



Small Modular Reactors 2023

Marktanalyse



Nuclear. For life.

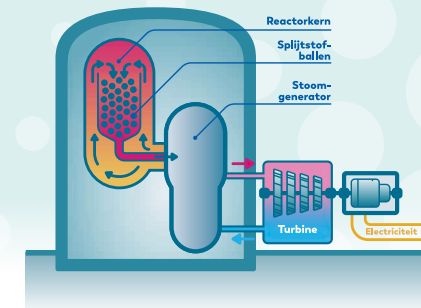
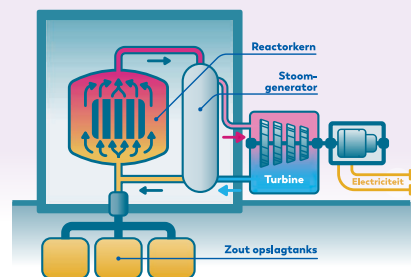
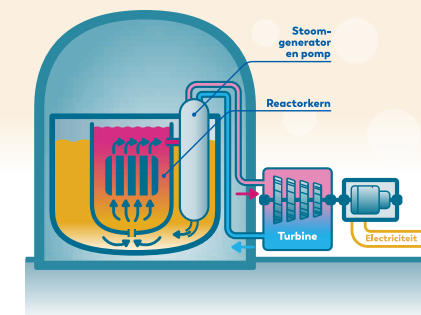
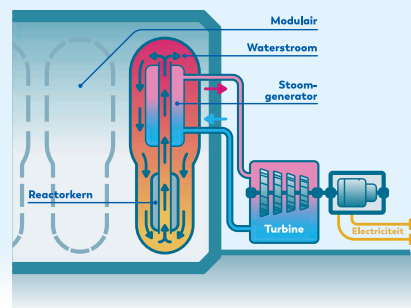
Opmerking vooraf

Dit rapport is gebaseerd op publiekelijk beschikbare informatiebronnen. Bij het opstellen van dit rapport hebben wij vertrouwd op deze informatiebronnen en de verstrekker ervan. Het verifiëren van de juistheid en inhoudelijke claims van deze bronnen viel buiten de scope van deze opdracht. Wij aanvaarden hiervoor dan ook geen aansprakelijkheid.

Tevens aanvaarden wij geen aansprakelijkheid voor de uitkomsten van de marktanalyse. Het betreft een momentopname op basis van de huidig beschikbare informatie; de keuzes die hierbij zijn gemaakt, zijn gebaseerd op de verstrekte informatie en kunnen derhalve afwijken van de actuele en/of feitelijke situatie.

Wij accepteren geen enkele verantwoordelijkheid voor het gebruik van het rapport voor een ander doel, anders dan het doel waarvoor het rapport is opgesteld.

De inhoud van dit rapport mag niet (geheel of in delen) gekopieerd worden, of voor andere doeleinden gebruikt worden, zonder de schriftelijke goedkeuring van NRG.



Managementsamenvatting

ACHTERGROND

In het coalitieakkoord van het kabinet Rutte-IV is een stevige ambitie wat betreft de energietransitie aangekondigd. In 2050 moet Nederland de uitstoot van broeikasgassen teruggedrongen hebben tot een niveau dat 95% lager ligt dan in 1990. Hierbij kan kernenergie een belangrijke bijdrage leveren. Voor de huidige kabinetsperiode wil het kabinet de bouw van twee nieuwe grote kernreactoren voorbereiden.

Vanuit de overheid worden in dit kader nucleair-technologische ontwikkelingen met grote interesse gevolgd. Een van de meest zichtbare daarvan is de komst van kleine modulaire reactoren (Small Modular Reactors, SMR's).

Wereldwijd zijn er vele types SMR's in ontwikkeling. In een recente inventarisatie door het IAEA¹ werden ruim 80 types SMR's gedocumenteerd. Ook de OECD NEA heeft recent een dergelijk overzicht geproduceerd². Deze types verschillen qua toegepaste technieken, voorzien vermogen, toepassingen en splijtstofstofcyclus.

Ook op gebied van reeds bereikte mijlpalen en marktrijpheid zijn er grote verschillen. Een enkel type SMR is reeds operationeel (in Rusland en China). Sommigen zijn inmiddels in detail uitgewerkt en hebben evaluaties ondergaan, uitgevoerd door Bevoegde Gezagen in diverse landen. Aan het andere eind van het spectrum bevinden zich SMR's die nog conceptueel zijn.

¹ [Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to IAEA Advanced Reactor Information System \(ARIS\), IAEA, 2022](#)

² [The NEA Small Modular Reactor Dashboard, OECD NEA, 2023](#)

³ [Kleine modulaire kernreactoren \(SMR\): Kennisoverzicht van techniek en ontwikkelingen, NRC, maart 2023](#)

DOELSTELLING

In opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft NRG|PALLAS voorliggende marktanalyse uitgevoerd. Het doel hiervan is om een overzicht te krijgen van de algemene status van een selectie van 13 SMR's. Het overzicht in deze marktanalyse kan dienen als basis voor zowel beleidsmakers als industrie om inschattingen te maken voor eventuele mogelijkheden in Nederland. De studie kan ook gezien worden als een verdiepende uitwerking van NRG's Whitepaper³ over SMR's.

In deze studie worden vooral technische en organisatorische aspecten beschouwd. Dat wil zeggen dat voor een aantal geselecteerde SMR's gestructureerd gekeken is naar:

1. Toepassing en techniek

Dit betreft zaken als vermogen, flexibiliteit en splijtstofcyclus.

2. Inpassing en omgeving

Hier is gekeken naar ruimtebeslag, koelbehoefte en koppeling met elektriciteitsnet.

3. Planning en randvoorwaarden

Dit omvat onder andere de fase van ontwikkeling van het ontwerp, bouwtijd, vergunningsaspecten voor de Kernenergiewetvergunning, veiligheidskenmerken, toeleveringsketen, security & safeguards en kostenparameters.

4. Organisatie en ervaring

Dit betreft kenmerken van de organisatie achter het SMR-ontwerp, zoals ervaring, omvang en beschikbare toeleveringsketen.

Deze aspecten zijn voor ieder reactortype in een uitgebreide set tabellen uitgewerkt op basis van data beschikbaar in openbaar toegankelijke bronnen.

AFBAKENING

In de voorliggende studie is een selectie gemaakt van SMR's die reeds binnen hun categorie relatief ver ontwikkeld zijn of waarvan op basis van *engineering judgement* wordt aangenomen dat ze in de Nederlandse context interessant kunnen zijn. De selectie moet niet als 'compleet' of 'definitief' gezien worden en kan op een later moment worden uitgebreid als daar aanleiding toe is. Ook kan bepaalde informatie op termijn geactualiseerd moeten worden vanwege voortschrijdende ontwikkelingen.

DE SELECTIE VAN BESCHOUWDE SMR'S

In dit rapport zijn de beschouwde SMR's ingedeeld in vier groepen:

- **Lichtwater SMR's**

Dit zijn SMR's waarbij het koelmiddel gewoon water is. De gebruikte techniek is conventioneel en bekend uit bestaande kerncentrales. Opgenomen in de selectie zijn de types NuScale, Rolls-Royce SMR, BWRX-300 en NUWARD.

- **Micro-range SMR's**

Dit zijn SMR's met een klein elektrisch vermogen (tot 20 MWe). Geselecteerd zijn Last Energy en eVinci.

- **Gesmoltenzout SMR's**

De SMR's in deze groep maken gebruik van gesmolten zout als koelmiddel. Opgenomen zijn Thorizon, Kairos Power FHR en IMSR.

- **Diverse geavanceerde SMR's**

In deze groep zijn de SMR's metaalgekoeld of gasgekoeld. Opgenomen zijn Westinghouse LFR, Natrium, HTR-PM en Xe-100.

SAMENVATTENDE CONCLUSIE

Vergunningverlening als belangrijk deelaspect voor planning

De vergunningverlening bepaalt voor een deel de tijd die nodig is van concept tot realisatie (bouw). In het algemeen kan gesteld worden dat vergunningverlening minder arbeidsintensief zal zijn (en daardoor sneller kan verlopen), als de toegepaste technieken in een SMR-type reeds bekend zijn en/of bijvoorbeeld lijken op die van de huidige conventionele reactoren van generatie III en III+. Daarmee wordt namelijk goed aangesloten bij reeds in Nederland gebruikte regelgeving en standaarden.

Veel SMR ontwerpen hebben passieve veiligheidskenmerken en sommige zijn inherent veilig. Het kan het vergunningsproces voor dit soort nieuwe concepten – maar ook voor bekende – vergemakkelijken, als er al elders in de wereld uitgebreid is gekeken naar de veiligheidsaspecten van een ontwerp en een Bevoegd Gezag of certificerende instantie dit al transparant heeft beoordeeld – en het Nederlandse Bevoegd Gezag heeft kunnen 'meekijken'.

Beoordeling marktintroductie van SMR's in Nederland

Op basis van de in deze studie verzamelde informatie kunnen de volgende inschattingen gemaakt worden voor het traject vergunningverlening en bouw. Dit gaat ervan uit van dat belangrijke zaken op orde zijn, zoals toegepaste technologie voldoende bewezen, voorbehoud van volwassenheid van organisatie en toeleveringsketen, en een gemaakte locatiekeuze.

Voor lichtwater SMR's, gebaseerd op een NOAK SMR (*Nth of a Kind*), is een minimale doorlooptijd van circa 7 jaar voor vergunning en bouw realistisch.

Voor Micro-range SMR's, rekening houdend met nog geen ervaring van het Bevoegd Gezag, maar gelet op hun kleinere omvang, is de inschatting dat de vergunningverlening langer is en bouwtijd korter dan die voor LWR SMR's.

Voor geavanceerde SMR's zal de doorlooptijd waarschijnlijk langer zijn dan lichtwater SMR's gezien het stadium waarin deze concepten zich bevinden en de daarmee samenhangende onzekerheid.

Tabel met kruisverwijzingen naar de gedetailleerde tabellen met aspecten versus SMR-ontwerpen uit de vier groepen

GROEPEN	TOEPASSING EN TECHNIEK	INPASSING EN OMGEVING	PLANNING EN RANDVOORWAARDEN	ORGANISATIE EN ERVARING
1. Lichtwater SMR's	<u>Tabel 1.1</u>	<u>Tabel 1.2</u>	<u>Tabel 1.3</u>	<u>Tabel 1.4</u>
2. Micro-Range SMR's	<u>Tabel 2.1</u>	<u>Tabel 2.2</u>	<u>Tabel 2.3</u>	<u>Tabel 2.4</u>
3. Gesmoltenzout SMR's	<u>Tabel 3.1</u>	<u>Tabel 3.2</u>	<u>Tabel 3.3</u>	<u>Tabel 3.4</u>
4. Diverse Geavanceerde SMR's	<u>Tabel 4.1</u>	<u>Tabel 4.2</u>	<u>Tabel 4.3</u>	<u>Tabel 4.4</u>

Inhoudsopgave

Introductie en leeswijzer	7		
I. Te beschouwen SMR's	9		
II. Te beoordelen aspecten	13		
a. Toepassing en techniek	13		
b. Inpassing en omgeving	14		
c. Planning en randvoorwaarden	15		
d. Organisatie en ervaring	17		
1. Lichtwater SMR's	18		
1.1 Toepassing en techniek	19		
1.2 Inpassing en omgeving	21		
1.3 Planning en randvoorwaarden	22		
1.4 Organisatie en ervaring	24		
1.5 Resumé	25		
2. Micro-range SMR's	27		
2.1 Toepassing en techniek	28		
2.2 Inpassing en omgeving	29		
2.3 Planning en randvoorwaarden	30		
2.4 Organisatie en ervaring	31		
2.5 Resumé	32		
3. Gesmoltenzout SMR's			34
3.1 Toepassing en techniek			35
3.2 Inpassing en omgeving			36
3.3 Planning en randvoorwaarden			37
3.4 Organisatie en ervaring			39
3.5 Resumé			40
4. Diverse geavanceerde SMR's			41
4.1 Toepassing en techniek			42
4.2 Inpassing en omgeving			44
4.3 Planning en randvoorwaarden			45
4.4 Organisatie en ervaring			47
4.5 Resumé			48
Uitgebreide Samenvatting			50
Definities			57
Lijst met afkortingen			59
Referentielijst			60

Introductie en leeswijzer

INTRODUCTIE

Nederland heeft de ambitie om de uitstoot van broeikasgassen in 2050 terug te dringen tot een niveau dat 95% lager ligt dan in 1990. Dit is in de klimaatwet opgenomen [1]. Deze ambitie komt tot uiting in het coalitieakkoord [2] waarin de doelstellingen van het kabinet om deze CO₂-reductie te realiseren verder zijn toegelicht. Het kabinet signaleert dat het gebruik van kernenergie hierbij een rol kan spelen in de energiemix. Daarom worden deze kabinetsperiode de voorbereidingen getroffen voor de levensduurverlenging van de bestaande kerncentrale Borssele, om de bouw van twee nieuwe grote kernreactoren te realiseren, en om de kennisinfrastructuur te versterken die benodigd is om aan deze doelen te kunnen bijdragen. Hiervoor is €5 miljard gereserveerd. Recentelijk zijn de voornemens nader uitgewerkt in de Kamerbrief van minister Jetten [3].

Daarnaast heeft het kabinet ook oog voor nieuwe nucleaire technologische ontwikkelingen waarbij op een kleinere modulaire schaal kerncentrales gebouwd kunnen worden, de zogenoemde kleine modulaire reactoren (Small Modular Reactors, SMR's). Deze zijn ook eerder aan bod gekomen in de "Scenariostudie Kernenergie" [4], uitgevoerd door Witteveen+Bos, in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK). Eerder is ook door NRG een globaal overzicht over SMR's beschreven in een whitepaper [5], waarin op een laagdrempelige en toegankelijke manier de techniek en relevante ontwikkelingen van SMR's worden belicht. Verder zijn er enkele relevante studies uitgevoerd ten behoeve van de inzetbaarheid van SMR's op provinciaal niveau: zo is er studie gedaan naar de mogelijkheden voor kernenergie in de provincie Limburg (uitgevoerd door een consortium van onder andere Nuclear-21, DNV en STORK) [6]. Daarnaast is een onderzoek door TNO en NRG uitgevoerd naar de rol die kernenergie kan spelen in de energietransitie voor de provincie Noord-Brabant [7]. Recentelijk is er ook een notitie geschreven voor de provincie Overijssel [8], waarin de perspectieven van SMR's nader worden besproken, als reactie op enkele vragen afkomstig van de provincie.

Om een beter overzicht te krijgen van de haalbaarheid van SMR's in het algemeen, en de hieruit voortvloeiende mogelijkheden voor Nederland in het bijzonder, is in opdracht van EZK een marktanalyse SMR's uitgevoerd. Deze marktanalyse geeft een gestructureerd overzicht van de "toepassing en techniek", "inpassing en omgeving", "planning en randvoorwaarden", en "organisatie en ervaring" van een aantal geselecteerde SMR's. De resultaten van de marktanalyse worden in dit document weergegeven.



LEESWIJZER

Het document is als volgt ingedeeld.

In [Hoofdstuk I](#) worden alle te beschouwen SMR's nader toegelicht. De selectie van reactorconcepten in deze marktanalyse wordt in perspectief geplaatst naar enkele ontwerpeigenschappen. De verschillende ontwerpeigenschappen laten zich hanteren door de SMR's in te delen in vier groepen.

[Hoofdstuk II](#) geeft een nadere toelichting op de verschillende aspecten waarop elke geselecteerde SMR beoordeeld wordt. Er is gekozen voor vier paren van aspecten die logisch bij elkaar passen. Het betreft de paren "toepassing en techniek", "inpassing en omgeving", "planning en randvoorwaarden", en "organisatie en ervaring".

In de Hoofdstukken 1 t/m 4 worden vervolgens voor de vier verschillende groepen telkens alle SMR's in de groep beoordeeld op alle aspecten. Dit wordt als volgt uitgewerkt: per aspect wordt de opgehaalde informatie eerst in een beknopte tabelvorm gepresenteerd. Daarna wordt onder elke tabel een korte toelichting gegeven voor de beoordeelde SMR's, indien dit bijzonderheden betreft die als toegevoegde waarde kunnen worden gezien. Hierdoor ontstaat een overzichtelijke matrix waarmee de informatie over alle SMR's eenvoudig met elkaar vergeleken kan worden. Elk van deze hoofdstukken wordt afgesloten met een resumé: een korte samenvattende paragraaf aangevuld met specifieke aspecten die relevant zijn voor eventuele realisatie in Nederland.

[Hoofdstuk 1](#) betreft de analyse van de geselecteerde lichtwaterreactoren.

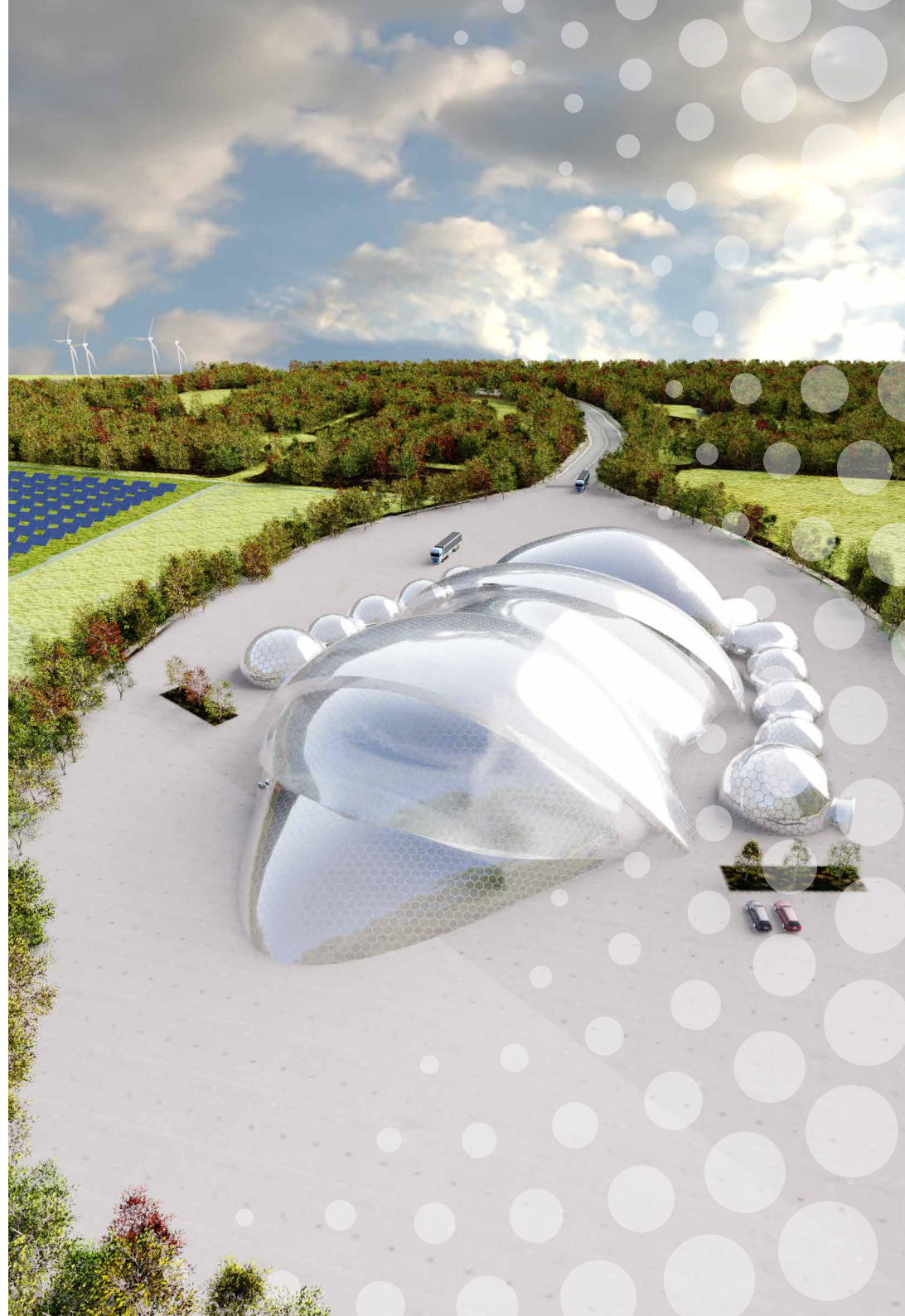
[Hoofdstuk 2](#) geeft het overzicht van de geselecteerde micro-range reactoren.

De geavanceerde SMR's komen aan bod in de laatste twee hoofdstukken, te weten:

[Hoofdstuk 3](#) de gesmoltenzoutreactoren.

[Hoofdstuk 4](#) de diverse geavanceerde SMR-concepten.

Het document wordt afgesloten met een [Uitgebreide Samenvatting](#).



I. SMR als begrip

Wereldwijd bestaan er kernreactoren in allerlei verschillende modellen, gebaseerd op verschillende technische principes en toegespitst op verschillende functies. Er bestaat een onderscheid tussen verschillende reactorconcepten. De indeling wordt gebaseerd op de techniek evenals de mogelijke toepassing. Deze indeling is in [Figuur 1](#) weergegeven: zowel de watergekoelde reactoren als de innovatieve technologieën worden getoond.

De huidige lichtwaterreactoren (Light Water Reactors, LWR's), die door middel van de ervaringen met huidige reactoren als *proven concept* beschouwd kunnen worden, worden momenteel alleen voor elektriciteitsproductie ingezet. De toekomstige reactoren worden ontworpen met het idee om naast elektriciteit ook warmte te kunnen leveren. Dit wordt op de korte termijn bewerkstelligd met nieuwe groot-schalige watergekoelde reactoren. Op iets langere termijn zouden kleine modulaire lichtwaterreactoren (Small Modular Light Water Reactors, SMLWR's) gerealiseerd kunnen worden. Deze SMLWR's beloven een aantal significante voordelen op het gebied van plaatsing en financiering. Op langere termijn kan worden ingezet op hogere systeemtemperaturen met geavanceerde modulaire reactoren (Advanced Modular Reactors, AMR's), waarbij doorgaans andere koelmiddelen en/of andere splijfstofvormen gehanteerd worden dan gebruikelijk bij LWR's.

Door middel van hun hoge systeemtemperatuur kunnen AMR's een complementaire energiebron zijn en een breder toepassingsgebied bedienen: deze reactorontwerpen kunnen flexibel ingezet worden voor het leveren van warmte voor zowel stads-verwarming als industriële warmte. [Figuur 2](#) toont globaal het toepassingsgebied voor de verschillende varianten, dat gebaseerd is op de systeemtemperaturen. Waterstofproductie is bijvoorbeeld ook mogelijk op lagere temperaturen, en ook in combinatie met elektriciteit.

Voor metaalgekoelde reactoren en gesmoltenzoutreactoren geldt verder dat zij kunnen bijdragen aan een verduurzaming van de splijststofcyclus om natuurlijke bronnen efficiënter te gebruiken (metaalgekoelde reactoren voor efficiënt gebruik van uranium; gesmoltenzoutreactoren voor efficiënt gebruik van thorium), evenals om afval te minimaliseren.

Wereldwijd zijn er ruim 80 SMR-concepten in ontwikkeling, waarvan het merendeel op de watergekoelde techniek is berust. [Figuur 3](#) toont een overzicht van alle concepten die tegenwoordig in ontwikkeling zijn. Omdat niet al deze SMR-ontwerpen in deze marktanalyse beschouwd kunnen worden is er een selectie gemaakt, die hieronder nader wordt toegelicht.

GROEPSINDELING VOOR DEZE MARKTANALYSE

De hierboven beschreven indeling betreft een onderscheid tussen watergekoelde en geavanceerde reactorconcepten. In deze marktanalyse is een soortgelijke indeling gehanteerd: een viertal groepen wordt onderverdeeld in twee varianten, namelijk de SMLWR's en de AMR's. Omdat voor de lichtwater SMR's de meeste informatie beschikbaar zal zijn, en aangezien voor deze concepten geldt dat zij (ten opzichte van de AMR's) in een vergevorderd stadium van ontwikkeling zijn, worden deze in de eerste groep besproken. Daarnaast wordt er specifiek gekeken naar een tweetal reactorconcepten die in het micro-SMR-bereik liggen. In het bijzonder zijn de AMR's verder onderverdeeld in twee groepen, waarbij is gelet op het koelmiddel: de gesmoltenzoutreactoren en diverse geavanceerde SMR's. De lijst met SMR-concepten (rechts) is niet bedoeld als compleet en kan op een later moment worden uitgebreid als hier aanleiding voor is.

