

Kleine modulaire kernreactoren (SMR)

Kennisoverzicht van techniek en ontwikkelingen



Nuclear. For life.



NRG is een internationaal opererende nucleaire dienstverlener. De onderneming produceert isotopen, verricht nucleair technologisch onderzoek, is consultant op het gebied van veiligheid en betrouwbaarheid van nucleaire installaties en dienstverlener in stralingsbescherming.

Met haar onderzoek draagt NRG bij aan de instandhouding, innovatie en verdere ontwikkeling van de kennis in Nederland op het gebied van nucleaire technologie en veiligheid.

NRG is wereldmarktleider in de levering van medische isotopen. In Nederland is NRG de autoriteit op het gebied van integrale stralingsbescherming. NRG exploiteert de Hoge Flux Reactor die eigendom is van de Europese Unie.

Bij de onderneming werken ongeveer 700 medewerkers. Met hun hoogwaardige kennis dragen zij bij aan de excellente resultaten van partners in de gezondheidszorg, de energiemarkt, de industrie, overheden en de wetenschap.

Inhoud

Inleiding	5
1 Kleine modulaire reactoren	7
1.1 Wat is een kleine modulaire reactor (SMR)	8
1.2 Kenmerken van SMR's	8
1.3 Kostenindicatie	9
1.4 Commerciële beschikbaarheid	10
1.5 Uitdagingen met betrekking tot SMR's	11
1.6 Typen en toepassingen	12
1.7 Lopende projecten op SMR-gebied	14
1.8 Onderzoek SMR bij NRG	19
2 Indicatoren SMR inzet in Nederland	21
2.1 Relevante ontwikkelingen in Nederland	23
3 Resumé	25
Afkortingen en referentielijst	27
Gebruikte afkortingen	27
Referentielijst	28
Bijlage A - Overzicht huidige kernreactoren	29
Lichtwaterreactoren	30
Zwaarwaterreactoren	32
Gasgekoelde reactor	32
Bijlage B - Vergunningstraject en stakeholders	33
Stakeholders SMR	35
Rol van stakeholders in vergunningsproces	36
Bijlage C - Overzicht van nucleaire bedrijven en instanties	37
Bestaande nucleaire faciliteiten	37
Nederlandse nucleaire beroepsverenigingen	38
Overheid	38
Relevante internationale partijen	38
Potentiële gebruikers/afnemers	39



Inleiding

Om de verandering van het klimaat en de opwarming van de aarde tegen te gaan heeft Nederland de ambitie om de uitstoot van broeikasgassen in 2050 terug te dringen tot een niveau dat 95% lager ligt dan in 1990. De emissies moeten in 2030 met 49% gereduceerd zijn en in 2050 dient Nederland een volledige CO₂-neutrale elektriciteitsproductie te hebben [1]. De energietransitie leidt door meer inzet op elektriciteit in plaats van fossiele bronnen tegelijkertijd tot een hoger elektriciteitsgebruik door huishoudens en industrie. Deze groei zal moeten worden opgevangen met extra elektrisch vermogen zónder CO₂-uitstoot.

Een stabiele elektriciteitsvoorziening is essentieel voor de hoogtechnologische Nederlandse samenleving. Om geopolitieke redenen is het belangrijker dan ooit om voor energie en grondstoffen minder afhankelijk te worden van landen als Rusland. Om de gestelde klimaatdoelen te halen én de leveringszekerheid te garanderen zullen alle mogelijke CO₂-neutrale energiebronnen nu en in de toekomst ingezet moeten worden. Dat vraagt niet alleen volle inzet de eerstkomende jaren maar ook het tijdig nadenken over de mogelijkheden op middellange en lange termijn, voorbij 2030.

Er zijn drie sectoren die een rol spelen bij de energietransitie:

- de elektriciteitsproductiesector,
- de warmtesector (industriële proceswarmte, warmtedistributie) en
- de transportsector.

Om effectief aan een CO₂-uitstootvermindering te kunnen voldoen dient er op alle drie

de sectoren ingezet te worden. Zo zijn bij de transportsector al de nodige ontwikkelingen gaande; zo wordt het aandeel elektrisch aangedreven voertuigen steeds groter. Van fundamenteel belang voor de energietransitie is de wijze van opwekking van energie en de uiteindelijk geleverde energie vorm.

De doelstellingen van het kabinet op het gebied van CO₂-reductie hebben geleid tot het concrete voornemen om kernenergie in te zetten. In het coalitieakkoord van december 2021 [2] is afgesproken dat het kabinet de benodigde stappen gaat nemen voor het langer openhouden van de kerncentrale in Borssele en de bouw van twee nieuwe kerncentrales. Ook is besloten om in te zetten op de voorbereiding van de bouw van twee nieuwe generatie III+ kerncentrales. Hiervoor is € 5 miljard gereserveerd. Recentelijk zijn deze voornemens nader uitgewerkt in de Kamerbrief van minister Jetten van 9 december 2022 [3].

Een nieuwe ontwikkeling in kerntechnologie betreft kleine modulaire kernreactoren (*Small Modular Reactors, SMR's*). Dit type reactoren belooft een aantal significante voordelen ten opzichte van huidig opererende kerncentrales. SMR's hebben een betere geschiktheid voor de productie van bijvoorbeeld waterstof of industriële proceswarmte. Daarnaast kan de modulaire bouw van deze productie-eenheden gaan zorgen voor een mogelijke kostenbesparing. De inzet van SMR's in Nederland kan op termijn een belangrijke bijdrage leveren aan de energietransitie en is daarom interessant om nader te beschouwen.

Naast het behalen van de klimaatdoelstellingen wil het kabinet ook de leveringszekerheid van energie voor Nederland borgen. SMR's kunnen een interessante complementaire energiebron zijn, bijvoorbeeld voor industrie-clusters en/of energie intensieve sectoren en bedrijven. Ook de productie van waterstof met SMR's kan een reële optie worden.

Gezien de tijd die nodig is voor besluitvorming, vergunningen aanvraag en bouw, is het verstandig om tijdig afwegingen maken over eventuele inzet van SMR's. Hoewel er nu nog geen SMR's commercieel in gebruik zijn, gaan de ontwikkelingen snel. In deze notitie wordt een overzicht gegeven van belangrijke aspecten die betrekking hebben op de werking, ontwikkelingen en realisatie van SMR's. Tevens wordt de stand van zaken gegeven van lopende projecten op SMR-gebied.

In [Hoofdstuk 1](#) wordt een beschrijving van SMR's gegeven met de beoogde voordelen en de resterende uitdagingen.

In [Hoofdstuk 2](#) wordt ingegaan op de aspecten die van belang zijn voor de realisatie van een SMR.

[Hoofdstuk 3](#) sluit af met een resumé.

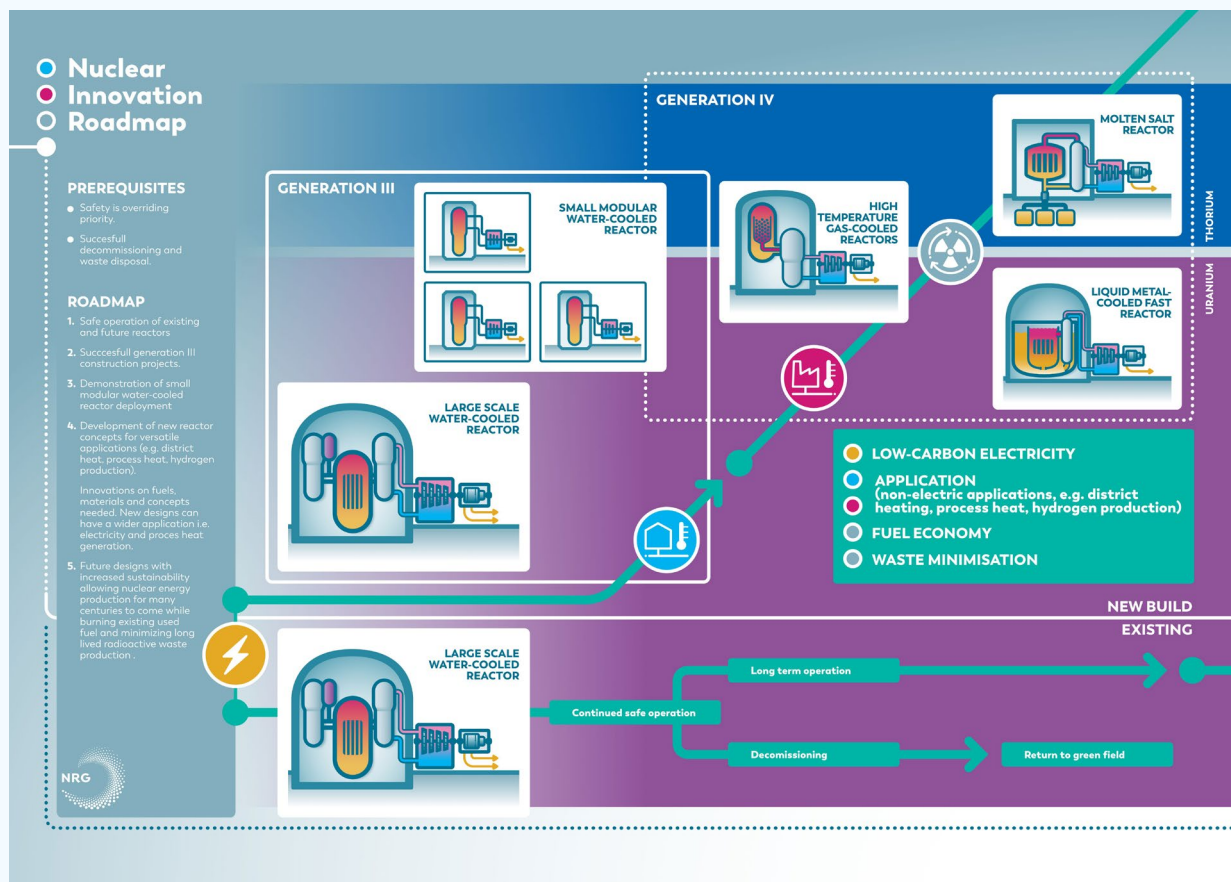
1. Kleine modulaire reactoren

In de door NRG opgestelde *Nuclear Innovation Roadmap* zijn scenario's opgesteld voor de realisatie van nieuwe kernreactoren (zie [Figuur 1.1](#)). Dit betreft zowel grote lichtwaterreactoren (*Light Water Reactors, LWRs*) als kleine modulaire reactoren (*Small Modular Reactors, SMR's*). De Nederlandse overheid is voornemens om twee nieuwe generatie III+

kerncentrales in Nederland te realiseren. Aanvullend kunnen SMR's een interessante optie zijn voor de toekomst, omdat deze reactoren een complementaire energiebron kunnen zijn, waarbij het toepassingsgebied zich uitstrekt tot meer dan alleen elektriciteitsproductie.

Figuur 1.1

De "Nuclear Innovation Roadmap" toont scenario's tot realisatie van nieuwe innovatieve kerncentrales, waarbij zowel grote LWR kerncentrales als SMR's onder de aandacht gebracht worden



1.1 WAT IS EEN KLEINE MODULAIRE REACTOR (SMR)

Het Internationaal Atoom Energie Agentschap van de Verenigde Naties (IAEA) definieert een SMR op basis van het elektrisch vermogen. Tegenwoordig worden reactorconcepten ingedeeld volgens [Figuur 1.2](#). Voor SMR's geldt derhalve een vermogen tot ~300 MWe, vermogens onder ~10 MWe worden aangeduid met microreactoren (of micro-SMR's).

De term *modulair* duidt op een aantal ontwerpaspecten. Zo kan een SMR samengesteld worden op basis van modules die in een fabriek in serie geproduceerd worden. Het uitgangspunt is dat deze methodiek tot lagere bouwkosten kan leiden. Daarnaast wordt de term modulair ook gebruikt om een *multi-module* installatie aan te duiden, waarbij meerdere kleine reactoren worden aangestuurd vanuit een enkele regelzaal.

Historisch gezien gold tot voor kort het devies *the bigger the better*, wat in de praktijk inhield dat de voorkeur werd gegeven aan grote kerncentrales met een hoog (elektrisch) vermogen. Hierbij profiteert men van *economy of scale* (schaalgrootte) wat resulteert in lage kosten voor de elektriciteitsproductie. Dit gaat wel gepaard met een relatief grote

investering. Met de inzet op kleinschaligheid kunnen deze hoge kapitaalkosten worden verlaagd: *less is more*. Hierbij probeert men *economy of numbers* (aantallen) te laten opwegen tegen *economy of scale*. Daarnaast kunnen SMR's ook ingezet worden voor verschillende energiefuncties zoals elektriciteit en (proces-)warmte.

SMR's zijn onder te verdelen in twee categorieën:

- Lichtwatergekoelde SMR's (*Small Modular Light Water Reactors, SM-LWR's*) en
- Overige koelmiddelen, zoals vloeibare metalen, gassen en gesmolten zouten; geavanceerde modulaire reactoren (*Advanced Modular Reactors, AMR's*).

Zie verder [paragraaf 1.6](#).

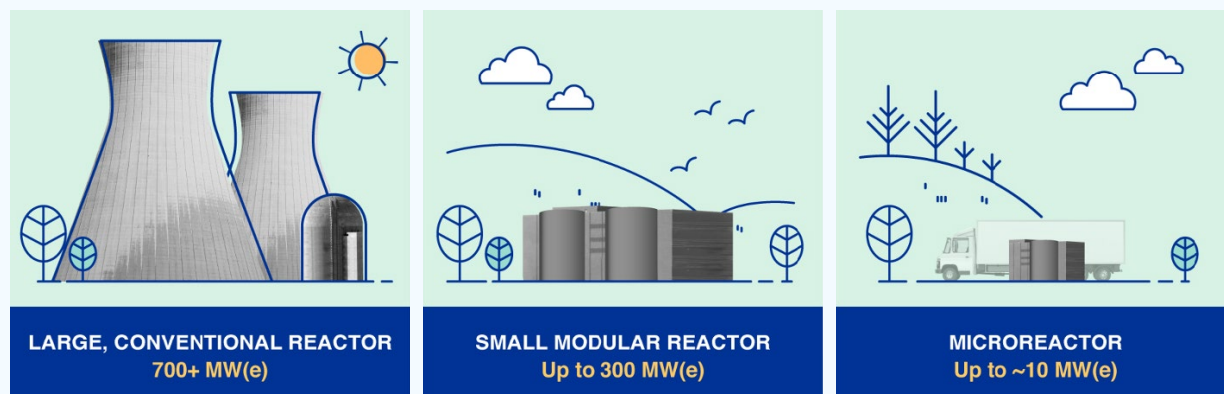
1.2 KENMERKEN VAN SMR'S

Het werkingsprincipe van SMR's berust net als voor bestaande kerncentrales op kernsplijting en het genereren van hoogwaardige stoom. Ter informatie wordt in [Bijlage A](#) een overzicht weergegeven van de huidige in bedrijf zijnde kernreactoren, met een korte toelichting op de verschillende werkingsprincipes.

