

NRG
PALLAS

Nuclear. For Life.

KENNISMODULE

SMALL MODULAR REACTORS

In opdracht van het Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Inhoud

Leeswijzer	3
Introductie	4
<i>Overzicht van SMR-technieken</i>	8
1 Organisatorische aspecten	9
1.1 Welke partijen zijn stakeholders bij een SMR?	9
1.2 Financieringsmodellen	12
1.3 Termijnen en faseringen	14
1.4 Vergunningverlening	15
2 Ruimtebeslag	18
2.1 Gebouwgrootte en terreingrens	18
2.2 Veiligheidszones om het terrein	19
2.3 Inpassing energie-intensief cluster	20
3 Benodigde koelvoorzieningen	21
3.1 Koelmethode	21
3.1.1 Algemeen	22
3.1.2 Beschikbaarheid van voldoende koelwater in NL	22
3.2 Gevolgen van verschillende koelmethode	23

4 Flexibiliteit van SMR toepassingen	25
4.1 Bijdrage betrouwbaarheid energiesysteem	25
4.1.1 Elektriciteit	26
4.1.2 Warmtelevering en warmtekrachtkoppeling	27
4.2 Load following	28
4.2.1 Snelheid op- en afregelen	28
4.2.2 Mogelijkheden per type SMR	29
4.3 Waterstofproductie	30
5 Nucleaire veiligheid	32
5.1 Radioactiviteit	32
5.1.1 Algemeen	32
5.1.2 Normale bedrijfsvoering	33
5.1.3 Veiligheidskenmerken	34
5.2 Veiligheid voor omwonenden en omgeving	36
5.3 Fysieke security	37
5.4 Cybersecurity	38
5.5 Verzekering van schade	38

6 Radioactief afval en eindberging	39
6.1 Kenmerken van radioactief afval	39
6.2 Transport	41
6.3 Opslag en eindberging	42
6.4 Radioactief afval en SMR's	43
6.5 Ontmantelingskosten	44
Bijlage A	
Niet elektrische toepassing: LDR-50	45
Bijlage B	
Samenvatting realisatie vier SMR ontwerpen	46
Lijst met afkortingen	53
Lijst met referenties	54

LEESWIJZER

Deze kennismodule over Small Modular Reactors (hierna SMR) is als volgt ingedeeld:

- i** In de **Introductie** wordt het concept SMR nader toegelicht: wat is een SMR, welke varianten zijn er op de markt en op welke manier kunnen SMR's worden ingezet?
- 1** In **Hoofdstuk 1** worden de relevante aspecten behandeld die bij een realisatie aan bod kunnen komen.
- 2** **Hoofdstuk 2** behandelt de benodigde ruimte voor een SMR en beschrijft in hoeverre een SMR in bebouwde omgevingen in te passen is.
- 3** **Hoofdstuk 3** bespreekt koelingsaspecten die relevant zijn om restwarmte af te voeren.
- 4** **Hoofdstuk 4** beschrijft hoe een SMR binnen een energiesysteem past, gaat in op de flexibiliteit van een SMR als het gaat om elektriciteitsopwekking en regelbaar vermogen en de mogelijke toepassingen van SMR's anders dan voor elektrische opwekking.
- 5** **Hoofdstuk 5** behandelt de nucleaire veiligheid.
- 6** **Hoofdstuk 6** gaat in op radioactief afval en de (eind)berging ervan.
- B** SMR's kunnen naast levering van elektriciteit ook voor andere toepassingen worden gebruikt.
In **Bijlage A** is als voorbeeld een toepassing van een lichtwater SMR voor warmtenetten beschreven.
In **Bijlage B** is de status van een viertal SMR-concepten weergegeven.



INTRODUCTIE

Het voormalige Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (nu Klimaat en Groene Groei, KGG) heeft begin 2024 een programma-aanpak voor SMR's opgesteld [REF.1]. Binnen 'programmaliijn 1' worden simulaties uitgevoerd. Simulaties zijn bedoeld om knelpunten en kansen in een zo vroeg mogelijk stadium in beeld te krijgen. Met een simulatie loopt het ministerie van KGG samen met stakeholders het proces – of een deel van het proces – door: van initiatief nemen tot uiteindelijke (virtuele) realisatie. Stakeholders krijgen hierdoor de kans om gezamenlijk relevante praktijkervaring op te doen, kennis op te bouwen en gezamenlijk knelpunten te identificeren. Praktische kennisopbouw zal een onderdeel van deze programmaliijn zijn. In dit kader is deze SMR-kennismodule (hierna: de 'module') door de Nuclear Academy¹ en het Ministerie van Klimaat en Groene Groei opgesteld.

Om invulling te geven aan deze module is een aantal thema's opgesteld door de Nuclear Academy. Deze thema's omvatten de meest relevante aspecten die bij een realisatie van een SMR behoren. Na een eerste inventarisatie zijn er te behandelen vragen gedefinieerd. Deze zijn voorgelegd aan het Interprovinciaal Overleg (IPO), Regionale Ontwikkelingsmaatschappijen (ROM) en de Vereniging

van Nederlandse Gemeenten (VNG). Om aan de kennisbehoefte van deze instanties tegemoet te komen, zijn de gestelde vragen waar nodig aangepast. Uiteindelijk zijn de vragen omgezet naar zes thema's, die elk een aantal subvragen behandelen. Door deze aanpak kunnen we specifieker ingaan op de onderwerpen die het belangrijkste worden gevonden en daarbij meer details naar voren halen. Sommige thema's die zijn opgehaald bij stakeholders vallen buiten de scope van deze SMR-module, bijvoorbeeld omdat ze aan bod komen tijdens de uitwerking van het SMR-programma of omdat de vragen op dit moment niet te beantwoorden zijn. De kennismodule wordt waar nodig met nieuwe inzichten aangevuld zodra deze bekend zijn.