Lichtwater SMR's

- NuScale
- Rolls-Royce SMR
- BWRX-300
- NUWARD

Micro-range SMR's

- Last Energy (lichtwaterreactor)
- eVinci (hogetemperatuurreactor)

Gesmoltenzout SMR's

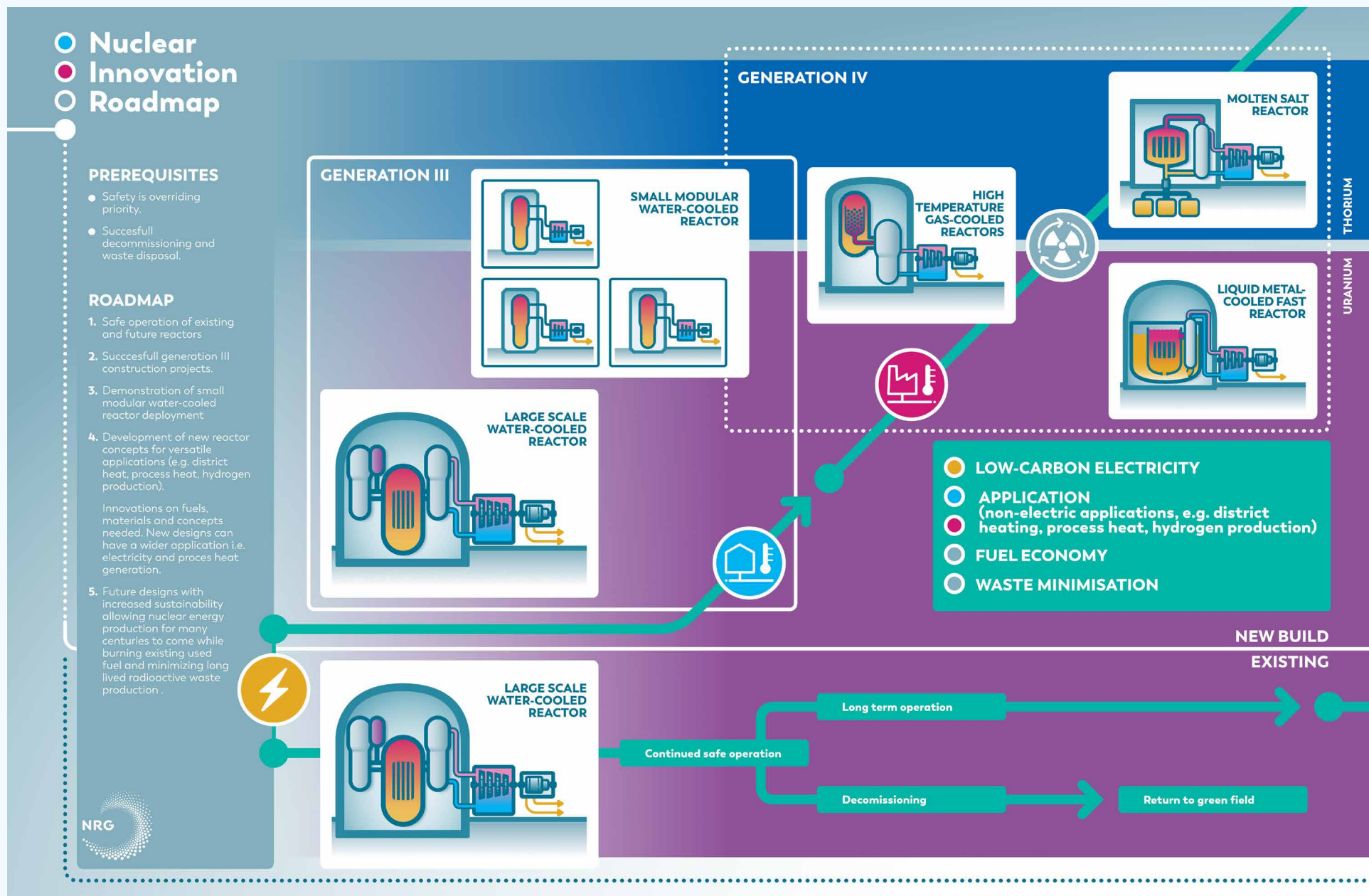
- Thorizon
- Kairos Power FHR (pebble-fuel-in-salt)
- IMSR

Diverse geavanceerde SMR's

- HTR-PM (hogetemperatuurreactor)
- Westinghouse LFR (metaalgekoelde reactor)
- Natrium (metaalgekoelde reactor)
- Xe-100 (hogetemperatuurreactor)

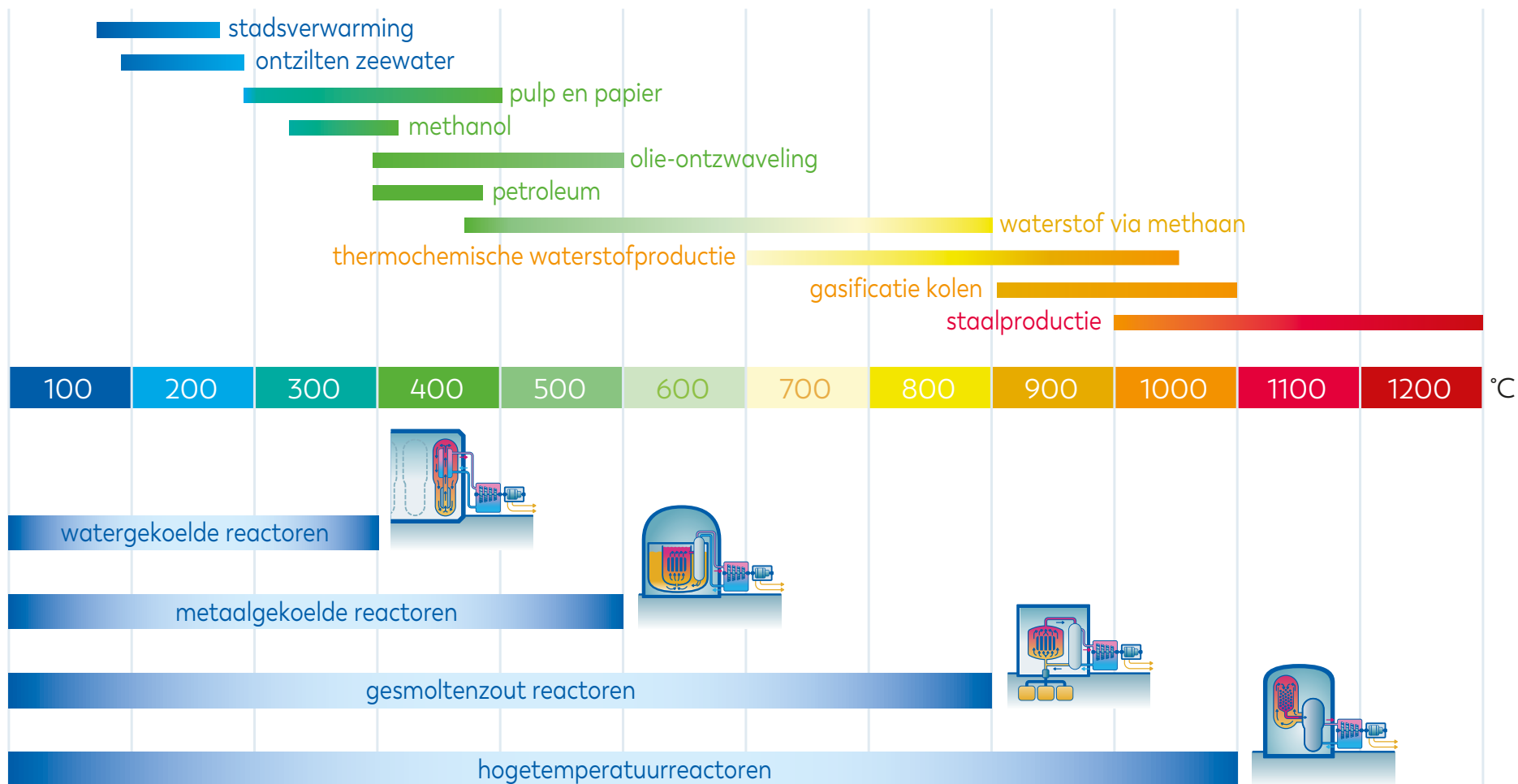


Figuur 1: Indeling van reactor-concepten op basis van toegepaste techniek – een onderscheid wordt gemaakt tussen bestaande technologie en geavanceerde reactoren
 Geavanceerde reactorconcepten kunnen bijdragen aan proceswarmte evenals een verduurzaming van de splijtstofcyclus.

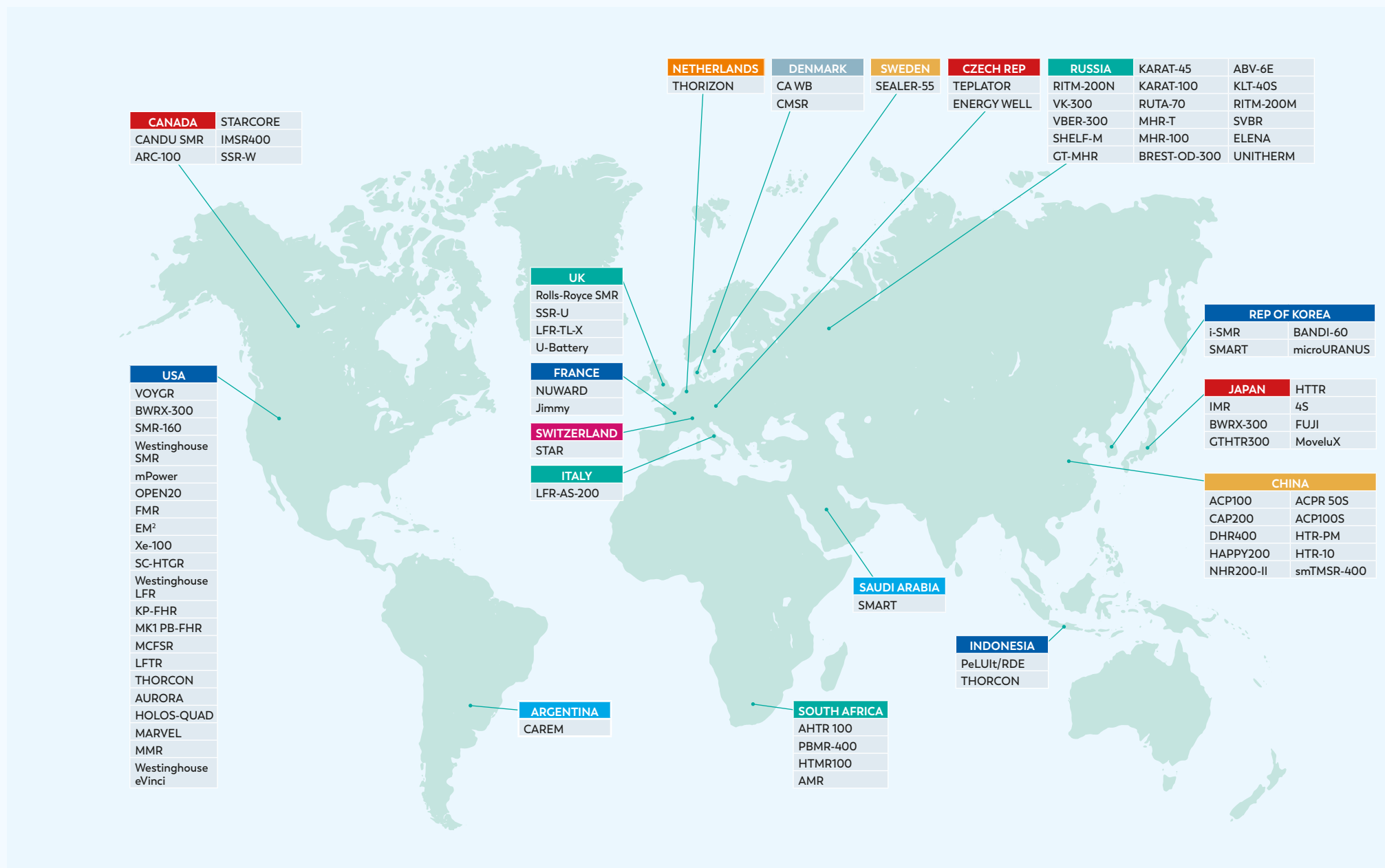


Figuur 2: Globaal overzicht van reactorontwerpen met bijbehorende (niet-elektrische) toepassingen, op basis van de systeemtemperaturen [9]

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



Figuur 3: SMR-ontwikkeling in de wereld [10]



II. Te beoordelen aspecten

De volgende aspecten worden beschouwd:

- a. Toepassing en techniek
- b. Inpassing in de omgeving
- c. Planning en randvoorwaarden
- d. Organisatie en ervaring

Deze aspecten worden in dit hoofdstuk generiek toegelicht, uitgesplitst in kenmerken. In de daarop volgende hoofdstukken worden deze aspecten voor de verschillende SMR categorieën verder ingevuld aan de hand van de geselecteerde kenmerken (zie ook Definities).

a. TOEPASSING EN TECHNIEK

Ten aanzien van “Toepassing en techniek” zijn de hieronder weergegeven kenmerken geselecteerd. Tevens is per kenmerk een korte toelichting weergegeven.

• Toepassing

SMR's worden ontwikkeld en aangeboden voor de productie van elektriciteit, (proces)warmte, warmte voor ontzilting, warmtekracht waterstofproductie en andere industriële toepassingen (*co-generation*). De mogelijke of meest geschikte toepassingen van een SMR zijn afhankelijk van het te beschouwen SMR-ontwerp.

• Vermogen

SMR's worden met uiteenlopende vermogens aangeboden, variërend van tientallen tot honderden MW elektrisch vermogen. SMR's kunnen onder andere toegepast worden bij een groot industrieterrein waar behoefte is aan een bepaald (elektrisch) vermogen. Een aantal SMR's maakt gebruik van meerdere reactoreenheden (modules) die samen ondergebracht zijn in één reactorgebouw (een unit). Dit principe wordt bijvoorbeeld voor de NuScale SMR toegepast. Door middel van toepassing van een aantal reactormodules kan het vermogen gemakkelijker aangepast worden aan de behoefte van de klant.

• Techniek

SMR ontwerpen verschillen van elkaar onder andere in het gekozen koelmiddel (water, zwaar water, vloeibaar metaal, gesmolten zout of een heet gas). Veel SMR's gebruiken dezelfde splijtstof als grote gangbare reactoren. Maar er zijn er ook met speciale keramische splijtstof of splijtstof in gesmolten zout (dat dan ook koelmiddel is). De SMR's gebruiken zo veel mogelijk ervaring door toepassing van bewezen technieken en componenten. Dit betreft met name de lichtwaterreactor SMR's. Dit wordt aangevuld met innovatie, bijvoorbeeld door toepassing van passieve componenten in verschillende systemen of integratie van alle primaire componenten in één vat.

• Flexibiliteit

Het vermogen van een SMR kan meestal gemakkelijker gevarieerd worden (toepassing 'load following') dan bij toepassing van de gangbare kerncentrales. Daarnaast kan door toepassing/combinatie van meerdere eenheden of units het elektrisch vermogen gemakkelijker aangepast worden aan de behoefte van de klant. Tevens kan dan onderhoud/splijtstofvervanging van een eenheid/unit uitgevoerd worden, terwijl de andere eenheden/units in bedrijf kunnen blijven en vermogen blijven leveren. Dit vergroot de flexibiliteit en de leveringszekerheid. Daarnaast zou een SMR ingezet kunnen worden om bijvoorbeeld afwisselend elektriciteit en waterstof te produceren. De reactor kan dan bij veel elektriciteitsproductie elders (door bijvoorbeeld zon en/of wind) overschakelen op waterstofproductie.

• Fuel cycle (front-end en back-end)

Ten aanzien van de *fuel cycle* is onder andere het type splijtstof dat gebruikt wordt van belang en de lengte van de splijtstofcyclus (dit is de tijdsduur dat (de splijtstof in) de reactor in bedrijf is zonder dat deze splijtstof gewisseld hoeft te worden). Tevens moet een SMR periodiek voorzien worden van nieuwe splijtstof (*front-end*). Daarnaast moet gebruikte splijtstof en procesafval verwerkt worden (*back-end*). Voor de SMLWR's met gebruikelijke UO_2 -splijtstof (verrijkingsgraad rond de 5%) is deze *fuel cycle* reeds beschikbaar en bekend voor Nederland. Voor SMR's met andere splijtstof moet nagegaan worden hoe dit ingevuld en gewaarborgd is.



Met betrekking tot de *back-end* geldt in het algemeen het volgende: radioactief afval wordt nu veilig opgeslagen in speciaal daarvoor ontworpen gebouwen bij de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) in Zeeland. Ook in de toekomst dient het beheer van radioactief afval en als radioactief afval beschouwde verbruikte splijtstof zodanig te zijn dat het geen gevaar voor mens en milieu oplevert. Het Nederlandse beleid voor radioactief afval is gebaseerd op vier uitgangspunten [11]:

- Minimalisatie van het ontstaan van radioactief afval;
- Veilig beheer van radioactief afval;
- Geen onredelijke lasten op de schouders van latere generaties;
- De veroorzakers van radioactief afval dragen de kosten van het beheer ervan.

Het beleid is stabiel en gaat al ruim dertig jaar uit van bovengrondse opslag van het radioactieve afval gedurende ten minste 100 jaar, waarna rond 2130 berging in de diepe ondergrond is voorzien. Besluitvorming wordt rond 2100 voorzien.

Voor realisatie van een eindberging wordt zowel een nationale als een internationale lijn gevolgd: de zogenaamde duale strategie. Hierbij wordt een nationale route naar eindberging uitgewerkt maar wordt de mogelijkheid om samen te werken met andere Europese lidstaten voor de realisatie van een eindberging niet uitgesloten [12].

Momenteel werkt COVRA met standaardformaten voor het te verwerken afval, onder andere afkomstig van huidige lichtwaterreactoren. Het is goed mogelijk dat geavanceerde reactoren van deze standaarden afwijken (bijvoorbeeld door het gebruik van andere splijtstofvormen met andere geometrieën, evenals door het gebruik van geheel andere splijtstof met andere afvalkarakteristieken in het bijzonder). Er zullen afspraken gemaakt moeten worden tussen de aanbieder en COVRA. Dit betreft bijvoorbeeld de afvalsamenstellingen, type verpakkingen en eisen aan transport. De huidige standaardwerkwijze van COVRA moet zo nodig aangepast worden.

b. INPASSING EN OMGEVING

Ten aanzien van “Inpassing en omgeving” zijn de hieronder weergegeven kenmerken geselecteerd. Tevens is per kenmerk een korte toelichting weergegeven.

• Ruimtelijke inpassing

Voor een ruimtelijke inpassing is onder andere de benodigde oppervlakte van de SMR-site (terreingrens) en gebouwoppervlak van belang. SMR's zouden geplaatst kunnen worden op een locatie dicht bij industrieterreinen of dichterbij de bevolking dan grote gangbare reactoren. Kerncentrales nemen ongeveer een vergelijkbare ruimte in als fossiele centrales van een vergelijkbaar vermogen.

Onder de Kernenergiewet zijn er geen bijzondere beperkingen aan het gebruik van de omgeving rond een kerncentrale. Aan de terreingrens van een nucleaire installatie gelden wettelijke eisen t.a.v. groepsrisico en individueel risico zoals vastgelegd in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse). Hierdoor is er ten aanzien van de veiligheid geen indirect ruimtegebruik buiten het terrein. De ruimte rond een kerncentrale dient daarentegen wel aan bepaalde voorwaarden te voldoen [13]. Het betreft zogenaamde Preparatiezones waarbinnen maatregelen, zoals evacuatie of schuilen, toegepast moeten kunnen worden; de maatregelen dienen ook voorbereid te zijn. De grootte van deze zones verschillen per type maatregel. De maatregelen volgen weer uit (de potentiële gevolgen van) het type object, in dit geval een kleine kerncentrale (SMR). De preparatiezones en het voorbereiden van de maatregelen leggen geen beperkingen op aan activiteiten in de zone (rondom de SMR).

• Koeling

Een SMR is een thermische centrale en dient gekoeld te worden. Derhalve is van belang welk type koeling toegepast kan worden voor een SMR (waterkoeling, lucht-koeling) en hoeveel koelcapaciteit beschikbaar is. Nederland beschikt over rivieren, kanalen, meren en de Noordzee. De behoefte aan koelwater per opgewekte MWh is vergelijkbaar met die van een fossiele centrale. Voor inpassing in de omgeving is het van belang te weten op welke wijze(n) de geproduceerde warmte wordt afgevoerd naar de omgeving.

• Koppeling met het elektriciteitsnet

Voor SMR's die aan het openbare elektriciteitsnet gekoppeld worden is het van belang dat aan de gestelde eisen voldaan wordt en dat de benodigde extra infrastructuur en de kans op netcongestie minimaal zijn. Daarnaast kan een aantal SMR's zelfstandig opereren (*off-grid*, dus zonder koppeling aan het openbare elektriciteitsnet). Dit betreft met name de micro-SMR's. Indien beschikbaar wordt specifieke informatie vermeld.



c. PLANNING EN RANDVOORWAARDEN

Ten aanzien van “Planning en randvoorwaarden” zijn de hieronder weergegeven kenmerken geselecteerd. Tevens is per kenmerk een korte toelichting weergegeven.

• Planning

Voor realisatie van een SMR worden fasen doorlopen te worden zoals *proof-of-principle*, basisontwerp, haalbaarheid, detailontwerp, vergunningen, locatie, basisontwerp, detailontwerp, bouw, inbedrijfstelling.

• Duur van de bouw tot commissioning

De verwachte bouwtijd (tot aan de inbedrijfstelling) van een SMR is een belang aspect ten behoeve van omgevingsplannen. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen de verwachte bouwtijd voor een ‘*First of a Kind*’ (FOAK) reactor en een gestandaardiseerd model dat in serieproductie is genomen (‘*Nth of a Kind*’ (NOAK) reactor). Het inbedrijfstellen (*commissioning*) van de reactor(en) volgt na de fysieke installatie en neemt grofweg één jaar in beslag, maar dit zal bij een relatief eenvoudig en klein ontwerp (veel) minder zijn, bij een omvangrijke multi-module unit waarschijnlijk meer [14].

• Vergunningsfase (internationaal)

Een SMR-type kerncentrale heeft een traject vergelijkbaar met een grote kerncentrale. Bij een opvolgende vergelijkbare SMR zal de vergunningverlening waarschijnlijk sneller gaan. Het is bekend dat de competente autoriteiten in veel landen (inclusief Nederland) aandacht hebben voor SMR vergunningstrajecten en zich hebben aangesloten bij internationale initiatieven om ervaringen en inzichten te delen (IAEA, SNETP, NEA). Het vergunningstraject in Nederland kan baat hebben bij ervaring en documentatie uit vergunningstrajecten en typecertificeringen in andere landen, zoals het certificeringsproces door de European Utilities Requirements (EUR). Binnen EUR zijn SMR-criteria en beoordelingen in ontwikkeling (revisie F).

Voor het verkrijgen van een vergunning voor een SMR in Nederland wordt het vergunningsproces dat doorlopen dient te worden in behandeling genomen en beoordeeld door de ANVS. De ANVS ziet aanvragen als ontvankelijk indien uit het (uitgebreid) traject van vooroverleg blijkt dat er een ontwerp ligt dat door ANVS als voldoende veilig wordt beschouwd. Het vergunningsproces kan opgedeeld worden in de volgende drie fasen [15]:

○ Fase 1: Opstellen documentatie (door aanvrager)

In deze fase dient de ontwerper de veiligheid van een ontwerp op de voorziene locatie sluitend aan te tonen. Tevens dient de aanvrager te starten met de organisatie en financiering. Als voorbeeld van een huidig nieuwbouwproject kan het project voor de PALLAS-onderzoeksreactor genoemd worden. In het geval van het doorlopen van deze fase voor de PALLAS-onderzoeksreactor heeft dit proces enige jaren geduurd, omdat de PALLAS-onderzoeksreactor een uniek ontwerp betrof, specifiek voor die locatie en toepassing. In het geval van de aanvraag voor een SMR kan het sneller gaan (indicatief minimaal circa 1 jaar), indien voor de bouw van de SMR een volwassen technologie wordt gekozen en een ontwerper die bekend is met de veiligheidseisen in Europa en Nederland, en het onderbouwende dossier al voor een groot deel gereed is (omdat een soortgelijke SMR al elders vergund/gebouwd is). Hierbij zal voor de benodigde inspanning voor de beoordeling veel uitmaken of een bekende technologie wordt gebruikt, zoals een lichtwaterreactor, of een technologie waarvoor nog meer aangetoond dient te worden, zoals een gesmoltenzoutreactor.

○ Fase 2: Ontwerpbeoordeling

De tweede fase betreft de ontwerpbeoordeling. Belangrijke documenten die opgesteld en beoordeeld dienen te worden betreffen onder andere het Veiligheidsrapport en de onderbouwing daarvan in het *Preliminary Safety Analysis Report* (PSAR), de milieueffectrapportage (MER) en het pakket van beveiligingsmaatregelen. ANVS heeft voor de beoordeling hiervan zeker 1 jaar nodig. Indien de aanvrager naar aanleiding van de eerste beoordelingsronde (grote) aanpassingen moet doen kan dit (veel) langer worden. Er kan tijd gewonnen worden als de ANVS kan samenwerken of gebruik maken van eerdere beoordeling(en) van hetzelfde of een vergelijkbaar ontwerp door collega's uit het buitenland.

○ Fase 3: Formele beoordeling

Dit betreft de formele vergunningsprocedure. Deze duurt een half jaar, waarbij er een mogelijkheid tot beroep is. Dit betekent dat de activiteiten pas ongeveer twee maanden na afloop van die procedure kunnen starten (of langer indien een beroep gegrond wordt verklaard wordt of er een voorlopige voorziening wordt aangevraagd).

Voor het verkrijgen van een vergunning voor een SMR met bewezen/volwassen technologie lijkt, op basis van bovenstaande, een doorlooptijd van een jaar of drie mogelijk te zijn (doorlopen fase 1 t/m 3), voor een partij die direct voldoende capaciteit, kennis en toewijding heeft.



Met betrekking tot de technische eisen voor een SMR zijn onder andere de volgende documenten van belang:

- o Het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse) [16]. Dit betreft eisen met betrekking tot radiologische doelstellingen en het voldoen aan radiologische acceptatiecriteria.
- o De Handreiking voor het Veilig Ontwerp en het veilig Bedrijven van Kernreactoren (VOBK) [17] en de Dutch Safety Requirements (DSR) for Nuclear Reactors [18]. Deze bevatten veiligheidsrandvoorwaarden voor het ontwerp en de bedrijfsvoering van lichtwater gekoelde (nieuwe) kernreactoren. Ten aanzien van het voldoen aan de veiligheidsrandvoorwaarden voor SMR's biedt het VOBK / DSR de mogelijkheid voor een aanvrager van een vergunning om in zijn evaluatie aan te tonen dat hetzelfde veiligheidsniveau ook op een andere wijze bereikt kan worden dan de wijze vermeld voor huidige grote reactoren (toepassing van gelijkwaardigheid).

Juridisch kader

Naast bovengenoemde vergunningsaspecten gelden er nog andere vergunningen. Ter beantwoording van de vraagstelling *welke procedures een potentieel geïnteresseerd bedrijf zou moeten doorlopen om een SMR op hun terrein mogelijk te maken* zijn enkele aspecten in het kader van ruimtelijke inpassing van belang (met de randvoorwaarde dat een dergelijke SMR niet meer dan 500 MW aan vermogen opwekt).

Omwille van de ontwikkelingsfase wordt er vanuit het juridisch kader uitgegaan dat een SMR-aanvraag pas binnenkomt nadat de Energiewet de Elektriciteitswet 1998 en de Gaswet heeft vervangen. Daarnaast wordt er aangenomen dat de Omgevingswet per 1 januari 2024 in werking is. Specifiek in de Energiewet wordt EZK aangewezen als bevoegd gezag, echter geldt dat de minister van EZK kan besluiten om niet het bevoegd gezag te zijn, indien naar zijn oordeel besluitvorming door een ander bestuursorgaan het project kan versnellen of aan besluitvorming door een ander bestuursorgaan anderszins aanmerkelijke voordelen zijn verbonden. Hierdoor heeft de Minister van EZK de bevoegdheid om een college van Gedeputeerde Staten/Gemeenteraad aan te wijzen als bevoegd gezag, in het geval dat een SMR een vermogen heeft van niet meer dan 500 MW. Verder is in het omgevingsbesluit (in Bijlage V, categorie C3) aangegeven dat de oprichting van een kernreactor milieueffectrapportage (mer) plichtig is, ten behoeve van de vergunning op grond van artikel 15 van de Kernenergiewet.

Uit artikel 6.1 van de Energiewet, en artikel 5.44 van de Omgevingswet, volgt dat de ontwikkeling en de exploitatie van een SMR niet zal worden vergund door middel van de projectprocedure. Het is wel mogelijk om het project via een gecoördineerde procedure vast te stellen, bijvoorbeeld als het gaat om een gemeentelijk project van nationaal belang. Na een fase van informeel vooroverleg zal er een aanvraag moeten worden ingediend bij het coördinerend bestuursorgaan. Dit bestuursorgaan zal in clusters de afgifte van de benodigde vergunningen coördineren. Er zijn verschillende stappen zowel verplicht als facultatief afhankelijk van de inrichting van de projectarchitectuur.