Veel van de voordelen van SMR's zijn inherent verbonden aan de aard van hun ontwerp, namelijk klein en modulair. SMR's hebben een relatief kleine *footprint*. Niet alleen in vierkante

Figuur 1.2

De onderverdeling van reactorconcepten op basis van elektrisch vermogen



meters, maar ook als het gaat om de impact op bijvoorbeeld de koelwaterbehoefte en vereisten voor de koppeling aan het elektriciteitsnet. Daardoor kunnen SMR's worden geplaatst op locaties die minder of niet geschikt zijn voor grotere kerncentrales. Pre-fabricaten van SMR's kunnen centraal vervaardigd worden en op locatie als eenheid geïnstalleerd worden (modulaire bouw). Waarbij de kwaliteit van componenten beter gecontroleerd kan worden, wat leidt tot minder kosten in vergelijking met de bouw van grote reactoren. Onderdelen van grote reactoren zijn vaak op maat gemaakt voor een specifieke locatie/bedrijver, hetgeen regelmatig leidt tot vertragingen bij de bouw. Naast het besparen van kosten en bouwtijd kunnen SMR's stapsgewijs, dat wil zeggen eenheid voor eenheid, worden ingezet om te voldoen aan een toenemende vraag naar energie (modulaire opbouw van de energieproductie).

In gebieden met onvoldoende transmissielijnen en netwerkcapaciteit kunnen SMR's worden geïnstalleerd in een bestaand netwerk of op afstand buiten het netwerk om. Zo kan een SMR bij een industriecluster geplaatst worden waardoor er geen gebruik gemaakt hoeft te worden van het lokale elektriciteitsnet. Verder bestaat de mogelijkheid voor hybride energiesystemen die nucleaire en alternatieve energiebronnen combineren, inclusief hernieuwbare energiebronnen.

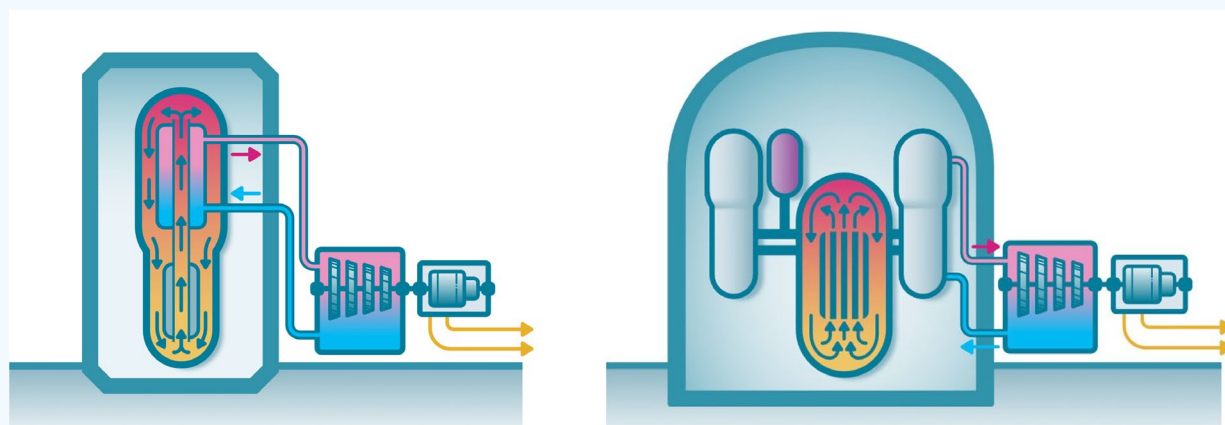
In vergelijking met bestaande reactoren zijn SMR-ontwerpen over het algemeen eenvoudiger. Het veiligheidsconcept is meer afhankelijk van passieve systemen en veiligheidskenmerken van de reactor, zoals een lager vermogen en een lagere werkdruk. Dit betekent dat in veel situaties geen menselijke tussenkomst of (externe) kracht nodig is om systemen uit te schakelen, omdat passieve systemen afhankelijk zijn van fysieke verschijnselen zoals zwaartekracht, natuurlijke circulatie, en drukverschillen). Een uitgangspunt van het ontwerp is de integratie van de verschillende relevante systemen in een zodanige vorm dat er minder leidingwerk benodigd is: een *integrated PWR (iPWR)*, zie [Figuur 1.3](#). Op deze manier is het mogelijk om de reactor kleinschaliger te ontwerpen.

1.3 KOSTENINDICATIE

De kosten van energie uit een bepaalde energiebron wordt uitgedrukt in kosten per megawattuur (*MWh*). Dit wordt de *Levelized Cost Of Electricity (LCOE)* genoemd. De LCOE fungeert als een parameter die van alle kosten een gemiddelde weergeeft per elektriciteits eenheid (gebruikelijk in €/MWh) over de gehele levensduur van een (kern)centrale – waarin onder andere de kapitaalkosten reeds verwerkt zijn.

Figuur 1.3

Schematische weergave van een 'integrated PWR (iPWR)' SMR (links) ten opzichte van een PWR (rechts), waarbij alle relevante systemen (bijv. pompen, stoomgeneratoren, drukhouder) zoveel mogelijk binnen het reactorvat gelokaliseerd worden



De kostenramingen voor een representatieve waarde voor de LCOE voor SMR's lopen sterk uiteen. Dit komt onder andere voort uit het feit dat het veelal om verschillende reactorconcepten gaat, die nog niet in commercieel gebruik zijn. Enkele indicatieve waarden zijn wel bekend: de LCOE voor SMR's ligt grofweg tussen de 42 €/MWh en 102 €/MWh (45 \$/MWh en 110 \$/MWh) [4]. Opgemerkt dient te worden dat deze maximale waarde voor een prototype SMR (*First of a Kind*, FOAK) geldt. De kosten voor volgende SMR's, een zogeheten *nth-of-a-kind* (NOAK) waarvan meerdere exemplaren zijn gebouwd, worden een stuk lager ingeschat: op 90 \$/MWh [5].

Daarnaast ligt de LCOE voor SMR's vooralsnog hoger dan voor grote LWR kerncentrales. Het streven is echter om de kosten voor SMR's op hetzelfde niveau (of lager) te krijgen als de grote reactoren, middels de modulaire opbouw en het hanteren van een efficiënte (gezamenlijke) toeleveringsketen. Ook voor de kostenramingen van de kapitaalkosten geldt dat er een flinke spreiding bestaat en zijn eenduidige waarden vooralsnog niet bekend. Een aantal reactorontwerpers hanteert echter wel hun eigen eerste inschatting: zo zijn de bouwkosten voor een Rolls-Royce SMR in serie bouw geraamd op ongeveer €2 tot €2,5 miljard [6], [7].

Daarnaast zijn eventuele besparingen in de kosten per geïnstalleerd vermogen (€/MW) omtrent de realisatie van een NOAK SMR, ten opzichte van een FOAK, ingeschat tussen de 28% en 40% [8], [9]. Deze besparingen bestaan uit een aantal facetten.

Zo is er ongeveer 25% aan kostenreductie te verwachten omdat problemen die direct te maken hebben met het eerste ontwerp bij vervolproductie worden voorkomen [10]. Dat wil zeggen dat er zogenaamde leereffecten optreden die het ontwerp als 'bewezen' zou kunnen betitelen: "de tweede reactor van hetzelfde type is ongeveer 25% goedkoper dan de eerste". Kostenbesparingen, die als gevolg van de serieproductie van reactoren ontstaan, zijn ingeschat op ongeveer 2% per additionele reactor ($N > 1$), als gevolg van productiviteits-effecten, wederom door eerder genoemde leereffecten. De laatste 7% kostenreductie zijn mogelijk door efficiënter om te gaan met resources, terreinindeling, en gebruik van

gezamenlijke faciliteiten voor een centrale met twee reactoren.

Zoals hierboven beschreven liggen de benodigde investeringen voor de realisatie van een SMR qua omvang significant lager dan bij een grote LWR kerncentrale. Uit verschillende marktconsultaties komt naar voren dat een investeringsbehoefte voor een SMR van 250-300 MW in de orde grootte van €2 tot €4 miljard liggen, terwijl voor een grote LWR centrale een investering van minimaal €10 miljard benodigd is.

1.4 COMMERCIËLE BESCHIKBAARHEID

SMR's bevinden zich veelal nog in het onderzoeks- en ontwikkelingsstadium en zijn momenteel nog niet commercieel in de markt beschikbaar. De gehele ontwikkeltijd tot een FOAK SMR neemt minimaal 15 jaar in beslag [8], [11].

Enkele types zijn al ver in de ontwikkeling, waarvan sommige inmiddels in gebruik. Zoals de KLT-40S reactor die door Rusland is gebouwd en wordt gebruikt als een drijvende kerncentrale voor afgelegen gebieden, een zogeheten *Floating Nuclear Power Plant* (FNPP). De Chinese HTR-PM (*High Temperature Reactor Pebble bed Module*) is recentelijk op het elektriciteitsnet aangesloten.

Naar verwachting zullen de eerste SMR's in het westen tussen 2025 en 2030 gereed zijn, vooral in Amerika en het Verenigd Koninkrijk. Een SM-LWR in aanbouw is CAREM in Argentinië, met een vermogen van 30 MWe. Rolls-Royce in het VK verwacht dat de eerste SMR rond 2030 in bedrijf kan gaan en de eerste tien vervolgeenheden voor het jaar 2035 [12].

Voor micro-SMR's zal op termijn een voorbereidings- en bouwtijd van 10 jaar realiseerbaar kunnen zijn. Het moet dan echter gaan om een kleine reactor die werkelijk ook modulair wordt gefabriceerd.

1.5 UITDAGINGEN MET BETREKKING TOT SMR'S

Hoewel er de afgelopen jaren aanzienlijke vooruitgang is geboekt in verschillende SMR-technologieën, zijn er ook nog uitdagingen op technisch, organisatorisch en regulatorisch gebied om op te lossen.

Nieuwe technieken vragen vaardigheden en kennis

Dit betreft onder meer de ontwikkeling van *multi-module* installaties (een reactor-eenheid met meerdere kleine reactoren), waarbij de onderlinge invloed meegenomen moet worden in het ontwerp. Hierdoor zullen additionele eisen gesteld moeten worden aan de bedrijfsvoering, zoals de voorbereiding op ongevalsituaties. Zo kan het voorkomen dat meerdere modules één regelkamer delen. Het vergt nader onderzoek wat dit voor het menselijk handelen betekent. Daarnaast betreft dit onderwerpen als het definiëren van de noodplannen en zones, ontwikkelen van nieuwe codes en standaarden, en bedrijfsvoeringsaspecten zoals *load-following* (d.w.z. dat een reactor inspeelt op een afwisselende elektriciteitsvraag. Tenslotte speelt de standaardisatie van ontwerpen, regelgeving en productieprocessen een significante rol bij SMR-ontwikkeling.

Behoeft aan componenten

Een belangrijk aspect richting mogelijke realisatie van SMR's is de toeleveringsketen. De fabricage van nucleaire componenten is wereldwijd beperkt, mede als gevolg van het gebrek aan nieuwbouwprojecten in de afgelopen jaren. Daarnaast is het waarschijnlijk dat niet alleen SMR's gebruik zullen maken van de toeleveringsketen: grote (nieuwbouw) kerncentrales zullen ook aanspraak gaan maken op nucleaire componenten zoals reactorvaten, koelmiddelpompen, et cetera.

Kennis en menskracht

Door het uitblijven van investeringen in de nucleaire kennisinfrastructuur in de afgelopen decennia is kennis en ervaring verloren gegaan. Vergrijzing speelt een rol en het opleiden van deskundigen kost tijd. Daarbij speelt dat er veel instellingen en instanties zijn die bij het voorbereiden en bouwen van

de twee nieuwe kerncentrales een rol spelen. Dat kan leiden tot onderlinge concurrentie om personeel in een krappe arbeidsmarkt.

Investeers wachten prototypes af

Prototypes, zogeheten FOAK SMR's zijn tot dusver alleen in China en Rusland gepresenteerd. Ook Rolls-Royce is inmiddels dichtbij de presentatie van hun prototype. Investeers en/of eindgebruikers zullen veelal de realisatie van de bouw van een prototype afwachten. SMR-ontwerpers zetten in op de realisatie van prototypes in de periode tweede helft van dit decennium (~ 2025–2030).

Kwalificatie is een tijdrovend proces

Bij de realisatie van geavanceerde SMR's (zie voorgaande secties) vormen materiaal-technologische aspecten een additionele uitdaging, aangezien de kwalificatie van het gebruik van dergelijke materialen een tijdsintensief proces is. Inmiddels is er in Europees verband overleg tussen de *regulators* om te zorgen dat bij de goedkeuring van ontwerpen niet voor elke SMR opnieuw het wiel uitgevonden hoeft te worden en men van elkaars ervaring kan leren.

Capaciteit van het elektriciteitsnet

Een van de uitdagingen bij het versnellen van de toegang tot energie is de infrastructuur. De beperkte netdekking in landelijke gebieden en de kosten van netaansluiting voor elektrificatie van bijvoorbeeld het platteland evenals industrieën en stedelijke gebieden zijn aandachtspunten. Zo wordt in de studies van het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) aangeraden dat een enkele elektriciteitscentrale niet meer dan 10 procent van de totale geïnstalleerde netcapaciteit mag vertegenwoordigen [13]. Afhankelijk van locatie, en de bijbehorende al dan niet beschikbare infrastructuur, en afnemer kan er voor gekozen worden om een SMR *off-grid* (dat wil zeggen, buiten het elektriciteitsnet om) te realiseren.

1.6 TYPEN EN TOEPASSINGEN

SMR's kunnen worden onderscheiden op basis van zowel de techniek als de toepassing. De 'klassieke' indeling op basis van techniek is in [Figuur 1.4](#) weergegeven. De te onderscheiden technieken bestaan, naast concepten met waterkoeling (die als *proven concept* beschouwd worden), uit geavanceerde technologieën met andere koelmiddelen en/of andere splijfstofvormen.

De volgende groepering omvat nagenoeg alle concepten die momenteel in ontwikkeling zijn [13], [14]:

Watergekoelde SMR's op land

Dit betreft watergekoelde SMR-ontwerpen (*Small Modular Light Water Reactor, SM-LWR*) van verschillende configuraties van lichtwaterreactor- (LWR) en zwaarwaterreactortechnologieën (HWR). De ontwerpen zijn voorzien van volwassen technologie afkomstig van de grote watergekoelde reactoren.

Ontwerpen in ontwikkeling: ~25

Watergekoelde SMR's op water

Dit betreft concepten die kunnen worden ingezet in een maritieme omgeving. Dit kan als op een schip gemonteerde drijvende krachtbron of als onderdompelbare onderwatermotor. Dit biedt veel flexibele inzetmogelijkheden.

Ontwerpen in ontwikkeling: ~6, waarvan sommige worden ingezet als nucleaire ijsbrekerschepen. De eerste SMR aangesloten op het elektrische netwerk is van deze categorie (i.e., een "drijvende kerncentrale").