Deze module bereidt medeoverheden en betrokken partijen inhoudelijk voor op de simulaties onder 'programmaliijn 1'. De module legt bij de deelnemers de kennisbasis waardoor er tijdens de simulaties sneller de diepte ingegaan kan worden. Dit zal de resultaten van de simulaties bevorderen.

Ook instanties die niet deelnemen aan de simulaties kunnen deze module raadplegen voor kennisopbouw. De module kan ook voorzien in een betere communicatie over het onderwerp SMR's door de thematische behandeling, de gekozen onderdelen en de uitleg van de gebruikte termen.

¹ De Nuclear Academy is een samenwerking tussen NRG PALLAS en de TU Delft, met als doel de nucleaire kennis en vaardigheden in Nederland te versterken. In het Nuclear Academy-project zijn verschillende aandachtsgebieden gedefinieerd, zoals het reguliere onderwijs (middelbare scholen, mbo, hbo, wo) evenals het opleiden van medewerkers van de rijksoverheid, provincies, gemeentes en veiligheidsregio's.

Vragen en thema's die leven bij overheid en publiek

1 Welke organisatorische aspecten zijn van belang bij de realisatie van een SMR?

- Welke stakeholders zijn er? Welke partijen zijn betrokken bij de realisatie en wat zijn hun rollen?
- Welke financieringsmodellen kunnen van toepassing zijn?
- Welke termijnen/faseringen kunnen worden aangebracht?
- Hoe ziet het vergunningsproces eruit?

2 Wat is het ruimtebeslag van een SMR?

- Wat is het ruimtebeslag door gebouwen? Wat is de terreingrens?
- Wat zijn veiligheidszones en hoe worden ze bepaald?
- Kan een SMR in een energie-intensief bedrijf of cluster worden ingepast? Op welke afstand kan bebouwing komen?

3 Wat zijn de benodigde koelvoorzieningen voor een SMR?

- Op welke manieren kunnen SMR's gekoeld worden? Welke koelmogelijkheden zijn geschikt voor locaties in Nederland?
- Welke gevolgen heeft welke koelmethode?

4 Hoe dragen SMR's bij aan de betrouwbaarheid van het energiesysteem?

- Hoe kan de inzet van SMR's gecombineerd worden met de inzet van hernieuwbare energiebronnen? Welke mogelijkheden bieden SMR's naast elektriciteitsopwekking?
- In hoeverre kunnen SMR's voor *load following* worden ingezet, en welke technische voorwaarden zijn hieraan verbonden?
- Wat is de mogelijke rol van SMR's binnen waterstofproductie?

5 Wat houdt nucleaire veiligheid in en hoe kenmerken SMR's zich hierin?

- Wanneer is radioactiviteit gevaarlijk? Komt er extra straling in de omgeving bij normale bedrijfsvoering? Komt er radioactiviteit vrij bij ongevallen en zo ja, wat zijn dan de gevolgen?
- Hoe is de veiligheid voor de omwonenden/omgeving geregeld?
- Hoe zit het met security/data risico's bij externe aansturingen?
- Is schade veroorzaakt door nucleaire installaties verzekerd?

6 Hoe wordt in Nederland omgegaan met radioactief afval en de mogelijke toename ervan in de toekomst?

- Wat zijn de belangrijkste kenmerken van radioactief afval? En hoe verhoudt dit afval zich tot andere vormen van afval? Kun je radioactief afval veilig insluiten en verpakken? Hoe lang moet je afval opslaan? Welke hoeveelheid/type afval betreft het op dit moment voor Nederland?
- Welke logistiek kent Nederland m.b.t. radioactief afval?
- Wat verandert er in het afvalmanagement in het geval er SMR's in Nederland worden gerealiseerd?
- Welke opslagmogelijkheden zijn er en hoe wordt de toekomstige eindberging geregeld? Wat is een veilige eindberging?
- Hoe worden de kosten voor ontmanteling geregeld?

Wat is een SMR?

Het begrip SMR staat voor Small Modular Reactor, ofwel kleine modulaire reactor. De definitie van een SMR is als volgt:

- **[Small]** Het betreft een kleine kernreactor. Zowel klein in formaat (de gebouw- en terreingrootte) als in het thermische en elektrische vermogen. De ordegrrootte voor gebouw- en terreingrootte is enkele voetbalvelden. Het elektrisch vermogen voor SMR's wordt over het algemeen gedefinieerd tot 300 MWe [REF.2]. Er bestaan uitzonderingen zoals de Rolls-Royce SMR (470 MWe) en de VOYGR-12 van NuScale (924 MWe) die door hun modulaire karakter nog steeds als SMR beschouwd worden.
- **[Modular]** Het betreft een reactor met een modulaire samenstelling. De afzonderlijke reactoronderdelen kunnen als bouwstenen gezien worden, die tezamen een reactoreenheid vormen. Sommige SMR concepten hebben daarnaast de mogelijkheid om meerdere reactoreenheden te combineren. Hierdoor ontstaat er één grote (samengestelde) eenheid. Daarbij kan gebruik gemaakt worden van één enkele regelkamer. De reactoronderdelen kunnen fabrieksmatig vervaardigd worden en afzonderlijk over de weg worden vervoerd. Daarnaast is productie en bouwwijze zoveel mogelijk gestandaardiseerd.
- **[Reactor]** Het gaat om een kernreactor. De kernsplijting in de reactorkern genereert warmte die omgezet kan worden naar andere energiesoorten, zowel in de vorm van warmte alsook elektriciteitsopwekking.