• Veiligheidskenmerken

Een SMR kan ontworpen worden zonder dat er elektriciteit (of een andere externe energiebron) nodig is om de reactor te koelen na het optreden van een ontwerp-ongeval. Dit is een zogenoemd passief veilige eigenschap. Bij grote gangbare reactoren gebeurt koeling vaak met water dat actief wordt geïnjecteerd met pompen waarvoor elektriciteit benodigd is. Voor de koeling van een SMR is vaak 'passieve koeling' door passieve systemen voldoende door de lagere warmteproductie en specifiek ontwerp van de nucleaire systemen. Daarvoor is dan geen stroomvoorziening nodig. Gangbaar is om de kernsmeltfrequentie aan te geven, een theoretisch getal dat niet aangeeft of er daadwerkelijk radioactiviteit naar de omgeving vrijkomt maar alleen het vóórkomen van een vorm van kernsmelt, en welke tijd beschikbaar is zonder dat ingreep van het personeel nodig is na het optreden van een ontwerp-ongeval (dit wordt de autarkietijd genoemd).

• Keten

Een kerncentrale kan niet zonder een betrouwbare toeleveringsketen ten behoeve van splijtstof en specifieke componenten en systemen (voor onderhoud). Voor de meeste SMLWR's is hier voldoende zekerheid over. Ook kunnen veel SMLWR's toe met splijtstof verrijkt tot circa 5% U-235, zoals de meeste grote kerncentrales. De *back-end* van de keten, de verwerking van reststoffen, is dan ook bekend. Bij meer geavanceerde reactoren kan het zijn dat de backend nog verder ontwikkeld dient te worden.



- **Security and safeguards**

Security en safeguards zijn een reeks technische en organisatorische maatregelen die onder IAEA en Euratom toezicht worden toegepast om misbruik van nucleaire technologie en materialen te voorkomen. Ten aanzien van security en safeguards zijn de aspecten van toepassing die tevens voor de gangbare grote kerncentrales van toepassing zijn. Derhalve kunnen dezelfde verdragen/voorwaarden toegepast worden. In aanvulling hierop kunnen voor SMR's een aantal andere aspecten extra aandacht vragen, bijvoorbeeld het garanderen van de security indien er minder personeel ingezet wordt bij een SMR, het beperken van de toegankelijkheid (safeguards) ten gevolge van langere bedrijfscycli bij een SMR.

- **Kosten**

Ingeschatte kosten, bij voorkeur weergegeven als *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Dit betreft de gemaakte kosten (installatie + bedrijfsvoering) voor (elektriciteits-)productie over de gehele levensduur van de installatie (voor nieuwbouw 60 jaar of meer), gedeeld door de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (warmte, et cetera) in MWh over de gehele levensduur van de installatie. Kosten kunnen ook uitgedrukt worden in de *Capital Cost* (OCC), de financiering die gemoeid is met de bouw van de complete installatie in een nacht per maximaal opgewekt vermogen (kWe). Sommige leveranciers overwegen medefinanciering van het [19].

d. ORGANISATIE EN ERVARING

Ten aanzien van “Organisatie en ervaring” zijn de hieronder weergegeven kenmerken geselecteerd. Tevens is per kenmerk een korte toelichting weergegeven.

- **Nederlandse vertegenwoordiging**

Is er een Nederlandse vertegenwoordiging of een Nederlandse vestiging. Zijn er anderszins contacten die van belang kunnen zijn voor het realisatieproces.

- **Track record**

Het vertrouwen in aanbieders is groter als er elders al in het ontwerp is geïnvesteerd. Zijn er al serieuze (bouw)plannen elders? Welke beoordelingrecords zijn er van bijvoorbeeld de GDA, NRC, EUR? Welke ervaring heeft de aanbieder met/in de nucleaire markt?

- **Omvang**

De omvang van de leverancier (*Full Time Equivalent* (FTE's)/financiën) geeft meer zekerheid ten aanzien van de realisatie.

- **Supply chain volwassenheid**

Dit betreft een inschatting van de volwassenheid (betrouwbaarheid) voor massaproductie van systemen en componenten ten behoeve van realisatie van een reeks (NOAK) op basis van ervaring, bestaande productiemethoden en toeleveringsroutes. Deze neemt toe indien meer relevante ervaring in de nucleaire markt aanwezig is bij een leverancier.



1. Lichtwater SMR's

Dit hoofdstuk betreft de beschouwing van de vier geselecteerde lichtwater SMR's, te weten het Amerikaanse NuScale, de Britse Rolls-Royce SMR, de Amerikaans-Japanse BWRX-300 en het Franse NUWARD-reactorconcept.

NuScale (NuScale Power Corporation, VS)

De NuScale Power Module (NPM) is een kleine, lichtwatergekoelde drukwaterreactor (PWR). Reactorkern, stoomgenerator en drukhouder zijn in een reactorvat geïntegreerd. Een power-unit kan uit drie configuraties bestaan: VOYGR-4 met 308 MWe, VOYGR-6 met 462 MWe en de VOYGR-12 met 924 MWe. Elke NPM is een op zichzelf staande module, elk aangesloten op een eigen turbine-generator, die onafhankelijk van de andere modules werkt in een configuratie met meerdere modules. Alle modules worden beheerd vanuit één controlekamer.

Rolls-Royce SMR (Rolls-Royce SMR Ltd, VK)

De Rolls-Royce SMR is een compacte drie-lus drukwaterreactor (PWR). Het koelwater wordt gecirculeerd door drie reactorkoelmiddelpompen naar drie verticale U-buisvormige stoomgeneratoren. Een drukhouder is opgenomen in het reactor-koelsysteem. Meerdere preventie- en beschermingslagen zijn aangebracht in de vorm van onafhankelijke en diverse actieve en passieve veiligheidssystemen, onder andere in de vorm van grote watervoorraden. Passieve veiligheidssystemen zijn zo ontworpen dat de vraag naar menselijk handelen en energie tot een minimum wordt beperkt.

BWRX-300 (GE-Hitachi, VS-Japan)

De BWRX-300 is een 300 MWe kokendwaterreactor (BWR) die gebruikmaakt van diverse passieve/natuurlijk gedreven systemen. Primaire pompen zijn niet vereist en veiligheidssystemen zijn passief. Het reactorvat beschikt over interne stoomscheiders en drogers zodat hoogkwalitatieve stoom aan de stoomturbine geleverd kan worden. Stoomgeneratoren zijn derhalve niet nodig. Het concept betreft de tiende BWR generatie en is een evolutie van de Amerikaanse NRC vergunde 1.520 MWe Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR).

NUWARD (EDF, Frankrijk)

NUWARD is een SMLWR met een totaal netto elektrisch vermogen van 340 MW geproduceerd door twee onafhankelijke (reactor)modules. NUWARD is gebaseerd op een geïntegreerde PWR met volledige integratie van de belangrijkste componenten in het reactordrukvat: aandrijfmechanisme voor regelstaven, compacte stoomgeneratoren en drukregelaar. Innovatieve ontwerpkenmerken zijn onder andere de beperkte hoogte van het reactorvat en de stalen omhulling die is ondergedompeld in een grote hoeveelheid water (ingegraven watermuur). Met betrekking tot nucleaire veiligheid omvat het ontwerp het beheersen van ontwerpongevallen via passieve systemen en heeft de beschikking over een interne ultimate heat sink (warmte opslag) voor meer dan 3 dagen.



1.1 TOEPASSING EN TECHNIEK

Tabel 1.1: Toepassing en techniek voor lichtwater SMR's

ASPECT	NUSCALE	ROLLS-ROYCE SMR	BWRX-300	NUWARD
Toepassing	Elektriciteit. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. warmte, waterstofproductie) [20]	Elektriciteit. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. warmte, waterstofproductie) [21]	Elektriciteit. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. warmte, waterstofproductie) [22]	Elektriciteit. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. warmte, waterstofproductie) [23]
Vermogen (MWth)	250 per module (NPM) [24]	1200 – 1350 [10]	870 [22]	1080 [10]
Vermogen (MWe)	77 per module [20] [24] Mogelijk aantal modules per power-unit: 4 (308 MWe), 6 (462 MWe) en 12 (927 MWe)	470 [21] [25]	300 [22] [26]	340 [10]
Techniek	iPWR (downscaled bestaande lichtwater- techniek) Standaard LWR-splijstof (UO ₂ tabletten) [24] Verrijking tot 4,95% [24] Gebruik MOX-splijstof is niet bekend	Drukwaterreactor (PWR met 3 primaire loops) [10] Standaard LWR splijstof (UO ₂ tabletten) [10] Verrijking tot circa 4,95% Gebruik MOX-splijstof is niet bekend	Kokendwaterreactor (BWR) [22] Standaard LWR splijstof (UO ₂ tabletten) [22] Verrijking tot circa 4,95% [22] Mogelijk toepassing Accident Tolerant Fuel (ATF) [27] Gebruik MOX-splijstof is niet bekend	Geïntegreerde drukwaterreactor (PWR) [10] Standaard LWR splijstof (UO ₂ tabletten) [10] Verrijking < 5% [10] Gebruik MOX-splijstof is niet bekend
Flexibiliteit	<i>Load following</i> is mogelijk: 40% vermogen per uur; met maximaal 10% per minuut [28]	<i>Load following</i> is mogelijk: 50-100% vermogen; 3-5 % per minuut [10]	<i>Load following</i> is mogelijk: 50-100% vermogen; 0,5 % per minuut [22]	<i>Load following</i> is mogelijk: 20-100% vermogen; 5% per minuut [10] [29]
Fuel cycle (front- and back-end)	Splijstofcyclus: 18-24 maanden (onderhoudsstop 10 dagen) [24] Opslag: verbruikte splijstofelementen worden in een opslagbassin opgeslagen; <i>On-site</i> tevens droge opslag voor 60 jaar [10]	Splijstofcyclus: 18-24 maanden [10] Opslag: verbruikte splijstofelementen worden opgeslagen in een bassin in een apart splijstofopslaggebouw [10]	Splijstofcyclus: 12-24 maanden [22] Opslag: verbruikte splijstofelementen worden opgeslagen in een opslagbassin in het reactorgebouw [22]	Splijstofcyclus: 24 maanden (onderhoudsstop 20 dagen); wissel ter grootte van een halve kern [10] Opslag: verbruikte splijstofelementen worden voor 10 jaar opgeslagen in een opslagbassin in het reactorgebouw [10]



NuScale

Het NuScale SMR-concept bestaat uit meerdere reactoreenheden (modules) in een enkel reactorgebouw. De complete centrale, de VOYGR plant genaamd, wordt in drie varianten aangeboden: VOYGR-4, VOYGR-6, en VOYGR-12. De gegevens zoals in dit document gepresenteerd hebben betrekking op een VOYGR-12-centrale (927MWe).

Naast elektriciteit, kan ook waterstof geproduceerd worden: een enkele 250 MWth eenheid kan ongeveer 50 ton waterstof per dag genereren [20].

De kern van een NPM bestaat uit 37 elementen in een 17x17 splijtstofelement en 16 regelstaafelementen. De activiteit wordt geregeld met de regelstaven en opgelost boor.

Rolls-Royce SMR

De lengte van de splijtstofcyclus bedraagt 18-24 maanden waarbij de splijtstof vervangen wordt in drie batches [10]. De lengte van de splijtstofwisselperiode bedraagt 18 dagen. Na de splijtstofwissel worden de gebruikte splijtstofelementen opgeslagen in een bassin in een apart splijtstofopslaggebouw [10].

BWRX-300 SMR

De lengte van de splijtstofcyclus bedraagt 12-24 maanden [22]. De lengte van de splijtstofwisselperiode bedraagt 10-20 dagen [22]. Na de splijtstofwissel worden de gebruikte splijtstofelementen opgeslagen in het splijtstofopslagbassin dat zich in het reactorgebouw bevindt [22]. In het splijtstofopslagbassin kunnen de gebruikte splijtstofelementen tot 8 jaar opgeslagen worden.

NUWARD

De NUWARD-technologie is ontwikkeld om fossiele energiecentrales in het gebied 300-400 MWe te vervangen. Daarnaast kan de SMR gebruikt worden voor warmtekrachtkoppeling, waterstofproductie, stadsverwarming en ontzilting van water. Het ontwerp biedt *baseload* en *load-following*.

De referentiekern is gebaseerd op een 17x17 splijtstofelement zoals gebruikt in een in bedrijf zijnde PWR echter met verkorte kernhoogte. Het ontwerp is boorvrij waardoor verschillende U-235 verrijkingen en splijtbare *absorbers* worden gebruikt [10] [29].

De ontwerpstreefwaarde voor de capaciteitsfactor ligt boven de 90%, met alleen groot gepland onderhoud voor 20 dagen per 24 maanden [10] [29].



1.2 INPASSING EN OMGEVING

Tabel 1.2: Inpassing en omgeving voor lichtwater SMR's

ASPECT	NUSCALE	ROLLS-ROYCE SMR	BWRX-300	NUWARD
Ruimtelijke inpassing	VOYGR-12: Site (hek): 140.000 m ² [10] [30] Gebouwoppervlakte: 4.877 m ² [30]	Site (hek): 40.000 m ² [10] Gebouwoppervlakte: 10.000 m ² [10] De gevolgen voor de omgeving buiten de terreingrens worden geminimaliseerd. Dit wordt behandeld in het <i>Safety and Environmental Report</i>	Site (hek): 26.300 m ² [22] Gebouwoppervlakte: 8.400 m ² [10] [22] Ten aanzien van de gevolgen voor de omgeving zal in het vergunningsproces aangetoond worden dat aan de wettelijke eisen voldaan wordt (vergunningsaanvraag loopt in de VS en Canada [26])	Site (hek): niet genoemd [10] [29] Nucleair deel inclusief opslagbassin: 3.500 m ² [10]
Koeling	Koeling middels water, via rivier en/of zee Via secundair/tertiair systeem, waarbij primair en secundair binnen het containment geplaatst is [24]	Apart <i>Cooling Water Island</i> [10] Koeling middels koelwater; indirecte of directe luchtkoeling kan tevens toegepast worden	De referentiesite omvat koeling via een koeltoren [22] Tevens is koeling via rivier of zee mogelijk	Geschikt voor locaties aan zee/meer aan land en/of rivieroever, met open-loop conventionele condensorkoeling, evenals locaties in het binnenland met lucht condensors [10]
Koppeling met elektriciteitsnet	Eenvoudig in te passen op bestaand net (afhankelijk van aantal modules) [24]	Aan te sluiten op energie-intensieve industrielocaties [10]	Er is één inkomende/uitgaande transmissielijn nodig die het vermogen van de centrale kan verwerken [22]	Basis net-interface is <i>compliant</i> met ENTSO-E en EUR eisen (typisch 225kV/400 kV 50Hz) [10]

NUWARD

De bodemgesteldheid moet zodanig zijn dat ~20 m diepe uitgraving (meestal middelzware/rotsbodem) mogelijk is met redelijk technisch beschikbare middelen. Basis netwerkaansluiting (225kV/400kV, 50Hz), netaansluiting met specifieke gebruikerseisen is mogelijk (60Hz bijv.) [29].



1.3 PLANNING EN RANDVOORWAARDEN

Tabel 1.3: Planning en randvoorwaarden voor lichtwater SMR's

ASPECT	NUSCALE	ROLLS-ROYCE SMR	BWRX-300	NUWARD
Planning	2029: in bedrijfstelling voor de eerste VOYGR-6 is gepland [10]	2029: in bedrijfstelling voor de eerste SMR [10]	2028: in bedrijfstelling voor de eerste SMR is gepland [26]	2023-2026: basisontwerp fase. 2026-2030: detailontwerp fase. Vanaf 2030: start bouw FOAK in Frankrijk [10]
Duur van de bouw tot commissioning	FOAK: 39 maanden [24] NOAK: 30 maanden [24]	NOAK: 48 maanden [25]	NOAK: 24-36 maanden [27]	FOAK: 36 maanden [31]
Vergunningsfase (internationaal)	<i>Design approved.</i> US-NRC vergund in 2020 met verkrijgen van FSER [32] [33] <i>Pre-licensing</i> activiteiten worden uitgevoerd in Canada, Roemenië, Oekraïne en Polen [32]	<i>Pre-licensing: Generic Design Assessment</i> GDA review in maart 2022 gestart in het VK [32] GDA Stap 1 (<i>Initiation</i>) afgerond in april 2023 en GDA Stap 2 (<i>Fundamental Assessment</i>) gestart in april 2023 [32]	<i>Pre-licensing:</i> Vergunningsaanvraag geïnitieerd in de VS en in Canada [26] [32]	<i>Pre-licensing:</i> De ASN (Frankrijk), STUK (Finland) en SUJBO (Tsjechië) werken samen aan de vergunningsreview van het NUWARD reactor-design [32]
Veiligheidskenmerken	<i>Gesplitst hieronder</i>			
<ul style="list-style-type: none"> Actief/passief 	Passieve systemen [24]: <ul style="list-style-type: none"> Natuurlijke circulatie gedurende normaal bedrijf Afvoer vervalwarmte en noodkoeling Buiten-containment pool als ultieme heat sink 	Passieve systemen [10]: <ul style="list-style-type: none"> Containment koelsysteem Accumulatoren als onderdeel van het noodkoelsysteem Waterstof-recombinatoren Kernsmeltopvang (de eerste 12 uur) 	Passieve systemen [22]: <ul style="list-style-type: none"> Containment koelsysteem Natuurlijke circulatiekoeling van de reactorkern Isolatiecondensorsysteem (ICS) 	Passieve systemen [10] [29]: <ul style="list-style-type: none"> Geïntegreerd reactorcoolmiddel-systeem (reductie max LOCA) Boor-vrije bedrijfsvoering (alle DBC), geen problemen met boor-verdunning Koeling van het containment door water rondom (ondergedompeld) IVR bij DEC-B situaties
<ul style="list-style-type: none"> Kernsmeltfrequentie (en/of insluiting gerelateerde kenmerken) 	Kernsmeltfrequentie < 10 ⁻⁷ per reactorjaar [30] [34] [35]	Kernsmeltfrequentie < 10 ⁻⁷ per reactorjaar [10]	Kernsmeltfrequentie < 10 ⁻⁷ per reactorjaar [22]	Kernsmeltfrequentie < 10 ⁻⁵ per reactorjaar (PSA nog niet volledig) <i>Large Release Frequency:</i> praktisch geëlimineerd [29]
<ul style="list-style-type: none"> Autarkietijd 	<i>Station blackout:</i> geen operator acties nodig [24] [36] Door passief ontwerp/systemen koeling en afschakeling geborgd bij DBA, operator acties waarschijnlijk na lange tijd (dagen) nodig, echter niet vermeld [24]	72 uur [10]	24 uur [22]	>72 uur [10]



ASPECT	NUSCALE	ROLLS-ROYCE SMR	BWRX-300	NUWARD
Security and safeguards	Met de implementatie van digitale I&C worden security-aspecten in het ontwerp meegenomen (op basis van US-NRC regulaties) [24]	Security aspecten worden meegenomen in het ontwerp volgens de 'UK Office for Nuclear Regulation (ONR) <i>Security Assessment Principles</i> (SAP's) [10] Geen informatie over safeguards gevonden	Alle vitale apparatuur bevindt zich in beveiligde/beschermde zones waarvan de toegang wordt bewaakt en gecontroleerd [22] Safeguards van nucleair materiaal consistent met de reeds in bedrijf zijnde BWRs van GEH [22]	De reactor en spent fuel bevinden zich onder de grond en zijn afgeschermd door een kunstmatige heuvel. Geen directe toegang mogelijk; Safeguards vergelijkbaar met huidige PWR NPP's [29]
Keten	Primaire reactoronderdelen worden fabrieksmatig aangeleverd [24] Splijtstof wordt gefabriceerd door AREVA NuScale voert momenteel voorbereidingen (contractering/samenwerking) voor realisatie in de VS, Canada, Roemenië en Polen [37] [38]	Rolls-Royce heeft 3 locaties geselecteerd in het VK om een fabriek te bouwen voor productie van onderdelen van de SMR [39]	GEH maakt voor de fabricage van onderdelen zoveel mogelijk gebruik van de bestaande wereldwijde vestigingen/locaties [27] GEH SMR Technologies Canada ondersteunt de ontwikkeling van de BWRX-300 in Canada [27]	Designontwikkeling wordt op dit moment geleid door een consortium van zes bedrijven: EDF, CEA, Naval Group, Framatome, TechnicAtome en Tractebel-Engie [10] Ontwerp maakt gebruik van PWR-technologie, PWR-toeleveringsketen en de 17x17 UO ₂ -splijtstofelement [10]
Kosten (LCOE of OCC)	LCOE FOAK: circa €92 per MWh (2022) [40] LCOE NOAK: circa €79 per MWh (2022) [40]	LCOE NOAK: €41-€58 per MWh (2021) [21] OCC NOAK: circa €2,3 miljard (2021) [21]	LCOE NOAK: circa €55 per MWh (2022) [41]	Niet gevonden in openbare bronnen (Algemene range bijv. aangegeven in KPMG studie [42])

NuScale

Het NuScale-reactorontwerp is in 2020 door de US-NRC vergund [32].

De US-NRC heeft het FSER (Final Safety Evaluation Report) uitgegeven [33].

Pre-licensing activiteiten worden uitgevoerd in Canada, Roemenië, Oekraïne en Polen [32]. Een eerste VOYGR-6 wordt in Idaho, VS, gebouwd [43].

Rolls-Royce SMR

Rolls-Royce gebruikt geen boor ten behoeve van reactiviteitsregeling in het primaire koelsysteem tijdens standaardoperatie [10].

BWRX-300

Het vergunningstraject: *Pre-licensing: Review van Licensing Topical Reports* door US-NRC sinds december 2019 [44]. *Application submitted*: In oktober 2022 een *Construction License* aangevraagd voor de Darlington site in Canada [27] [45]. *Pre-licensing* fase 1 en 2 bij de Canadese Nuclear Safety Commission afgerond in maart 2023 [46]. In december 2022 een GDA-aanvraag gestart in het Verenigd Koninkrijk (fase 1) [47].

In juni 2022 heeft SaskPower (Canada) de BWRX-300 geselecteerd voor potentiële ontwikkeling in Saskatchewan [48]. In augustus 2022 kondigden TVA en GEH een samenwerking aan voor de bouw van een BWRX-300 bij Clinch River in de VS [49].

NUWARD

Vanuit het oogpunt van nucleaire veiligheid omvat het ontwerp het beheer van ontwerp-ongeval situaties via passieve systemen zonder de noodzaak van een extern geclassificeerde elektrische voeding. Er is geen systeem/resource (inclusief *ultimate heat sink* of koellichaam; ook geen boor injectie) buiten het *Nuclear Island* vereist voor het bereiken van een veilige toestand, gedurende ten minste 3 dagen [29].

Door de geïntegreerde architectuur van het reactorkoelsysteem wordt de maximale *Loss of coolant accident* (LOCA) afmeting verkleind, zodat meer tijd beschikbaar is voor het beheersen van een LOCA-ongeval. Een intern aandrijfmechanisme voor regelstaven (CRDM) voorkomt ongevallen met uitwerpen van regelstaven [29].

De grote reactorkoelmiddelinventaris (kg per MWth) biedt inertie bij vermogens-transiënten.

Vervalwarmte-afvoer: een passief warmteafvoersysteem van 2 x 100% dat door natuurlijke circulatie de vervalwarmte van de kern naar de watermuur rond de insluiting overbrengt [29].

Passieve beheersing van ernstige ongevallen (ongevallen met kernsmelt) met retentie (behoud) van de kern in het vat (IVR-concept) [29].



1.4 ORGANISATIE EN ERVARING

Tabel 1.4: Organisatie en ervaring voor lichtwater SMR's

ASPECT	NUSCALE	ROLLS-ROYCE SMR	BWRX-300	NUWARD
NL vertegenwoordiging	Geen	Samenwerking met ULC-Energy, Amsterdam [50]	GE Benelux [27]	Dochteronderneming EDF Trading in NL actief [51], echter niet voor nucleaire activiteiten
Track record	NuScale Power Corporation is in 2007 opgericht, specifiek voor de ontwikkeling van een iPWR SMR-concept [52] MoU voor bouw SMR in Oekraïne op 1 september 2021 [53]	De Rolls-Royce Group heeft circa 60 jaar ervaring in het bouwen van kleine reactoren (nucleaire technologie) [39]. Levert zowel voor defensie als de civiele industrie. MoU's voor bouw SMR's 6 partijen (zie toelichting) [39] [54]	GE Nucleaire Energy decennialange ervaring binnen de nucleaire industrie [55] GEH heeft MoU's of andere overeenkomsten voor bouw BWRX-300 met bedrijven in Canada, Tsjechië, Polen, Verenigd Koninkrijk en Zweden [48] [55]	EDF is op alle terreinen van energie actief, van productie tot levering. In 2018 had EDF 58 kernreactoren verspreid over 19 centrales in heel Frankrijk, met een capaciteit van 63GW [56] MoU's voor samenwerking met Zuid Korea en Saoedi Arabië [57]
Omvang	440 medewerkers, hoofdkantoor in Portland, Oregon (VS). Beursgenoteerd (NYSE). Jaaromzet \$12 miljoen, Financiering tot nu toe \$850 miljoen [52]	Wereldwijd circa 35.000 medewerkers [39]	GE Hitachi Nucleaire Energy met het hoofdkantoor in de VS heeft circa 3.000 medewerkers [55]	EDF is het grootste elektriciteitsbedrijf in de EU. EDF is ook buiten Frankrijk actief [56]
Supply chain volwassenheid	Er wordt gebruik gemaakt van bestaande producenten in de (nucleaire) productiesector in de VS. Een voorbeeld is BWX Technologies Inc. voor de productie van de NPMs [24]	De faciliteit(en) voor fabricage van de SMR-modules worden de komende jaren gebouwd waarna de fabricage start [39] Rolls-Royce heeft onder andere tientallen jaren ervaring met de bouw van nucleaire onderzeeërs [39]	De faciliteit(en) voor fabricage van componenten/systemen van de BWRX-300 staan onder andere in de VS (onder andere sites van GE Hitachj) [27]. Binnen enige jaren is aanvang bouw van de BWRX-300 voor de Darlington site (Canada) gepland.	Ontwerp maakt gebruik van PWR-technologie, PWR-toeleveringsketen en de 17x17 UO ₂ -splijtstofassemblage. Tevens gebruik van bewezen technologische oplossingen (bijv. metalen containment half-ondergronds). Voor de meeste SMR onderdelen bestaat een supply chain [29]



Rolls-Royce SMR

MoU's met ULC-Energy (in Nederland) op 25 augustus 2022, met Skoda JS (in Tsjechië) op 5 september 2022, met Industria (in Polen) op 8 februari 2023, met Finland en Zweden op 21 maart 2023, met Oekraïne op 20 maart 2023 [39] [54].

BWRX-300

GE Nucleaire Energy is opgericht in 1955 waarna met de bouw van de eerste BWR is begonnen. Sindsdien wereldwijd vele tientallen BWR's gebouwd. De samenwerking met Hitachi voor de bouw van nieuwe BWR's is bekrachtigd in 2007 [55].

NUWARD

NUWARD SMR wordt ontwikkeld door een consortium geleid door Électricité de France (EDF). Het consortium bestaat verder uit CEA, Naval Group, Framatome, TechnicAtome en Tractebel-Engie [10].