Hoge temperatuur gasgekoelde SMR's

Hoge-temperatuur-gasgekoelde reactoren (*High-Temperature Gas-cooled Reactors, HTGR's*) zorgen voor warmte op relatief hoge temperatuur (≥ 700 °C) die gebruikt kunnen worden voor een efficiëntere elektriciteitsopwekking, maar ook voor een verscheidenheid aan industriële toepassingen en voor warmtekrachtkoppeling (zie Sectie ['Toepassingen anders dan elektriciteitsopwekking'](#)). Naast een duidelijk verschil in koelmiddel

(een inert gas in plaats van water of vloeibaar metaal) is ook de splijstofvorm significant anders (kleine bolletjes).

Ontwerpen in ontwikkeling: ~10

Snelle neutronenspectrum SMR's

Dit betreft SMR-ontwerpen op basis van een snel neutronenspectrum met verschillende koelmiddelopties (waaronder de vloeibare metalen natrium, lood of loodbismut) in een lagedruksysteem zodat voor de veiligheidsomhulling beperkte eisen gelden. Deze systemen, die werken in een gesloten splijstofcyclus (dat wil zeggen dat gebruikte splijstof vrijwel geheel hergebruikt wordt en als nieuwe splijstof dient), hebben het potentieel om de duurzaamheid van kernenergie aanzienlijk te vergroten. Dat wil zeggen dat ze ongeveer 20 keer meer energie uit uranium kunnen halen dan bestaande thermische reactoren. Bovendien kunnen deze ontwerpen gebruikte splijstof weer hergebruiken als nieuwe splijstof.

Ontwerpen in ontwikkeling: ~10

Gesmolten zout SMR's

Geavanceerde reactortechnologieën die gebruik maken van gesmolten zout, de zogenaamde gesmoltenzoutreactoren (*Molten Salt Reactors, MSR's*), zijn veelbelovend. De voordelen zijn onder andere de grote mogelijkheden voor het gebruik van passief veilige systemen, dankzij de gesmolten toestand van het zout ('stolt in ongevalscondities').

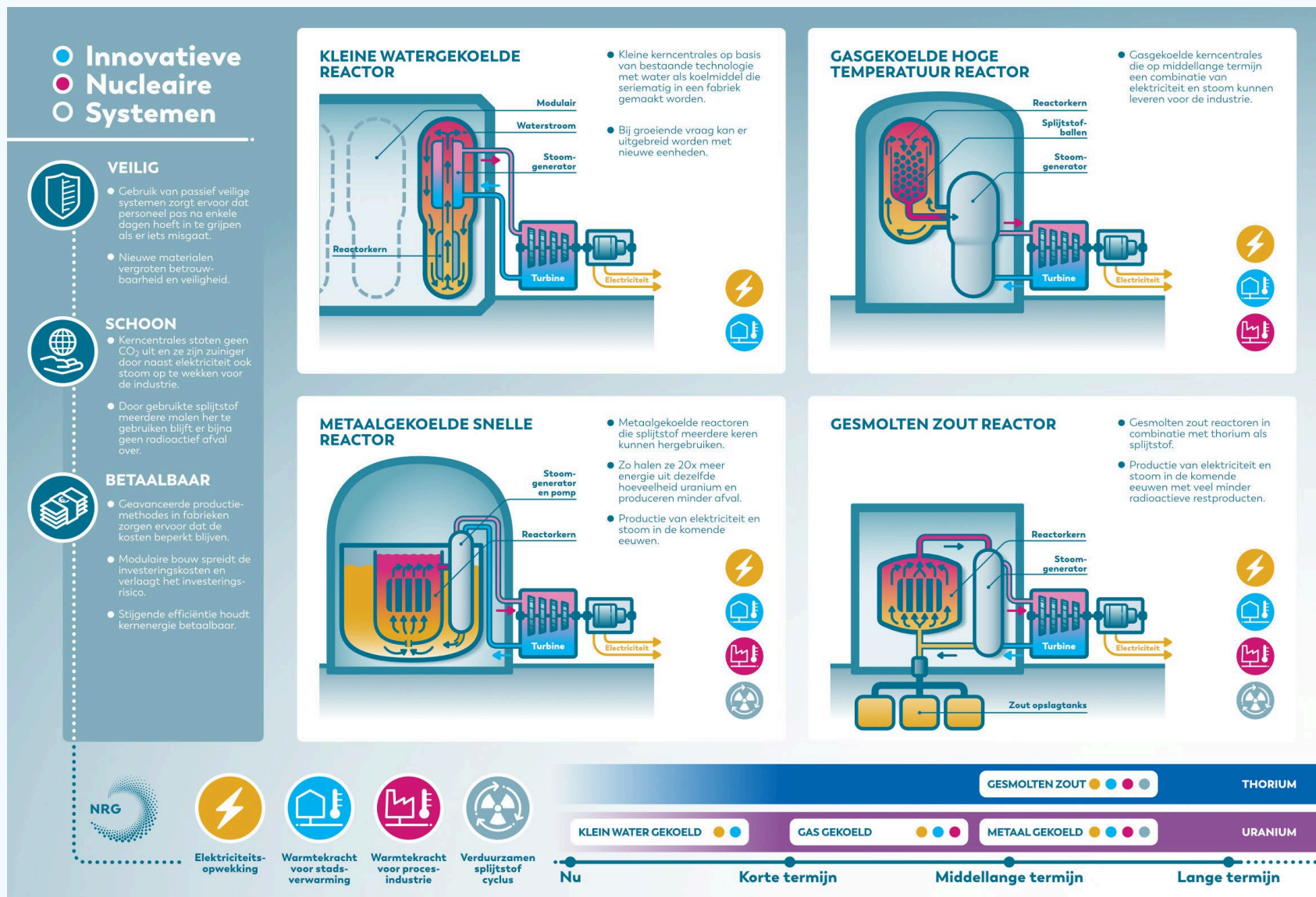
MSR's kennen een lagedruksysteem zodat voor de veiligheidsomhulling beperkte eisen gelden. Het systeem met hoge temperaturen resulteert in hoge efficiëntie en een gesloten splijstofcyclus. De kortere halfwaardetijden van het afval zorgen dat de opslagduur van afval aanmerkelijk korter wordt (~300 jaar).

Enkele MSR-ontwerpen berusten op snelle neutronen. In dit reactorconcept kan thorium efficiënt als splijstof gebruikt worden, dat in het zout wordt opgelost. Overigens kan thorium in elk type kernreactor ingezet worden, echter in een gesmoltenzoutreactor gaat dit het efficiëntst.

Ontwerpen in ontwikkeling: ~10

Figuur 1.4 | Indeling van SMR-concepten op basis van toegepaste techniek

Eveneens wordt per techniek de mogelijke toepassing aangeduid: elektriciteitsopwekking, (proces-)warmte evenals een verduurzaming van de splijstofcyclus.



Micro-SMR's

Er is een grote ontwikkelingstrend ontstaan van zeer kleine SMR's, die een elektrisch vermogen tot 10 MWe genereren. De ontwerpen voor deze *micro-SMR's* zijn zeer uiteenlopend en maken gebruik van verschillende soorten koelmiddelen. Gezien het formaat worden deze concepten ook wel 'nucleaire batterijen' genoemd. De toepassingen zijn nagenoeg eindeloos. Micro-SMR's kunnen toekomstige nichemarkten bedienen voor elektriciteit en stadswarmte in afgelegen regio's, mijnbouw, industrieën en visserijen en kunnen huidige dieselcentrales vervangen. Gezien de hoge energiedichtheid en het relatief kleine vermogen zijn deze typen in staat om gedurende 5 tot 10 jaar continu in bedrijf te zijn (zonder de reactor met verse splijtstof te herladen), en hebben ze van alle typen geavanceerde SMR's verreweg de kleinste *footprint*.

Ontwerpen in ontwikkeling: -6

Wereldwijde ontwikkelingen in kaart

In [Figuur 1.5](#) zijn de concrete projecten op het gebied van SMR's weergegeven. Het betreft ongeveer 80 projecten verdeeld over Amerika, Rusland, Azië, Europa en Zuid-Afrika.

[Figuur 1.6](#) geeft een overzicht weer van de geplande koppeling op een elektrisch net (uitgezet tegen het vermogen van de reactor-module) van een aantal van deze projecten.

Ombouw bestaande kolencentrales

Sinds kort wordt er met steeds meer belangstelling gekeken naar de mogelijkheden om kolencentrales om te bouwen en zo op een andere efficiënte manier CO₂-reductie te realiseren. Een voorbeeld van dit initiatief is het *repower*-concept van TerraPraxis [15].

Het concept houdt in dat in bestaande kolencentrales één onderdeel wordt vervangen, namelijk de warmtebron zelf. Voor de kolenververbranding komt een kernreactor in de plaats. De conventionele componenten en installaties van de kolencentrale (koelwatersysteem, stoomturbine, generator, gebouwen en overige infrastructuur) kunnen op deze manier worden hergebruikt. Door hun kleinschaligheid kan een SMR een eenvoudig te realiseren oplossing zijn. Aangezien alleen de reactor zelf gerealiseerd dient te worden, zullen de bijkomende investeringen lager uitvallen.

Toepassingen anders dan elektriciteitsopwekking

Naast elektriciteitsopwekking zullen (micro) SMR's ook om andere redenen kunnen worden ingezet. Door de flexibele inzet (snelle uitbreiding, integratie met bijvoorbeeld zon/wind) en toegankelijkheid tot diverse locaties, kan met de verschillende concepten, met ieder zijn eigen kenmerken, een breed toepassingsgebied bediend worden.

Met name de inzet in de procesindustrie biedt een aantal interessante toepassingen. [Figuur 1.7](#) toont verschillende SMR-ontwerpen en hun mogelijke toepassingen op basis van hun systeemtemperaturen. Te zien is dat zeer energie-intensieve chemische processen hoge temperaturen nodig hebben om conversie te realiseren.

1.7 LOPENDE PROJECTEN OP SMR-GEBIED

In deze sectie worden verschillende ontwerpen die in een gevorderd ontwikkelingsstadium zijn kort beschreven op basis van de belangrijkste kenmerken. Een aantal van deze ontwerpen bevinden zich in de voorbereiding voor een eerste bouwproject.

Een *SM-LWR* in aanbouw is *CAREM* in Argentinië, met een vermogen van 30 MWe. De bouw is in 2014 begonnen en de geplande koppeling aan het elektriciteitsnet is in 2026 (zie [Figuur 1.6](#)). Voorbeelden van micro-SMR-ontwerpen zijn *eVinci* van Westinghouse in de VS en *U-Battery* van Urenco in het VK. En onlangs zijn de eerste details bekend gemaakt voor een Koreaans *iPWR* SMR-concept met een vermogen van 100 MWe die gerealiseerd zal gaan worden in Saudi-Arabië [16]. Het Amerikaanse Terrapower heeft voor hun Natrium-reactor (een vloeibaar metaalgekoelde reactor-ontwerp) een locatie in de staat Wyoming geselecteerd om de Naughton kolencentrale te vervangen [17]. Deze metaalgekoelde reactor dient als warmtebron en de reeds bestaande infrastructuur en gebouwen/systemen kunnen worden hergebruikt.

Daarnaast zijn er ook een aantal ontwerpen reeds gerealiseerd. Zo is de Russische *KL40S*, een drijvende kerncentrale gebaseerd op

Figuur 1.5

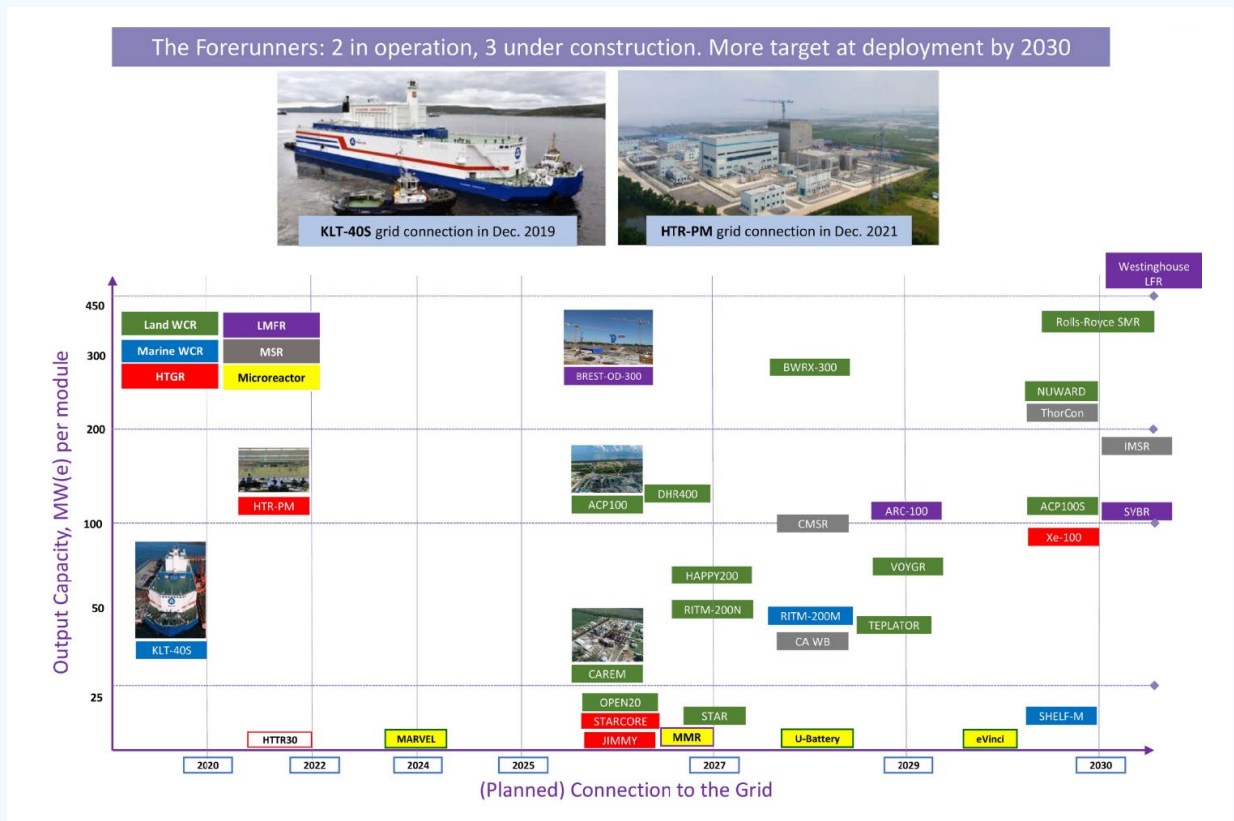
SMR-ontwikkeling in de wereld [14]



Figuur 1.6

Overzicht van de status (aansluiting op elektriciteitsnet) en elektrisch vermogen van de concepten in 2022