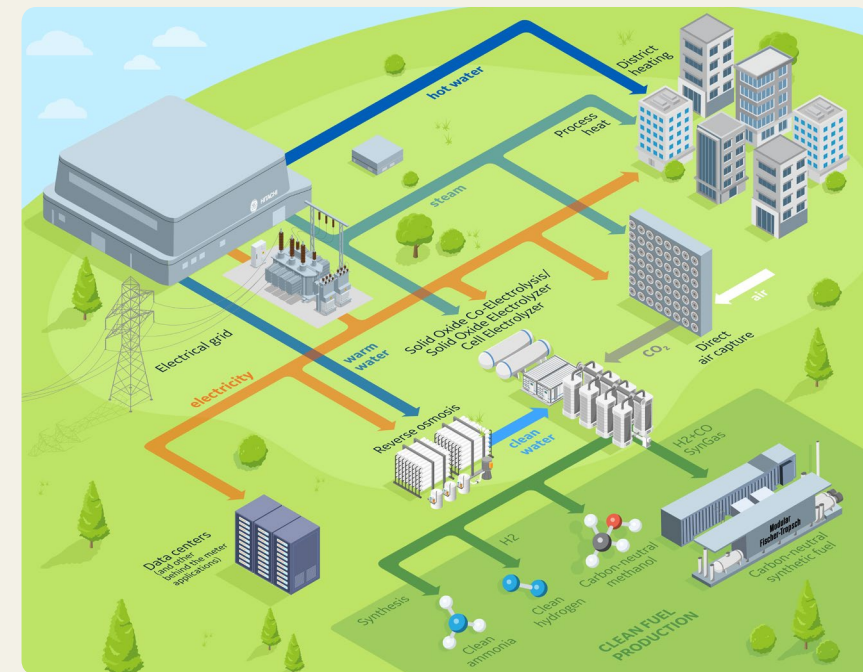
Inzetbaarheid van SMR's

SMR's worden ontworpen om flexibel ingezet te worden. Een SMR kan naast elektriciteitsopwekking ook voor andere toepassingen worden ingezet. De figuur hiernaast toont een overzicht van de vele mogelijkheden. De warmteproductie bij een SMR kan efficiënt ingezet worden voor bijvoorbeeld stadsverwarming of industriële toepassingen. Denk daarbij ook aan waterstofproductie, of onttrekken van CO₂ uit de lucht (*Direct Air Capture*) voor onder andere de productie van synthetische brandstoffen.

Het ontwerp van een SMR biedt dus flexibiliteit als het gaat om inpassing, gebruik én inzet.

- **de locatie:**
inpassing in afgelegen gebieden met beperkte infrastructuur of juist nabij energie-intensieve clusters,
- **de balans tussen vraag en aanbod:**
snel kunnen op- of afregelen (*load following*),
- **'product'-levering, co-generatie:**
naast elektriciteitsopwekking bijvoorbeeld waterstofproductie of proceswarmte voor industriële toepassingen.

Naast elektriciteitsopwekking zijn er verschillende andere toepassingen mogelijk voor het gebruik van SMR's [REF.3]



SMR-concepten

SMR's zijn onder te verdelen in twee categorieën:

- **Lichtwatergekoelde SMR's**,
de zogenaamde Small Modular Light Water cooled Reactors (SM-LWR's).
- **Geavanceerde SMR's**,
de Advanced Modular Reactors (AMR's).

Op dit moment zijn er wereldwijd ruim zeventig SMR-concepten in ontwikkeling. In de *NRG Marktanalyse SMR's* wordt een selectie van deze concepten nader toegelicht [\[REF.2\]](#).

Het merendeel van de SMR-concepten is op de lichtwatergekoelde techniek gebaseerd. De marktrijpheid van een viertal SMR-concepten (twee SM-LWR's en twee AMR's) wordt ter illustratie in de bijlage beschreven. Het gaat hierbij om de BWRX-300 (SM-LWR), ROLLS-ROYCE SMR (SM-LWR), THORIZON (AMR) en XE-100 (AMR).

Lichtwatergekoelde SMR's

De SM-LWR's (Small Modular Light Water cooled Reactors) zijn alle reactor-concepten die lichtwatergekoeld zijn. Er is al jarenlange ervaring met het bedrijven van lichtwatergekoelde reactoren. Het gaat dan om een drukwater-reactor of een kokendwaterreactor. De SM-LWR's komen vanwege de bewezen techniek naar verwachting het eerst beschikbaar op de markt. In deze module zal de focus daarom ook liggen op deze reactoren.

Geavanceerde SMR's

Op de langere termijn kunnen Advanced Modular Reactors (AMR's) een belangrijke rol spelen. AMR's maken veelal gebruik van innovatieve technologieën en splijtstoffen. Er is nog veel onderzoek en kwalificatie nodig voordat marktintroductie binnen Nederland gerealiseerd kan worden. In deze kennismodule worden AMR's daarom niet nader belicht. Omdat er wel grote belangstelling is voor AMR's geven we in deze alinea's kort aandacht aan dit veelbelovende maar toekomstige reactortype. Deze kennismodule zal in de komende tijd worden aangevuld met meer informatie over AMR's.