De basistechnologie (PWR), de kern ($17 \times 17 \text{ UO}_2$) en de meeste technologische oplossingen profiteren van de grote operationele ervaring van de wereldwijde PWR-vloot en de EDF-ervaring op de Franse vloot. De meeste basiskennis, berekeningscodes, licentiebenaderingen en methodologieën zijn daarom beproefde technische praktijken. Voor de meeste componenten bestaat een supply chain die kan worden toegesneden op SMR's. Aan het einde van de jaren 2000 zijn er innovaties gelanceerd, vooruitlopend op het algemene fabrieksontwerp, om de haalbaarheid van deze technische innovaties te consolideren voordat het NUWARD-ontwerp werd gestart. Het is de bedoeling dat deze verschillende innovaties tegen het einde van het conceptuele ontwerp op prototypeniveau zijn. Voor deze innovaties is het uitgangspunt om bestaande technologieën uit het nucleaire en niet-nucleaire domein samen te voegen tot een specifiek nucleair ontwerp [29].

1.5 RESUMÉ

De beschouwde SMR's worden hier samengevat op basis van de aspect-kenmerken die in bovenstaande tabellen zijn gehanteerd.

Toepassing en techniek

1. De vier ontwerpen onderscheiden zich niet wezenlijk van elkaar in toepassing, zijn alle vier in staat *load-following* toe te passen (waarbij de BWRX-300 het minst flexibel is) en maken gebruik van standaard LWR-splijstof.
2. NuScale (VOYGR) heeft zich vooral op modulaire techniek toegerust, met mogelijkheden van 4, 6 en 12 reactormodules in één unit (met een unit-vermogen van 77 MWe). Het NUWARD ontwerp bestaat uit twee reactormodules in één unit. Rolls-Royce en BWRX-300 hebben ieder één reactor per unit. Voor genoemde ontwerpen is het laagste vermogen per unit 300 MWe (BWRX-300, VOYGR-4) en hoogste 924 MWe (VOYGR-12).
3. Alle vier de ontwerpen volgen een reguliere lichtwater PWR/BWR splijstofcyclus, waarbij hergebruik van splijstof mogelijk is na verwerking van verbruikte splijstof. De splijstofcyclus varieert van 12 tot 24 maanden; opslag van *verbruikte splijstof* is voor vele jaren mogelijk op de sites. Voor NuScale wordt naast een opslagbassin ook *on-site* droge opslag voorzien.

Inpassing en omgeving

1. De Rolls-Royce SMR en BWRX-300 nemen per energie-eenheid een vergelijkbaar *site*-oppervlak (hek) in (85 m^2 per MWe); het NUWARD-concept lijkt hier in mee te gaan (beperkte gegevens). NuScales VOYGR-12 neemt per energie-eenheid meer ruimte in, ruwweg anderhalf keer meer.
2. De uiteindelijke warmteafvoer vindt plaats middels koeling door zee, meer, rivierwater of zo mogelijk (gedeeltelijk) door lucht. De BWRX-300 maakt gebruik van een koeltoren, maar kan ook koelen door alleen rivier/zee (zonder koeltoren). NUWARD maakt in principe gebruik van (lucht) condensorkoeling.
3. Alle ontwerpen zijn op het Europese elektriciteitsnet aan te sluiten. Van NUWARD is bekend dat het ook aan specifieke gebruikerseisen tegemoet kan komen. Er is echter geen aanleiding aan te nemen dat andere ontwerpen dat niet kunnen (betreft conventionele E-systemen).



Planning en randvoorwaarden

1. De beoogde planning voor inbedrijfstelling in het buitenland van de eerste NuScale, Rolls-Royce SMR en BWRX-300 ontwerpen is rondom 2029. Het NUWARD-ontwerp loopt hierop achter, aanvang van de bouw is gepland in 2030. De opgegeven bouwtijd varieert van 24 tot 36 maanden (BWRX-300), tot 48 maanden (Rolls-Royce) voor een NOAK-project. De opgegeven *Levelised Cost Of Electricity* (LCOE) voor een NOAK liggen voor Rolls-Royce en BWRX-300 tussen €50-60 per MWh, voor NuScale zijn deze hoger: €75-85 per MWh. NUWARD heeft geen kostenschattting opgegeven.
2. Rolls-Royce SMR en de BWRX-300 zijn in een gevorderd stadium van het vergunningsvoortraject (met UK-GDA, CNSC). NuScale is door de US-NRC beoordeeld en het ontwerp beschikt over een *design approval*. Het NUWARD-vergunningsproces loopt achter ten opzichte van de andere drie; er vindt samenwerking plaats met drie Europese nucleaire toezichthouders.
3. Alle ontwerpen maken gebruik van passieve koeling voor warmteafvoer bij ontwerp-ongevallen. Voor kernsmelt heeft de Rolls-Royce SMR een passief opvangsysteem, NUWARD past een passief *In Vessel Retention* (IVR) concept toe (behouden van gesmolten kern in reactorvat). De indicatieve waarden voor kernsmeltfrequenties zijn zeer laag; NUWARD geeft een hogere indicatieve waarde als bovengrens af voor de kernsmeltfrequentie (grote lozingen worden hier wel al praktisch uitgesloten). Ingrijpen van personeel bij ontwerp-ongevallen is pas vanaf 72 uur (of 'meerdere dagen') nodig bij de NuScale, Rolls-Royce en NUWARD ontwerpen. Voor NuScale is bij Station Black-out (in -en externe stroomuitval) helemaal geen personeels-ingreep nodig. Voor de BWRX-300 is personeelsingreep nodig vanaf 24 uur.
4. *Security en Safeguards* aspecten worden meegenomen in alle ontwerpen. Voor nieuwe ontwerpen zijn de internationale richtlijnen/eisen ten aanzien van deze aspecten momenteel in ontwikkeling (IAEA, WENRA).
5. De ontwerpen willen allemaal zo veel mogelijk gebruik maken van bestaande PWR/BWR toeleveringsketens en vestigingen. De ontwerpers van Rolls-Royce, BWRX-300 en NUWARD beschikken hierin veel over eigen middelen en voorzieningen.

Organisatie en ervaring

De organisaties achter de ontwerpen van Rolls-Royce (Rolls-Royce Group), BWRX-300 (GE Hitachi) en NUWARD (onder andere EDF) zijn groot zowel in aantal medewerkers als in beschikbaar kapitaal, bovendien hebben ze veel nucleaire (bouw-)ervaring. De bestaande *supply chain* van deze organisaties zal uitgebreid worden op basis van

beproefde technologie en ervaring. Voor de ontwikkeling van het Rolls-Royce ontwerp in Nederland wordt samengewerkt met het Nederlandse ULC-Energy. GE Hitachi heeft vestigingen in de Benelux.

NuScale is specifiek opgericht voor de ontwikkeling van een SMR en legt zich toe op investeerders en afspraken met de nucleaire en conventionele maakindustrie.

Realisatie lichtwater SMR's in Nederland

Op basis van de informatie uit [sectie II.c](#) (vergunningsproces in Nederland) en [sectie 1.3](#) (Planning en randvoorwaarden) kan het volgende gesteld worden over de geschatte minimale doorlooptijd voor de bouw van een lichtwater SMR op een geselecteerde locatie in Nederland:

- Doorlopen van fasen vergunningsproces:
 - Fase 1: Opstellen documentatie (door aanvrager)
 - Fase 2: Ontwerpbeoordeling
 - Fase 3: Formele beoordeling

Voor het verkrijgen van een vergunning voor een SMR met bewezen/volwassen technologie lijkt een doorlooptijd van ongeveer drie jaar mogelijk te zijn (doorlopen fase 1 t/m 3), voor een partij die direct voldoende capaciteit, kennis (onder andere bekend met de veiligheidseisen in Nederland/Europa) en toewijding heeft. Deze schatting is gebaseerd op de ervaring die de Nederlandse toezichthouder recent heeft opgedaan bij het vergunnen van de PALLAS-reactor. Ook dat is een FOAK gebaseerd op conventionele technieken voor het type reactor dat gebouwd wordt (in het geval van PALLAS betreft dat een onderzoeksreactor).

- De door de leveranciers geschatte bouwtijd van een NOAK SMR bedraagt circa 3-4 jaar.

Op basis van het voorgaande volgt een minimale doorlooptijd van circa 7 jaar voor de bouw van een NOAK SMR. Naast bovengenoemde voorwaarden/vereisten t.a.v. het vergunningsproces dienen tevens de nodige voorzieningen (onder andere financiering, toeleveringsketen, expertise en capaciteit) in toereikende mate beschikbaar te zijn. Een leverancier met voldoende kennis, ervaring (track record) en capaciteit is hierbij essentieel.



2. Micro-range SMR's

Dit hoofdstuk betreft de beschouwing van de twee geselecteerde micro-SMR's, te weten de Amerikaanse concepten Last Energy en eVinci.

Last Energy

Last Energy's PWR-20 is een SMLWR met een totaal netto elektrisch vermogen van 20 MWe. De PWR-20 is grotendeels gebaseerd op conventionele PWR's en maakt gebruik van (aangepast) standaard LWR-splijtstof. Innovatieve kenmerken zijn onder andere de focus op modulariteit van bewezen PWR-technologie om de bestaande supply chain te kunnen gebruiken en een luchtgekoelde faciliteit voor minimale waterbehoefte. Met betrekking tot nucleaire veiligheid wordt een combinatie van actieve en passieve veiligheidssystemen gebruikt uit de ervaring van decennialang PWR-bedrijf.

eVinci

eVinci is een AMR met een variërend netto elektrisch vermogen van 2 MWe tot 3.5 MWe, ontwikkeld door Westinghouse. eVinci is gebaseerd op een microreactor met een gesloten kern en maakt gebruik van vaste TRistructural ISOtropic (TRISO) splijtstof (zie [Definities](#)). Innovatieve kenmerken zijn onder andere de installatie van warmtepijpen en een geïntegreerde warmtewisselaar direct in de kern, die zorgen voor passieve koeling van de reactor. Met betrekking tot nucleaire veiligheid is het ontwerp specifiek gericht op het toepassen van passieve veiligheid, waarbij onder andere gebruik wordt gemaakt van natuurlijke convectie.



2.1 TOEPASSING EN TECHNIEK

Tabel 2.1: Toepassing en techniek voor micro-range SMR's

ASPECT	LAST ENERGY	eVINCI
Toepassing	Elektriciteit en proceswarmte (tot 300 °C) [10]	Elektriciteit en proceswarmte. Ontwikkeld om in afgelegen gebieden gebruikt te worden [10]
Vermogen (MWth)	73 per module [10]	7-12 [10]
Vermogen (MWe)	22 per module [10]	2-3,5 [10]
Techniek	<ul style="list-style-type: none"> • Drukwaterreactor (PWR met 1 primaire loop) [10] • Splijtstoftype: standaard LWR splijtstof (UO₂ tabletten) [10] • Verrijking: <4,95% [58] • Koelmiddel: licht water • Moderator: licht water 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Heat pipe</i>-gekoelde reactor [10] • Splijtstoftype: TRISO-UCO (Uranium Oxycarbide) splijtstof [10] • Verrijking: HALEU (zie Definities) 5% - 19,75% [10] • Koelsysteem: warmtepijpen • Moderator: metaalhydride
Flexibiliteit	Niet gevonden in openbare bronnen	<i>Load following</i> mogelijk [10]
Fuel cycle (front- and back-end)	<p>Splijtstofcyclus: 72 maanden, 3 maanden wissel [58]</p> <p>Opslag: <i>on-site</i> tot einde levensduur [10]</p>	<p>Splijtstofcyclus: 96-120 maanden [59] [60]</p> <p>Gehele microreactor wordt voor refueling teruggebracht naar de fabriek, waar óf de splijtstofwissel plaatsvindt óf de unit klaar wordt gezet voor opslag [61]</p>

Last Energy SMR

Last Energy's SMR heeft een door de IAEA gerapporteerd thermisch vermogen van 73 MWth en elektrisch vermogen van 22 MWe [10]. Een *one-pager* van Last Energy zelf rapporteert echter vermogens van respectievelijk 60 MWth en 20 MWe [58].

eVinci SMR

De eVinci microreactor is ontworpen door Westinghouse om te voldoen aan de gespecialiseerde energiebehoeften van de gedecentraliseerde markt. Het is een transporteerbare energiegenerator die volledig in de fabriek is gebouwd, gevuld en geassembleerd en die gecombineerde elektriciteit en proceswarmte van respectievelijk 5 MWe en tot 13 MWth, met 8+ jaar volledige operationeel voordat splijtstof gewisseld hoeft te worden. Het ontwerp is bedoeld om de mogelijkheid voor snelle *load following* te bieden en om gebruikt te worden als een nucleaire batterij (dat wil zeggen een klein nucleair energiesysteem dat niet is aangesloten op een gecentraliseerd net) [59].



2.2 INPASSING EN OMGEVING

Tabel 2.2: Inpassing en omgeving voor micro-range SMR's

ASPECT	LAST ENERGY	eVINCI
Ruimtelijke inpassing	<ul style="list-style-type: none">• Site (hek): 52.600 m² [58]• Site (gebouw): circa 2.023 m² [10]	<ul style="list-style-type: none">• Site (vaste installatie): 2.400 m² [60]
Koeling	Luchtgekoeld [58]	Warmteafvoer naar de buitenlucht (via <i>heat pipes</i>) [61]
Koppeling met elektriciteitsnet	Afstand tot elektriciteitsnetwerk tot 10 kilometer mogelijk [58]	Primair bedoeld voor koppeling aan lokaal <i>microgrid</i> [61]

Last Energy SMR

Het nucleaire eiland zit onder de grond, met de *balance of plant* erboven [10]. Het landgebruik wordt efficiënter als er meerdere modules op één locatie worden neergezet, tot circa 202.300 m² voor 10 modules [58].

De warmteafvoer naar de omgeving is luchtgekoeld. Hiervoor is relatief weinig water nodig (< 0,5 liter per seconde) [58].

eVinci SMR

Heat pipes werken in een passieve modus bij relatief lage drukken. Elke individuele *heat pipe* bevat slechts een kleine hoeveelheid werkend medium, die volledig is omgeven door een afgesloten metalen buis. *Heat pipes* transporteren eenvoudig warmte van de *in-core* 'evaporator' naar de *ex-core* condensor met behulp van een continue interne, isotherme stroom van damp-, dan wel vloeistof [61].



2.3 PLANNING EN RANDVOORWAARDEN

Tabel 2.3: Planning en randvoorwaarden voor micro-range SMR's

ASPECT	LAST ENERGY	eVINCI
Planning	2025-2026: eerste geplande inbedrijfstelling [10] [62]	2025: geplande commerciële inzet [63]
Duur van de bouw tot commissioning	FOAK: zie planning hierboven NOAK: 24 maanden [58]	FOAK: zie planning hierboven NOAK: installatietijd van 30 dagen [64]
Vergunningsfase (internationaal)	<i>Pre-licensing</i> : in 2022 met vier regelgevende instanties in gesprek [10]	<i>Pre-licensing</i> : NRC en CNSC [32] 2022: 24 technische whitepapers ingestuurd bij de NRC [65]
Veiligheidskenmerken	<i>Gesplitst hieronder</i>	
• Actief/passief	Combinatie van actieve en passieve systemen uit ervaring van eerdere PWR's [10] Passief [10]: • Afvoer vervalwarmte	Inherent [61] [66]: • Automatische inzet van regelstaven Passief [61] [66]: • Afvoer vervalwarmte • Heat pipes • Injectie van neutronen absorberende materialen in de kern
• Kernsmeltfrequentie (en/of insluiting gerelateerde kenmerken)	Kernsmeltfrequentie < 10 ⁻⁷ per reactorjaar [10]	Niet gevonden in openbare bronnen
• Autarkietijd	Niet gevonden in openbare bronnen	Niet gevonden in openbare bronnen
Security and safeguards	Wordt ingericht volgens internationale richtlijnen/eisen (IAEA)	Module autonoom gecontroleerd: Controlekamer niet specifiek nodig en module afgesloten geïnstalleerd [10]
Keten	Design gebruik alleen componenten uit de nucleaire en conventionele industrie die al beschikbaar zijn [58]	Ontwerper beschikt over grote productieketen nucleaire componenten; ook wordt gebruikgemaakt van de keten voor ruimtevaarttechnologie [64]
Kosten (LCOE of OCC)	OCC: €4.000 - 5.200 per kWe (2023) [67] [68]	LCOE: €260 per MWh (2021) [69]

Last Energy SMR

In juli 2022 is er een *letter of intent* ondertekend tussen Legnica Special Economic Zone (LSEZ, Polen) en DB Energy om in Polen tien SMR's van Last Energy neer te zetten met een gecombineerd vermogen van 200 MWe [62]. In juli en november 2022 zijn er ook concrete plannen opgesteld met respectievelijk Roemenië en het Verenigd Koninkrijk [62] [70].

De Last Energy SMR is specifiek ontwikkeld om alleen bestaande PWR en andere standaard (non-)nucleaire componenten te gebruiken [58].

eVinci SMR

De reactor maakt warmteafvoer mogelijk door geleiding naar de buitenste delen van de reactor die een passieve warmteoverdracht toestaan naar de omringende atmosfeer (lucht). De ontwerplevensduur is 40 jaar [64].

LANL en Westinghouse kregen in 2018 van het Amerikaanse ministerie van Energie (DoE) een \$1,5 miljoen project om een FOAK *heat pipe* te ontwerpen en te fabriceren [64].



2.4 ORGANISATIE EN ERVARING

Tabel 2.4: Organisatie en ervaring voor micro-range SMR's

ASPECT	LAST ENERGY	eVINCI
NL vertegenwoordiging	Geen	Geen
Track record	Last Energy opgericht in 2020 [71]	Westinghouse decennialange ervaring in de nucleaire industrie. Daarnaast voor de compactheid ook ervaring uit de ruimtevaart [64]
Omvang	51-100 werknemers [72]	9.000 werknemers [64]
Supply chain volwassenheid	Door het gebruik van bestaande componenten, zijn er voldoende bedrijven wereldwijd beschikbaar voor levering [58]	FOAK <i>heat pipe</i> in concrete ontwikkeling sinds 2018, daarna FOAK reactor [63] [64]

Last Energy SMR

Opgericht vanuit de “Energy Impact Center” (EIC) in 2020 met dezelfde oprichter. Ze hebben alle twee als doel kernenergie een grotere rol te laten spelen in de energiemix. Last Energy heeft geen eerdere ervaring in de nucleaire industrie [71]. Er wordt geen exacte omvang gegeven van Last Energy, maar een schatting is tussen de 50 en 100 werknemers [72].

Last Energy neemt verantwoordelijkheid voor het ontwerp tot en met operatie en onderhoud [71]. Aangezien de SMR alleen bestaande nucleaire en industriële componenten gebruikt, is er al een wereldwijde *supply chain* aanwezig, waarmee Last Energy honderden bedrijven ter beschikking heeft [58] [71].

eVinci SMR

De ontwikkelingstijdlijn van de Westinghouse eVinci Micro Reactor is afgestemd op het vervullen van de vereiste uit de 2019 NDAA om voor 2027 een microreactor te demonstreren voor het aandrijven van kritieke Amerikaanse installaties met behulp van de NDU of een commerciële proefeenheid [63]. Daarvoor is eerst een project opgezet om een FOAK *heat pipe* te fabriceren [64].



2.5 RESUMÉ

De beschouwde SMR's worden hier samengevat op basis van de aspect-kenmerken die in bovenstaande tabellen zijn gehanteerd.

Toepassing en techniek

1. De twee ontwerpen onderscheiden zich niet direct van elkaar in toepassing (elektriciteit/proceswarmte) en vraag gestuurde (*load-following*) bedrijfsvoering. De inzet van deze micro-range reactoren is vooral in de gedecentraliseerde markt met veel langere splijtstofcycli vergeleken met conventionele grote reactoren. De capaciteit van Last Energy (22 MWe) is 6-10 keer groter dan van eVinci.
2. Last Energy maakt gebruik van standaard LWR (UO₂) splijtstof met waterkoeling/moderatie, eVinci maakt gebruik van TRISO-UCO splijtstof met hogere verrijking dan standaard UO₂ en koelt op basis van warmtepijpen.
3. De ontwerpen onderscheiden zich van elkaar wat betreft splijtstofwissel: Last Energy heeft een splijtstofwisselperiode, de eVinci unit wordt getransporteerd naar een splijtstofwisselfaciliteit.

Inpassing en omgeving

1. De micro reactoren nemen vergeleken met de lichtwatergroep per opgewekt MWe (veel) meer ruimte in. Beide installaties nemen een vergelijkbare oppervlakte in (2.000-2.500 m²). eVinci is in principe bedoeld als een 'transporteerbare energie-generator' waarbij de unit wordt ingepast en geen sprake is van een nucleaire site. Last Energy vergt meer ruimte en gebruikt een eigen site.
2. Voor de uiteindelijke warmte-afvoer naar de omgeving is voor beide concepten geen rivier, meer of zee nodig.
3. Het eVinci concept is duidelijk bedoeld voor lokale inpassing en is toegerust op koppeling aan een micro-grid. Specifieke informatie over netkoppeling van Last Energie ontbreekt.

Planning en randvoorwaarden

1. De beoogde planning voor inbedrijfstelling/commerciële inzet van beide ontwerpen is rondom 2026. De beide concepten onderscheiden zich van elkaar wat betreft realisatie: voor Last Energy is sprake van een bouwtijd van 24 maanden, eVinci hanteert een installatietijd, zijnde 30 dagen. De kosten bedragen respectievelijk 4.000 tot 5000 € per kWe (OCC) en 260 € per MWh (LCOE) en laten zich derhalve, gezien de beschikbare gegevens en verschil in vermogens en daarmee toepassing, moeilijk vergelijken. Beide ontwerpen zijn nog niet vergund en bevinden zich in vergunningsvoortrajecten.
2. Beide ontwerpen maken gebruik van passieve veiligheidssystemen/-principes, alleen Last Energy heeft enige actieve PWR-veiligheidssystemen. Er is nog weinig te zeggen over probabilistische veiligheidskennalen (geen PSA, alleen afschatting kernsmeltfrequentie) en personeelsingrijpen bij ongevallen.
3. Beide ontwerpen maken gebruik van bestaande productieketens uit conventionele- en nucleaire industrie. eVinci maakt ook gebruik van ruimtevaart-technieken.

Organisatie en ervaring

Last Energy heeft geen directe ervaring in de nucleaire industrie en is geen leverancier. De organisatie is van beperkte omvang (tot circa 100 medewerkers). De ontwikkelaar van eVinci, Westinghouse is een grote organisatie (~9000 medewerkers) met veel ervaring in bouwen, produceren en bedrijven van nucleaire installaties.



Realisatie Micro-range SMR's in Nederland

Last Energy SMR (een LWR) bevindt zich in de *pre-licensing* fase en verwacht de bouwer in 2026 een FOAK SMR op te leveren. Op basis van de minimale doorlooptijd van het vergunningsproces in Nederland (circa drie jaar, [Sectie II.c](#)) en de geschatte bouwtijd door de leverancier van een NOAK SMR van circa 2 jaar ([Sectie 1.3](#)), volgt een minimale doorlooptijd van circa 5 jaar voor de vergunning en bouw van een NOAK Last Energy SMR in Nederland. De toegepaste/geïntegreerde technologie dient hiervoor voldoende bewezen/volwassen te zijn en tevens dienen de nodige voorzieningen (onder andere financiering, toeleveringsketen, expertise en capaciteit) in toereikende mate beschikbaar te zijn. De organisatie achter Last Energy is van beperkte omvang en heeft nog geen grote *track record* in de nucleaire industrie en is zelf geen leverancier van de installatie.

De eVinci SMR bevindt zich eveneens in de *pre-licensing* fase, de bouwer verwacht in 2025 een FOAK SMR op te leveren. Deze SMR gebruikt metaalhydride als koelmiddel waarmee qua vergunningverlening minder ervaring is in Nederland (commerciële bedrijfservaring met deze technologie ontbreekt); het doorlopen van het vergunningsproces in Nederland kan daardoor langer duren dan voor het vergunningsproces van een lichtwater SMR. De door de leverancier geschatte bouwtijd op locatie voor een NOAK SMR bedraagt circa 30 dagen (exclusief fabricagetijd, niet gespecificeerd). Door toedoen van de innovatieve aspecten in het vergunnings-traject neemt de onzekerheid in de planning toe (minimaal 3 jaar bij LWR's) en zal voor de bouw en vergunning van een NOAK minimaal 4-5 jaar bedragen, waarbij op dit moment voor de daadwerkelijke realisatietijd waarschijnlijk meer tijd benodigd is in verband met het ontbreken van relevante commerciële bedrijfservaringen met reactoren die dit koelmiddel en deze innovatieve koelingstechnologie hanteren.



3. Gesmoltenzout SMR's

Dit hoofdstuk betreft de beschouwing van de drie geselecteerde gesmoltenzout SMR's, te weten het Nederlandse concept Thorizon, de Amerikaanse Kairos Power FHR en de Canadese IMSR.

Thorizon

Thorizon is een AMR met een modulair netto elektrisch vermogen van 100 MW tot 300 MW, gebaseerd op een gesmoltenzoutreactor met flexibele splijtstofmogelijkheden van op korte termijn uranium en als lange termijn doel thorium en LWR-plutonium of ander afval. De AMR wordt ontwikkeld door het Nederlandse bedrijf Thorizon. Innovatieve ontwerpkenmerken zijn onder andere modulaire technologie waarbij de reactor uit subkritische modules ontstaat die individueel verwijderd en vervangen kunnen worden en alleen samen kritisch kunnen zijn. Dit maakt innovatie en vervanging tijdens bedrijf mogelijk, wat een oplossing biedt voor het materiaaldegradatievraagstuk bij gesmoltenzoutreactoren. Met betrekking tot nucleaire veiligheid omvat het ontwerp per module een elektrische pomp die het zout met splijtstof omhoog in de kritische zone pompt, waardoor bij stroomverlies de reactor automatisch subkritisch wordt.

Kairos Power FHR

De Kairos Power FHR (KP-FHR) is een AMR met een netto elektrisch vermogen van 140 MW, gebaseerd op een mix van een gesmoltenzoutreactor en reactoren op basis van TRISO-splijtstofelementen (zie [Definities](#)). De AMR wordt ontwikkeld door het Amerikaanse bedrijf Kairos Power. Innovatieve ontwerpkenmerken zijn onder andere het gebruik van bolvormige TRISO-splijtstofelementen, waarmee de reactor continu wordt bijgevuld, met als koelmiddel een gesmoltenzout in tegenstelling tot een gas in andere ontwerpen rondom TRISO-splijtstofelementen. Een gesmoltenzout als koelmiddel betekent dat normale operatie op lage druk gedaan kan worden. Andere kenmerken met betrekking tot nucleaire veiligheid zijn een relatief klein overschot aan reactiviteit en de eliminatie van de kans op een kernsmelt, als gevolg van het gebruik van TRISO-splijtstofelementen en het continu bijvullen daarvan.

IMSR

IMSR is een AMR met een totaal netto elektrisch vermogen van 195 MW en wordt ontwikkeld door het Canadese Terrestrial Energy. De AMR is gebaseerd op een integrale gesmolten zoutreactor (iMSR) met een drukvrije behuizing. Innovatieve ontwerpkenmerken zijn onder andere de direct in het reactordrukvat geïntegreerde gesmolten zoutpomp en primaire warmtewisselaar, het gebruik van een grafiet-moderator en de complete vervanging van het reactorvat na 7 jaar. Met betrekking tot nucleaire veiligheid omvat het ontwerp passieve koeling via natuurlijke circulatie.