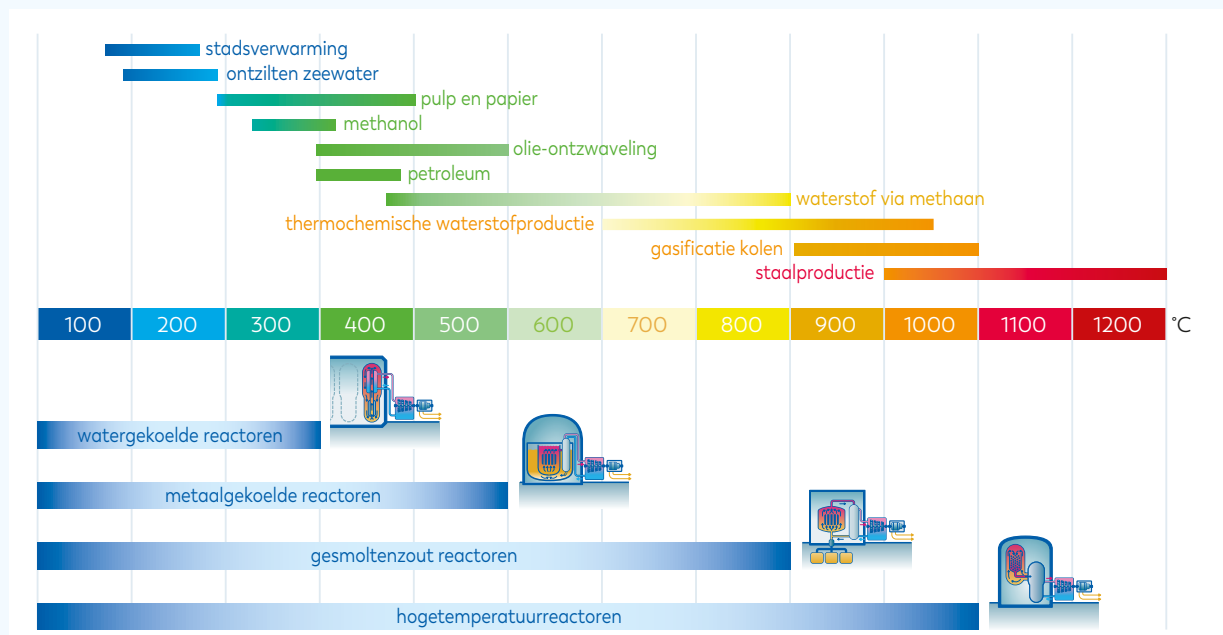
(WCR: watergekoelde reactor, HTGR: hoge-temperatuur gasgekoelde reactor, LMFR: vloeibaar metaal gekoelde snelle neutronen-spectrum reactor, MSR: gesmoltenzoutreactor) [14].



Figuur 1.7

Globaal overzicht van SMR-ontwerpen met bijbehorende (niet-elektrische) toepassingen op basis van systeemtemperaturen [13]

In de figuur wordt toepassing met hoogwaardige stoom aangeduid, waterstof kan bijvoorbeeld ook op lagere temperaturen (met elektriciteit) gegenereerd worden.



PWR-technologie, eind 2019 in bedrijf genomen en is de *High Temperature Reactor Pebble bed Module (HTR-PM)* in China recentelijk op het elektriciteitsnet aangesloten. Het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) van de Verenigde Naties geeft elke twee jaar een brochure uit met een overzicht van alle ontwerpen die bekend zijn [14].

NuSCALE

Ontwerper: NuScale Power Corporation, Tigard (Oregon), VS [14], [18].

Concept: gebaseerd op PWR techniek.

Alle componenten voor stoomopwekking en warmte-uitwisseling zijn in een enkele geïntegreerde ('iPWR') eenheid geplaatst, de NuScale Power Module (NPM). Elke NPM werkt onafhankelijk binnen een configuratie tot 12 modules gecombineerd in een VOYGR-plant [19], bewaakt en bediend vanuit een enkele regelkamer.

- Vermogen NPM: 77 MWe (thermisch reactorvermogen 250 MW); 12 NPM: 924 MWe;
- Reactorvat afmetingen: 17,7 m (hoogte); 2,7 m (diameter);

- Beheersing reactiviteit: regelstaven en opgelost boorzuur;
- Splijtstof: standaard LWR splijtstof (UO₂ tabletten); cyclusduur tot 24 maanden; verrijking van U-235 <5%.

Vergunning: In augustus 2020 heeft NuScale een belangrijke mijlpaal bereikt met de Amerikaanse toezichthouder, de United States Nuclear Regulatory Commission (US-NRC). De US-NRC voltooide de Fase 6-beoordeling – de laatste fase – van NuScale's *Design Certification Application (DCA)* met de uitgifte van het *Final Safety Evaluation Report*. In september 2020 heeft de NRC de *Standard Design Approval* uitgegeven, wat betekent dat de veiligheidsaspecten van het NuScale-ontwerp US-NRC-goedgekeurd zijn.

Projecten: In november 2021 ondertekenden NuScale en het Roemeense energiebedrijf *Societatea Nationala Nuclearelectrica SA* een samenwerkingsovereenkomst tijdens de VN-conferentie over klimaatverandering (COP26) ten behoeven van de inzet van een 6-module VOYGR-6 462 MWe elektriciteitscentrale in Roemenië.

Mijlpalen/planning:

- 2003 Initiële concept ontwikkeld, een integrale test facility in bedrijf;
- 2007 NuScale Power wordt opgericht;
- 2012 Regelkamer-simulatie van een twaalf-reactor eenheid is in gebruik genomen;
- 2016 Ontwerp-aanvraag wordt bij de US-NRC ingediend;
- 2020 NuScale-ontwerpcertificering afgerond;
- 2023 Start bouw eerste full-scale NuScale-reactor in de VS;
- 2027 Eerste commerciële NuScale-reactor inbedrijfname gepland in Idaho, VS.

BWRX-300

Ontwerper: GE-Hitachi Nuclear Energy, VS & Hitachi-GE Nuclear Energy, Japan [14], [20].

Concept: De BWRX-300 vertegenwoordigt het meest innovatieve BWR-ontwerp sinds General Electric begon met de ontwikkeling van kernreactoren in 1955. De BWRX-300 is een evolutie van de US-NRC-vergunde 1520 MWe ESBWR die op zijn beurt een doorontwikkeling was van technieken die in de Nederlandse kerncentrale Dodewaard zijn getest en aangetoond. Een belangrijk kenmerk is dat deze reactoren geen koelmiddelpompen hebben: de koelmiddelstroom berust op natuurlijke circulatie. Het ontwerp is ontwikkeld met een strikte naleving van de IAEA-richtlijnen. De veiligheidssystemen zijn volledig passief.

- Vermogen: 870 MWt / 290 MWe;
- Reactorvat afmetingen: 26 m (hoogte); 4 m (diameter);
- Beheersing Reactiviteit: regelstaven en opbrandbare absorbers (in de splijfstofstaven);
- Splijstof: standaard LWR splijstof (UO_2 tabletten); cyclusduur tot 24 maanden; verrijking <5%.

Mijlpalen/planning:

- 2017 Start van het conceptuele ontwerp;
- 2018 Financiering *Mature Technology Evaluation* door het ministerie van *Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS)* in het Verenigd Koninkrijk;
- 2019 Initiatie van de vooraanvraag van relevante activiteiten met de US NRC;
- 2020 Gecombineerde 'fase 1' en 'fase 2' "Vendor Design Review" geïnitieerd met CNSC (Canadese toezichthouder);

- 2022 Verwachte indiening aanvraag eerste bouwvergunning;
- 2024 Begin van de bouw van de eerste unit verwacht;
- 2027 Commerciële inbedrijfname van de eerste reactor gepland/verwacht.

Rolls-Royce SMR

Ontwerper: Rolls-Royce and Partners, Verenigd Koninkrijk [12], [14].

Concept: Type drukwaterreactor (PWR, 3-loop). Het koelmiddel wordt gecirculeerd met drie centrifugale reactorcoolpompen via drie stoomgeneratoren in een zogenaamde 'kort gekoppelde' configuratie. Het ontwerp bevat meerdere actieve en passieve veiligheidssystemen, elk met een aanzienlijke interne redundantie en wijkt conceptueel niet erg af van de grote drukwaterreactoren. Rolls-Royce zet vooral in op modulaire bouw op basis van beproefde technologie, met het idee dat de grootste componenten nog net over de weg vervoerd en aangeleverd moeten kunnen worden.

- Vermogen: 1276 MWt / 470 MWe;
- Reactorvat afmetingen: 11,3 m (hoogte); 4,5 m (diameter);
- Beheersing reactiviteit: regelstaven en opbrandbare absorbers (in de splijfstofstaven, Gd_2O_3);
- Splijstof: standaard LWR splijstof (UO_2 tabletten); cyclusduur tot 24 maanden; verrijking <5%.

Projecten: Rolls-Royce SMR heeft een exclusieve overeenkomst getekend met het Nederlandse ontwikkelingsbedrijf *ULC-Energy* (gevestigd in Amsterdam) om samen te werken aan de realisatie van Rolls-Royce SMR's in Nederland.

Mijlpalen/planning:

- 2015 Rolls-Royce ontwikkeling van het initiële referentie-ontwerp;
- 2016 Consortium voor ontwerp van het gehele reactorconcept opgezet;
- 2017 Volwaardig ontwerpconcept ontwikkeld;
- 2025 Start van de realisatie van de FOAK;
- 2030 Geplande FOAK commerciële inbedrijfname.

NUWARD

Ontwerper: EdF-geleid consortium met CEA, Naval Group, en TechnicAtome; Frankrijk [14], [21], [22].

Concept: NUWARD betreft een integrale drukwaterreactor ('iPWR'), bestaande uit twee reactormodules, waarbij de hoofdcomponenten van het *Nuclear Steam Supply System* (NSSS) volledig geïntegreerd zijn (regelstaafregeling, stoomgeneratoren, drukhouder, reactorvat). Het ontwerp is voornamelijk op passieve systemen gebaseerd.

- Vermogen: 2 x 540 MWt / 2 x 170 MWe;
- Reactorvat afmetingen: 13 m (hoogte); 4 m (diameter);
- Beheersing reactiviteit: regelstaven en opbrandbare absorbers (in de splijfstofstaven);
- Splijstof: standaard LWR splijstof (UO₂ tabletten); cyclusduur: 24 maanden; verrijking <5%.

Vergunning: Voor het NUWARD ontwerp wordt een *case study* uitgevoerd door een groep Europese nucleaire toezichthouders ten behoeve van een vroege beoordeling van het ontwerp. De leiding is in handen van de Franse toezichthouder ASN, de andere toezichthouders zijn het Tsjechische SUJB en de Finse STUK. De beoordeling zal gebaseerd zijn op de huidige nationale voorschriften van elk land, de hoogste internationale veiligheidsdoelstellingen en referentieniveaus, en *up-to-date* kennis.

Mijlpalen/planning:

- 2012-2016 Voorbereidende onderzoeken en technologische innovaties (met behulp van eerder ontwikkelde patenten);
- 2017-2019 Pre-conceptuele ontwerpfasen en validatie van de technologie;
- 2019-2022 Conceptuele ontwerpfasen;
- 2030 Verwachte implementatie en realisatie.

HTR-PM

Ontwerper: INET (*Institute of Nuclear and New Energy Technology*), Tsinghua University; Peking, China [14].

Concept: De HTR-PM is van het type hogetemperatuur gasgekoelde reactor. De HTR-PM (*High Temperature Reactor Pebble bed Module*)

bestaat uit twee *pebble-bed* reactor-modules gekoppeld aan een stoomturbine. Met de *pebbles* wordt de vorm waarin de splijstof zich bevindt aangeduid: kleine bollen ter grootte van een biljartbal (waarin weer duizenden kleine splijstofbolletjes zijn verwerkt). De temperatuur van het helium bij de inlaat en uitlaat van de reactorkern is respectievelijk 250 °C en 750 °C, de stoomparameters zijn 13,25 MPa bij 567 °C bij de ingang van de stoomturbine.

De HTR-PM heeft de veiligheidskenmerken van een modulaire HTGR, zoals een lage vermogensdichtheid en een grote negatieve reactiviteitscoëfficiënt.

- Vermogen: 2x250 MWt / 210 MWe;
- Reactorvat afmetingen: 22 m (hoogte); 5,7 m (binnendiameter);
- Beheersing reactiviteit: regelstaven;
- Splijstof: sferische elementen (bollen) met gecoate splijstof; cyclusduur: niet van toepassing (splijstof bijvullen/verwijderen tijdens bedrijf); verrijking: 8,5%.

Mijlpalen:

- 2001 Start van het commerciële HTR-PM-project;
- 2004 Start van het *standard design* van de HTR-PM;
- 2006 Goedkeuring HTR-PM demonstratiereactor als één (van de 16) "National Science and Technology" projecten in China;
- 2006 Huaneng Shandong Shidaowan Nuclear Power Co., Ltd, de eigenaar van de HTR-PM, opgericht door de China Huaneng Group, de China Nuclear Engineering Group Co. en de Tsinghua University in Peking;
- 2006-2008 *Basic design* van de HTR-PM afgerond;
- 2009 Beoordeling van de HTR-PM PSAR (Preliminary Safety Analysis Report) afgerond;
- 2012 Eerste betonstorten van de HTR-PM;
- 2013 Bouw van de splijstoffabriek gestart;
- 2014 Kwalificatie bestralingskasten van de splijstof afgerond;
- 2015 Civiele constructie van het reactorgebouw afgerond;
- 2016 Reactorvat en kernonderdelen, etcetera, aangeleverd, installatie van de kritische componenten;

- 2017 Splitsstoffabriek behaald verwachte productiecapaciteit;
- 2020 Inbedrijfstellingstest van het primaire systeem.

Op 12 september 2021 werd de eerste van twee reactoren opgestart en op 11 november 2021 bereikte reactor 2 criticiteit. Vervolgens werd op 20 december 2021 reactor 1 aangesloten op het openbare elektriciteitsnet van China [23], [24]. Reactor 2 volgt waarschijnlijk later in 2023.

THORIZON

Ontwerper: THORIZON B.V., Nederland [25].

Concept: Het THORIZON reactorontwerp betreft een gesmoltenzoutreactor met plutonium en thorium als splitsstoffen. De reactorkern bestaat uit zeven modules die afzonderlijk kunnen worden verwijderd en vervangen. De zeven modules naast elkaar in de reactor vormen een zone waarin het splitsingsproces plaatsvindt. Indien één van deze modules wordt verwijderd, stopt het splitsingsproces. Als moderator wordt grafiet gehanteerd. De temperatuur van het gesmolten zout bij de inlaat en uitlaat van de reactorkern is respectievelijk 500 °C en 800 °C. Het primair systeem staat onder een druk van 8 bar tijdens bedrijf en 2 bar in afgeschakelde toestand. Het beoogde thermisch/elektrisch vermogen bedraagt respectievelijk 100-300 MWt, en 40-120 MWe, met een stoomtemperatuur van rond de 550 °C.