AMR's zijn specifiek in staat om hoge temperaturen te genereren voor een verscheidenheid aan toepassingen. Denk aan de levering van hoge temperatuur warmte aan de industrie of hoge temperatuur elektrolyse. Karakteristiek voor deze typen is de werking met andere koelmiddelen dan water en/of andere splijtstofvormen dan gebruikelijk bij LWR's. Koeling vindt voor deze categorie per definitie niet plaats met lichtwater, maar met een vloeibaar metaal, een gas, of een gesmolten zout. Deze werkingsprincipes maken dat de systeemtemperaturen voor dergelijke concepten een stuk hoger liggen dan voor SM-LWR's. Zodoende kunnen AMR's een complementaire energiebron zijn met een breder toepassingsgebied.

Voor metaalgekoelde reactoren en gesmoltenzoutreactoren geldt verder dat zij kunnen bijdragen aan een verduurzaming van de splijtstofcyclus om natuurlijke bronnen efficiënter te gebruiken. Metaalgekoelde reactoren gaan efficiënt om met uranium en gesmoltenzoutreactoren kunnen efficiënt gebruik maken van thorium. Ook kunnen deze reactoren radioactief afval minimaliseren.

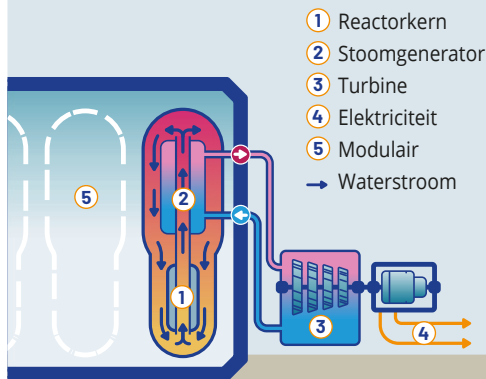
Overzicht van SMR-technieken

LICHTWATER SMR'S

Bereik: ca. 20 – 500 MWe

Werking: Splijtstofelementen die circulerend water verwarmen.

Techniek: Bestaand/bekend. Lichtwatertechnologie.



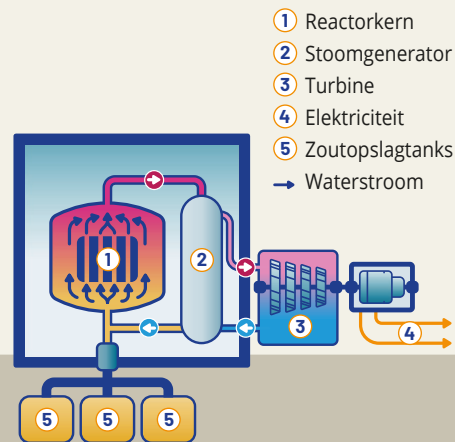
GEAVANCEERDE SMR'S

Gesmoltenzout

Bereik: ca. 100 – 300 MWe

Werking: Circulerend vloeibaar splijtstofzout.

Techniek: Grotendeels innovatief. Geen tot weinig ervaring aanwezig.



Andere geavanceerde SMR's

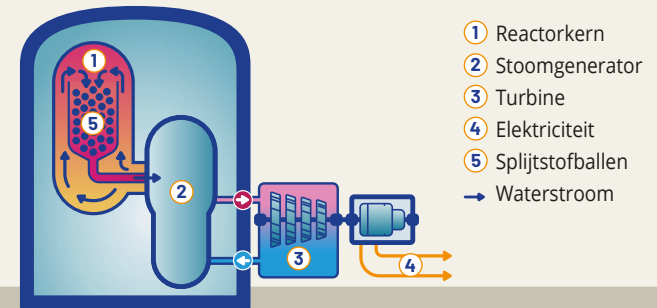
Bereik: ca. 40 – 500 MWe

Werking: Splijtstofelementen die circulerend koelmiddel verwarmen.

Voorbeelden van soorten koelmiddel:

- Gasgekoeld (*gas-cooled*)
- Metaalgekoeld (*liquid metal*)

Techniek: Grotendeels innovatief maar enige ervaring aanwezig door testreactoren. Chinese HTR-PM (gasgekoeld) al operationeel.



1

Organisatorische aspecten

Dit hoofdstuk gaat over de organisatorische aspecten die van belang zijn bij de realisatie van een SMR.

- 1.1 Welke stakeholders zijn er? Welke partijen zijn betrokken bij de realisatie en wat zijn hun rollen?
- 1.2 Welke financieringsmodellen kunnen van toepassing zijn?
- 1.3 Welke termijnen/faseringen kunnen worden aangebracht?
- 1.4 Hoe ziet het vergunningsproces eruit?

1.1 WELKE PARTIJEN ZIJN STAKEHOLDERS BIJ EEN SMR?

Bij de realisatie van een SMR zullen veel verschillende personen, groepen of organisaties betrokken zijn. Deze stakeholders kunnen bijvoorbeeld een belang hebben bij de realisatie van een SMR of deel uitmaken van de realisatie. Andere stakeholders staan buiten de plannen, maar ervaren wel de effecten van de realisatie en/of de bedrijfsvoering die daar op volgt.