3.1 TOEPASSING EN TECHNIEK

Tabel 3.1: Toepassing en techniek voor gesmoltenzout SMR's

ASPECT	THORIZON	KAIROS POWER FHR (PEBBLE-FUEL-IN-SALT)	IMSR
Toepassing	Elektriciteit en proceswarmte [10] Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. waterstofproductie) [10]	Vooral elektriciteit. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. waterstofproductie). Doel is om kostencompetitief te zijn met gascentrales [10] [73]	Elektriciteit en proceswarmte [10] Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. waterstofproductie)
Vermogen (MWth)	100-300 [10]	320 [10]	442 per module [10]
Vermogen (MWe)	40-120 [10]	140 [10]	195 per module [10]
Techniek	<ul style="list-style-type: none"> • Gesmoltenzoutreactor met modulaire kern [10] • Splijtstoftype: flexibel, maar LWR-plutonium en thorium als einddoel [10] • Koelmiddel: gesmolten zout • Moderator: grafiet 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluoride zoutgekoelde hoge-temperatuur korrelbedreactor (FHR) [10] • Splijtstoftype: bollen (d 40 mm [74]) die duizenden kleine bolletjes splijtstof bevatten (d 1 mm; grafiet met gecoate uranium) (TRISO) • Verrijking: 19,75% • Koelmiddel: Li_2BeF_4 (Flibe) • Moderator: grafiet 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluoride zoutgekoelde hoge-temperatuurreactor [10] • Splijtstoftype: UF_4 gemixt met een bijna-eutectische zoutmix [10] • Verrijking: < 5% [10] • Koelmiddel: gesmolten zout • Moderator: grafiet
Flexibiliteit	Aantal modules kan variëren van 3-7 (huidig design), waarbij elke module individueel kan worden vervangen [10] [75]	<i>Load following</i> mogelijkheid niet gevonden in literatuur	<i>Load following</i> is mogelijk: 50%-100% vermogen; 10% per minuut [76] Backup voor wind- en zonne-energie met warmte-opslag wordt als optie gegeven [10]
Fuel cycle (front- and back-end)	Splijtstofcyclus: 60-120 maanden [10] Opslag: kernmodule in zijn geheel vervangen. Tijdelijke <i>on-site</i> opslag voor module. Daarna naar een afvalverwerkingsinstallatie voor het scheiden, zuiveren en recyclen van het zout [10]	Splijtstofcyclus: continu [10] Opslag: <i>on-site</i> in droge, interim opslag. Daarna naar recycling of geologische opslag [10]	Splijtstofcyclus: 84 maanden, daarna vervanging Core-unit [10] Opslag: De gebruikte splijtstof wordt gedeeltelijk hergebruikt. Verbruikte splijtstof wordt <i>on-site</i> opgeslagen totdat er een permanente locatie geïdentificeerd is [10]

Kairos power FHR

Kairos Power lijkt zich vooral te focussen op elektriciteitsproductie. Gezien de hoge systeemtemperaturen is het aannemelijk dat het ook voor onder andere proceswarmte ingezet kan worden.

Gebruikte TRISO-splijtstofelementen worden verpakt in *multi-purpose canisters* voor droge tussentijdse opslag, en daarna naar recycling of permanente geologische opslag [10].



3.2 INPASSING EN OMGEVING

Tabel 3.2: Inpassing en omgeving voor gesmoltenzout SMR's

ASPECT	THORIZON	KAIROS POWER FHR (PEBBLE-FUEL-IN-SALT)	IMSR
Ruimtelijke inpassing	Niet gevonden in openbare bronnen	Niet gevonden in openbare bronnen	Site (hek): 45.000 m ² [10] – 70.000 m ² [77] [78]
Koeling	Secundaire zoutcircuit Conventionele koeling: rivier/zee of koeltorens [10]	Conventionele koeling: rivier/zee of koeltorens [79] [80]	Maakt gebruik van warmteopslag [10]
Koppeling met elektriciteitsnet	Geen bijzonderheden gevonden in de literatuur	Geen bijzonderheden gevonden in de literatuur	Geen bijzonderheden gevonden in de literatuur



3.3 PLANNING EN RANDVOORWAARDEN

Tabel 3.3: Planning en randvoorwaarden voor gesmoltenzout SMR's

ASPECT	THORIZON	KAIROS POWER FHR (PEBBLE-FUEL-IN-SALT)	IMSR
Planning	<p>Project in vier fases opgedeeld [10]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2020-2022: conceptuele design • 2022-2025: definitief design • 2025-2030: zoutexperimenten • 2030-2035: start constructie 	<p>Interatief ontwikkelingsproces [81] [82]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2022: niet-nucleaire Engineering Test Unit afgerond • 2026: bouw Hermes demonstratiereactor • Derde stap: niet-nucleaire U-facility voor fabricage- en constructietest primaire systemen • Vierde stap: FOAK 	<ul style="list-style-type: none"> • 2026: benodigde vergunning compleet [10] • 2027: geplande start constructie [10] • 2031: geplande inbedrijfstelling voor de eerste IMSR [10]
Duur van de bouw tot commissioning	FOAK: 60 maanden, vanuit bovenstaande planning [10]	Niet gevonden in openbare bronnen	FOAK: 48 maanden, vanuit bovenstaande planning [10]
Vergunningsfase (internationaal)	<p><i>Pre-licensing</i>: ANVS [10]</p> <p>Lage druk en geen kans op drukescalatie kan ten goede komen aan de duur van de vergunningsaanvraag [75]</p>	<p><i>Application submitted</i>: NRC [32] [81]</p> <p><i>Construction license</i> voor demonstratiereactor "Hermes" eind 2023 verwacht [32]</p>	<p><i>Pre-application</i>: <i>pre-license</i> joint review door CNSC en NRC afgerond in juni 2022 [10] [83]</p>
Veiligheidskenmerken	<i>Gesplitst hieronder</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Actief/passief 	<p>Inherent [10]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Normale operatie op bijna-atmosferische druk <p>Passief [10] [75]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ontwerp met 7 modules, die elk subkritisch zijn • Kritische zone boven in de kern: reactor wordt subkritisch bij wegvallen van stroom 	<p>Inherent [10]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geen voorziening voor <i>make-up</i> koelmiddel nodig • Grote veiligheidsmarge • Normale operatie op bijna-atmosferische druk <p>Passief [10]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Afvoer vervalwarmte • Noodkoeling 	<p>Inherent [10]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Negatieve temperatuurscoëfficiënt • Normale operatie op bijna-atmosferische druk <p>Passief [10]:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Afvoer vervalwarmte
<ul style="list-style-type: none"> • Kernsmeltfrequentie (en/of insluiting gerelateerde kenmerken) 	Nog niet bepaald, maar zal in ieder geval onder de vergunningseis liggen [10]	Kernsmelt zeer onwaarschijnlijk geacht [10]	<p>Kernsmeltfrequentie niet van toepassing. Wel vermeld:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Loss of reactor vessel integrity</i>: $<10^{-5}$ per reactorjaar [10] • <i>Large release frequency</i>: $<10^{-6}$ per reactorjaar [10]
<ul style="list-style-type: none"> • Autarkietijd 	Niet gevonden in openbare bronnen	72 uur [10]	Niet gevonden in openbare bronnen



ASPECT	THORIZON	KAIROS POWER FHR (PEBBLE-FUEL-IN-SALT)	IMSR
Security and safeguards	Wordt ingericht volgens internationale richtlijnen/eisen (IAEA).	Tijdens iteratief ontwikkelingsproces focus op het volwassen maken van <i>security and safeguards</i> en designstrategie daarop aanpassen [84]	Wordt ingericht volgens internationale richtlijnen/eisen (IAEA).
Keten	Heeft met het MOlten SAIt Innovation ECosystem (MOSAIEC) ecosysteem – welk ook het Franse nucleaire recyclingbedrijf Orano bevat – een brede basis van vaardigheden en bestraalt tegelijkertijd kandidaat-materialen in de HFR [75]	Nucleaire deel: heeft een nucleair consortium gevormd met ervaren nucleaire partners in de VS en Canada (zie toelichting) [85] Warmte-afvoerende systemen: conventioneel [80] Splijtstof: voor Hermes reactor productie samenwerking met Los Alamos National Laboratory [86]	Verbeterd op eerdere SMR-ontwerpen en incorporeert recente innovaties, maar het is nog niet openbaar waar deze onderdelen vandaan gaan komen [77]
Kosten (LCOE of OCC)	Niet mogelijk een accurate schatting te geven (2023) [87]	LCOE FOAK: niet gevonden in literatuur LCOE NOAK: €45 per MWh (2020) [82]	LCOE FOAK: niet gevonden in literatuur LCOE NOAK: €45 per MWh (2023) [77]

Kairos power FHR

Doel is om LCOE competitief te maken met *natural gas combined cycle plants*, wat in 2020 een LCOE van €45 per MWh inhield [82].

Kairos Power heeft een consortium genaamd Kairos Power Operations, Manufacturing and Development Alliance (*Kairos-Power-OMADA*) opgezet om de geavanceerde nucleaire technologie voor de KP-FHR te ontwikkelen. Op dit moment zijn de leden: Bruce Power (Canada), Constellation (VS), Southern Company (VS) en Tennessee Valley Authority (TVA – VS) [85].



3.4 ORGANISATIE EN ERVARING

Tabel 3.4: Organisatie en ervaring voor gesmoltenzout SMR's

ASPECT	THORIZON	KAIROS POWER FHR (PEBBLE-FUEL-IN-SALT)	IMSR
NL vertegenwoordiging	Thorizon is een spin-off van NRG. Het werkt samen met onder andere NRG en EPZ binnen het MOSAIEC 'ecosysteem' [75]	Geen	Geen
Track record	Thorizon in 2018 opgericht [88] Het betrokken Franse Orano is wereldleider op het gebied van het recyclen van nucleair materiaal [75]	Kairos Power opgericht in 2016 [82] Demonstratieprojecten eerst in VS [89] [90]	Terrestrial Energy opgericht in 2013 [77] Bedrijf zelf is nu in het <i>pre-licensing</i> -traject en heeft geen eerdere directe ervaring bij de bouw van nucleaire installaties [91]
Omvang	10-15 medewerkers [10] [87] In 2022 €12,5 miljoen opgehaald voor het ontwikkelen van een nieuwe generatie NPP's [92] [88]	158 werknemers (2020) [82] In 2020 \$629 miljoen over zeven jaar van onder andere DoE, gedeeltelijk voor de bouw van Hermes [93]	120 werknemers [94]
Supply chain volwassenheid	In de eerste fase contact gelegd met bedrijven en instellingen die componenten kunnen leveren [75] De focus is echter eerst gedetailleerd design voordat de supply chain volledig gemaakt wordt.	Meerdere contracten: <ul style="list-style-type: none"> • Fabricage: drie [32] • Gesmoltenzout koelmiddel: samenwerking met Materion [95] • Splijtstof: in samenwerking met Los Alamos National Laboratory [86] 	Leveranciersconsortium bedrijven zoals BWXT, Siemens en Westinghouse [77] Er wordt nog gezocht naar splijtstofleveranciers [10]

Kairos power FHR

De TRISO-splijtstofelementen voor de demonstratiereactor Hermes zullen in samenwerking met Los Alamos National Laboratory in de Low Enriched Fuel Fabrication Facility (LEFFF) gefabriceerd worden [86].



3.5 RESUMÉ

De beschouwde SMR's worden hier samengevat op basis van de aspect-kenmerken die in bovenstaande tabellen zijn gehanteerd.

Toepassing en techniek

1. De drie ontwerpen onderscheiden zich van elkaar in toepassing: alleen Thorizon en IMSR kunnen naast elektriciteit ook proceswarmte leveren. De mogelijkheid voor proceswarmte wordt niet nadrukkelijk benoemd voor de Kairos Power FHR. De ontwerpen hebben uiteenlopende vermogens (40 – 195 MWe). Het is niet bekend of *load following* ook voor Thorizon en Kairos Power FHR mogelijk is. Thorizon onderscheidt zich door een reactorkern met module concept (een module kan in zijn geheel vervangen worden).
2. De splijtstofvormen zijn voor alle drie verschillend. Thorizon hanteert plutonium en thorium als einddoel, Kairos Power FHR hanteert splijtstof in de vorm van gecoate splijtstofbolletjes (wat doorgaans alleen gebruikelijk is voor hoge-temperatuurreactoren), en IMSR werkt met een eutectische zoutmix. IMSR heeft een verrijking van < 5%, de verrijkingsgraad van het Kairos Power concept ligt daarboven (19,75%). De duur van de splijtstofcyclus ligt voor Thorizon en IMSR ver boven die van de huidige grote lichtwaterreactoren (namelijk vanaf 60 maanden). De cyclus voor Kairos Power FHR is continu (middels het constante uitwisselen van de splijtstofbollen).

Inpassing en omgeving

1. Op basis van de tabelgegevens kan alleen voor de IMSR gezegd worden dat deze vergeleken met de lichtwatergroep per MWe meer ruimte inneemt.
2. De warmte kan worden afgevoerd naar een rivier, meer of zee. Specifiek voor IMSR geldt dat er ook de mogelijkheid is voor (een combinatie van) warmteopslag, en warmteprocessen.

Planning en randvoorwaarden

1. De beoogde inbedrijfstelling voor IMSR is gepland rond 2031. Thorizon voorziet de start van de constructie in de periode 2030-2035. Kairos Power FHR start met de bouw van een demonstratiereactor in 2026, wanneer de bouw van de FOAK begint is niet bekend. De bouwtijd is geschat op 48 (IMSR) en 60 (Thorizon) maanden. De duur van de bouw van de Kairos Power FHR is niet bekend. De kosten voor een NOAK Kairos Power FHR en IMSR zijn geschat op 45 € per MWh (LCOE).

2. Alle drie de ontwerpen maken gebruik van passieve veiligheidssystemen/-principes. Er is nog niets/weinig bekend over probabilistische veiligheidskennallen (geen afgeronde PSA) en autarkietijden voor Thorizon en IMSR. Voor Kairos Power FHR geldt dat een kernsmelt niet mogelijk is, en een autarkietijd van 72 uur.
3. De toeleveringsketen voor alle drie de concepten is in ontwikkeling. Voor Kairos Power FHR geldt dat zij voor het nucleaire deel, evenals de splijtstof, in Noord-Amerika samenwerkingsverbanden zijn aangegaan. Voor de overige concepten zijn geen gedetailleerde gegevens bekend.

Organisatie en ervaring

Thorizon is een kleine organisatie (15 medewerkers) maar werkt met diverse internationale partijen samen, diverse contacten zijn gelegd met betrekking tot componentleveranties. Kairos Power is opgericht in 2016 (160 medewerkers). De eerste demonstratiereactor zal in de VS gerealiseerd worden, dat deels door het ministerie van Energie wordt gefinancierd. Het bedrijf heeft geen ervaring met de bouw van nucleaire installaties. IMSR wordt ontwikkeld door Terrestrial (120 medewerkers) en heeft geen ervaring met de bouw van nucleaire installaties maar heeft een leveranciersconsortium opgesteld in 2021.

Realisatie gesmoltenzout SMR's in Nederland

De gesmolten zout SMR's in deze groep gebruiken niet-LWR technieken, hiermee is in Nederland geen/beperkt ervaring met vergunningverlening. Daarnaast zijn de ontwerpen momenteel niet voldoende volwassen/ontwikkeld (inclusief het voldoende aantonen van de veiligheid) en/of is niet voldoende informatie gevonden over de duur van de bouw en/of is niet voldoende informatie gevonden over de track record (ervaring) van de leverancier. Gezien het stadium waarin deze concepten zich bevinden en de daarmee samenhangende onzekerheid, kan geen goede inschatting gegeven worden ten aanzien van de doorlooptijd voor het vergunningsproces en de bouwtijd van een gesmolten zout SMR in Nederland.



4. Diverse geavanceerde SMR's

Dit hoofdstuk betreft de beschouwing van de vier geselecteerde diverse geavanceerde SMR's, te weten het Chinese concept HTR-PM, de Amerikaanse concepten Westinghouse LFR, Natrium en Xe-100.

HTR-PM

De HTR-PM is een Modular pebble bed High Temperature Gas cooled Reactor ontwikkeld door het Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua Universiteit, China. Het betreft een demonstratie-unit voor elektriciteitsproductie. De HTR-PM bestaat uit twee NSSS-modules gekoppeld aan één stoomturbine van 210 MWe, elk met onafhankelijke beveiligingssystemen en gedeelde niet-veiligheids-hulpssystemen. Elke NSSS-module bevat een reactor met een reactordrukvat, een stoomgenerator en een heetgaskanaal (helium). De HTR-PM is inmiddels in China vergund en operationeel.

Westinghouse LFR

De Westinghouse Lead Fast Reactor (LFR) is een loodgekoelde, snelle reactor werkzaam bij hoge temperaturen in een 'poolconfiguratie'. Het concept beschikt over inherente veiligheidskenmerken door onder meer de fysische eigenschappen van lood (hoog kookpunt) waardoor bedrijfsvoering onder praktisch atmosferische omstandigheden mogelijk is. Het ontwerp beschikt over een geïntegreerd energie-opslagsysteem, waarbij het reactorvermogen onveranderd blijft, ter behoeve van load following. Het vermogen bedraagt 300 MWe.

Natrium

Natrium is een AMR met een totaal netto elektrisch vermogen van 345 MWe, gebaseerd op een metaalgekoelde snelle reactor, waarbij het koelmiddel natrium is. Het wordt ontwikkeld door TerraPower en GE Hitachi. Innovatieve ontwerpkenmerken zijn onder andere de gescheiden architectuur van de kern en het stoomgeneratiesysteem, en de integratie van een energieopslagsysteem voor flexibele stroomvoorziening. Met betrekking tot nucleaire veiligheid omvat het ontwerp passieve koeling via natuurlijke convectie.

Xe-100

Xe-100 is een AMR met een modulair netto elektrisch vermogen van 82,5 MWe, gebaseerd op een hoge-temperatuur gasgekoelde reactor en wordt ontwikkeld door het Amerikaanse bedrijf X-energy. Innovatieve ontwerpkenmerken zijn onder andere het gebruik van bolvormige TRISO-splijtstofelementen (zie [Definities](#)), waarmee de reactor continu wordt bijgevuld, en helium als koelmiddel dat een hogere thermische efficiëntie mogelijk maakt. Met betrekking tot nucleaire veiligheid omvat het ontwerp een grote negatieve temperatuurcoëfficiënt en een relatief klein overschot aan reactiviteit, als gevolg van de mogelijkheid tot continue aanvulling van splijtstofelementen. Bovendien zou het gebruik van TRISO-splijtstof de kans op kernsmelt elimineren.



4.1 TOEPASSING EN TECHNIEK

Tabel 4.1: Toepassing en techniek voor diverse geavanceerde SMR's

ASPECT	HTR-PM (GASGEKOELD)	WESTINGHOUSE LFR (METAALGEKOELD)	NATRIUM (METAALGEKOELD)	XE-100 (GASGEKOELD)
Toepassing	Elektriciteit en proceswarmte. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. ontzilting en waterstof-productie) [10]	Elektriciteit. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. proceswarmte, ontzilting en waterstofproductie) [10]	Elektriciteit en proceswarmte. Geïntegreerd energieopslagsysteem om in te spelen op elektriciteitsvraag [96] [97]	Elektriciteit en proceswarmte. Inzet voor andere toepassingen mogelijk (bijv. ontzilting en waterstof-productie) [10]
Vermogen (MWth)	250 per module [10] Leverbare configuraties: 2 modules [10]	950 [10]	840 [32]	200 per module [10] Leverbare configuraties: 1 of 4 module(s)
Vermogen (MWe)	210 (2 modules) [10]	450 [10]	345 [98]	82,5 per module [10]
Techniek	Modulaire korrelbedreactor (HTGR); 2 onafhankelijke modules [10] <ul style="list-style-type: none">• Splijtstoftype: bollen (d 60 mm) die duizenden kleine bolletjes splijtstof bevatten (d 1 mm; grafiet met gecoate uranium) (TRISO)• Verrijking: 8,5%• Koelmiddel: Helium• Moderator: Grafiet	Loodgekoelde snelle reactor (LFR) [99] <ul style="list-style-type: none">• Splijtstoftype: Oxide (UO₂ of MOX)• Verrijking: < 20%• Koelmiddel: lood [10]• Moderator: geen (snelle spectrum) [99] Gebruik MOX-splijtstof is mogelijk in alternatief ontwerp [100]	Natriumgekoelde snelle reactor (SFR) [98] <ul style="list-style-type: none">• Splijtstoftype: metallisch UO₂ [32]• Verrijking: HALEU (5%-20%) [32] [101]• Koelmiddel: natrium [98]• Moderator: geen (snelle spectrum)	Hoge temperatuur gasgekoelde korrelbedreactor (HTGR) [10] [102] <ul style="list-style-type: none">• Splijtstoftype: bollen (d 60 mm) die duizenden kleine bolletjes splijtstof bevatten (d 1 mm; grafiet met gecoate uranium) (TRISO) [103] [104]• Verrijking: 15,5%• Koelmiddel: Helium• Moderator: Grafiet
Flexibiliteit	<i>Load following</i> is niet mogelijk [10] Alternatieve flexibiliteit wordt onderzocht [105]	<i>Load following</i> is mogelijk [99]: 65-125% (van nominaal vermogen); > 10% per minuut	<i>On-site</i> elektriciteitsopslag maakt 500 MWe voor 5,5 uur mogelijk [98]	<i>Load following</i> is mogelijk: 100-40% in 20 minuten [10] [106] Alternatieve 100-25-100% wordt onderzocht [107]
Fuel cycle (front- and back-end)	Splijtstofcyclus: continu [10] Opslag: gebruikt splijtstof in opslaggebouw [10] Opwerking mogelijk in normale opwerkingsfaciliteit. Hergebruik van splijtstofdeeltjes is een uitdaging [108]	Splijtstofcyclus: eenmalige cyclus met <i>single-batch</i> met lange levensduur [10] Opslag: gebruikte splijtstof na korte (90 dagen) koelperiode in speciaal ontwikkelde <i>cas</i> k [10] Gesloten kringloop mogelijk [10]	Splijtstofcyclus: duur onbekend [109] Opslag: <i>on-site</i> opgeslagen totdat er een permanente locatie geïdentificeerd is [101]	Splijtstofcyclus: continu [10] Opslag: <i>on-site</i> tot einde levensduur [10]



HTR-PM SMR

De werkingsmodus van de HTR-PM is gebaseerd op het continu laden en afvoeren van splijtstof: de splijtstofelementen vallen in de reactorkern vanuit de centrale laadbuis en worden afgevoerd via een afvoerleiding aan de onderkant van de kern. Wanneer een splijtstofbolletje de beoogde opbrand heeft bereikt wordt deze afgevoerd naar de opslagtank voor verbruikte splijtstof, zo niet wordt deze opnieuw in de reactor geplaatst om de kern opnieuw te passeren. Door dit principe wordt, vergeleken met NPP's met splijtstofcycli, van de HTR-PM een hoge(re) beschikbaarheid verwacht [10].

Het reactorvermogen bepaalt de turbinelast en de HTR-PM is daarom niet geschikt voor *load following* bij variabele vraag van het elektriciteitsnet. Specifieke strategieën voor *load following* bedrijf zijn ontwikkeld op basis van simulaties [105].

Westinghouse LFR SMR

De Westinghouse LFR is ontworpen om de belasting te volgen met behulp van een thermisch energieopslagsysteem. Dit maakt het mogelijk om het vermogen te variëren tussen 65% en 125% van de nominale uitvoer, terwijl de kern op volledige uitvoer wordt gehouden [99].

Xe-100

De splijtstof die wordt gebruikt in de Xe-100, TRISO-X, is een variant op de technisch bewezen TRISO-splijtstof. TRISO-X maakt gebruik van HALEU als kleine bolletjes splijtstof binnen de grotere bollen [110]. Er zullen 173 TRISO-X bollen per dag in (en uit) de reactor gaan [10].



4.2 INPASSING EN OMGEVING

Tabel 4.2: Inpassing en omgeving voor diverse geavanceerde SMR's

ASPECT	HTR-PM (GASGEKOELD)	WESTINGHOUSE LFR (METAALGEKOELD)	NATRIUM (METAALGEKOELD)	XE-100 (GASGEKOELD)
Ruimtelijke inpassing	Site (hek): 256.100 m ² (2 modules) [10]	Site (hek): 40.500 m ² [99] Oppervlakte gebouw: 4.650 m ² [99]	Site (hek): 178.000 m ² [101] Oppervlakte nucleaire eiland: 65.000 m ² [101]	Site (hek): 131.712 m ² (4 modules) [111]
Koeling	Conventionele koeling: rivier/zee of koeltorens	Hybride koeling, grootste warmte-afvoer via luchtgekoelde condensor [99]	Conventionele koeling: rivier/zee of koeltorens [101]	Conventionele koeling: rivier/zee of koeltorens Optie voor luchtkoeling [112]
Koppeling met elektriciteitsnet	Met Chinese elektriciteitsnet verbonden op 21 december 2021 (Status nu: vol vermogen, 2 modules) [113]	Netwerkkoppeling op 135% van nominale output; Voltage ~20kV; Frequency 50Hz-60Hz [99]	Geen bijzonderheden gevonden in literatuur	Geen bijzonderheden gevonden in literatuur

HTR-PM SMR

De voetafdruk van een HTR-PM/PM600 unit met meerdere modules verschilt niet significant van die van een PWR-module die hetzelfde vermogen genereert [10] [114].

Westinghouse LFR SMR

De LFR maakt gebruik van een hybride koelbenadering, waarbij het merendeel van de warmte wordt afgevoerd met behulp van een luchtgekoelde condensor en een kleine hoeveelheid jaarlijkse afwijzing wordt aangevuld met een bevochtigd oppervlaktekoeler of ACC-sproeisysteem. Dit resulteert in een zeer kleine hoeveelheid waterverdamping in vergelijking met conventionele watergekoelde installaties (<<1% jaarlijks op de meeste locaties) [99].

Natrium

De demonstratiereactor in Wyoming zal gebruik maken van een bestaande koeltoren van de kolencentrale die het zal gaan vervangen. Naar verwachting zal de reactor iets minder water gebruiken de voorgaande centrale [101].