Mijlpalen/planning:

- 2020 Concept-ontwerp afgerond, patent-aanvraag en investering gehonoreerd;
- 2022 Transitie van 'fase 1' conceptontwerp naar 'fase 2' eindontwerp;
- 2025 'Fase 2' ontwerp afgerond, veiligheids-evaluaties succesvol uitgevoerd en aanvraag van de bouwvergunning ingediend;
- 2030 Afronden van 'fase 3': zout-experimenten afgerond, componenten gekwalificeerd en omgeving/locatie geselecteerd en ingericht;
- 2035 Bouw afgerond, vergunning voor de in bedrijfname afgegeven;
- >2035 Initiële ervaringen worden opgedaan met reactorbedrijf. Verdere commercialisatie van het reactorontwerp.

In [Figuur 1.8](#) is voor een aantal reactorconcepten de stoomparameters (temperatuur in °C) aangegeven, tezamen met de benodigde streeftemperaturen voor verscheidene industriële productieprocessen.

1.8 ONDERZOEK SMR BIJ NRG

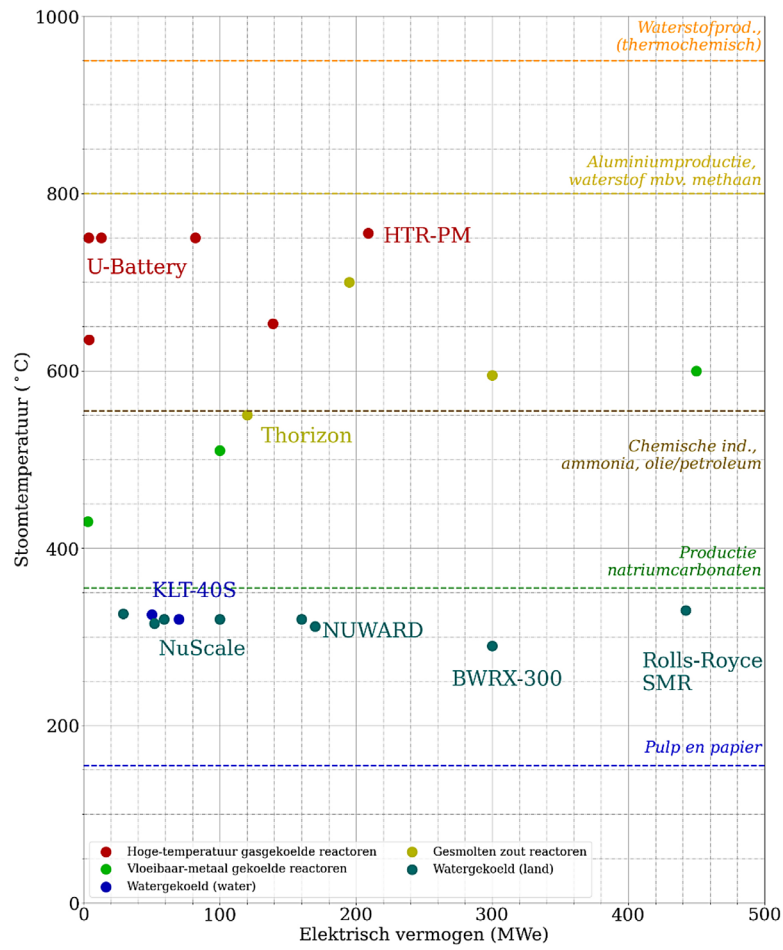
In Nederland wordt onderzoek gedaan naar allerlei facetten binnen de nucleaire technologie. In het bijzonder is er gedurende de laatste 10 jaar veel werk verzet op het vlak van onderzoek omtrent SMR's. De volgende onderzoeken binnen *Nuclear Research & consultancy Group* (NRG) vinden momenteel plaats voor de verschillende typen reactoren:

- **Lichtwater-SMR**
 - Veiligheidsanalyses
 - Multi-unit probabilistische veiligheidsanalyses (evaluatie onderlinge invloeden van reactormodules)
 - Gebruikseisen en vergunbaarheid
- **HTR**
 - Veiligheidsanalyses
 - Splitsstofonderzoek en kwalificatie
 - Materiaalonderzoek
 - Techno-economische analyses
- **LMFR**
 - Veiligheidsanalyses
 - Splitsstofonderzoek
 - Materiaalonderzoek
 - Onderzoek naar scheiden en transmuteren van gebruikte splitsstof
 - Techno-economische analyses
- **MSR**
 - Veiligheidsanalyses
 - Splitsstofonderzoek
 - Materiaalonderzoek
 - Onderzoek naar afvalroutes
 - Ontwerp bestralingsfaciliteit met stromend zout

Naast het onderzoek binnen NRG wordt ook onderzoek gedaan aan de TU Delft (*RID*). In het verleden heeft de TU Delft aan de wieg gestaan van het microreactor-concept *U-Battery* dat nu door Urenco in het VK verder ontwikkeld wordt. Meer recentelijk wordt in Delft met name op het vlak van HTGR- en MSR-technologieën onderzoek gedaan.

Figuur 1.8

Enkele SMR-concepten uitgezet tegen de benodigde stoomtemperaturen voor (chemische) procesindustrieën



2. Indicatoren SMR inzet in Nederland

Het Internationale Atoom Energie Agentschap (IAEA) van de Verenigde Naties heeft een systematiek ontwikkeld waarmee het potentieel van een land om SMR-technologie in te zetten in kaart wordt gebracht. Er worden 18 indicatoren gebruikt, verdeeld over zes hoofdcategorieën [13]:

1. Nationale energievraag
2. SMR-energievraag
3. Financieel/economische toereikendheid
4. Voldoende fysieke infrastructuur
5. Motivatie voor klimaatverandering
6. Motivatie voor energiezekerheid

Deze indicatoren worden weergegeven in [Tabel 2.1](#).

Er wordt een eenvoudige puntenscore voor elke indicator gebruikt om grofweg te beoordelen of een land gereed is om SMR-technologie toe te passen en om te helpen bepalen

of een SMR een goede optie kan zijn om aan toekomstige energiebehoeften te voldoen.

De indicatoren die de meest gunstige score behalen krijgen een score van 10 en de minste een score van 1. De indicatoren worden gelijk gewogen zodat met 18 indicatoren de maximaal haalbare score 180 bedraagt. De IAEA geeft aan dat een score van minimaal 100 punten (dat wil zeggen > 55%) benodigd is om SMR-technologie in te gaan voeren. Opgemerkt kan worden dat een groot deel van de score afhangt van SMR specificaties en/of de grootte van bepaalde indicatoren.

Naast de bovengenoemde 'geschiktheids-evaluatie' is er ook een aantal voorwaarden waaraan voldaan moet worden voordat een land kan overwegen SMR-technologie in te zetten. Zo heeft de IAEA richtlijnen gepubliceerd over de grootte van kerncentrales in verhouding tot de totale netgrootte [13], [26].

Tabel 2.1

Indicatoren landen potentieel m.b.t. het toepassen van SMR technologie [13]

NATIONALE ENERGIE-VRAAG	SMR ENERGIE-VRAAG	ECONOMISCHE TOEREIKENDHEID	FYSIEKE INFRA-STRUCTUUR	MOTIVATIE KLIMAAT-VERANDERING	MOTIVATIE ENERGIE-ZEKERHEID
Groei economische activiteit	Elektriciteitsverspreiding in landelijke gebieden	Vermogen tot ondersteunen nieuwe investeringen	Beschikbaarheid locatie	CO ₂ reductie per capita	Vermindering Elektriciteitsimport
Groeisnelheid primaire Elektriciteitsconsumptie	Opwekking elektriciteit en proceswarmte	Openheid tot internationale handel	Conditie infrastructuur	Vermindering gebruik fossiele brandstof	Gebruik eigen uraniumbron
Elektriciteitsconsumptie per capita	E-intensieve industrieën	Geschiktheid voor investering	Capaciteit elektriciteitsnetwerk	Behalen koolstof reductiedoelen	Leveringszekerheid i.c.m. <i>intermittent renewables*</i>

*bijvoorbeeld zon en wind

Op basis van deze systematiek wordt een kwalitatieve inschatting gemaakt van de score van Nederland. Hiervoor worden drie scores per indicator gehanteerd:

- A** = score 1-3: slecht
- B** = score 4-6: redelijk
- C** = score 7-10: (zeer) goed

In [Tabel 2.2](#) zijn de scores op basis van een eerste inschatting ingevuld.

De totaalscore voor Nederland ligt in deze berekening in de range van 99 tot 146. Te weten 2 x A, 5 x B en 11 x C. Volgens de IAEA-systematiek is dit een indicatie dat Nederland geschikt is voor het inzetten van SMR-technologie.

Voor Nederland kan met name genoemd worden dat de bereidwilligheid om klimaatdoelen te realiseren (CO₂-reductie) hoog is. Er wordt veel waarde gehecht aan leveringszekerheid en de vermindering van energie import. Daarnaast zijn er volop mogelijkheden en is er interesse om de verschillende SMR-toepassingen anders dan stroomlevering (warmte, waterstofproductie et cetera) in te zetten (zie ook [Sectie 1.6](#)). De bereidheid om in klimaatmaatregelen te investeren is hoog, wat structureel tot uiting komt in de Rijksbegroting.

Nederland kent veel energie-intensieve industrie, waaronder staalproductie en (petro)chemische industrie. Voor genoemde voorbeelden is de inzet van SMR's ten behoeve van warmteproductie en conversieprocessen (zoals waterstofproductie) met name interessant. In de provincie Limburg laat men hier studie naar doen.

Tabel 2.2

Indicatieve scan voor de geschiktheid voor SMR-inzet voor Nederland

NATIONALE ENERGIE-VRAAG	SMR ENERGIE-VRAAG	ECONOMISCHE TOEREIKENDHEID	FYSIEKE INFRA-STRUCTUUR	MOTIVATIE KLIMAAT-VERANDERING	MOTIVATIE ENERGIE-ZEKERHEID
Groei economische activiteit C	Elektriciteitsverspreiding in landelijke gebieden A	Vermogen tot ondersteunen nieuwe investeringen C	Beschikbaarheid locatie B	CO ₂ -reductie per capita C	Vermindering Elektriciteitsimport C
Groei snelheid primaire Elektriciteitsconsumptie B	Opwekking elektriciteit en proceswarmte B	Openheid tot internationale handel C	Conditie infrastructuur C	Vermindering gebruik fossiele brandstof C	Gebruik eigen uraniumbron A
Elektriciteitsconsumptie per capita B	E-intensieve industrieën C	Geschiktheid voor investering C	Capaciteit elektriciteitsnetwerk B	Behalen koolstof reductiedoelen C	Leveringszekerheid i.c.m. zon/wind C

2.1 RELEVANTE ONTWIKKELINGEN IN NEDERLAND

In deze sectie worden enkele initiatieven en studies op het gebied van SMR, en/of nucleaire inzet in het algemeen, in Nederland opgesomd. Naast deze initiatieven zijn er in Nederland nog meer relevante spelers en belanghebbenden in het kader van de nucleaire kennisinfrastructuur en SMR-realiserings. In [Bijlage B](#) wordt getracht een compleet overzicht te presenteren van bestaande nucleaire faciliteiten, (inter-)nationale overheden en potentiële gebruikers voor SMR-technologie.

THORIZON (www.thorizon.com)

THORIZON is een Nederlandse *start-up* die recentelijk is opgericht, als spin-off van NRG. Het bedrijf heeft de ambitie om een eerste thorium-gesmoltenzoutreactor in Nederland te realiseren. Het THORIZON reactor project heeft onlangs een investering van € 12,5 miljoen opgehaald bij diverse investeerders (o.a. invest.nl) om de ontwikkeling van de MSR voort te zetten. Het doel van THORIZON is om voor 2035 een eerste reactorsysteem te realiseren.

ULC-Energy B.V. (www.ulc-energy.com)

ULC-Energy B.V. is een nucleair ontwikkelingsbedrijf, opgericht in 2021 in Nederland en gevestigd in Amsterdam. ULC-Energy werkt samen met Rolls-Royce om een eerste SMR in Nederland te realiseren. De missie van ULC-Energy is om de decarbonisatie in Nederland te versnellen door kernenergieprojecten te ontwikkelen die efficiënt integreren in industriële en residentiële energienetwerken in Nederland.

LastEnergy Inc. (www.lastenergy.com)

LastEnergy is een Amerikaans bedrijf dat zich inzet op de ontwikkeling van een iPWR met een elektrisch vermogen van 20 MW. Het bedrijf is vorig jaar gesprekken aangegaan met de Nederlandse overheid. De doelstelling is om alle componenten fabrieksmatig te bouwen en aan te leveren. Gebruik makende van de bestaande toeleveringsketen (van zowel conventionele als ook nucleaire partners) is met de compleet modulaire opzet van het reactorconcept het doel om de gehele bouw binnen 24 maanden te realiseren.

INTERESSE VANUIT PROVINCIES EN BEDRIJVEN

- **Technische (on)mogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg**

Dit betreft een studie uitgevoerd in de periode april – juli 2022 in opdracht van de Provincie Limburg door een consortium bestaande uit Nuclear-21, EVOCATI Consulting Alliance, DNV en STORK [11]. In deze studie wordt met name aandacht besteed aan de inzetbaarheid van SMR's op locaties met een grote energievraag, zoals het industriële cluster Chemelot. Het rapport geeft, naast energie-ontwikkelingen en toekomstige behoeften, een breed overzicht van allerlei (f)actoren die gemoeid zijn met de bouw van een (kleine modulaire) kerncentrale.

- **Energietransitie Noord-Brabant**

In opdracht van de Provincie Noord-Brabant is een studie door TNO en NRG uitgevoerd om onderzoek te doen naar de rol die kernenergie kan spelen in de energietransitie van deze provincie. Naast grote lichtwaterreactoren komt ook de mogelijkheid van inzet van SMR's aan de orde [27].

- **SmartPort**

SmartPort is een samenwerkingsverband van het Havenbedrijf Rotterdam, Deltalinqs, de gemeente Rotterdam, TNO, MARIN, Deltares, de Erasmus Universiteit van Rotterdam en de Technische Universiteit in Delft. Er is een Feitenverkenning uitgevoerd die als basis moet dienen voor de discussie over een mogelijke rol van kernenergie in Rotterdam.

- Rapportage: "Kernenergie, Stand der techniek, ruimtelijke inpassing en de organisatie van besluitvorming, Een verkenning"; 8 november 2021.
- Kennisconferentie Gemeente Rotterdam; 29 september 2021. Presentaties gegeven door onder andere TU Delft en NRG betreffende SMR's.

3. Resumé

Deze notitie geeft een overzicht van een aantal aspecten die betrekking hebben op de werking, ontwikkelingen en realisatie van kleine modulaire kernreactoren (SMR's). Het doel is een kennisoverzicht te geven van de stand van zaken van de techniek en lopende projecten op SMR-gebied.