Bij iedere te realiseren SMR zal het ongeveer om vergelijkbare stakeholders gaan. Kleine verschillen kunnen ontstaan door bijvoorbeeld locatie-specifieke factoren. Hoog over zijn de stakeholders die invloed uitoefenen op het realisatieproces van een SMR in te delen in:

- **Bevoegde partij**
Bestuursorgaan dat een vergunningaanvraag behandelt, meldingen ontvangt en bevoegd is voor toezicht en handhaving. Bevoegdheden kunnen bij verschillende partijen zijn belegd.
- **Benodigde partijen**
Zonder benodigde partijen is het realiseren van een SMR niet mogelijk. Deze partijen hebben een actieve rol bij de realisatie, faciliteren de realisatie en/of operatie van een SMR of ondervinden invloed van de realisatie en/of operatie van een SMR.

Tabel 1.1. Globaal overzicht van de verschillende stakeholders die bij de realisatie en/of operatie van een SMR betrokken kunnen zijn

Dit overzicht is niet uitputtend. De stakeholders worden kort omschreven in welke (rol)len zij betrokken zijn.

Bevoegde partijen	
Rijk: Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)	Het ministerie van KGG is het bevoegd gezag op het gebied van energiebeleid. Een verkenning van de mogelijkheden van SMR's is opgenomen in het bestaande KGG-beleid. KGG – kan mogelijk bevoegd gezag zijn voor de coördinatie van de vergunningen (zie 1.4).
Rijk: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW)	Het ministerie van IenW is verantwoordelijk voor uitwerking van beleid en regelgeving voor nucleaire veiligheid en stralingsbescherming.
Vergunningverlener ANVS	De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) is een onafhankelijke autoriteit. De ANVS ziet er op toe dat de nucleaire veiligheid en stralingsbescherming in Nederland voldoen aan de hoogste eisen. De ANVS stelt daarvoor regels op, verleent vergunningen, ziet toe op de naleving daarvan en kan handhavend optreden. Voor de bouw van een SMR is een vergunning in het kader van de Kernenergiewet nodig. De ANVS beoordeelt deze vergunningsaanvraag en verleent de vergunning.
Provincie	De provincie kan bevoegd gezag zijn voor (delen van) de omgevingsvergunning. Ook kan de provincie de algehele vergunningsaanvraag coördineren. Daarnaast is zij een belangrijke partij in het samenbrengen van betrokken partijen. Zo heeft de provincie Limburg de SMR-alliantie bijeengebracht.
Gemeente	De realisatie van een SMR kan van invloed zijn op de toekomstige omgevingsplannen in de buurt van de SMR-locatie. Daarnaast is de gemeente het Bevoegd Gezag voor het omgevingsplan dat nodig is om de SMR te realiseren. Ook kan de gemeente de algehele vergunningsaanvraag coördineren.
Regionale uitvoerings- dienst/Omgevingsdienst	Bevoegd (uitvoerend) gezag vanuit milieu- en natuurbeschermingswetgeving op gemeentelijk en provinciaal niveau. Deze partijen controleren, namens gemeente of provincie, de impact van het project op het plaatselijke milieu.
Rijk: Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (VRO)	Een SMR-project kan de projectprocedure doorlopen (voorheen rijkscoördinatieregeling-procedure). In dat geval is het ministerie van VRO ondertekenaar van het projectbesluit. Daarnaast is VRO ook stakeholder inzake nota ruimte.

Benodigde partijen voor de realisatie van een SMR

Initiatiefnemer	De partij die het initiatief neemt tot realisatie van een SMR. Dit kan een gebruiker(sgroep) zijn, een technologieleverancier of een lokale/regionale of nationale overheid.
Gebruikers/Afnemers	Voor het realiseren van een SMR zijn residentiële of industriële afnemers van de opgewekte energie nodig. Zij bepalen de vraag naar de opgewekte energie en zien hun energieleveringszekerheid toenemen.
Technologieleverancier	Instantie die de SMR ontwerpt en finaliseert met eventuele aanpassingen als gevolg van consultaties met lokale bevolking op basis van lokale context en gebruik.
Uitvoeringsorganisatie	De organisatie die verantwoordelijk is voor de realisatie van een SMR.
Opererende organisatie (exploitant)	De organisatie die het uiteindelijke bedrijven van een SMR op zich neemt. De opererende organisatie is de vergunninghouder, verantwoordelijk voor de SMR en de operationele veiligheid.
Financiers (privaat en publiek)	Partijen die de bouw en inbedrijfname van de SMR financieren. Financiers zijn stakeholders vanuit het perspectief dat zij een aandeel hebben in het functioneren/bedrijven van de SMR.
Aannemers/Installateurs	Partijen die delen van de constructie of installatie van de SMR leveren of faciliteren. Er wordt veelal onderscheid gemaakt tussen conventionele aannemers (voor alle niet nucleaire onderdelen) en nucleaire aannemers (voor het nucleaire deel, het zogenaamde nucleaire eiland).
Leveranciers	Zij leveren materialen en onderdelen van SMR's.
Lokale bevolking	Omwonenden (residentieel of industrieel) moeten bij de SMR kunnen blijven wonen of hun industriële activiteiten kunnen blijven uitvoeren. Via de gemeenteraad en inspraakprocedures is de lokale bevolking van belang voor het draagvlak. De bevolking heeft indirect invloed op bijvoorbeeld visuele aspecten van de SMR, zoals bijvoorbeeld koeltorens.
Kennisinstellingen (bv. TU Delft, Nuclear Academy, hbo- en mbo-instellingen)	De kennisinstellingen zijn betrokken bij de opleiding van nucleair specialisten, engineers en operators benodigd voor de realisatie en bedrijfsvoering van SMR's.
Onderzoeksinstituten (bv. TU Delft, TNO, NRG, etc.)	Onderzoeksinstituten zijn betrokken bij de ontwikkeling van kennis, verbeteringen en innovaties aan bestaande en nieuwe type SMR's.
NGO's (Milieudefensie, Greenpeace, etc.)	Een ngo is een organisatie die onafhankelijk is van de overheid en zich op een of andere manier richt op een verondersteld maatschappelijk belang. Over het algemeen gaat het om organisaties die werken aan het bevorderen van milieubescherming, gezondheid, ontwikkelingswerk of mensenrechten.
Netbeheerders	De netbeheerders verzorgen het beheer en transport van energie in de regio. Zij zijn onder andere verantwoordelijk voor de aansluiting van een SMR op het elektriciteitsnet.
Brancheverenigingen (bv. FME, VNO/NCW, etc.)	Brancheverenigingen zijn belanghebbend als potentiële toeleverancier voor de bouw van SMR's of als potentiële afnemer van energie/warmte.