4.3 PLANNING EN RANDVOORWAARDEN

Tabel 4.3: Planning en randvoorwaarden voor diverse geavanceerde SMR's

ASPECT	HTR-PM (GASGEKOELD)	WESTINGHOUSE LFR (METAALGEKOELD)	NATRIUM (METAALGEKOELD)	XE-100 (GASGEKOELD)
Planning	21 december 2021: Afgerond Demo/FOAK project [113] Vervolgproject: HTR-PM600 (600MWe) met 6 modules op 1 stoomturbine [10]	2030: geplande start constructie <i>full-scale</i> prototype [99]	2021: aangekondigd dat de eerste Natrium reactor in Wyoming komt [115] 2024: geplande start constructie [116] Eind decennium: eerste Natrium reactor operationeel [101]	2025: geplande start constructie [10] 2025: geplande <i>commissioning</i> en opstart van TRISO-X splijtstof splijtstof-faciliteit in Oak Ridge (VS) [117]
Duur van de bouw tot com-missioning	Demo/FOAK: 108 maanden [113] (Start bouw december 2012 [118]) NOAK: niet gevonden in literatuur	FOAK: niet gevonden in literatuur NOAK: < 36 maanden [99]	FOAK: 36-60 maanden (FOAK), niet expliciet genoemd [119] NOAK: niet gevonden in literatuur	FOAK: niet gevonden in literatuur NOAK: 54 maanden [111]
Vergunningsfase (internationaal)	<i>License to operate</i> : vergunning afgegeven op 20 augustus 2021 door NNSA [118]	<i>Pre-licensing</i> : in gesprek met regelgevende instantie VK [99]	<i>Pre-licensing</i> : NRC [32] [119]	<i>Pre-licensing</i> : NRC en CNSC [32]
Veiligheidskenmerken	<i>Gesplitst hieronder</i>			
• Actief/passief	Inherent [10]: <ul style="list-style-type: none"> Lage vermogensdichtheid Grote negatieve temperatuurs-coëfficiënt Kleine overreactiviteit Grote hittecapaciteit splijtstof-elementen Passief [10]: <ul style="list-style-type: none"> Afvoer vervalwarmte bij DBA Radioactieve inventaris in helium koeling is klein [10] Bij reactiviteitsincidenten/ LOCA weinig radioactiviteit vrij Noodmaatregelen niet nodig bij vrijkomen Helium koelmiddel 	Inherent [99]: <ul style="list-style-type: none"> Normale operatie op atmosferische druk Negatieve temperatuurscoëfficiënt Passief [99]: <ul style="list-style-type: none"> Afvoer vervalwarmte Twee <i>reactor shutdown safety trains</i> 	Inherent [101]: <ul style="list-style-type: none"> Normale operatie op atmosferische druk Negatieve temperatuurscoëfficiënt Passief [96]: <ul style="list-style-type: none"> Afvoer vervalwarmte 	Inherent [10]: <ul style="list-style-type: none"> Lage vermogensdichtheid Grote negatieve temperatuurscoëfficiënt Kleine overreactiviteit Passief [10]: <ul style="list-style-type: none"> Afvoer vervalwarmte
• Kernsmeltfrequentie (en/of insluiting gerelateerde kenmerken)	Kernsmelt zeer onwaarschijnlijk geacht [120]	Niet gevonden in openbare bronnen	Niet gevonden in openbare bronnen	Kernsmelt zeer onwaarschijnlijk geacht [10]
• Autarkietijd	Niet gevonden in openbare bronnen	72 uur [99]	Niet gevonden in openbare bronnen	Onbepaalde tijd (<i>indefinite</i>) [121]

ASPECT	HTR-PM (GASGEKOELD)	WESTINGHOUSE LFR (METAALGEKOELD)	NATRIUM (METAALGEKOELD)	XE-100 (GASGEKOELD)
Security and safeguards	Door de grootte van de splijtstofbol-len is het van belang een effectieve traceertechniek te implementeren [108] IAEA en CAEA zijn in 2019 een vierjarig samenwerkingsverband ingegaan [122]	Wordt ingericht volgens internationale richtlijnen/eisen; op dit moment specifiek die van het VK [99] [123]	Wordt ingericht volgens richtlijnen van de NRC. Herzien <i>Safeguards Information Security Program</i> in 2022 goedgekeurd [124]	Wordt ingericht volgens internationale richtlijnen/eisen (IAEA) [125]
Keten	Nucleaire deel: RPV <i>en internals</i> door Shanghai Electric Corporation; smeedstukken door Chinese nucleaire industrie [114] Warmte-afvoerende systemen: grotendeels conventioneel, moeilijkste onderdeel stoomgenerator [114] Splijtstof: fabriek in Baotou (China)	Nucleaire deel: Internationale samenwerking op gebied lood-technologie; diverse materiaal-ontwikkelingen door Westinghouse [99] Warmte-afvoerende systemen: superkritisch CO ₂ (sCO ₂) PCS door Westinghouse in ontwikkeling; door lage gereedheid wordt conventioneel PCS parallel meegenomen [99] [100] Splijtstof: commerciële levering van UO ₂ /MOX/advanced fuel [99]	Niet gevonden in openbare bronnen	Nucleaire deel: investering en contract met Doosan om belangrijke componenten te ontwikkelen en te leveren [126] Warmte-afvoerende systemen: conventioneel [104] Splijtstof: in samenwerking bezig met design, productie en vergunnen van TRISO-X splijtstof. Eigen TRISO-productie gepland voor 2025 [32] [117]
Kosten (LCOE of OCC)	OCC FOAK: €5.280 per kWe (2021) [127] OCC HTR-PM600: €2.260 per kWe (2021) [127]	OCC FOAK: niet gevonden in literatuur OCC NOAK: < €2.700 per kWe (2015) [99]	LCOE FOAK: niet gevonden in literatuur LCOE NOAK: €45-€55 per MWh (2022) [101]	LCOE FOAK: niet gevonden in literatuur LCOE NOAK: < €55 per MWh (2022) [112]

HTR-PM SMR

De vervalwarmte wordt passief verwijderd uit de kern onder alle ontworpen ongevalsomstandigheden door natuurlijke mechanismen, zoals warmtegeleiding of warmtestraling, en houdt de maximale splijtstoftemperatuur beneden 1620 °C. Hierdoor blijven bijna alle splijtingsproducten in de SiC-laag van de met TRISO gecoate splijtstofdeeltjes, wat de mogelijkheid van kernsmelting en grote lozingen van radioactiviteit in het milieu elimineert [120].

Binnen de *supply chain* van het warmte-afvoerende systeem is de stoomgenerator het moeilijkste onderdeel [114]. Dit komt omdat het een *helical coil* stoomgenerator

betreft: de productie van dit soort stoomgeneratoren is uitdagend vanwege de complexe geometrie en het vereiste gebruik van hitte- en corrosiebestendige materialen. Daarnaast zijn geavanceerde fabricagetechnieken nodig om de spiraalvormige buizen nauwkeurig te vormen en te verbinden.

Andere vermelde veiligheidskenmerken zijn: *Large Early Release Fraction* (LERF) ‘extremely low’; Effectieve dosis > 50mSv, < 1E-6 per jaar (per unit) [128].



4.4 ORGANISATIE EN ERVARING

Tabel 4.4: Organisatie en ervaring voor diverse geavanceerde SMR's

ASPECT	HTR-PM (GASGEKOELD)	WESTINGHOUSE LFR (METAALGEKOELD)	NATRIUM (METAALGEKOELD)	XE-100 (GASGEKOELD)
NL vertegenwoordiging	Geen	Geen (wel elders in Europa) [129]	Geen	Geen (wel elders in Europa) [130]
Track record	Demo/FOAK project in 2021 succesvol afgerond [113] Vervolgproject: HTR-PM600 (600MWe) met 6 modules op 1 stoomturbine [10]	Westinghouse heeft decennialange ervaring in de nucleaire industrie en werkt parallel aan de eVinci Micro-reactor en AP1000 PWR [129]	TerraPower opgericht in 2008 [115] Natrium technologie samen met GE Hitachi ontwikkeld [115]. GE Hitachi heeft decennialange ervaring in de nucleaire industrie en werkt parallel aan de BWRX-300 [101] [119] Demonstratieproject in Wyoming (VS) [116] MoU met JAEA, Mitsubishi Heavy Industries and Zuid Korea SK Group [32]	X-energy opgericht in 2009 [104] Demonstratieproject in Washington (VS) [131] Een mogelijk toekomstig project samen met Cavendish Nuclear gepland in Hartlepool (VK) [130] MoU's met meerdere partijen in de VS en Canada (zie toelichting), en Jordan Atomic Energy Commission [32]
Omvang	Betreft (omvangrijke) Chinese nucleaire industrie en kennis-instituten	9.500 medewerkers, 50 vestingen in VS, Europa en Azië [129]	251-500 werknemers [132] In 2020 initieel \$80 miljoen van de DOE voor de bouw van een FOAK [133]. Over zeven jaar is er ook \$1,23 miljard vrijgesteld [32]	400-500 werknemers [134] In 2020 \$80 miljoen van de DOE voor de bouw van een FOAK [135]
Supply chain volwassenheid	De Chinese industrie lijkt voldoende toegerust en ervaren om seriële SMR productie te kunnen bewerkstelligen [113]	Algemene samenwerking: Ansaldo Nucleare ten behoeve van synergie maximalisatie, testen vergunning-verlening en het afstemmen partner- en toeleveringsorganisaties [136] Testfaciliteiten: lood-testen in het VK, de VS, Italië en Roemenië [136]	Gedeelte supply chain van GE Hitachi en lokaal uit Wyoming [101] <ul style="list-style-type: none"> • Aannemer: Bechtel [137] • Academia en onderzoek: 5 [32] • Vergunning en operatie: Energy Northwest [32] • Splijtstof: samenwerking met Global Nuclear Fuel-Americas [138] • Actief op zoek naar gedeelte van supply chain [137] 	<ul style="list-style-type: none"> • Aannemers: 3 (zie toelichting) [139] • Designstudie: Doosan [140] • Implementatie: 4 (zie toelichting) [32] • Splijtstof: 3 (zie toelichting) [32] • Moderator: Amsted Graphite [32] • Supply chain ontwikkeling: SIMSA [141]



HTR-PM SMR

Het demonstratieproject/FOAK van de HTGR van het Chinese Institute of Nuclear and New Energy Technology. De technologie is in samenwerking met het Chinese (nucleaire) bedrijfsleven ontwikkeld. Na een succesvolle aansluiting op het elektriciteitsnet (in 2021 met één en in 2022 met twee modules) wordt nu de commerciële exploitatie beoogd van de multi-modulaire units van 200, 600 en 1000 Mwe [10] [113]. China verwacht na 2030 de HTR-PM600 in de markt te kunnen zetten [142].

Westinghouse LFR SMR

Westinghouse Electric Company en Ansaldo Nucleare hebben in 2022 een nieuwe samenwerkingsovereenkomst ondertekend om de volgende generatie kerncentrale te ontwikkelen op basis van loodgekoelde snelle reactor (LFR) technologie [136].

Natrium

Project voor demonstratiereactor wordt geleid door Bechtel, welke een groot deel van de leveranciersselectie zal gaan doen [137]. TerraPower en GE Hitachi werken samen met een aantal academische instellingen en onderzoekscentra, waaronder: North Carolina State, Oregon State, University of Wisconsin, Idaho National Laboratory en Argonne National Laboratory [32]. Energy Northwest biedt TerraPower hun ervaring en kennis aan op het gebied van vergunningen en reactoroperatie [32].

De HALEU splijfstof die gebruikt wordt in het ontwerp van de Natriumreactor is technisch bewezen, maar nog niet commercieel beschikbaar vanuit OECD landen [32].

In samenwerking met Global Nuclear Fuel-Americas zal TerraPower daarom een splijfstoffaciliteit bouwen naast een bestaande reactor van Global Nuclear Fuel-Americas in Wilmington, North Carolina [138].

Xe-100

X-energy is zowel in de VS als in Canada actief [131]. Het heeft het MoU's in de VS met Energy Northwest en Grant County Public Utility District, en in Canada met First Nations Power Authority, Millwright Regional Council of Ontario en Building Trades of Alberta [32]. Ook heeft het via een betrokken partij Cavendish Nuclear opstartende plannen in het VK [130].

Met betrekking tot de *supply chain* heeft X-energy een aantal partijen geselecteerd en gecontracteerd, waaronder: Zachry Group en Burns & McDonnell (aannemers);

Doorsan (designstudies); Ontario Power Generation, Southern Nuclear, Cavendish Nuclear en Kinectrics (implementatie); Amsted Graphite (moderator) en SIMSA (*supply chain* ontwikkeling) [32].

Voor het design, de productie en het vergunnen van de bolvormige TRISO-splijstf-elementen – in de Xe-100 TRISO-X splijststof – werkt X-energy onder anderen samen met MIT, Sargent & Lundy en Centrus [32]. In 2022 is het Horizon Center Industrial Park in Oak Ridge, Tennessee geselecteerd als bouwlocatie voor de TRISO-X splijststoffaciliteit [32] [117].

4.5 RESUMÉ

De beschouwde SMR's worden hier samengevat op basis van de aspect-kenmerken die in bovenstaande tabellen zijn gehanteerd.

Toepassing en techniek

1. Naast elektriciteitsproductie richten de ontwerpen zich ook op andere toepassingen, deze dienen zich nog nader uit te ontwikkelen. De mogelijkheid van *Load-following* is voor de gasgekoelde ontwerpen nog in ontwikkeling, voor de metaalgekoelde ontwerpen is dit mogelijk. De splijststoffen zijn anders dan de standaard LWR-splijststoffen, de verrijkingsgraad ligt voor alle vier tussen de 5% en 20%. De gasgekoelde reactoren maken gebruik van een moderator (remmen van de neutronen met grafiet), de metaalgekoelde reactoren niet (gebruik van niet geremde, snelle neutronen).
2. De gasgekoelde reactoren zijn modulair opgebouwd en hebben per reactormodule een vermogen van circa 100 MWe; meerdere reactormodules in een unit zijn op dit moment al mogelijk. De vermogens van de metaalgekoelde concepten liggen per reactor hoger (350-450 MWe).
3. De gasgekoelde concepten kennen een continu-proces op basis van toe- en afvoer van korrels. De metaalgekoelde concepten claimen een langdurige (langer dan LWR) cyclus met de mogelijkheid voor een gesloten kringloop (Westinghouse LFR), gegevens ontbreken echter.



Inpassing en omgeving

1. De ontwerpen zijn zeer uiteenlopend wat betreft het benodigd oppervlakte van de site. De HTR-PM (2 modules) neemt hierin per MWe de meeste ruimte in (1200 m² per MWe), gevolgd door Xe-100 (4 modules) en Natrium (respectievelijk 400 en 500 m² per MWe). Het Westinghouse LFR concept neemt een vergelijkbaar oppervlakte in als de Rolls-Royce SMR en de BWRX-300 (90 m² per MWe).
2. De uiteindelijke warmteafvoer vindt plaats middels koeling door zee, meer, rivierwater of lucht (Westinghouse LFR, optioneel voor Xe-100). Inzet van koeltorens (behalve Westinghouse LFR).
3. De ontwerpen zijn op het Europese elektriciteitsnet aan te sluiten. Voor Westinghouse LFR dient rekening gehouden te worden met tijdelijk grotere (125%) vermogensleveringen aan het net (in verband met het thermische energie-opslagsysteem).

Planning en randvoorwaarden

1. Natrium en Xe-100 starten rond 2025 de bouw, de bouwtijd voor deze concepten wordt geschat op respectievelijk 36-60 maanden (Natrium, FOAK) en 54 maanden (Xe-100, NOAK). De bouw van Westinghouse LFR start in 2030 en de bouwtijd wordt geschat op minder dan 36 maanden. De HTR-PM is inmiddels gebouwd (2021) en operationeel in China (een vervolg met 6 modules is inmiddels gaande). De opgegeven *Levelised Cost Of Electricity* (LCOE) voor een NOAK liggen voor Natrium en Xe-100 tussen €45-55 per MWh. De *Overnight Capital Cost* (OCC) voor de HTR-PM (FOAK) bedragen €5.300 per KWe, voor Westinghouse bedraagt dit voor een NOAK minder dan €2.700 per KWe.
2. De HTR-PM is in China vergund (bedrijfsvoering). De andere concepten bevinden zich in de *pre-licensing* fase met NRC/ONR.
3. Alle ontwerpen maken gebruik van passieve/inherente veiligheid(systemen). Voor Westinghouse LFR en Natrium is nog niets te zeggen over probabilistische veiligheidskennallen (geen PSA); Er wordt voor HTR-PM en Xe-100 een zeer onwaarschijnlijke kans op kernsmelt gemeld. De autarkietijd lijkt voor deze ontwerpen hoog (72 uur, niet alle gegevens bekend) of zelfs onbepaald (Xe-100).
4. Security en Safeguards aspecten worden meegenomen in alle ontwerpen op basis van internationale richtlijnen/eisen (IAEA, WENRA) en/of landencriteria (VS, UK, China).

5. De ontwerpen maken zoveel mogelijk gebruik van de bestaande (niet) nucleaire toeleveringsketens (met name HTR-PM). De drie in ontwikkeling zijnde concepten zijn thans bezig de keten op te bouwen, onder andere door internationale samenwerking en contractering.

Organisatie en ervaring

De HTR-PM is ontwikkeld in samenwerking met de Chinese nucleaire industrie. Een vervolg betreft commerciële exploitatie van meerdere multi-modulaire units (200, 400 en 1000 MWe). De Chinese industrie lijkt voldoende toegerust en ervaren om seriële SMR productie te kunnen bewerkstelligen.

De organisatie achter het Westinghouse LFR ontwerp is groot en heeft decennia-lange ervaring in de nucleaire industrie. Internationale samenwerking vindt plaats met betrekking tot lood-testen. De organisaties achter de ontwerpen Natrium (TerraPower) en Xe-100 (X-energy) zijn middelgroot (tot 500 medewerkers). Natrium werkt samen met het grote GE-Hitachi en beschikt zodoende over een grote bestaande *supply chain*. X-energy is actief in de VS en Canada en heeft voor haar *supply chain* inmiddels diverse partijen geselecteerd en gecontracteerd.

Realisatie geavanceerde SMR's in Nederland

De geavanceerde SMR's in deze groep gebruiken niet-LWR technieken, hiermee is in Nederland geen (of beperkte) ervaring met vergunningverlening. Daarnaast zijn de ontwerpen (behalve de Chinese HTR-PM) momenteel niet voldoende volwassen/ontwikkeld (inclusief het voldoende aantonen van de veiligheid) en/of is niet voldoende informatie gevonden over de duur van de bouw en/of is niet voldoende informatie gevonden over de track record (ervaring) van de leverancier. De HTR-PM wordt op dit moment niet aangeboden op de Nederlandse markt. Gezien het stadium waarin deze concepten zich bevinden en de daarmee samenhangende onzekerheid, kan geen goede inschatting gegeven worden ten aanzien van de doorlooptijd voor het vergunningsproces en de bouwtijd van een geavanceerde SMR in Nederland.



Uitgebreide samenvatting

ACHTERGROND

In het coalitieakkoord van het kabinet Rutte-IV is een stevige ambitie wat betreft de energietransitie aangekondigd. In 2050 moet Nederland klimaatneutraal zijn. Hierin past het streven om uiterlijk in 2035 de elektriciteitsproductie CO₂-neutraal te maken, waarbij kernenergie een belangrijke bijdrage kan leveren. Voor de huidige kabinetsperiode wil het kabinet de bouw van twee nieuwe kernreactoren voorbereiden.

Vanuit de overheid worden in dit kader nucleair-technologische ontwikkelingen met grote interesse gevolgd. Eén van de meest zichtbare daarvan is de komst van de zogenoemde kleine modulaire reactoren (Small Modular Reactors, SMR's).

In een recente inventarisatie door het IAEA⁴ werden ruim 80 types SMR's gedocumenteerd, maar er zijn meer types bekend. Ook de OECD NEA heeft recent een dergelijk overzicht geproduceerd⁵. Deze types verschillen qua toegepaste technieken, voorzien vermogen, toepassingen en splijstofstofcyclus. Er zijn echter ook grote verschillen qua reeds bereikte mijlpalen en marktrijpheid.

Enkele SMR's zijn reeds in bedrijf (in Rusland en China). Andere zijn al in detail uitgewerkt en hebben evaluaties ondergaan, uitgevoerd door de Bevoegde Gezagen in diverse landen. Aan het andere eind van het spectrum bevinden zich SMR's die nog conceptueel zijn.

DOELSTELLING

In opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft NRG|PALLAS de voorliggende marktanalyse SMR's uitgevoerd. Het doel hiervan is om een overzicht te krijgen van de algemene status van een selectie van 13 SMR's.

Het overzicht in deze marktanalyse kan dienen als basis voor zowel beleidsmakers als industrie om inschattingen te maken voor eventuele mogelijkheden in Nederland. De studie kan ook gezien worden als een verdiepende uitwerking van NRG's Whitepaper⁶ over SMR's.

In deze studie worden vooral technische en organisatorische aspecten beschouwd. Dat wil zeggen dat voor een aantal geselecteerde SMR's gestructureerd gekeken is naar de volgende aspecten:

- 1) Toepassing en techniek. Dit betreft zaken als techniek, vermogen, flexibiliteit en splijstofcyclus (*front-end* en *back-end*).
- 2) Inpassing in de omgeving. Hier is gekeken naar ruimtebeslag, koelbehoefte en koppeling met elektriciteitsnet.
- 3) Planning en randvoorwaarden. Dit omvat onder andere fase van ontwikkeling ontwerp, bouwtijd, vergunningsaspecten, veiligheidskenmerken, toeleveringsketen, *security & safeguards* en kostenparameters.
- 4) Organisatie en ervaring. Dit betreft kenmerken van de organisatie achter het SMR-ontwerp, zoals ervaring, omvang, beschikbare toeleveringsketen en eventueel ook Nederlandse vertegenwoordiging.

Deze aspecten zijn voor ieder reactortype in een uitgebreide set tabellen uitgewerkt op basis van data beschikbaar in openbaar toegankelijke bronnen.

⁴ *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to IAEA Advanced Reactor Information System (ARIS)*, IAEA, 2022

⁵ *The NEA Small Modular Reactor Dashboard*, OECD NEA, 2023

⁶ *Kleine modulaire kernreactoren (SMR): Kennisoverzicht van techniek en ontwikkelingen*, NRG, maart 2023



AFBAKENING

In de voorliggende studie is een selectie gemaakt van SMR's die binnen hun categorie relatief ver ontwikkeld zijn of waarvan op basis van *engineering judgement* wordt aangenomen dat ze in de Nederlandse context interessant kunnen zijn. De selectie moet echter niet als 'compleet' of 'definitief' gezien worden en kan op een later moment worden uitgebreid als daar aanleiding toe is.

Ook kan het na verloop van tijd nodig zijn de in dit rapport verstrekte informatie over reactortypes te actualiseren. Immers zullen reactorconcepten en -ontwerpen worden doorontwikkeld en zal er progressie zijn op gebied van certificering, vergunningverlening en realisatie van bouwprojecten.

Deze studie geeft geen financiële analyse van de beschouwde types. Wel worden bepaalde kosten zoals LCOE⁷ vermeld, zoals die uit beschikbare openbare bronnen (vaak die van de ontwikkelaars) bekend zijn.

Deze studie gaat niet in op financieringsmodellen voor kerncentrales. Het ministerie van EZK heeft al een studie daarnaar laten uitvoeren⁸. Hierin werd geconcludeerd, dat een financieringsmodel waarin verschillende partijen waaronder het Rijk, bouw- en marktrisico's beheersen en delen een randvoorwaarde is voor de nieuwbouw van kerncentrales.

SMR-TECHNIEK

De 'S' in SMR staat voor 'small'. De SMR's hebben een relatief klein vermogen vergeleken met gangbare grote kernreactoren, met elektrische vermogens van een paar MW tot meestal 300 MWe. De organisaties achter de diverse SMR's melden naast elektriciteitsproductie, ook toepassingen als levering van warmte, waterstofproductie en ontzilting. Een bepaalde categorie SMR's met heel kleine vermogens (tot enkele tientallen MW, micro-range) wordt wel gepresenteerd als oplossing voor gedecentraliseerde toepassingen, waarbij elektriciteit en warmte geleverd kunnen worden.

De 'M' van modulair in SMR kan verwijzen naar een modulair bouw- en fabricageproces, maar ook naar de combinatie van meerdere kernreactoren als modules in één gebouw ('*multi module unit*'). Deze aanpak kan het bouwproces vereenvoudigen naar complete fabricage van reactormodules in een fabriek en aanlevering van deze modules op de bouwplaats. En in sommige gevallen zelfs naar volledig vervangen van een reactormodule als er na langdurig gebruik, splijtstof moet worden vervangen ('splijtstofwissel'). Maar bij sommige types kan modulair ook verwijzen naar het kunnen plaatsen van meerdere reactormodules in één gebouw, soms met optie tot latere uitbreiding met meer modules.

De 'R' in SMR staat voor reactor. Er zijn veel verschillende SMR-reactorontwerpen, variërend van conventioneel tot geavanceerd en met variatie in splijtstof en koelmiddel. Het grootste deel heeft *light water* (H₂O) als koelmiddel. Dit worden *Light Water Reactors* (LWR) genoemd, waarvan de meeste in de subcategorie drukwaterreactor (PWR) vallen en minder vaak in de subcategorie kokendwaterreactor (BWR). PWR en BWR zijn technieken waarmee wereldwijd zeer veel ervaring is. Veel van de SMR's gebruiken ook het gangbare laag-verrijkte uraniumoxide als splijtstof. Maar er zijn ook ontwerpen die gebruik maken van hogere verrijkingsgraden of andere soorten splijtstof. Geavanceerdere SMR-reactortypes kunnen andere soorten koelmiddel gebruiken zoals gesmolten lood of gesmolten zout, waarbij in het laatste geval de splijtstof in het zout zit. Ook zijn er SMR's die bij zeer hoge temperaturen werken.

Bij veel SMR's is gestreefd naar compacte en vereenvoudigde ontwerpen. Met innovaties zoals passieve koelmechanismes met natuurlijke circulatie en gebruik van zwaartekracht voor injectie van koelmiddel. Maar soms ook een integraal ontwerp waarbij alle componenten van het primaire systeem in één vat worden gecombineerd.

Vanwege het kleinere vermogen ten opzichte van conventionele moderne kerncentrales, zal er bij storingsen veel minder restwarmte moeten worden afgevoerd. Hierdoor zijn de aanwezige passief veilige koelsystemen afdoende en zijn noodkoelvoorzieningen niet of minder noodzakelijk. Ook zal het ruimtebeslag van een SMR kleiner zijn dan van een grote kerncentrale⁹. Zie voor inpassing in de omgeving, de paragraaf in deze samenvatting over vergunningverlening.

⁷ LCOE: Levelized Cost Of Energy

⁸ Financing models for nuclear power plants, Baringa, September 2022

⁹ Dit geldt in absolute zin, niet in vermogen per oppervlakte



DE SELECTIE VAN BESCHOUWDE SMR'S

Afhankelijk van het doel van een analyse kan men SMR's op verschillende manieren indelen. In dit rapport is gekozen voor een indeling in de vier groepen, die hieronder gepresenteerd worden. Iedere groep heeft in het voorliggende rapport zijn eigen hoofdstuk gekregen, met daarin beoordeling van de bijbehorende reactortypes op de eerdergenoemde aspecten.

Groep 1: Lichtwater SMR's, Hoofdstuk 1

Dit zijn SMR's waarbij het koelmiddel 'light water' (H₂O) is. De gebruikte techniek is conventioneel en bekend uit bestaande kerncentrales. Ook kunnen de SMR's gebruikmaken van de bestaande splijtstofcyclus en uraniumoxide splijtstof met verrijking kleiner dan 5%. De vier geselecteerde SMR's zijn:

- NuScale, een concept waarbij 4 tot 12 PWR modules van 77 MWe gecombineerd kunnen worden in één reactorgebouw.
- Rolls-Royce SMR, een concept met 1 PWR module van 470 MWe.
- BWRX-300, een concept met 1 BWR module van 300 MWe.
- NUWARD, een concept met 2 PWR modules van 170 MWe in één reactorgebouw.