De belangrijkste voordelen van SMR's ten opzichte van bestaande kerncentrales betreffen:

1. **Kostenreductie** (lagere absolute kosten en relatief korte bouwtijd) door gecentraliseerde fabricage van de modulaire componenten en multi-module inzet tijdens bedrijfsvoering.
2. De mogelijkheid tot **geleidelijke uitbouw** van een energieproductie eenheid.
3. **De bouwtijd** wordt door het SMR-concept gereduceerd.
4. SMR's bieden **mogelijkheden voor meerdere energiefuncties**, zoals elektriciteit en hogetemperatuur proceswarmte. Beide kunnen ingezet worden voor de productie van waterstof.

Er zijn ook nog de nodige uitdagingen op het gebied van de toeleveringsketen, de kennisinfrastructuur, en het vergunningstraject (zie [Sectie 1.5](#)). Hoewel de ontwikkelingen snel gaan, zijn SMR's op dit moment nog niet beschikbaar op de markt. Wereldwijd zijn er tientallen concrete SMR's in ontwikkeling. Naar verwachting zullen de eerste SMR-prototypes in het westen tussen 2025 en 2030 gereed zijn, met name in Amerika en het Verenigd Koninkrijk. Rolls-Royce is inmiddels dichtbij de presentatie van een prototype.

In Nederland is veel belangstelling voor SMR's, omdat deze reactoren een complementaire energiebron kunnen zijn, waarbij het toepassingsgebied zich uitstrekt tot meer dan alleen elektriciteitsproductie. Zo zijn er recentelijk onderzoeken uitgevoerd naar de mogelijkheden van gebruik in Limburg en Noord-Brabant.

Het Nederlandse ontwikkelingsbedrijf ULC-Energy werkt samen met Rolls-Royce om een eerste SMR in Nederland te realiseren. Een ander initiatief betreft THORIZON, een Nederlandse *start-up* die bezig is met ontwikkeling van de eerste thorium-gesmoltenzoutreactor in Nederland.

Het Internationale Atoom Energie Agentschap (IAEA) heeft een systematiek ontwikkeld waarmee het potentieel van een land om SMR-technologie in te zetten in kaart wordt gebracht. Als deze systematiek wordt toegepast op Nederland, lijkt Nederland goed te scoren op geschiktheid voor de inzet van SMR's (zie [Sectie 2](#)).

Daarbij beschikt Nederland over een goede nucleaire (kennis) infrastructuur, die het kabinet wil versterken. Er is kennis over SMR's aanwezig bij TU Delft, NRG-PALLAS en andere partijen in de nucleaire sector. Er vindt nucleair onderzoek plaats dat relevant is voor SMR's, zoals veiligheidsstudies en materiaalonderzoek. Hiermee beschikt Nederland over een goede uitgangspositie om aan SMR-technologieontwikkeling bij te dragen, door de combinatie van faciliteiten in Petten en Delft.

Ondanks de voorziene geclaimde voordelen op technologisch, financieel, en toepassingsgebied, is er vooralsnog een beperkte ervaring tot het realiseren van SMR's. Hierdoor zijn deze claims nog niet of nauwelijks te verifiëren. Als Nederland daadwerkelijk in wil zetten op SMR's dient tijdig met studies en voorbereidingen te worden gestart. Met studies naar technische haalbaarheid en inpassing in de energiemix moet inzicht worden verkregen naar de realiseerbaarheid.

Afkortingen en referentielijst

GEBRUIKTE AFKORTINGEN

ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (Nederlandse toezichthouder)
BWR	Boiling Water Reactor (kokendwaterreactor)
EPR	European Pressurised (water) Reactor (Europese drukwaterreactor)
EPZ	Elektriciteits Productiemaatschappij Zuid-Nederland
EUR	European Utility Requirements
FOAK, NOAK	First-of-a-kind, N th -of-a-kind
HTGR	High-Temperature Gas-cooled Reactor (hoge-temperatuurreactor)
HWR	Heavy Water Reactor (zwaarwaterreactor)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationaal Atoom Energie Agentschap)
KCB	KernCentrale Borssele
LCOE	Levelized Cost Of Electricity
LWR	Light Water Reactor (lichtwaterreactor)
MSR	Molten Salt Reactor (gesmoltenzoutreactor)
MWe, GWt	Elektrisch vermogen in Megawatt, Thermisch vermogen in Gigawatt
NRG	Nuclear Research & consultancy Group (nucleaire dienstverlener in Nederland)
PWR	Pressurised Water Reactor (drukwaterreactor)
RID	Reactor Instituut Delft
SMR	Small Modular Reactor (kleine modulaire kernreactoren)
US-NRC	United States Nuclear Regulatory Commission (Amerikaanse toezichthouder)

REFERENTIELIJST

[1]	„Klimaatwet, [Online] https://wetten.overheid.nl/BWBR0042394/2022-03-02 [Geopend 27 03 2023].”
[2]	„Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst - Coalitieakkoord 2021 - 2025,” VVD, D66, CDA en ChristenUnie, 15 december 2021.
[3]	R. Jetten, „Nadere uitwerking van de afspraken uit het coalitieakkoord op het gebied van kernenergie,” Ministerie voor Klimaat en Energie, 9 december 2022.
[4]	„Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research, B. Mignacca, G. Locatelli (Renewable and Sustainable Energy Reviews 118 (2020) 109519).”
[5]	„Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market”.
[6]	S. Macfarlane-Smith, „Rolls-Royce SMR,” in Nuclear Academics meeting, 8th September 2021.
[7]	„Power Technology, Rolls Royce plans first UK modular nuclear reactor for 2029,” 19 4 2022.
[8]	„KPMG - Marktconsultatie kernenergie (1 juli 2021).”
[9]	„Reduction of Capital Costs (NEA OECD).”
[10]	„Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear A Practical Guide for Stakeholders (NEA OECD).”
[11]	„Onderzoeksrapport Kernenergie Limburg,” [Online] https://www.limburg.nl/publish/pages/7628/onderzoeksrapport_kernenergie_limburg.pdf . [Geopend 17 05 2023].
[12]	„Rolls-Royce SMR,” [Online] https://www.rolls-royce-smr.com/ . [Geopend 1 12 2022].
[13]	„Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, IAEA Nuclear Energy Series, No. NR T 1.18,” IAEA, 2021.
[14]	„Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS),” IAEA, 2022.
[15]	„Terraprxis - Decarbonizing The Global Coal Fleet By 2050, [Online] www.terraprxis.org/projects/repowering-coal [Geopend 08 03 2023].”
[16]	„KEPCO SMART100, [Online] https://www.kepco-enc.com/eng/contents.do?key=1539 [Geopend 1 12 2022].”
[17]	„TerraPower selects Kemmerer, Wyoming as the preferred site for advanced reactor demonstration plant, [Online] www.terrapower.com/natrium-demo-kemmerer-wyoming/ [Geopend 27 03 2023].”
[18]	„NuScale Power,” [Online] https://www.nuscalepower.com/technology/design-innovations . [Geopend 1 12 2022].
[19]	„NuScale VOYGR,” [Online] https://www.nuscalepower.com/en/products . [Geopend 16 12 2022].
[20]	„Hitachi-GE BWRX-300,” [Online] https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300 . [Geopend 1 12 2022].
[21]	„The NUWARD SMR solution,” [Online] https://www.edf.fr/en/the-edf-group/producing-a-climate-friendly-energy/nuclear-energy/shaping-the-future-of-nuclear/the-nuwardtm-smr-solution/the-solution . [Geopend 1 12 2022].
[22]	„European regulators to cooperate on NUWARD SMR licensing,” [Online] https://www.world-nuclear-news.org/Articles/European-regulators-to-cooperate-on-Nuward-licensi . [Geopend 1 12 2022].
[23]	„Demonstration HTR-PM connected to grid,” [Online] https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Demonstration-HTR-PM-connected-to-grid . [Geopend 1 12 2022].
[24]	„China’s demonstration HTR-PM reaches full power, [Online] www.world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power [Geopend 01 03 2023].”
[25]	„Thorizon,” [Online] https://thorizon.com/ . [Geopend 20 12 2022].
[26]	„Electric Grid Reliability and Interface with Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series, No. NG T 3.88,” IAEA, 2012.
[27]	„De rol van kernenergie in de energietransitie van Noord-Brabant, TNO 2020 P12092, 060.46358,” 2021.
[28]	„World Nuclear Association - Reactor database,” [Online] https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/reactor-database.aspx . [Geopend 28 11 2022].
[29]	„Licensing Process for Nuclear Installations - SSG-12,” IAEA, 2010.
[30]	„Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors; Challenges, Resolutions and Insights; TECDOC-2003,” IAEA, 2022.
[31]	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Wegwijzer Nationaal beleid nucleaire veiligheid en stralingsbescherming,” Juli 2022.

Bijlage A

Overzicht huidige kernreactoren

Wereldwijd zijn op dit moment ongeveer 440 kernreactoren in bedrijf [28]. De meeste kernreactoren staan in de Verenigde Staten (92) en Frankrijk (56). De reactoren zijn van uiteenlopende ontwerpen, echter het grootste aandeel van reactoren is van het type lichtwaterreactor en dan met name de drukwaterreactor (*Pressurised Water Reactor, PWR*). Andere ontwerpen betreffen kokendwaterreactoren (*Boiling Water Reactor, BWR*), zwaarwaterreactoren, gasgekoelde reactoren en snellekweekreactoren. [Tabel A1](#) geeft een overzicht weer van de verschillende typen met enkele kenmerkende gegevens.

Op dit moment ligt de maximaal mogelijke netto elektriciteitsproductie van één reactor rond de 1700 MWe, gerealiseerd door de *EPR*

(*European Pressurised Reactor*). De meest voorkomende netto productie ligt echter rond de 1000 MWe. De kerncentrale in Borssele (*KernCentrale Borssele, KCB*) heeft een vermogen van 482 MWe, betreft een PWR-ontwerp (Siemens/KWU), en behoort tot de kleinere kerncentrales. Het aandeel van KCB in de totale *elektriciteitsproductie* van Nederland is ongeveer 3,5% (~40 PJ), het totale *energieverbruik* van Nederland ligt momenteel rond de 3000 PJ. Hierbij valt op te merken dat de elektriciteitsproductie slechts een onderdeel is van het totale energieverbruik.

Momenteel zijn er 60 reactoren in aanbouw [28]. De huidige in aanbouw zijnde reactoren betreffen moderne ontwerpen, zoals de *EPR*

Tabel A1

Meest voorkomende typen centrales wereldwijd [28]

REACTOR-TYPEN	VOORNAAMSTE LANDEN	AANTAL	GEÏNSTALLEERD VERMOGEN (GWE)	TYPE SPLIJTSTOF	KOELMIDDEL	MODERATOR
Drukwaterreactor (PWR)	VS, Japan, Frankrijk	302	287,0	Verrijkt uraniumoxide (UO ₂)	Lichtwater	Lichtwater
Kokendwaterreactor (BWR)	VS, Japan, Zweden	63	64,1	Verrijkt UO ₂	Lichtwater	Lichtwater
Zwaarwaterreactor	Canada, India	49	24,5	Natuurlijk UO ₂	Zwaarwater	Zwaarwater
Geavanceerde gas-gekoelde reactor	Verenigd Koninkrijk	14	7,7	Natuurlijk/verrijkt UO ₂	CO ₂	Grafiet
Lichtwater-grafietreactor	Rusland	12	8,4	Verrijkt UO ₂	Water	Grafiet
Snelle reactor	Rusland	2	1,4	PuO ₂ en UO ₂	Vloeibaar natrium	-
Hoge-temperatuurreactor	China	2	0,2	UO ₂	Helium	Grafiet
TOTAAL		444	393			

Voor elk van de onderstaande reactortypen zijn enkele voor- en nadelen in [Tabel A2](#) weergegeven.

in Flamanville, Frankrijk en de AP1000 in Burke County, Georgia, VS. Vooral de nieuwbouwprojecten in de VS en Europa gaan echter gebukt onder grote overschrijdingen van budget en bouwtijden. De redenen hiervoor zijn divers (levering materialen, kwalificatieaspecten, vertraging in het vergunningstraject, et cetera).

LICHTWATERREACTOREN

Een lichtwaterreactor is een type reactor dat *licht water* gebruikt. 'Licht' doelt hier op het gebruik van de lichtste variant van de waterstofisotoop (*H*) in water, H_2O . Het water wordt zowel als koelmiddel alsook voor neutronenmoderator gebruikt. De moderator kan gezien worden als een 'remstof' doordat de neutronen op de watermoleculen botsen en een deel van hun energie aan het water afgeven. De mate van vertraging bepaalt de energietoestand van de neutronen: relatief sterk vertraagde neutronen worden *thermisch* genoemd. Een thermisch neutron kan een kern van het uraniumisotoop 235 (*U-235*) splijten. Een neutron met een relatief hoge energie (met minder moderatie) wordt een *snel neutron* genoemd en is niet in staat om *U-235* te splijten. Er zijn twee typen lichtwaterreactoren te onderscheiden: de *PWR* en de *BWR*.

Drukwaterreactor (PWR)

Een drukwaterreactor is een type kernreactor dat water onder hoge druk (~155 bar) gebruikt als koeling en als moderator (enkele ontwerpen gebruiken voor dat laatste grafiet). De splijtstof zit in tabletten die tesamen de splijtstofelementen vormen. Het water van de primaire kring (zie [Figuur A1](#)) wordt opgewarmd tot circa 315 °C, door de warmteproductie, die als gevolg van splijting van uraniumkernen vrijkomt. Door de hoge druk kookt het koelwater in de primaire kring niet.

Het water uit de primaire kring komt in de warmtewisselaar met dunne buisjes terecht (de 'stoomgenerator'). Hier geeft het de warmte af aan de secundaire kring. Er is hierbij geen enkel contact tussen het water aan de primaire en de secundaire zijdes. Het water uit de secundaire kring staat op een druk van circa 60 bar en gaat koken door het warmteaanbod vanaf de primaire kring en

wordt stoom. Deze stoom wordt vervolgens naar de hoge- en lagedrukturbines gevoerd waarbij expansie plaatsvindt, waardoor thermische energie wordt omgezet in mechanische energie. Deze mechanische energie wordt tenslotte door de generator omgezet in elektrische energie. Boven in [Figuur A1](#) zijn de belangrijkste onderdelen van een drukwaterreactor schematisch weergegeven.

Kokendwaterreactor (BWR)

Een kokendwaterreactor is een type kernreactor dat water gebruikt dat zowel als koelmiddel als moderator dient. Tevens dient het voor de directe productie van stoom: in tegenstelling tot een PWR wordt het in de reactorkern geproduceerde stoom direct naar de turbine geleid en ontbreekt dus een extra watercircuit. Het verdere proces van elektriciteitsproductie is hetzelfde als dat van de PWR. [Figuur A1](#) geeft de belangrijkste onderdelen schematisch weer.