1.2 FINANCIERINGSMODELLEN

Er bestaan vele verschillende modellen of strategieën waarmee kernenergie gefinancierd kan worden.

Door onder andere de NEA [\[REF.4\]](#), Baringa [\[REF.5\]](#) en KPMG [\[REF.6\]](#) is er onderzoek gedaan naar huidige financieringsmodellen voor grote kerncentrales in westerse landen. Voor SMR's lijken er wat betreft de financiering meer mogelijkheden te zijn dan bij grote kerncentrales.

Verder is belangrijk om te noemen dat financieringsmodellen van land tot land erg kunnen verschillen. Het onderzoek 'financieringsconstructies kernenergie' van KPMG geeft hierin het beste Nederlandse perspectief. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen een vijftal verschillende financieringsmodellen:

1. Regulated Asset Base-model (RAB)
2. Contract for Difference (CfD)
3. Mankala-model
4. Power Purchase Agreement (PPA)
5. Deelneming/overheidsfinanciering

Regulated Asset Base-model *Verwachte toepassing in het VK (Sizewell C), wordt vaak ook voor grote conventionele projecten gebruikt [\[REF.6\]](#).*

Het Regulated Asset Base model (RAB) is een model waarin private partijen de investering dragen. Vanaf de start van de bouw krijgen zij een vast 'redelijk rendement' vergoed (de RAB-vergoeding). De RAB-vergoeding dekt een 'redelijk kostenniveau'. Dit resulteert in een redelijk rendement voor de investeerders waardoor een lagere financieringslast ontstaat. Een regulator (onafhankelijke derde) bepaalt wat 'redelijke kosten' zijn. Kosten boven dit niveau zijn voor rekening van de eigenaar.

De RAB-vergoeding kan worden betaald door de Staat en eventueel worden opgehaald bij energiegebruikers via een bijdrage in de energierekening. Als de RAB-vergoeding wordt verstrekt door de Staat is deze vanaf de start van de bouw betrokken en blijft betrokken zolang risicodekking via de RAB-vergoeding nodig is.

Contract for Difference [\[REF.7\]](#)

Momenteel van toepassing in het VK (Hinkley Point C)

In een Contract for Difference (CfD) is er een overeenkomst tussen de koper van de energie en de verkoper/producent van de energie. De energie wordt voor een vooraf afgesproken bedrag gekocht (de zogeheten 'Strike-price'). Specifieker is de two-way CfD. Daarin krijgt de verkoper van energie subsidie als energieprijzen lager zijn dan de Strike-price én verkoopt hij de energie tegen een lager tarief als energieprijzen hoger zijn dan de Strike-price. Overigens is dit dus alleen een garantie tijdens exploitatie, en niet voor eventuele vertragingen bij bouw of vergunningsproces.

Mankala-model [\[REF.8\]](#)

Momenteel van toepassing in Finland (Olkiluoto)

In het Mankala-model wordt een consortium van meerdere private partijen opgericht. Iedere partij verplicht zich om de opgewekte energie naar rato van hun aandeel in het consortium af te nemen. De partijen kunnen de energie rechtstreeks gebruiken of doorverkopen.

Vaak is er ook sprake van een mate van ontwikkelaarfinanciering. Daarbij neemt de ontwikkelaar van de technologie ook een deel van de financiering op zich. Bij het Hanhikivi-project (Finland) was bijvoorbeeld afgesproken dat Rosatom turn-key² zou opleveren en daarbij alle bouwrisico's zou dragen. Rosatom is een Russisch staatsbedrijf in nucleaire technologie. De bouw is overigens na de Russische invasie van Oekraïne afgelast. Overheden zijn dikwijls betrokken via aparte garanties en afspraken met de private partijen.

² Bij een turn-key project draagt de opdrachtgever de complete bouw van de reactor over aan de opdrachtnemer. De opdrachtnemer neemt alle taken op zich die verbonden zijn aan de bouw.

Power Purchase Agreement [\[REF.6\]](#)

Momenteel van toepassing in VAE (Barakah) en Turkije (Akkuyu)

Dit model wordt vaak door Rosatom toegepast. Een PPA is, net als een CfD, een vorm van een afnamecontract dat wordt gesloten tussen energieleverancier en afnemer. Naast een prijsgarantie is er in de PPA ook een afspraak gemaakt voor de afname van energie voor een periode van 10 tot 60 jaar.