Groep 2: Micro-range SMR's, Hoofdstuk 2

Dit betreft twee SMR's met zeer klein vermogen.

- Last Energy, een concept met 1 PWR module van circa 70 MWth en 20 MWe en gebruik van minder dan 5% verrijkt uraniumoxide.
- eVinci, een concept van Westinghouse, een generatie IV mobiele reactor, 5 MWe of 13 MWth, verrijking 5 tot 19,75% (TRISO-UCO splijtstof).

¹⁰ MSR: Molten Salt Reactor

¹¹ Kritisch: in staat een nucleaire kettingreactie in stand te houden

Groep 3: Gesmoltenzout SMR's, Hoofdstuk 3

De gesmolten zout reactoren (MSR¹⁰) kunnen gerekend worden tot de geavanceerde reactorontwerpen.

- Thorizon, een MSR met vermogen tussen 100 en 300 MWe. De reactorkern bestaat uit subkritische modules, die alleen samen kritisch¹¹ kunnen zijn. De splijtstof is gebaseerd op thorium.
- Kairos Power FHR, een MSR van 140 MWe. Dit is tevens een snelle reactor met splijtstofkorrels in zout (*pebble-fuel-in-salt*), werkend bij hoge temperaturen.
- IMSR is een MSR van Terrestrial Energy met vermogen van 195 MWe. Na 7 jaar wordt het volledige reactorvat vervangen door een nieuw vat met verse splijtstof.

Groep 4: Diverse geavanceerde SMR's, Hoofdstuk 4

In deze groep zijn geavanceerde reactoren behandeld, niet zijnde gesmoltenzout-reactoren.

- HTR-PM, gasgekoelde hoge temperatuurreactor met splijtstofbollen die continu ververst worden. In China is een demo-installatie voor elektriciteitsproductie. Meerdere reactormodules zouden een stoomturbine moeten delen wat leidt tot 200, 600 of 1000 MWe.
- Westinghouse LFR, metaalgekoelde snelle reactor van 450 MWe. Kan gebruik maken van zeer uiteenlopende splijtstoffen.
- Natrium, een metaalgekoelde (natrium) snelle reactor van TerraPower en Hitachi van 345 MWe. Gebruikt metallische splijtstof.
- Xe-100, een gasgekoelde hoge-temperatuur reactor van 82 MWe per module, met splijtstofbollen die continu ververst worden. Een kerncentrale is opgebouwd uit 1 tot 4 modules.



VERGUNNINGVERLENING ALS BELANGRIJK DEEL- ASPECT VOOR PLANNING EN RANDVOORWAARDEN

De vergunningverlening bepaalt voor een deel de tijd die nodig is van concept tot realisatie (bouw). In het algemeen kan gesteld worden dat vergunningverlening minder arbeidsintensief zal zijn (en daardoor sneller kan verlopen), als de toegepaste technieken in een SMR-type reeds bekend zijn en/of bijvoorbeeld lijken op die van de huidige conventionele reactoren van generatie III en III+. Daarmee wordt namelijk goed aangesloten bij reeds in Nederland gebruikte regelgeving en standaarden.

Veel SMR-ontwerpen hebben passieve veiligheidskenmerken en sommigen zijn inherent veilig. Het kan het vergunningsproces voor dit soort nieuwe concepten – maar ook voor bekende – verder vergemakkelijken, als er al elders in de wereld uitgebreid is gekeken naar de veiligheidsaspecten van een ontwerp en een Bevoegd Gezag of certificerende instantie dit al transparant heeft beoordeeld – en het Nederlandse Bevoegd Gezag heeft kunnen meekijken.

Bovengenoemde twee gunstige eigenschappen van een ontwerp kunnen vergunningverlening mogelijk versnellen. Hiernaar wordt in de volgende paragraaf verwezen.

In het huidige stelsel onder de Kernenergiewet is het eisenpakket doelstellend en technologie-onafhankelijk beschreven. Daarmee wordt geen enkel reactorontwerp a priori uitgesloten. Op detailniveau kunnen regels wel technologie-specifieke eisen bevatten, zoals in handreikingen die de ANVS hanteert, alsmede in *safety guides* van het IAEA die vaak in vergunningen worden geïntegreerd (soms aangepast in NVR's¹²). Sommige ontwerpen van SMR's kunnen ook anders dan gebruikelijk omgaan met implementatie van bepaalde veiligheidsprincipes. Onder de huidige regelgeving en richtlijnen maakt dit de beoordeling van de toereikendheid van hun veiligheid arbeidsintensiever.

Als de vergunningaanvrager niet kan terugvallen op gebruikelijke regels en standaarden, is het aan de vergunningaanvrager om middels een bewijsvoering (met aanvullende veiligheidsanalyses e.d.) aan te tonen dat zijn ontwerp aan de wettelijk gestelde eisen voldoet.

Onder de Kernenergiewet zijn er geen bijzondere beperkingen aan het gebruik van de omgeving rond een kerncentrale. Aan de terreingrens van een nucleaire installatie gelden wettelijke eisen t.a.v. groepsrisico en individueel risico zoals vastgelegd in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse). Hierdoor is er ten aanzien van de veiligheid geen indirect ruimtegebruik buiten het terrein.

In het Landelijk Crisisplan Straling en Nucleair (2021) zijn er verschillende preparatiezones voor de kernreactoren met verschillende soorten maatregelen in geval van ongevallen. Deze leggen geen beperkingen op aan activiteiten binnen deze zones tijdens normaal bedrijf. Daarmee heeft het Crisisplan geen impact op het indirect ruimtegebruik van een reactor.

Vergunningaanvragers zullen het afval dat hun SMR's zullen gaan produceren moeten specificeren en met de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) bespreken hoe de afvoer en het beheer daarvan geregeld dient te worden.



ALGEMENE BEOORDELING MARKTINTRODUCTIE VAN DE BESCHOUWDE GROEPEN SMR'S

Van Groep 1 lichtwater SMR's, lijken alle types op het eerste gezicht de bovengenoemde gunstige eigenschappen voor mogelijke versnelling te hebben, die in de vorige paragraaf zijn genoemd.

In Groep 1 gaat het om de types NuScale, Rolls-Royce SMR, BWRX-300 en NUWARD. Deze hebben allen bekende PWR- en BWR-techniek, waar veel ervaring mee is. De NuScale reactor heeft een *Design Certificate* van de US-NRC, het Bevoegd Gezag in de Verenigde Staten. De Rolls-Royce SMR heeft in april 2023 de *General Design Assessment* (GDA) Step 1 in het Verenigd Koninkrijk afgesloten. De NUWARD-reactor wordt geëvalueerd door Bevoegde Gezagen uit drie landen: Frankrijk, Finland en Tsjechië. De BWRX-300 is in een *construction licence procedure* in Canada.

De planning van de Franse NUWARD reactor laat zien dat deze technisch gezien later beschikbaar zal zijn dan andere ontwerpen uit Groep 1: naar verwachting detailontwerp in 2030. Waarna bouw in Frankrijk van First Of A Kind (FOAK) kan beginnen. Van de andere reactoren in Groep 1 wordt verwacht dat hun FOAK in 2029 in bedrijf zal worden gesteld.

In Groep 2 micro-range SMR is de 'Last Energy', een concept met een PWR-module, met gunstige eigenschappen voor versnelling van het vergunningproces.

De Groepen 3 (gesmoltenzout SMR's) en 4 (diverse geavanceerde SMR's) hebben niet-LWR technieken waarmee qua vergunningverlening minder ervaring is in Nederland. Het is aannemelijk dat hun implementatie daardoor langer duurt.

Specifieke bevindingen Groep 1 – Lichtwater SMR's

Zoals hierboven gesteld hebben de LWR-reactoren van deze groep bekende PWR- en BWR-techniek en is er informatie uit diverse buitenlandse beoordelingstrajecten waarvan bij vergunningverlening in Nederland geprofiteerd kan worden.

Het NuScale ontwerp onderscheidt zich vooral qua modulaire techniek, met mogelijkheden van 4, 6 of 12 reactormodules in één reactorgebouw. NUWARD combineert twee reactormodules in één gebouw. De andere ontwerpen hebben één reactor per gebouw.

De reactoren onderscheiden zich niet wezenlijk van elkaar qua toepassing en allen zijn in staat *load-following* toe te passen. De vermogens variëren van 300 MWe (BWRX-300) tot 924 MWe (VOYGR-12, met 12 modules). Voor koeling zal doorgaans oppervlaktewater worden gebruikt.

De organisaties achter de ontwerpen van Rolls-Royce (Rolls-Royce Group), BWRX-300 (GE Hitachi) en NUWARD (onder andere EDF, Framatome) zijn groot (medewerkers en kapitaal), hebben veel nucleaire (bouw-) ervaring en eigen productiemiddelen en voorzieningen. NuScale is specifiek opgericht voor ontwikkeling van een SMR en richt zich op investeerders en maakt afspraken met de nucleaire en conventionele maakindustrie. Rolls-Royce werkt samen met het Nederlandse ULC Energy. GE heeft vestigingen in de Benelux. Alle organisaties gaan bij de ontwerpen uit van zoveel mogelijk gebruik maken van bestaande PWR/BWR toeleveringsketens.

De vier ontwerpen volgen een reguliere PWR- of BWR-splijtstofcyclus, waarbij standaard LWR-splijtstof gebruikt wordt en recycling van gebruikte splijtstof mogelijk is. De tijd tussen twee splijtstofwissels varieert van 12 tot 24 maanden.

Realisatie in Nederland

Voor de hier besproken LWR SMR's geldt dat hier gegeven schattingen voor doorlooptijd van het traject van vergunningverlening en bouw alleen gelden als:

- 1) toegepaste/geïntegreerde technologie voldoende bewezen/volwassen is om te beoordelen in een vergunningsproces én
- 2) de nodige voorzieningen in toereikende mate beschikbaar zijn (zoals financiering, toeleveringsketen, expertise en capaciteit. Een leverancier met voldoende kennis, ervaring (*track record*) en capaciteit in de toeleveringsketen is essentieel.

Als aan voornoemde voorwaarden voldaan is, volgt voor de vier LWR SMR's uit de analyse een minimale doorlooptijd van circa 7 jaar voor het traject van vergunningverlening en bouw van een NOAK SMR (*Nth of a Kind*).

Een uitgebreide beschouwing van de diverse aspecten voor Groep 1 is te vinden in hoofdstuk 1 van dit rapport.



Specifieke bevindingen Groep 2 - Micro-range SMR's

Zoals hierboven eerder gemeld, heeft de Last Energy gangbare PWR-technologie. Maar is nog geen *track record* qua realisatie. eVinci is een geavanceerde reactor, waarmee in Nederland weinig ervaring is, waardoor vergunningverlening mogelijk arbeidsintensiever kan zijn. Beide bouwers verwachten rond 2026 hun FOAK op te leveren.

De ontwerpen in Groep 2 onderscheiden zich niet direct van elkaar in toepassing (elektriciteit, warmte) en vraaggestuurde (*load following*) bedrijfsvoering. Wel is er een groot verschil qua site: Last Energy heeft een eigen site, terwijl eVinci als een mobiele oplossing naar de plaats van toepassing wordt getransporteerd. Beide ontwerpen zijn bedoeld voor decentrale toepassing.

Voor de warmteafvoer hebben deze microreactors geen oppervlaktewater nodig.

De organisatie achter Last Energy is van beperkte omvang en heeft nog geen grote *track record* in de nucleaire industrie, in tegenstelling tot Westinghouse, de organisatie achter eVinci.

Last Energy gebruikt gewone uraniumoxide splijtstof, eVinci gebruikt TRISO-UCO splijtstof met hogere verrijking. eVinci wordt in zijn geheel na 8 jaar naar een splijtstofwisselfaciliteit getransporteerd.

Een uitgebreide beschouwing van de diverse aspecten voor Groep 2 is te vinden in hoofdstuk 2 van dit rapport.

Realisatie in Nederland

Voor beide Micro-Range SMR's geldt dat hier gegeven schattingen voor doorlooptijd van traject van vergunningverlening en bouw alleen gelden als:

- 1) toegepaste/geïntegreerde technologie voldoende bewezen/volwassen is én
- 2) de nodige voorzieningen in toereikende mate beschikbaar zijn (zoals financiering, toeleveringsketen, expertise en capaciteit).

Als aan voornoemde voorwaarden voldaan is, volgt voor de Last Energy SMR (een LWR) uit de analyse een minimale doorlooptijd van circa 5 jaar voor het traject van vergunningverlening en bouw van een NOAK Last Energy SMR in Nederland.

Als voor de eVinci SMR ook aan voornoemde voorwaarden is voldaan, zal de doorlooptijd van het traject van vergunningverlening en bouw voor een eerste exemplaar minimaal 4 à 5 jaar bedragen. Weliswaar is de eVinci een heel kleine installatie, maar gebruikt metaalhydride als koelmiddel waarmee qua vergunningverlening minder ervaring is in Nederland. Het doorlopen van het vergunningsproces kan daardoor

langer duren dan voor het vergunningsproces van een lichtwater SMR. Door toedoen van de innovatieve aspecten neemt de onzekerheid in de planning van het vergunningstraject toe (traject is minimaal 3 jaar bij LWR).

Specifieke bevindingen Groep 3 - Gesmoltenzout SMR's

Groep 3 betreft de gesmoltenzoutreactoren oftewel *molten salt reactors* (MSR's). In diverse landen wordt dit type gezien als veelbelovende techniek vanwege aan aantal voordelen. MSR's worden bij hoge temperaturen bedreven wat gunstig is voor hun efficiëntie bij elektriciteitsproductie. Bovendien kan een MSR hoogwaardige warmte voor de industrie leveren en is dit type reactor bij uitstek geschikt voor het gebruik van thorium als brandstof. Ook werken ze bij lage drukken, wat de veiligheid bevordert. Wereldwijd, maar ook in Nederland, wordt veel onderzoek gedaan dat bijdraagt aan het verder brengen van de MSR-techniek.

Bij de beschouwde reactortypes gaat het om geavanceerde reactoren waarmee in Nederland nog weinig ervaring is qua vergunningverlening. Alle ontwerpen gebruiken passieve veiligheidssystemen en -principes. Maar er zijn nog weinig probabilistische kentallen beschikbaar voor een numerieke beoordeling van de veiligheid. De beoogde inbedrijfstelling van IMSR is gepland rond 2031. Thorizon verwacht bouw tussen 2030 en 2035. Kairos heeft nog geen concreet jaartal genoemd voor de bouw van de FOAK, maar wel voor de demonstratiereactor Hermes (planning 2026). De toeleveringsketen is nog in ontwikkeling. Op dit moment is het lastig doorlooptijd vergunningsproces en bouw in Nederland in te schatten.

Thorizon is een kleine organisatie die echter met diverse internationale partijen samenwerkt. Kairos Power is een middelgrote organisatie met geen eerdere ervaring met de bouw van nucleaire installaties. De eerste demonstratiereactor wordt echter wel deels ondersteund door de US Department of Energy (DOE). IMSR wordt ontwikkeld door Terrestrial dat geen nucleaire track record heeft maar wel een leveranciersconsortium.

Een uitgebreide beschouwing van de diverse aspecten voor Groep 3 is te vinden in hoofdstuk 5 van dit rapport.

Realisatie in Nederland

Gezien het stadium waarin deze concepten zich bevinden en de daarmee samenhangende onzekerheid, kan geen goede inschatting gegeven worden ten aanzien van de doorlooptijd voor het traject van vergunningverlening en bouw van een gesmoltenzout SMR in Nederland.



Specifieke bevindingen Groep 4 - Diverse geavanceerde SMR's

Groep 4 betreft een diversiteit aan uiteenlopende geavanceerde reactoren, die niet tot de groep van gesmoltenzoutreactoren behoren.

De HTR-PM is in China vergund, gebouwd en operationeel, een vervolg met 6 modules is aanstaande. De andere reactoren zijn allen nog in de *pre-licensing* fase via dialogen met het Bevoegd Gezag in de VS (US NRC) en het VK (ONR). Voor de Natrium en Xe-100 wordt gesteld dat de bouw van een FOAK in 2025 begint. De bouw van de Westinghouse LFR zou in 2030 moeten beginnen.

Alle ontwerpen maken gebruik van passief veilige en/of inherent veilige systemen. Bij HTR-PM en Xe-100 wordt geclaimd dat de kern niet kan smelten. Voor de Westinghouse LFR en de Natrium zijn nog geen probabilistische kentallen beschikbaar voor een numerieke beoordeling van de veiligheid. Daarnaast gaat het bij de beschouwde reactortypes om geavanceerde reactoren waarmee in Nederland nog weinig ervaring is qua vergunningverlening. Op dit moment is het lastig de doorlooptijd van het traject van vergunningverlening en bouw van deze reactoren in Nederland in te schatten.

Load-following is voor de gasgekoelde ontwerpen nog in ontwikkeling, voor de metaalgekoelde ontwerpen is dit reeds mogelijk. De splijtstoffen zijn anders dan de standaard LWR-splijtstoffen en ze hebben ook hogere verrijkingsgraden (5 – 20%). De gasgekoelde reactoren worden gemodereerd met grafiet, de metaalgekoelde reactoren zijn zogenoemde snelle reactoren en hebben geen moderator.

De Westinghouse LFR en Xe-100 gebruiken voor warmteafvoer oppervlaktewater dan wel lucht.

De HTR-PM is ontwikkeld in samenwerking met de Chinese nucleaire industrie. Deze lijkt voldoende ervaren om seriële productie van SMR's uit te voeren. De organisatie achter het Westinghouse LFR ontwerp heeft decennialange ervaring in de nucleaire sector. Terrapower van Natrium werkt samen met GE-Hitachi. X-energy van het Xe-100 concept is actief in de VS en Canada en heeft voor haar toeleveringsketen diverse partijen gecontracteerd.

Realisatie in Nederland

Gezien het stadium waarin deze concepten zich bevinden en de daarmee samenhangende onzekerheid, kan geen goede inschatting gegeven worden ten aanzien van de doorlooptijd van het traject van vergunningverlening bouw van een geavanceerde SMR in Nederland.



Definities

TERM	DEFINITIE
Duur v/d bouw	Feitelijke bouwtijd (FOAK, NOAK) tot <i>commissioning</i> (inbedrijfstelling).
Flexibiliteit	(Vrijwel directe) Aanpasbaarheid van het vermogen bij een veranderende vermogensvraag.
FOAK	Acroniem voor First of a Kind. Het wordt gebruikt in de technische economie, waar het eerste item of de eerste generatie items die een nieuwe technologie of ontwerp gebruiken, (veel) meer kan kosten dan latere items of generaties, die NOAK worden genoemd, een acroniem voor <i>Nth of a Kind</i> .
Fuel Cycle	Betreft het vervaardigen, (her)gebruik, verwerken en opslag van splijtstof.
HALEU	High-Assay LEU (Low Enriched Uranium) doelt op het gebruik van uranium met een verrijking van 5 tot 20%.
Keten	De keten rondom het ontwerp ten behoeve van realisatie (zoals aanleverketens, lokale bijdragen, afvalmanagement, ontmanteling).
Koeling	Op welke wijze(n) de geproduceerde warmte wordt afgevoerd naar de omgeving.
Kosten	Ingeschatte kosten per MWh (LCOE). Alle gemaakte kosten (installatie + bedrijfsvoering) voor (stroom)productie over de gehele levensduur van de installatie, gedeeld door de hoeveelheid geproduceerde elektriciteit (of bijvoorbeeld (proces)warmte) over de gehele levensduur van de installatie. <i>Overnight Capital Cost (OCC)</i> , de financiering die gemoeid is met de bouw van de complete installatie in een nacht per maximaal opgewekt vermogen (kWe).
Koppeling elektriciteitsnet	Mate van complexiteit (benodigdheden/gevolgen) voor koppeling aan het net.
NL vertegenwoordiging	Vertegenwoordiging in Nederland of een Nederlandse vestiging van de buitenlandse partij.
NOAK	Zie FOAK.
Omvang	Grootte van de aanleverende partij(en) in werknemersaantallen en/of financiële indicatoren.
Planning	Planning voor realisatie (inbedrijfstelling) van de SMR.
Ruimtelijke inpassing	Het totale ingenomen oppervlakte en mogelijke implicaties voor de omgeving buiten het terrein.



TERM	DEFINITIE
Security and Safeguards	Beveiligings- en beheers-aspecten van splijtbaar materiaal (conform IAEA-afspraken met lidstaten).
Supply chain volwassenheid	Betrouwbaarheidsinschatting voor massaproductie van systemen en componenten voor realisatie van een reeks (NOAK) op basis van ervaring, bestaande productiemethoden en toeleveringsroutes.
Techniek	Werkingsprincipe (zoals drukwater of kokendwaterreactor) en bijbehorende technische invullingen t.a.v. splijtstofgebruik.
Toepassing	Hoofdproduct van de SMR (elektriciteit, warmte, industriële integratie zoals waterstofproductie, anderszins).
Track record	Ervaring en/of reputatie van de aanleverende partij(en) voor realisatie van de installatie.
TRISO	TRISO (TRistructural-ISOtropic (TRISO) is een splijtstof in de vorm van micro-deeltjes (splijtstofbolletjes). Een splijtstofbolletje bestaat uit een kern van UO_x -splijtstof (in sommige gevallen ook met UC- of UCO-samenstelling). Deze bolletjes zijn doorgaans gecoat met vier lagen van afwisselend grafiet en een keramische laag van SiC. De bolletjes zijn op deze manier in staat splijtingsproducten in te sluiten, zelfs voor relatief zeer hoge temperaturen. Daarnaast hebben zij met deze geometrie uitstekende structurele integriteit tot temperaturen van ruim 1600 °C.
Veiligheidskenmerken	Kenmerken die gerelateerd zijn aan nucleaire veiligheid (voorkomen van vrijzetting van radioactief materiaal naar de omgeving).
<ul style="list-style-type: none"> Actief/passief 	Actieve of passieve systemen die een veiligheidsfunctie hebben. Passieve systemen zijn in principe onafhankelijk van externe energiebronnen.
<ul style="list-style-type: none"> Kernsmelt-frequentie 	Theoretische kans op smelten van de kern (niet zijnde radiologische vrijzetting naar de omgeving) per jaar op basis van een probabilistische evaluatie van het ontwerp (PSA). Het betreft interne gebeurtenissen (binnen de site); de bijdrage van externe gebeurtenissen wordt in dit rapport niet gepresenteerd aangezien deze niet worden opgegeven door de ontwerper.
<ul style="list-style-type: none"> Autarkietijd 	Tijd dat personeel <i>niet</i> nodig is om de installatie in een veilige toestand te brengen na een ontwerpongeval (DBA).
Vergunbaarheid	Inschatting van tijdsduur vergunningstraject in Nederland en evt. andere vergunningsaspecten.
Vermogen	Het thermisch of elektrisch vermogen van de SMR (per unit, meestal bestaande uit meerdere reactormodules).



Lijst met afkortingen

ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
AMR	Advanced Modular Reactor
ATF	Accident Tolerant Fuel
BWR	Boiling Water Reactor
CAEA	China Atomic Energy Authority
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
DBA	Design Basis Accident
DEC	Design Extension Conditions
EDF	Électricité De France
EIC	Energy Impact Center
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EUR	European Utility Requirements
EZK	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat
FHR	Fluoride salt-cooled High-temperature Reactors
FOAK	First of a Kind (zie ook Definities)
GDA	Generic Design Assessment
GE	General Electric
GEH	General Electric & Hitachi
HALEU	High-Assay Low-Enriched Uranium
HWR	Heavy Water Reactor
I&C	Instrumentation & Control
IAEA	International Atomic Energy Agency
IVR	In Vessel Retention
LCOE	Levelised Cost Of Electricity
LFR	Lead-cooled Fast Reactor

LOCA	Loss Of Coolant Accident (Koelmiddelverlies ongeval)
LWR	Light Water Reactor (Lichtwaterreactor)
MOU	Memorandum Of Understanding
MOX	Mixed Oxide
MW	Mega Watt
MSR	Molten Salt Reactor
NEA	Nuclear Energy Agency
NNSA	National Nuclear Safety Administration (China)
NOAK	N th of a Kind (zie ook Definities)
NPP	Nuclear Power Plant
NSSS	Nuclear Steam Supply System
OCC	Overnight Capital Cost
PCS	Power Conversion System
PSA	Probabilistische veiligheidsanalyse
PWR	Pressurized Water Reactor
RPV	Reactor Pressure Vessel
SAP	Security Assessment Principles
SFR	Sodium-cooled Fast Reactor
SMLWR	Small Modular Light Water Reactor
SMR	Small Modular Reactor
SNETP	Sustainable Nuclear Energy Technology Platform
TRISO	Tri-structural Isotropic (splijtstof)
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
US-NRC	United States Nuclear Regulatory Commission



Referentielijst

[1]	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, „Klimaatwet,” Wetten Overheid, [Online]. https://wetten.overheid.nl/BWBR0042394/2022-03-02 . [Geopend 27 maart 2023].
[2]	VVD, D66, CDA en ChristenUnie, „Coalitieakkoord 2021 - 2025: Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst,” 2021.
[3]	R. Jetten, „Betreft: Nadere uitwerking van de afspraken uit het coalitieakkoord op het gebied van kernenergie (DGKE-PK / 22488932),” Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 9 december 2022.
[4]	Witteveen+Bos (in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat), „Scenariostudie kernenergie,” 2022.
[5]	P. A. Breijder en B. Henstra, „Kleine modulaire kernreactoren (SMR): Kennisoverzicht van techniek en ontwikkelingen,” NRG-2.6185/22.251087, maart 2023.
[6]	Nuclear-21, „Kernenergie: Technische (on)mogelijkheden voor kernenergie in de Provincie Limburg,” juli 2022. [Online]. https://www.limburg.nl/onderwerpen/energie-duurzaamheid/kernenergie/
[7]	TNO, „Rol van kernenergie in de energietransitie van Noord-Brabant onderzocht,” februari 2021. [Online]. https://www.tno.nl/nl/newsroom/2021/03/rol-kernenergie-energietransitie-noord/
[8]	Wim Turkenburg Energy and Environmental Consultancy, „Toepassing kernenergie in Nederland en de perspectieven van SMRs - Notitie voor de Provincie Overijssel,” 28 november 2022. [Online]. https://www.nieuweenergieoverijssel.nl/site-content/uploads/2023/03/Wim-Turkenburg-WTEEC-2022.11.28-Toepassing-kernenergie-in-Nederland-en-perspectieven-SMRs.pdf .
[9]	IAEA, „Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment,” Wenen, 2021.
[10]	IAEA Nuclear Power Technology Department, „Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS),” 2022.
[11]	V. L. Heijnen, „Betreft: Nucleaire veiligheid bij de inzet nieuwe kernenergie (IENW/BSK-2022/295375),” Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 9 december 2022.
[12]	Ministerie van Infrastructuur en Milieu, „Het nationale programma voor het beheer van radioactief afval en verbruikte splijtstoffen,” juni 2016.
[13]	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, „Landelijk Crisisplan Straling,” april 2021. [Online]. https://open.overheid.nl/documenten/ronl-99c4f56e-4331-4ec8-b30c-cc94ebd9078a/pdf . [Geopend 20 april 2023].
[14]	E. Grauf, „Commissioning of nuclear power plants (NPPs),” <i>Infrastructure and Methodologies for the Justification of Nuclear Power Programmes</i> , pp. 741-772, 2012.
[15]	ANVS, „Vergunningsproces kleine modulaire reactoren (SMR's); ANVS memo aan Ministerie van Economische Zaken,” Programmadirectie Kernenergie, 6 april 2023.
[16]	„Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen: hoofdstuk 3 - paragraaf 3 - artikel 18,” [Online]. https://wetten.overheid.nl/BWBR0002667/2021-11-12#HoofdstukIII . [Geopend 14 april 2023].
[17]	ANVS, „Handreiking VOBK: Handreiking voor een veilig ontwerp en het veilig bedrijven van kernreactoren,” 5 april 2023. [Online]. https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/richtlijn/2023/04/05/handreiking-vobk .