Veiligheidskenmerken voor lichtwaterreactoren zijn:

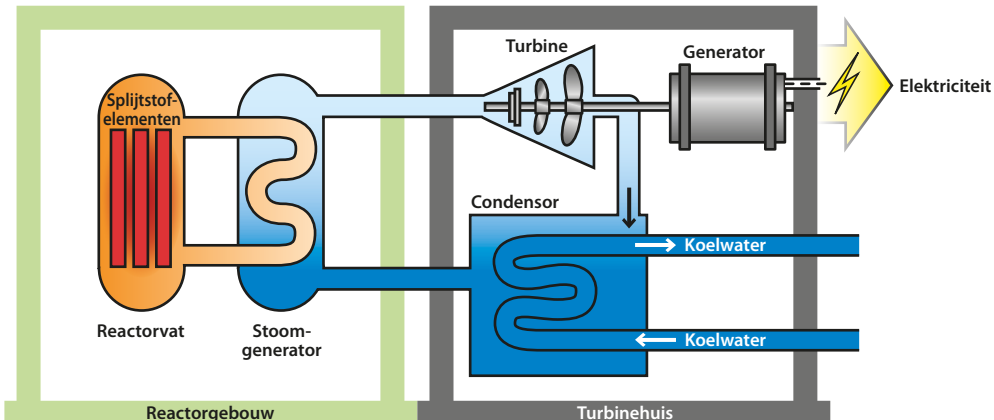
- De moderator (nodig om neutronen af te remmen) is water. Water is, in tegenstelling tot het grafiet in grafiet-gemodereerde ontwerpen, niet ontvlambaar.
- Mocht de reactor oververhit raken, dan zal het water in de primaire kring uitzetten. Door de lagere waterdichtheid worden de neutronen minder afgeremd, wat resulteert in een begrenzing van het splijtingsproces en de warmteproductie.
- Het *dopplereffect*. Dit vindt plaats als de reactor een te hoog vermogen levert waardoor de uraniumkernen meer trillen waardoor de kans groter wordt dat neutronen worden opgenomen door het niet-splijtbare *U-238* in plaats van door *U-235* dat m.b.v. thermische neutronen wel splijtbaar is. Dit remt het splijtingsproces en vermindert het geproduceerde vermogen. Hierdoor escaleert het splijtingsproces niet.

Voor beide lichtwaterreactorontwerpen geldt dat actieve nakoeling is vereist gedurende lange tijd na het uitschakelen.

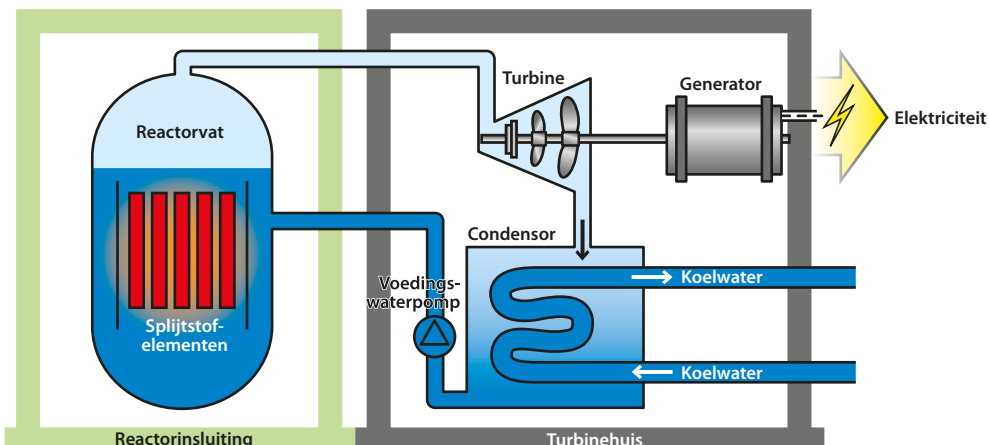
Figuur A1

Schematisch aanzicht van een drukwaterreactor (links) en een kokendwaterreactor (rechts)

Pressurized Water Reactor (PWR)



Boiling Water Reactor (BWR)



ZWAARWATERREACTOREN

Een tegenhanger van de lichtwaterreactoren is de zwaarwaterreactor. Dit is een kernreactor die zwaar water onder hoge druk (~155 bar) gebruikt voor zowel koeling als moderator. De aanduiding ‘zwaar’ doelt hier op het gebruik van deuterium-oxide (D₂O) (deuterium is een zwaardere isotoop van waterstof) als moderator, die de neutronen in mindere mate afremt dan licht water. Hierdoor kan niet-verrijkt (natuurlijk) uranium (uranium zoals het in de natuur voor komt) als splijtstof worden gebruikt (de verrijkingsgraad is het aandeel van U-235 in de splijtstof). Het plutonium dat in dit type reactoren ontstaat wordt hier wederom als splijtstof ingezet. Een bekend type zwaarwaterreactor is de in Canada ontwikkelde CANDU-reactor (*Canadian Deuterium Uranium*).

GASGEKOELDE REACTOR

Een gasgekoelde reactor is een kernreactor die grafiet gebruikt als neutronenmoderator en een gas (meestal koolstofdioxide of helium) als koelmiddel. Dit type reactor is in staat om natuurlijk uranium als splijtstof te gebruiken en is uitsluitend nog in het VK in gebruik (de *Advanced Gas-cooled Reactors*). Een variant op dit type reactoren is de hogetemperatuur-reactor (*High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR*) dat een andere vorm van splijtstof hanteert: grafietblokken met uranium (*prismatic blocks* splijtstof), dan wel grafietballen verwerkt met uranium (*pebble bed* splijtstof).

Tabel A2

Enkele voor- en nadelen voor de verschillende typen reactoren

REACTORTYPEN	VOORDELEN	NADELEN
Drukwaterreactor (PWR)	<ul style="list-style-type: none"> ● Eén fase in de primaire kring (stabiel systeem) ● Uitdovend effect van de kettingreactie bij stijgende water- en splijtstoftemperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Nakoeling gedurende langere tijd ● Beperkt rendement
Kokendwaterreactor (BWR)	<ul style="list-style-type: none"> ● Directe stoomvorming in het reactorvat (geen aparte stoomgenerator nodig) ● Uitdovend effect van de kettingreactie bij stijgende water- en splijtstoftemperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Nakoeling gedurende langere tijd ● Beperkt rendement
Zwaarwaterreactor	<ul style="list-style-type: none"> ● Inzet natuurlijk uranium ● ‘Online’ (tijdens reactorbedrijf) herbeladen is mogelijk 	<ul style="list-style-type: none"> ● Productiekosten zwaar water
Gasgekoelde reactor	<ul style="list-style-type: none"> ● Hoge uitlaattemperatuur v/h koelmiddel; <ul style="list-style-type: none"> ○ hoger rendement ○ toepasbaar voor proceswarmte ● Lagere systeemdruk dan bij PWR/BWR ● Meer mogelijkheden toepassen van passieve veiligheidssystemen 	<ul style="list-style-type: none"> ● Lagere energiedichtheid ● Grafiet is brandbaar ● Nucleair grafiet is relatief duur in vergelijking met lichtwater

Bijlage B

Vergunningstraject en stakeholders

Het vergunningsproces voor een nucleaire installatie omvat normaal gesproken de volgende fasen (Figuur B2), afhankelijk van de nationale wetgeving:

- locatie- en locatie-evaluatie
- ontwerp
- bouw
- inbedrijfstelling
- bedrijfsvoering
- ontmanteling
- vrijgave van regelgeving

Ervaringen uit het verleden hebben geleerd dat er enige overlap is tussen de verschillende stadia; dat wil zeggen, een fase kan beginnen voordat de vorige volledig is voltooid.

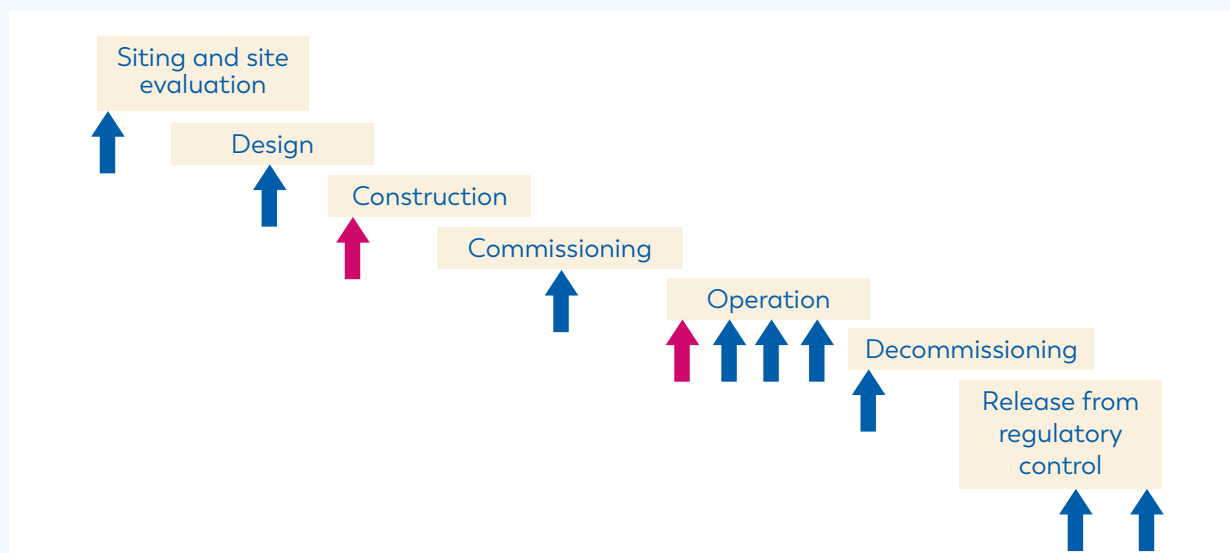
Bovendien kunnen er in een bepaalde fase één of meer *hold points* van toepassing zijn, bepaald door de nationale wet- en regelgeving.

Door de toezichthouder worden uiteindelijk twee vergunningen afgegeven: de bouwvergunning (*construction license*) en de vergunning voor bedrijfsvoering (*operating license*), zie Figuur B2. Het vergunningsproces kan worden versneld door de toepassing van pre-licensing. Dit houdt in dat bijvoorbeeld gebruik gemaakt wordt van een eerder/elders vergund standaardontwerp. Voorbeelden daarvan zijn het *Generic Design Assessment* in het VK en de *Design Certification* door de US NRC in de VS.

Figuur B2

Stadia van een vergunningsproces [29], [30]

Gemarkeerd in rood zijn de stadia voor de twee vergunningen die de toezichthouder afgeeft.



Het vergunningsproces van een nieuw reactorontwerp is omvangrijk en complex en vereist de voorbereiding, onafhankelijke beoordeling, en goedkeuring van veel documenten.

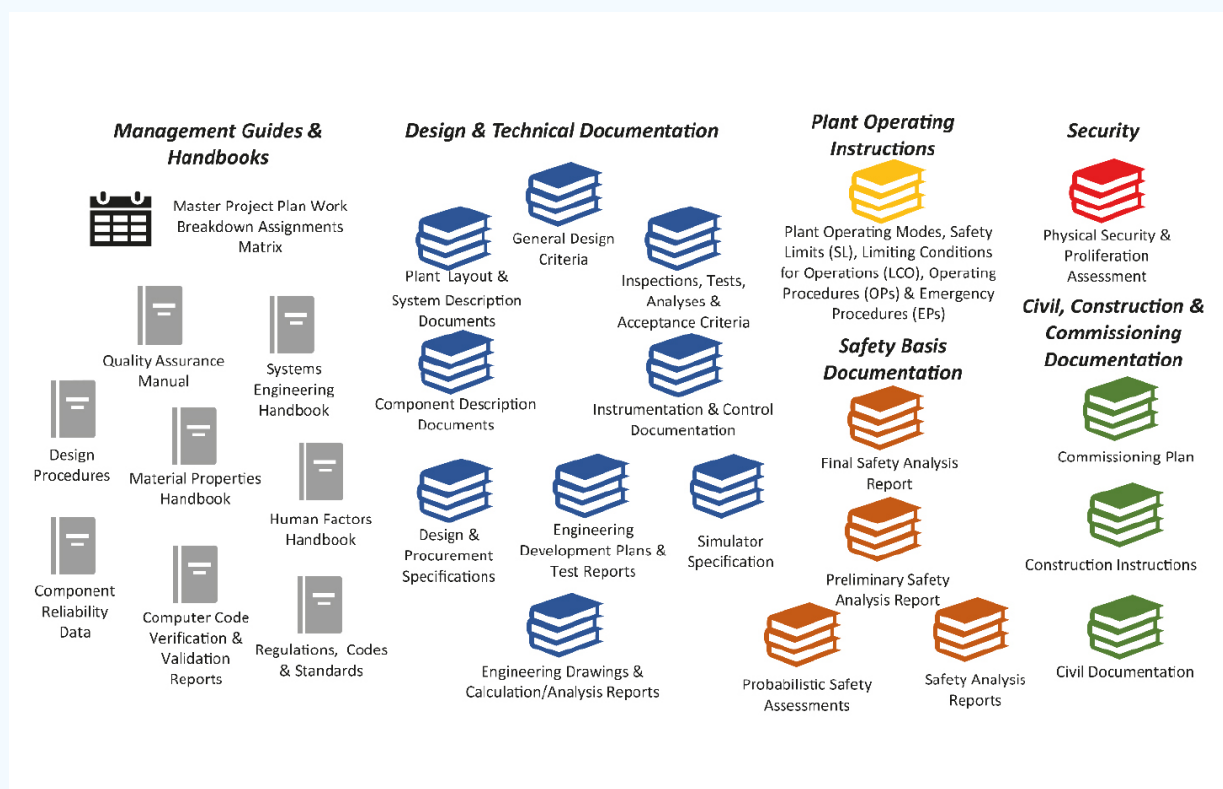
[Figuur B3](#) geeft een voorbeeldoverzicht van de verschillende soorten op te stellen documentatie. De evaluatie van een reactorontwerp (met bijbehorende documenten) is doorgaans geheel in het Engels.

Het vergunningstraject voor een SM-LWR wordt geschat op twee tot drie jaar, waarbij dient te worden opgemerkt dat dit van een gestandaardiseerd ontwerp uitgaat. Watergekoelde SMR's delen het grootste deel van hun techniek met die van de gangbare grotere watergekoelde kernreactoren.

Zodoende is veel van deze techniek reeds bekend bij vergunningverlenende instanties. Voor het vergunningstraject van geavanceerdere SMR's geldt een langer traject, aangezien dit type gepaard gaat met de nodige technologische kwalificaties evenals een uitgebreidere beoordeling van aspecten op het gebied van (geavanceerdere) veiligheidssystemen.

Figuur B3

Overzicht van de verschillende type documentatie voor een nieuw reactorontwerp [13]



STAKEHOLDERS SMR

Deze sectie toont een korte samenvatting van de belangrijkste stakeholders en van de regelgevende kaders [13].

Ontwerper/leverancier

De ontwerper/leverancier is de organisatie die primair verantwoordelijk is voor het ontwikkelen van het basis- en detailontwerp van de reactor, het onderhouden van ontwerpcodes en -methoden en het hebben van gespecialiseerde kennis van alle systemen en componenten die belangrijk zijn voor de veiligheid.