Ook bij zonne- en windparken wordt dit model gebruikt. Belangrijk is dat de ontwikkelaar eigenaar van de energiecentrale blijft. Dus alleen de energie wordt verkocht, niet de SMR.

Deelneming/overheidsfinanciering

De staat is in dit model verantwoordelijk als eigenaar. De staat ontwikkelt de reactor of laat die ontwikkelen en exploiteren. In 2021 hebben Sawicki en Horbaczewska het zogeheten SaHo-model als financieringsvorm doorontwikkeld [\[REF.9\]](#). Daarbij bouwt de staat haar rol stapsgewijs af voor de inbedrijfsneming. De staat neemt hierbij dus de politieke en financiële risico's (deels) op zich. De hoeveelheid risico en de mate waarin de staat haar risico-aandeel afwikkelt, is afhankelijk van de keuzes die de staat maakt en de mate van deelneming. Toepassing van dit model is mede afhankelijk van goedkeuring van de Europese Commissie.

Voor de nieuwe, grote kerncentrales die Nederland voornemens is om te bouwen is recent een marktconsultatie uitgevoerd. Hierin is samen met de mogelijke technologieleveranciers en marktpartijen een verkenning gedaan naar de mogelijkheden van, en de voorwaarden voor, private financiering. Hieruit blijkt dat de overheid in ieder geval gedurende de eerste fases van de bouw van de centrales een significant deel van de financiering op zich zal moeten nemen. Ook in het buitenland zien we dat nucleaire nieuwbouwprojecten niet worden gerealiseerd zonder uitgebreide ondersteuning van de overheid. Marktfinanciering zal gedurende de bouwperiode beperkt beschikbaar zijn vanwege het hoge risicoprofiel voor investeerders tijdens deze periode [\[REF31\]](#). Het is dan ook aannemelijk dat voor de nieuwe, grote kerncentrales een vorm van staatsdeelneming toegepast zal worden.

Conclusie

Investeren in kernenergie vraagt om een lange horizon waarbij langjarige politieke steun nodig is.

Voor SMR's lijken er wat betreft de financiering meer mogelijkheden te zijn dan bij grote kerncentrales. Enerzijds doordat SMR's een lagere investering vereisen. Maar ook omdat verwacht wordt dat het modulaire karakter van SMR's resulteert in een kortere bouwtijd. Hierdoor kunnen er eerder inkomsten gegenereerd worden en zal het aandeel van de rentevoet kleiner worden dan voor grotere centrales. Hierdoor zal (volledige) private financiering eerder mogelijk zijn. Mogelijke financieringsconstructies voor SMR's zullen in de toekomst nog nader moeten worden verkend.

1.3 TERMIJNEN EN FASERINGEN

De realisatie van een SMR doorloopt meerdere fases tussen de besluitvorming en de daadwerkelijke bedrijfsvoering van de installatie. De flowchart onderaan de pagina visualiseert dit proces op hoofdlijnen. Hieronder wordt iedere stap kort toegelicht.

1. Besluitvorming

Een SMR-traject kan door verschillende partijen geïnitieerd worden. Bijvoorbeeld door (industriële) partijen met een energievraag (Cluster Energie Strategie), een SMR-technologieleverancier, op initiatief van de Rijksoverheid vanuit een maatschappelijke visie (klimaatbeleid en energiebehoefte) of door een provincie (vanuit een regionale behoefte, Regionale Energie Strategie).

2. Locatie

De initiatiefnemer selecteert een voorkeurslocatie. In het kader van de merregelgeving zal in het MER naar 'redelijkerwijs te beschouwen' alternatieve locaties gekeken moeten worden. Het bevoegd gezag beoordeelt de geschiktheid van de locatie op basis van de randvoorwaarden. Denk daarbij aan regionaal draagvlak, inpassing binnen het omgevingsplan, koelwatermogelijkheden, eventuele aansluiting op het hoogspanningsnet, inpassing bij de lokale energievraag en een toereikende bodemgesteldheid.

3. Aanbesteding

Als de initiatiefnemer geen technologieleverancier is, zal de initiatiefnemer een programma van eisen opstellen. SMR-aanbieders kunnen zich inschrijven op de aanbesteding door een offerte in te dienen. Daarna selecteert de initiatiefnemer de aanbieder die de opdracht krijgt op basis van de vooraf opgestelde criteria.

4. Ontwerp

De ontwikkelaar zorgt voor inpassing van het standaard SMR-ontwerp in de lokale omgeving. Daarbij wordt rekening gehouden met de specifieke lokale randvoorwaarden.

5. Vergunning

De ontwerp- en vergunningsfase lopen deels parallel. Er is een wisselwerking tussen de ontwikkelaar en de uitvoerende organisatie die verantwoordelijk is voor het verkrijgen van alle vergunningen. Sommige vergunningen (omgevingsplanaanpassing) kunnen worden aangevraagd als het ontwerp nog niet volledig gedetailleerd is. Echter, voor de uiteindelijke vergunningverlening is een volledig ontwerp nodig. Dat is de reden voor de volgorde zoals hier benoemd. De vergunningverlenende instanties zijn gemeente, provincie en de Rijksoverheid en met name de ANVS voor alle nucleaire vereisten. Naast technische aspecten komen ook organisatorische vereisten aan bod. Het vergunningsproces zal versnellen als meerdere SMR's (van hetzelfde type) al ergens vergund zijn. Ook internationale goedkeuringen door toezichthouders zoals US-NRC, UK-ONR werken versnellend. De verwachte doorlooptijd voor de oprichtingsvergunning van een voldoende bewezen lichtwater SMR is ongeveer drie jaar. Voor elk nieuwbouwproject zullen ook plaatselijke milieuvergunningen moeten worden verleend (zie sectie 1.4).