[18]	ANVS, „Handreiking VOBK (vanaf p.10): Dutch Safety Requirements for Nuclear Reactors: Fundamental Safety Requirements,” 1 februari 2023. [Online]. https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/richtlijn/2023/04/05/handreiking-vobk .
[19]	OECD Nuclear Energy Agency (NEA), „The Financing of Nuclear Power Plants,” 2009. [Online]. https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/financing-plants.pdf .
[20]	NuScale Power LLC, „VOYGR Power Plants,” Nuscale Power, [Online]. https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants . [Geopend 21 maart 2023].
[21]	Rolls-Royce (Crawforth, M.), „Presentatie: Rolls-Royce SMR,” Nuclear Innovation Conference, Amsterdam, 2022.
[22]	GE Hitachi and Hitachi GE Nuclear Energy, „Status Report – BWRX-300,” IAEA, Wenen, 2019.
[23]	EDF (Baldi, S.), „Presentatie: NUWARD™- the European SMR by EDF,” Open Business Days, Helsinki, 2022.
[24]	NuScale Power LLC, „NuScale: SMR Fact Sheet,” 2022.
[25]	Rolly-Royce (Macfarlane-Smith, S.), „Presentatie: Rolls-Royce SMR,” Nuclear Academics Meeting, Cambridge, 2021.
[26]	GE Hitachi Nuclear Energy (Vitabäck, Frederik), „Business case for BWRX-300,” Nuclear Innovation Conference, Amsterdam, 2022.
[27]	GE Hitachi Nuclear Energy, „Hoofdpagina,” [Online]. https://nuclear.gepower.com/ . [Geopend 12 april 2023].
[28]	NuScale Power LLC, „NuScale SMR Technology: An Ideal Solution for Repurposing U.S. Coal Plant Infrastructure and Revitalizing Communities,” 2021.
[29]	EDF lead consortium, „Status Report – NUWARD™,” IAEA, Wenen, 2019.
[30]	NuScale Power LLC, „Status Report – NuScale SMR,” IAEA, Wenen, 2020.
[31]	World Nuclear News, „European regulators to cooperate on Nuward SMR licensing,” 6 juni 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/European-regulators-to-cooperate-on-Nuward-licensi .
[32]	OECD Nuclear Energy Agency (NEA), „The NEA Small Modular Reactor Dashboard,” OECD, Parijs, 2023.
[33]	World Nuclear News, „US regulator to issue final certification for NuScale SMR,” 2 augustus 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-regulator-to-issue-final-certification-for-NuSc .
[34]	NuScale Power LLC, „Core Damage Frequency,” YouTube: via NuScale Power - VOYGR Plant Models, 2018. [Online]. https://www.youtube.com/watch?v=9B4UFn-OcY4 .
[35]	IAEA, „NuScale Power Modular and Scalable Reactor,” 2013.
[36]	NuScale Power LLC, „Prolonged Station Blackout,” YouTube: via NuScale Power - VOYGR Power Plant, 2018. [Online]. https://www.youtube.com/watch?v=h--FAVoAQvk .
[37]	World Nuclear News, „NuScale ‘builds out’ Canadian SMR supply chain,” 15 september 2021. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/NuScale-builds-out-Canadian-SMR-supply-chain .
[38]	World Nuclear News, „Romanian-Polish cooperation on NuScale SMR deployment,” 07 september 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Romanian-Polish-cooperation-on-NuScale-SMR-deploym .
[39]	Rolls-Royce, „Hoofdpagina,” [Online]. https://www.rolls-royce-smr.com/ . [Geopend 21 maart 2023].
[40]	NuScale Power LLC, „NuScale Levelized Cost of Energy,” 2022.



[41]	NucNet Nuclear News, „Cost Of Nuclear / SMRs Can Be Developed With LCOE At Key Level Of About \$60/MWh, Says GEH,” 24 augustus 2022. [Online]. https://www.nucnet.org/news/smrs-can-be-developed-with-lcoe-at-key-level-of-about-usd60-mwh-says-geh-8-3-2022 .
[42]	KPMG Advisory N.V., „Marktconsultatie kernenergie,” 2021.
[43]	World Nuclear News, „NuScale places first order for SMR long-lead materials,” 13 maart 2023. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/NuScale-places-first-order-for-SMR-long-lead-mater .
[44]	NRC, „SMR Pre-Application Activities: GEH BWRX-300,” [Online]. https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/pre-application-activities/bwrx-300.html . [Geopend 17 april 2023].
[45]	World Nuclear News, „OPG applies for construction licence for Darlington SMR,” 2 november 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/OPG-applies-for-construction-licence-for-Darlington .
[46]	World Nuclear News, „BWRX-300 completes Phases 1 & 2 of Canadian pre-licensing review,” 15 maart 2023. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/BWRX-300-completes-Phases-1-2-of-Canadian-pre-lice .
[47]	General Electric, „News: GE Hitachi Submits Generic Design Assessment Application in the UK for the BWRX-300 Small Modular Reactor,” 20 december 2022. [Online]. https://www.ge.com/news/press-releases/ge-hitachi-submits-generic-design-assessment-application-in-the-uk-for-the-bwrx-300 .
[48]	SaskPower, „News: SaskPower Selects the GE-Hitachi BWRX-300 Small Modular Reactor Technology for Potential Deployment in Saskatchewan,” 27 juni 2022. [Online]. https://www.saskpower.com/about-us/media-information/news-releases/2022/saskpower-selects-the-ge-hitachi-bwrx-300-smr-technology-for-potential-deployment-in-saskatchewan .
[49]	World Nuclear News, „TVA, GEH cooperate on BWRX-300 deployment at Clinch River,” 3 augustus 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/TVA-GEH-cooperate-on-BWRX-300-deployment-at-Clinch .
[50]	World Nuclear News, „Collaboration for Rolls-Royce SMR deployment in the Netherlands,” 25 augustus 2022. [Online]. https://world-nuclear-news.org/Articles/Collaboration-for-Rolls-Royce-SMR-deployment-in-th .
[51]	Reuters, „EDF Trading signs for capacity at Dutch LNG terminal,” 16 november 2011. [Online].
[52]	Owler Inc., „NuScale - Overview,” [Online]. https://www.owler.com/company/nuscalepower . [Geopend 22 maart 2023].
[53]	NuScale Power LLC, „NuScale Power Signs Memorandum of Understanding with Energoatom to Explore SMR Deployment in Ukraine,” 1 september 2021. [Online]. https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2021/nuscale-power-signs-mou-with-energoatom-to-explore-smr-deployment-in-ukraine .
[54]	World Nuclear News, „Finland, Sweden and Ukraine consider Rolls-Royce SMRs,” 21 maart 2023. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Finland-Sweden-and-Ukraine-consider-Rolls-Royce-S .
[55]	General Electric, „GE reports: stories from the world of GE,” [Online]. https://www.ge.com/news/ . [Geopend 12 april 2023].
[56]	World Nuclear Association, „Nuclear Power in France,” [Online]. https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx . [Geopend 12 april 2023].
[57]	Reuters Events, „French consortium enters SMR race; Saudi Arabia and South Korea sign SMR deal,” 25 september 2019. [Online]. https://www.reutersevents.com/nuclear/french-consortium-enters-smr-race-saudi-arabia-and-south-korea-sign-smr-deal .
[58]	Last Energy, Inc., „Documentation,” [Online]. https://www.lastenergy.com/documentation . [Geopend 20 maart 2023].
[59]	R. Hernandez, M. Todosow en R. N. Brown, „Micro heat pipe nuclear reactor concepts: Analysis of fuel cycle performance and environmental impacts,” <i>Annals of Nuclear Energy</i> , vol. 126, pp. 419-426, 2019.



[60]	Westinghouse Electric Company LLC, „eVinci™ Micro Reactor,” <i>Nuclear Plant Journal</i> , nr. maart-april, 2019.
[61]	IAEA Nuclear Power Technology Department, „ARIA Database: Design and Technology Features of Microreactors (Part-2),” IAEA - Technical Meeting on the Status, Design Features, Technolgy Challenges and Deployment Models of Microreactors, Virtueel, 2021.
[62]	Last Energy, „Press Releases,” [Online]. https://www.lastenergy.com/news-press-categories/press-release . [Geopend 19 maart 2023].
[63]	Westinghouse Electric Company LLC, „The eVinci™ Micro Reactor Nuclear Demonstration Unit Readiness Project,” U.S. Department of Energy, Washington, 2019.
[64]	Westinghouse Electric Company LLC, „Energy Systems - eVinci™ Microreactor,” [Online]. https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor . [Geopend april 12 2023].
[65]	Westinghouse Electric Company LLC, „eVinci™ Microreactor Team Closes Out 2022 with Milestone Achievement,” 27 januari 2023. [Online]. https://info.westinghousenuclear.com/blog/evinci-microreactor-team-closes-out-2022-with-milestone-achievement .
[66]	Department of Nuclear Engineering, Seoul National Univ. (Cho, H. K.), „Heat Pipe Cooled Micro-reactor,” 2022. [Online]. https://ocw.snu.ac.kr/sites/default/files/NOTE/Lecture%204-4_0.pdf . [Geopend 20 april 2023].
[67]	VOA News, „Several US Universities to Experiment With Micro Nuclear Power,” 9 februari 2023. [Online]. https://www.voanews.com/a/several-us-universities-to-experiment-with-micro-nuclear-power-/6955392.html .
[68]	Data Center Dynamics, „Last Energy claims to have sold 24 nuclear reactors in the UK for £2.4 billion,” 22 maart 2023. [Online]. https://www.datacenterdynamics.com/en/news/last-energy-claims-to-have-sold-24-nuclear-reactors-in-the-uk-for-24-billion/ .
[69]	BrucePower & Westinghouse, „Feasibility Study: Executive Summary of the eVinci™ Micro-Reactor Deployment in Mining and Remote Canadian Communities,” 2021.
[70]	Access Intelligence LLC, „Last Energy Secures PPAs for 34 SMR Nuclear Power Plants in Poland and the UK,” 23 maart 2023. [Online]. https://www.powermag.com/last-energy-secures-ppas-for-34-smr-nuclear-power-plants-in-poland-and-the-uk/ .
[71]	Last Energy, „Hoofdpagina,” [Online]. https://www.lastenergy.com/ . [Geopend 19 maart 2023].
[72]	Crunchbase Inc., „Organization - Last Energy,” [Online]. https://www.crunchbase.com/organization/last-energy . [Geopend 20 maart 2023].
[73]	Kairos Power LLC, „Internal Updates: Kairos (def): the right or opportune moment,” 8 maart 2019. [Online]. https://kairopower.com/internal_updates/kairos-def-the-right-or-opportune-moment/ .
[74]	Kairos Power LLC, „Fuel Qualification Methodology for the Kairos Power Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor (KP-FHR),” juni 2022. [Online]. https://www.nrc.gov/docs/ML2218/ML22186A215.pdf .
[75]	Stichting KernVisie, „Ontwerp met modulaire kern maakt MSR van Thorizon haalbaar concept,” <i>KernVisie Magazine</i> , vol. 17, nr. 5/6, pp. 4-7, 2022.
[76]	Terrestrial Energy USA, Inc. (Hill, D.), „Presentatie: IMSR® Commercialization before 2030,” GAIN Molten Salt Reactor Workshop, Virtueel, 2020.
[77]	Terrestrial Energy LLC, „IMSR® Technology,” [Online]. https://www.terrestrialenergy.com/technology/ . [Geopend 20 maart 2023].
[78]	Terrestrial Energy USA Inc., „IMSR® Core-unit Definition: Applicable Structures, Systems and Components,” 17 maart 2023. [Online]. https://www.nrc.gov/docs/ML2009/ML20097B839.pdf .
[79]	Kairos Power LLC, „Technology: How it Works,” [Online]. https://kairopower.com/technology/ . [Geopend 12 april 2023].
[80]	Stichting KernVisie, „Lijst van innovatie kernreactoren: KP-FHR,” [Online]. https://www.kernvisie.com/innovatie/innovatieve-kernreactorontwikkeling/kp-fhr.html . [Geopend 12 april 2023].
[81]	NRG, „Articles: Reactor Licensing Strategies and Implications for Fuel and Materials,” 2 september 2021. [Online]. https://www.nuclearinnovationconference.eu/articles/reactor-licensing-strategies-and-implications-for-fuel-and-materials .



[82]	Kairos Power LLC (Pérès, M.), „Presentatie: Kairos Power,” MSR Workshop, Virtueel, 2020.
[83]	World Nuclear News, „US and Canadian regulators complete joint review of Terrestrial’s IMSR,” 8 juni 2022. [Online]. https://world-nuclear-news.org/Articles/US-and-Canadian-regulators-complete-joint-review-o .
[84]	Kairos Power LLC (Ellenson, M.), „Presentatie: Advanced Reactor Security Perspectives,” NRC, 2023.
[85]	Kairos Power LLC, „External Updates: Kairos Power Joins with Bruce Power, Constellation, Southern Company and TVA to Form Advanced Nuclear Development Consortium,” 20 april 2022. [Online]. https://kairopower.com/external_updates/kairos-power-joins-with-bruce-power-constellation-southern-company-and-tva-to-form-advanced-nuclear-development-consortium/ .
[86]	World Nuclear News, „Kairos Power, Los Alamos collaborate to make TRISO fuel,” 9 december 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Kairos-Power-Los-Alamos-collaborate-to-make-TRISO .
[87]	Thorizon, „Frequently Asked Questions,” [Online]. https://www.thorizon.com/faq/ . [Geopend 03 april 2023].
[88]	Thorizon, „Our story: We are Thorizon,” [Online]. https://www.thorizon.com/our-story/ . [Geopend 3 april 2023].
[89]	Kairos Power LLC, „New Mexico: Kairos Power Selects Albuquerque for Research and Development Center,” [Online]. https://kairopower.com/newmexico/ . [Geopend 12 april 2023].
[90]	Kairos Power LLC, „Tennessee: Kairos Power Selects East Tennessee Technology Park for Hermes Low-Power Demonstration Reactor,” [Online]. https://kairopower.com/tennessee/ . [Geopend 12 april 2023].
[91]	Terrestrial Energy Inc., „Hoofdpagina,” [Online]. https://www.terrestrialenergy.com/ . [Geopend 20 maart 2023].
[92]	Thorizon, „News: Press release: Thorizon raises €12,5 million to turn Nuclear waste into CO2-free energy,” [Online]. https://www.thorizon.com/press-release-thorizon-raises-e125-million-to-turn-nuclear-waste-into-co2-free-energy/ . [Geopend 3 april 2023].
[93]	Kairos Power LLC, „External Updates: Kairos Power awarded U.S. DOE ARDP award for Risk Reduction for Hermes Test Reactor,” 17 december 2020. [Online]. https://kairopower.com/external_updates/kairos-power-awarded-u-s-doe-ardp-award-for-risk-reduction-for-hermes-test-reactor/ .
[94]	ZoomInfo Technologies LLC, „Terrestrial Energy Employee Directory,” [Online]. https://www.zoominfo.com/pic/terrestrial-energy-inc/358075558 . [Geopend 20 maart 2023].
[95]	Kairos Power LLC, „External Updates: Kairos Power and Materion Corporation Commission Molten Salt Purification Plant to Produce Coolant for High-Temperature Molten Salt Reactors,” 19 juli 2022. [Online]. https://kairopower.com/external_updates/kairos-power-and-materion-corporation-commission-molten-salt-purification-plant-to-produce-coolant-for-high-temperature-molten-salt-reactors/ .
[96]	TerraPower LLC, „The Sodium™ Program,” [Online]. https://www.terrapower.com/sodium-program-summary/ . [Geopend 20 maart 2023].
[97]	Nuclear Energy Institute, „News: With Sodium, Nuclear Can Pair Perfectly with Energy Storage and Renewables,” 3 november 2020. [Online]. https://www.nei.org/news/2020/sodium-nuclear-pairs-renewables-energy-storage .
[98]	TerraPower LLC, „Our work - Sodium™ Reactor and Integrated Energy Storage: Fact Sheet,” [Online]. https://www.terrapower.com/our-work/sodiumpower/ . [Geopend 20 maart 2023].
[99]	Westinghouse Electric Company LLC, VS, „Status Report – Westinghouse Lead Fast Reactor,” IAEA, Wenen, 2019.
[100]	Westinghouse Electric Company LLC (Ferroni, P.), „Westinghouse Lead Fast Reactor Design and Safety,” Ninth Joint IAEA–GIF Technical Meeting/ Workshop on the Safety of Liquid Metal Cooled Fast Reactors, 2021.
[101]	TerraPower LLC, „Frequently Asked Questions,” [Online]. https://sodiumpower.com/frequently-asked-questions/ . [Geopend 20 maart 2023].
[102]	X Energy LLC, „Video: Xe-100 Technology Explainer,” X-energy, [Online]. https://x-energy.com/video/technology-explainer . [Geopend 12 april 2023].
[103]	X Energy LLC, „TRISO-X Pebble Fuel Qualification,” 16 augustus 2021. [Online]. https://www.nrc.gov/docs/ML2124/ML21246A289.pdf .



[104]	X Energy LLC (Mulder, E. J.), „Presentatie: X-energy’s Xe-100 Reactor Design Status,” National Academy of Sciences, 2021.
[105]	S. Wu, X. Ma, J. Liu, J. Wan, P. Wang en G. H. Su, „A load following control strategy for Chinese Modular High-Temperature Gas-Cooled Reactor HTR-PM,” <i>Energy</i> , vol. 263, p. 125459, 2023.
[106]	Office of Nuclear Energy, „X-energy is Developing a Pebble Bed Reactor That They Say Can’t Melt Down,” 5 januari 2021. [Online]. https://www.energy.gov/ne/articles/x-energy-developing-pebble-bed-reactor-they-say-cant-melt-down .
[107]	Y. Brits, F. Botha, H. van Antwerpen en H.-W. Chi, „A control approach investigation of the Xe-100 plant to perform load following within the operational range of 100--25--100\%,” <i>Nuclear Engineering and Design</i> , vol. 329, pp. 12-19, 2018.
[108]	IAEA (samengesteld door), „Symposium on International Safeguards: Building Future Safeguards Capabilities - Book of Abstracts,” Wenen, 2018.
[109]	R. Fasano, A. Hahn, A. Haddad en C. Lamb, „Advance Reactor Operational Technology Architecture Categorization,” OSTI, Verenigde Staten, 2021.
[110]	TRISO-X LLC, „Hoofdpagina,” [Online]. https://triso-x.com/ . [Geopend 17 april 2023].
[111]	Jordan Atomic Energy Commission (Araj, K. J.), „Presentatie: Identification, Assessment and User Requirements of Advanced SMRs for Electricity Generation in Jordan,” Second Meeting of the Technical Working Group for Small and Medium-sized or Modular Reactor (TWG-SMR), Wenen, 2019.
[112]	X Energy LLC, „Presentatie: X-energy,” National Governors Association, 2021.
[113]	World Nuclear News, „China’s demonstration HTR-PM reaches full power,” 9 december 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/China-s-demonstration-HTR-PM-reaches-full-power .
[114]	Z. Zhang, Y. Dong, F. Li, Z. Zhang, H. Wang, X. Huang, H. Li, H. Li, B. Liu, X. Wu en H. Wang, „The Shandong Shidao Bay 200 MWe high-temperature gas-cooled reactor pebble-bed module (HTR-PM) demonstration power plant: an engineering and technological innovation,” <i>Engineering</i> , vol. 2, nr. 1, pp. 112-118, 2016.
[115]	TerraPower LLC, „Hoofdpagina,” [Online]. https://natriumpower.com/ . [Geopend 20 maart 2023].
[116]	TerraPower LLC, „Natrium Project Update: The Natrium Project is Underway,” [Online]. https://www.terrapower.com/natrium-project-update/ . [Geopend 16 april 2023].
[117]	X Energy LLC, „News: TRISO-X Announces Relocation and Expansion of its Oak Ridge Offices Ahead of Construction for New Headquarters and Fuel Fabrication Facility,” 21 februari 2023. [Online]. https://x-energy.com/media/news-releases/triso-x-announces-relocation-and-expansion-of-its-oak-ridge-offices-ahead-of-construction-for-new-headquarters-and-fuel-fabrication-facility .
[118]	World Nuclear News, „Turbine tests completed at China’s HTR-PM,” 16 augustus 2021. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Turbine-tests-completed-at-Chinas-HTR-PM .
[119]	TerraPower LLC, „Regulatory Engagement Plan for the Natrium™ Reactor,” NRC, 2021.
[120]	IAEA, „Status report 96 - High Temperature Gas Cooled Reactor - Pebble-Bed Module (HTR-PM),” 2011.
[121]	Pacific Northwest National Laboratory, „Deployability of Small Modular Nuclear Reactors for Alberta Applications,” U.S. Department of Energy, 2016.
[122]	IAEA, „News: China’s Atomic Energy Authority and IAEA to Collaborate to Improve Nuclear Security Equipment,” 26 september 2019. [Online]. https://www.iaea.org/newscenter/news/chinas-atomic-energy-authority-and-iaea-to-collaborate-to-improve-nuclear-security-equipment .
[123]	UK Government, „Policy Paper: Advanced Nuclear Technologies,” [Online]. https://www.gov.uk/government/publications/advanced-nuclear-technologies/advanced-nuclear-technologies . [Geopend 14 april 2023].
[124]	NRC, „TerraPower LLC - Approval of Safeguards Information Security Program,” 20 april 2022. [Online]. https://www.nrc.gov/docs/ML2202/ML22028A094.pdf .
[125]	X Energy LLC, „LLC Xe-100 White Paper: Physical Protection Systems Approach,” 8 april 2022. [Online]. https://www.nrc.gov/docs/ML2209/ML22098A228.pdf .



[126]	Business Wire, „X-energy Announces Strategic Investment from DL E&C and Doosan Enerbility to Advance the Deployment of the Xe-100 Generation IV Advanced Small Modular Reactor,” 17 januari 2023. [Online]. https://www.businesswire.com/news/home/20230116005548/en/X-energy-Announces-Strategic-Investment-from-DL-EC-and-Doosan-Enerbility-to-Advance-the-Deployment-of-the-Xe-100-Generation-IV-Advanced-Small-Modular-Reactor .
[127]	Next Big Future, „Energy: Criticality for Both High Temperature Pebble Bed Reactors,” 16 november 2021. [Online].
[128]	J. Zhang, J. Zhao en J. Tong, „Study on Probabilistic Safety Goals for Multimodule High-Temperature Gas-Cooled Reactor Based on Chinese Societal Risks,” <i>Science and Technology of Nuclear Installations</i> , vol. 2021, pp. 1-10, 2021.
[129]	Westinghouse Electric Company LLC, „About us,” [Online]. https://www.westinghousenuclear.com/about . [Geopend 12 april 2023].
[130]	Nuclear Industry Association, „X-energy & Cavendish Nuclear Welcome Hartlepool Extended Life Plans,” 10 maart 2023. [Online]. https://www.niauk.org/x-energy-cavendish-nuclear-welcome-hartlepool-extended-life-plans/ .
[131]	X Energy LLC, „ARDP: Advanced Reactor Demonstration Program,” [Online]. https://x-energy.com/ardp . [Geopend 12 april 2023].
[132]	CrunchBase Inc., „Organization - TerraPower,” [Online]. https://www.crunchbase.com/organization/terrapower . [Geopend 20 maart 2023].
[133]	Office of Nuclear Energy, „U.S. Department of Energy Announces \$160 Million in First Awards under Advanced Reactor Demonstration Program,” 13 oktober 2020. [Online]. https://www.energy.gov/ne/articles/us-department-energy-announces-160-million-first-awards-under-advanced-reactor .
[134]	PitchBook, „X-energy overview,” [Online]. https://pitchbook.com/profiles/company/324297-82#overview . [Geopend 12 april 2023].
[135]	Science, „Department of Energy picks two advanced nuclear reactors for demonstration projects,” 16 oktober 2020. [Online]. https://www.science.org/content/article/department-energy-picks-two-advanced-nuclear-reactors-demonstration-projects .
[136]	Westinghouse Electric Company LLC, „News: Westinghouse Develops Next-Generation Nuclear Plant with Ansaldo Nucleare,” 3 oktober 2022. [Online]. https://info.westinghousenuclear.com/news/wec-partners-ansaldo-next-gen-nuclear-plant .
[137]	TerraPower LLC, „Suppliers,” [Online]. https://www.terrapower.com/contact-us/suppliers/ . [Geopend 20 maart 2023].
[138]	General Electric, „News: Global Nuclear Fuel and TerraPower Announce Natrium Fuel Facility,” 21 oktober 2022. [Online]. https://www.ge.com/news/press-releases/global-nuclear-fuel-and-terrapower-announce-natrium-fuel-facility .
[139]	World Nuclear News, „X-energy selects constructors of initial Xe-100 reactors,” 25 juli 2022. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/X-energy-selects-constructors-of-initial-Xe-100-re .
[140]	World Nuclear News, „Doosan to assess manufacturability of Xe-100,” 1 september 2021. [Online]. https://world-nuclear-news.org/Articles/Doosan-to-assess-manufacturability-of-Xe-100 .
[141]	X Energy LLC, „News: X-energy Canada and SIMSA Collaborate to Support the Potential Deployment of Xe-100 Small Modular Reactors,” 26 juli 2022. [Online]. https://x-energy.com/media/news-releases/x-energy-canada-and-simsa-collaborate-to-support-the-potential-deployment-of-xe-100-small-modular-reactors .
[142]	IAEA, „News: IAEA Convenes Global Experts to Assesses High Temperature Gas Cooled Reactors for Electricity, Heat and Hydrogen,” 22 december 2021. [Online]. https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-convenes-global-experts-to-assesses-high-temperature-gas-cooled-reactors-for-electricity-heat-and-hydrogen .
[143]	Z.-Y. Zhang, Y.-J. Dong, Q. Shi, F. Li en H.-T. Wang, „600-MWe high-temperature gas-cooled reactor nuclear power plant HTR-PM600,” <i>Nuclear Science and Techniques</i> , vol. 33, nr. 8, p. 101, 2022.
[144]	World Nuclear News, „NuScale places first order for SMR long-lead materials,” 13 maart 2023. [Online]. https://www.world-nuclear-news.org/Articles/NuScale-places-first-order-for-SMR-long-lead-mater .



Nuclear. For Life.



www.nrg.eu