12-13 & p. 92
- 3 European Commission, *Reducing emissions from the shipping sector*, zie: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector_en) (2023).
- 4 Zie: <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-can-nuclear-combat-climate-change>
- 5 Zie: <https://open.overheid.nl/documenten/a45bdebd-7143-4a61-91f3-ebb357bf5d05/file>
- 6 Zie: <https://www.iaea.org/publications/15943/nuclear-power-reactors-in-the-world> & <https://pris.iaea.org/pris/>
- 7 Zie: <https://pris.iaea.org/pris/>
- 8 Idem
- 9 Zie: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/duurzame-energie/kernenergie>
- 10 Zie: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors> & International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2022)*, zie: <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html>
- 11 Zie hiervoor onder andere: Jennett, G., *Australia to acquire nuclear submarine fleet as part of historic partnership with US and UK to counter China's influence*, <https://www.abc.net.au/news/2021-09-16/australia-nuclear-submarine-partnership-us-uk/100465814> (2021); Naval News, *Brazil's Nuclear-Powered Submarine Project Reaches New Milestone*, <https://www.navalnews.com/naval-news/2023/10/brazils-nuclear-powered-submarine-project-reaches-new-milestone/> (2023); World Nuclear Association, *Nuclear-Powered Ships*, <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx> (2023).
- 12 Zie: <https://www.world-nuclear-news.org/articles/russias-floating-nuclear-power-plant-passes-one-billion-kwh>
- 13 Zie: <https://saltfoss.com/> & <https://www.corepower.energy/library/floating-nuclear-power-plants>
- 14 Zie ook Peet, A.J. van der, 'Back to the future?', *Marineblad*, nr. 2 (maart 2023) & Peet, A.J. van der, 'The French Connection' *Manoeuvres rondom een Frans-Nederlands nucleair onderzeebootproject 1970-1972*, *Marineblad*, nr. 6 (oktober 2005)
- 15 Sectoragenda maritieme maakindustrie, 26 oktober 2023, p. 94
- 16 Zie: <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df24/presentations/3.2.Aliki%20van%20Heek%20-%20Towards%20tangible%20Projects%20for%20Maritime%20Nuclear.pdf>
- 17 Zie: <https://www.allseas.com/en/what-we-do/nuclear> & <https://nos.nl/artikel/2570011-schepen-nederlands-offshore-bedrijf-allseas-gaan-op-kernenergie-varen>
- 18 In plaats van een generator en elektromotor, kan de mechanische energie van de turbine ook direct gebruikt worden voor mechanische voortstuwing van het schip. Een extra (kleinere) turbine is dan wel benodigd om de elektriciteit voor het hotelbedrijf te produceren.
- 19 Dit is dus niet de reactor zelf, want deze bevindt zich in een aansluitend gebouw. Koeltorens worden ook bij andere installaties gebruikt, zoals bij oliaffinaderijen of chemische installaties.
- 20 Vloeibaar metaal gekoelde reactoren zijn ook geïmplementeerd aan boord van onderzeeboten. De Verenigde Staten hebben kortstondig voor hun tweede nucleaire onderzeeboot, het USS *Seawolf*, een Sodium gekoelde reactor gebruikt, zie: International Panel on Fissile Materials, *Reactors to shift from heu fuel*, [https://fissilematerials.org/blog/2020/04/us\\_study\\_of\\_reactor\\_and\\_f.html](https://fissilematerials.org/blog/2020/04/us_study_of_reactor_and_f.html) (2020). De Sovjet-Unie heeft dit ook gedaan met een lood gekoelde reactor voor hun Alfa-class onderzeeboten, zie: Rawool-Sullivan, M., P.D. Moskowitz, L.N. Shelonkov, *Technical and proliferation related aspects of the dismantlement of Russian alfa-class nuclear submarines* (2022). In beide gevallen waren de successen wisselvallig.
- 21 International Atomic Energy Agency, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2022)*, zie: <https://aris.iaea.org/sites/Publications.html>
- 22 De High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) in Japan, welke in 1998 al criticaliteit bereikte en in 2004 succesvol opereerde op 950°C, geeft praktische inzichten over het gebruik van een HTGR. Zie: Nagatsuka, K., H. Noguchi e.a., 'Current status of high temperature gas-cooled reactor development in japan', *Nuclear Engineering and Design*, 425 (2024): 113338
- 23 Zohuri, B., 'Generation IV nuclear reactors', *Nuclear Reactor Technology Development and Utilization* (2020), p. 213-246.
- 24 Een hogere temperatuur ( $T_{hot}$ ) verhoogt de totale efficiëntie ( $\eta$ ) van een installatie. Dit is direct terug te zien in de ideale Carnot efficiëntie:
$$\eta = 1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}}$$
- 25 Follett, W.W., J. Moore, J. Wade, S.Pierre, *The STEP 10 MWe sCO<sub>2</sub> Pilot Installation and Commissioning Status Update* (2024)
- 26 Follett, W.W. *The STEP 10 MWe sCO<sub>2</sub> Pilot Installation and Commissioning Status Update* (2024)
- 27 Seong Oh, B. and J. Ik Lee, 'Control schemes of S-CO<sub>2</sub> cooled KAIST Micro Modular Reactor as marine propulsion engine to treat rapid load change condition', *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju*, 2019.