Eigenaar/uitvoerende organisatie

De eigenaar/exploitant (zoals een staatsbedrijf, particulier elektriciteitsbedrijf, onafhankelijke elektriciteitsproducent) en diens aannemers zorgen voor de plaatsing, bouw, inbedrijfstelling en/of exploitatie van een nucleaire installatie.

Technische ondersteuningsorganisatie

De technische ondersteuningsorganisatie biedt (diepgaande) technische en wetenschappelijke ondersteuning aan de toezichthouder bij het verlenen van vergunningen, handhaving en toezicht, evenals voor de ontwikkeling van regelgeving en beleid.

Investeerders

Uiteindelijk is de investeerder een belangrijke stakeholder in een nucleair project. Nucleaire projecten zijn kapitaalintensief; in het verleden zijn investeerders blootgesteld aan aanzienlijke planningsrisico's die resulteerden in kostenescalaties op de lange termijn en teleurstelling bij investeerders. Misschien wel een van de belangrijkste aspecten van SMR-technologie is de belofte van kortere bouwperiodes en lagere initiële kapitaalinvesteringen.

Regelgevende instanties (toezichthouder)

Een regelgevend orgaan is een onafhankelijke autoriteit, of een systeem van autoriteiten, aangewezen door de regering, die de wettelijke bevoegdheid heeft om de veiligheidsbeginselen en -criteria te ontwikkelen, de regelgeving vast te stellen en het regelgevende proces uit te voeren, met inbegrip van het afgeven van vergunningen. De regelgevende instantie heeft de bevoegdheid om vergunningen, licenties en certificeringen te verlenen met betrekking tot locatie, het ontwerp, de bouw, de inbedrijfstelling, de exploitatie of de ontmanteling van nucleaire installaties (de verdeling van deze bevoegdheden kan per land verschillen). Zie ook [31] en [Sectie 2.1](#) en [Bijlage B](#) voor de situatie in Nederland.

Regering

Uiteindelijk zal de beslissing om SMR's in te zetten worden bepaald door het kabinet, met goedkeuring van het parlement. De overheid kan in haar rol ook medefinancier zijn, al dan niet met een staatsdeelneming waarbij de overheid aandelen in het bedrijf neemt.

Publiek

Het publiek is in veel landen van essentieel belang. De publieke acceptatie van kernenergie blijft een van de belangrijkste elementen bij het opzetten van een kredietwaardig kernenergieprogramma.

Andere stakeholders

Overige belanghebbenden zijn onder meer lokale en regionale overheden, handelsgroepen, gemeenschapsgroepen, geïnteresseerde particuliere bedrijven en milieugroeperingen. Deze belanghebbenden kunnen specifieke aandachtspunten hebben.

ROL VAN STAKEHOLDERS IN VERGUNNINGSPROCES

Eigenaar of uitvoerende organisatie

Deze stakeholder stimuleert de vraag naar een technologische oplossing die moet inspelen op:

- Gebruikerseisen die ook wettelijke eisen omvatten;
- Tijdsplanning voor implementatie;
- Behoeften aan productondersteuning op lange termijn.

De eigenaar of uitvoerende organisatie is uiteindelijk verantwoordelijk/aanspreekbaar voor zowel economische- als veiligheidsprestaties voor activiteiten uitgevoerd met behulp van SMR-technologie. Deze stakeholder kan een particulier belang zijn of een door de overheid gesteunde zakelijke entiteit.

Ontwerper/leverancier van de SMR-technologie

De ontwerper/leverancier werkt samen met de eigenaar of toekomstige licentiehouders om technologische oplossingen te ontwikkelen die voldoen aan de eisen van de gebruiker.

Dit betekent dat de ontwerper/leverancier een communicatiekader moet opstellen met de gebruiker en regelgevende instanties om te begrijpen wat de vereisten betekenen en hoe ze moeten worden aangepakt binnen de vereiste tijdslijnen van de gebruiker.

Regelgevende instanties

Deze stakeholder maakt het veilig uitvoeren van vergunde activiteiten mogelijk door een duidelijk regelgevend kader van vereisten vast te stellen en ervoor te zorgen dat voorstellen van een uitvoerende organisatie (de licentiehouders) hieraan voldoen. De toezichthouder heeft het mandaat om ervoor te zorgen dat de vergunninghouders activiteiten uitvoeren in overeenstemming met hun vergunning, waardoor de risico's redelijkerwijs laag blijven. De stakeholder moet begrijpen hoe de eisen van toepassing zijn op een vergunningsaanvraag. Dit vereist vroege betrokkenheid bij de eigenaar/licentiehouders en mogelijk met de ontwikkelaar van de technologie om alle uitdagingen te begrijpen die gepaard gaan met het interpreteren en toepassen van de vereisten.

Bijlage C

Overzicht van nucleaire bedrijven en instanties

Nederland beschikt over diverse nucleaire faciliteiten die samen de 'nucleaire keten' afdekken. Het betreft verrijking van uranium, elektriciteitsproductie, onderzoeksreactoren voor wetenschappelijk en industrieel onderzoek, de productie van medische isotopen, nucleaire laboratoria (waaronder de Hot Cell Labs bij NRG), afvalbewerking en opslag. Daarnaast zijn diverse partijen betrokken bij de instandhouding van de nucleaire faciliteiten. Gezien de huidige ontwikkelingen in de wereld betreffende energievoorzieningen en de huidige geopolitieke situatie, wordt verwacht dat het aantal spelers op het gebied van nucleaire technologie zal toenemen.

Hieronder worden de spelers en mogelijk te verwachten spelers in de nucleaire sector in Nederland weergegeven. Ook internationale organisaties die van belang zijn voor Nederland worden genoemd. Hierbij kan worden opgemerkt dat niet elke speler direct aan SMR-realisatie gerelateerd kan worden, echter het geheel vormt een toegankelijke bron van kennis en expertise op uiteenlopende gebieden.

BESTAANDE NUCLEAIRE FACILITEITEN

- **EPZ** (Elektriciteits Produktiemaatschappij Zuid-Nederland)
Een Nederlandse elektriciteitsproducent en eigenaar van de kerncentrale Borssele (KCB). De kerncentrale levert een netto elektrisch vermogen van 485 MWe en is vooralsnog vergund tot 2034.
- **NRG** (Nuclear Research & Consultancy Group)¹
NRG innoveert, produceert en levert medische isotopen. Daarnaast wordt

onderzoek verricht op het vlak van materialen, stralingsbescherming, veiligheid en radiologisch afval. NRG is een internationale dienstverlener op het gebied van nucleaire energieopwekking voor bestaande kerncentrales evenals voor nieuwe innovatieve concepten.

NRG beschikt over een onderzoeksreactor (HFR), nucleaire laboratoria (onder andere de Hot Cell Labs) en een afvalverwerking/opslag faciliteit. De nieuwe reactor PALLAS zal in de toekomst de HFR gaan vervangen. NRG en PALLAS zullen dan fuseren.

- **Urenco Nederland**

Urenco is een Brits-Duits-Nederlands consortium dat verrijkt uranium produceert door middel van ultracentrifugetechniek. Daarnaast worden bij Stable Isotopes grondstoffen voor medische isotopen geproduceerd.

- **RID** (Reactor Instituut Delft)

Het RID is een kenniscentrum voor aan straling gerelateerd onderzoek en onderwijs. Het RID is onderdeel van de TU Delft en beschikt over een eigen reactor: de Hoger Onderwijs Reactor (HOR).

- **COVRA** (Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval)

COVRA is de centrale organisatie voor radioactief afval en is verantwoordelijk voor inzameling, verwerking, opslag en eindberging van al het radioactief afval in Nederland. COVRA slaat het radioactief afval voor ten minste honderd jaar bovengronds op, waarna het wordt ondergebracht in een geologische eindberging.

¹ Sinds kort ook wel NRG|PALLAS genoemd

NEDERLANDSE NUCLEAIRE BEROEPSVERENIGINGEN

- **Nucleair Nederland**

(www.nucleairnederland.nl)

De vereniging Nucleair Nederland bestaat uit zeven Nederlandse nucleaire bedrijven en organisaties: COVRA, EPZ, NRG, PALLAS, Reactor Instituut Delft, Urenco en SHINE. De vereniging wil een evenwichtige bijdrage leveren aan het nucleaire debat en tegelijkertijd de brede toepassing van nucleaire technologie onder de aandacht brengen.

- **KIVI (beroepsvereniging van ingenieurs in Nederland)**

Regelmatig lezingen en symposia over nucleaire energie met onder andere inzet van SMR's.

Bijvoorbeeld:

- *Innovatieve toepassingen van Kernenergie*, KIVI Den Haag, 21 april 2022.
- *New nuclear power in the Netherlands beyond 2030*, TU Twente, 29 oktober 2021.

OVERHEID

- **ANVS (Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming)**

De ANVS bewaakt en bevordert continu de nucleaire veiligheid, stralingsbescherming en beveiliging. De ANVS is per Nederlandse wetgeving ingesteld als zelfstandig bestuursorgaan.

Belangrijke taken van de ANVS [31] zijn:

- Vergunningverlening, registraties en erkenningen
- Toezicht en handhaving
- Goedkeuring van beveiligingsplannen
- Bezwaar- en beroepsprocedures
- Review en assessment
- Uitvoeringsbeleid maken
- Juridische advisering
- Crisisvoorbereiding en -respons
- Bijdragen aan nationale en internationale samenwerking
- Bijdragen aan departementale en politieke vraagstukken
- Publiekscommunicatie

- **Ministeries**

De uitvoering van de Kernenergiewet en daarop gebaseerde regelgeving is op rijksniveau belegd bij de bewindspersonen van meerdere ministeries, zie ook [31].

- **RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu)**

Het RIVM is een instantie die zich, vanuit het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport, inzet voor een gezonde bevolking, en zich een duurzame, veilige en gezonde leefomgeving als doel stelt. Het RIVM houdt zich ook bezig met stralingsbescherming.

RELEVANTE INTERNATIONALE PARTIJEN

Richtlijnen en Regelgeving

- **IAEA (Internationaal Atoom Energie Agentschap)**

Organisatie voor een veilig, beveiligd en vreedzaam gebruik van nucleaire wetenschap en technologie. Voorziet voor zeer uiteenlopende (veiligheids-)onderwerpen in eisen, richtlijnen, methodieken, et cetera.

- **WENRA (Western European Nuclear Regulators Association)**

WENRA is een vereniging van regelgevende instanties/agentschappen van nucleaire landen van West-Europa. De belangrijkste doelstellingen zijn het ontwikkelen van een gemeenschappelijke benadering van nucleaire veiligheid en het vormen van een netwerk om ervaringen uit te wisselen en belangrijke veiligheidskwesaties bespreken.

- **EURATOM (Europese Gemeenschap voor Atoomenergie)**

Euratom is opgericht om de onderzoeksprogramma's voor ontwikkeling en vreedzaam gebruik van kernenergie van de lidstaten op elkaar af te stemmen. Euratom bestaat uit de leden van de Europese Unie. De Raad van Ministers vaardigt onder Euratom richtlijnen en verordeningen uit ten aanzien van de bescherming van de volksgezondheid tegen de gevaren die met kernenergie samenhangen. Deze verordeningen en richtlijnen zijn ook door Nederland opgenomen in de Kernenergiewet.

Integratie en samenwerking

- **EUR (European Utility Requirements)**

De EUR betreft een samenwerkingsverband van Europese (nucleaire) elektriciteitsbedrijven. De EUR organisatie heeft als doel eisen te harmoniseren en ontwerpen te standaardiseren zodat kosten omlaag gaan en snellere bouw gerealiseerd kan worden. De EUR eisen, zo'n 6000 eisen, omvatten alle aspecten die voor een utility van belang zijn (ontwerp, veiligheid, bedrijfsvoering, constructie, inbedrijfstelling, kosten, milieu, et cetera).

- **SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform)**

Een in Brussel gevestigd platform dat zich voornamelijk inzet op het vlak van onderzoek en ontwikkeling voor nucleaire technologie, en dat ondersteuning levert aan veilig, betrouwbaar en efficiënt bedrijven van nucleaire installaties.

- **Nuclear Innovation Conference**

(www.nuclearinnovationconference.eu)

NRG zet zich (elke twee jaar) in om veelbelovende initiatieven en belangrijke spelers in de nucleaire industrie bij elkaar te brengen en om samenwerking te vergemakkelijken. Tijdens de conferentie van 2022 is ingegaan op de trends in kernenergie. Ten aanzien van SMR (inzet) zijn de volgende presentaties gegeven:

- het versnellen van koolstofvrije technologie-opties beschikbaar voor grootschalige, betaalbare, marktgebaseerde decarbonisatie van de wereldeconomie
- Business case voor de Rolls-Royce SMR
- Business case voor de BWRX-300 SMR (Hitachi)
- Klimaatneutrale chemie (Chemelot)

- **Nucleareurope**

In Brussel gevestigde branchevereniging voor de nucleaire industrie in Europa. Nucleareurope vertegenwoordigt de Europese nucleaire industrie in besprekingen over energiebeleid met EU-instellingen en andere belangrijke belanghebbenden. Nucleareurope vertegenwoordigt bijna 3.000 bedrijven.

- **ENISS (European Nuclear Installation Safety Standards)**

ENISS biedt de nucleaire industrie een platform om informatie uit te wisselen over nationale en Europese regelgevende activiteiten over alle aspecten die verband houden met internationale veiligheidsnormen. Samenbrengen van besluitvormers, bedrijven en specialisten uit de nucleaire industrie.

- **WANO (World Association of Nuclear Operators)**

De WANO verenigt de bedrijven van kerncentrales wereldwijd. De organisatie beoogt de veiligheid en betrouwbaarheid van kerncentrales wereldwijd te maximaliseren, prestaties te verbeteren, informatie uit te wisselen et cetera.

- **NEA (Nuclear Energy Agency)**

De NEA (onderdeel van de OESO) is een intergouvernamenteel agentschap dat de samenwerking tussen landen met geavanceerde nucleaire technologie-infrastructuren faciliteert op het gebied van nucleaire veiligheid, technologie, wetenschap, milieu en recht.

POTENTIËLE GEBRUIKERS/ AFNEMERS

Onderstaande lijst geeft een idee van energie-intensieve bedrijven of industriegebieden, en waar eventueel additionele proceswarmte (lees: hoge temperaturen) significant kunnen bijdragen aan het productieproces:

(Petro) Chemische Industrie

- Europoort (Zuid-Holland)
- Maasvlakte (Zuid-Holland)
- Botlek (Zuid-Holland)
- Chemelot (Limburg)
- Dow Chemicals (Zeeland)

Metaalindustrie

- Tata Steel, staalproductie (Noord-Holland)
- Zalco N.V., aluminiumproductie (Zeeland)

Diversen

- Datacenters (Nederland)
- Schiphol (Noord-Holland)
- Eemshaven (Groningen)

Nuclear. For Life.



www.nrg.eu