6. Constructie

Na het verkrijgen van de oprichtingsvergunning kan de bouw starten. SMR's worden modulair gebouwd. De verwachting is dat meerdere SMR's met hetzelfde ontwerp in binnen- en buitenland gebouwd gaan worden. Dit zal bijdragen aan een kortere en beter voorspelbare bouwtijd. De door leveranciers verwachte bouwtijd voor een lichtwater SMR bedraagt op dit moment ongeveer 3 à 4 jaar.

7. Inbedrijfstelling

Inbedrijfstelling omvat een breed scala aan activiteiten die leiden tot de ingebruikneming van een SMR. Tijdens de inbedrijfstelling worden de constructies, systemen en componenten gecontroleerd op overeenstemming met het ontwerp. Ze worden operationeel gemaakt en getest om te bevestigen dat ze voldoen aan de verwachte prestatiecriteria. Voordat gestart kan worden met de 'warme' inbedrijfstelling moet de splijtstof op de locatie aanwezig zijn. Hiervoor moet de operationele vergunning al zijn verleend.

8. Bedrijfsvoering

De overgang naar commerciële bedrijfsvoering.



1.4 VERGUNNINGVERLENING

De vergunningverlening van een SMR is een niet-alledaags traject. Voor de realisatie en exploitatie van een SMR zijn diverse vergunningen vereist, zowel conventionele vergunningen als ook nucleaire vergunningen, waarbij er overlap zal zijn tussen deze vergunningen. Bij de beoordeling ervan zullen veel verschillende instanties betrokken zijn zoals de ANVS, gemeente, provincie, veiligheidsregio, Rijkswaterstaat etc. Zie Figuur 1.1 (pagina 17) voor een schematische weergave van een mogelijk SMR-vergunningstraject.

Bij projecten met een elektrisch vermogen van > 500 MW geldt dat in beginsel het ministerie van KGG bij wet coördinator is [\[REF.11\]](#). Bij SMR's die kleiner zijn dan 500 MW, geldt deze coördinatie dus niet per definitie. Het coördineren van vergunningen kan zowel voor- als nadelen hebben. Het kan zorgen voor afstemming en consistentie in de beslissingen van de autoriteiten. Coördinatie kan efficiënter zijn en een duidelijk overzicht creëren in de vergunningsprocedure voor alle stakeholders.

Het risico van het coördineren van vergunningen kan echter zijn dat vertraging in het ene vergunningsproces leidt tot vertraging in een ander proces. Kortom: het is voor de vergunningverlening van een SMR belangrijk om samen met de autoriteiten vooraf een duidelijke vergunningsstrategie af te spreken.

Aanpassen omgevingsplan (indien nodig)

Als de realisatie en exploitatie van een SMR niet past in het huidige Omgevingsplan, is een aanpassing noodzakelijk. Niet-passend kan betekenen dat de functie of de afmetingen van de SMR niet overeenkomen met de eisen van het huidige Omgevingsplan. Ook de voorbereiding van het terrein, zoals de verplaatsing van infrastructuur, de waterkering of het opvullen van grond, moet in overeenstemming zijn met het milieuplan.

Voor een SMR kunnen onderstaande vergunningen benodigd zijn:

- **Nucleaire vergunningen**

De Kernenergiewet (KeW) artikel 15b vereist een vergunning voor het vestigen (bouwen), in bedrijf stellen en exploiteren van een SMR. Voorafgaand aan de vergunningverlening zijn vergaderingen met de ANVS (nucleaire toezichthouder) nodig. Hierin kan de strategie voor het verlenen van vergunningen voor een faciliteit worden afgesproken. Ook kan in overleg worden bepaald hoeveel vergunningen er nodig zijn. Voor het PALLAS-project is er een vergunning aangevraagd voor de bouw van de reactor en er is een aanvraag voor de in bedrijfstelling in voorbereiding [\[REF.33\]](#).

De verplichte inhoud van de aanvraag voor de Kernenergiewet is wettelijk voorgeschreven in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse) [\[REF.25\]](#). Dit omvat onder andere een Veiligheidsrapport en een voorlopig ontmantelingsplan. Voor de bouw van een SMR is ook een milieueffectrapportage vereist. In het MER worden alle aspecten waarop het project een effect kan hebben, dus niet enkel nucleaire aspecten, behandeld. Denk hierbij aan bevolking, gezondheid, biodiversiteit, bodem, water, lucht etc. [\[REF.37\]](#). Naast formele aanvraagdocumenten is er nog een heel aantal andere belangrijke documenten op basis waarvan ANVS besluit een vergunning te verstrekken, zoals het (Preliminary) Safety Analyses Report ((P)SAR).

Meer informatie over de beoordeling van de ANVS en een beschrijving van hoe de ANVS haar vergunningverlening in de praktijk inricht, is te vinden in de Handreiking vergunningverlening ANVS [\[REF.10\]](#); (er wordt op het moment van schrijven – 10 december 2024 – gewerkt aan een revisie van dit document).

- **Conventionele vergunningen**

Omgevingsvergunning wateractiviteit

Deze vergunning is nodig voor aan- en afvoer van koelwater (warmte) in het oppervlaktewater (rivier, zee). Deze vergunning omvat ook het aanbrengen van constructies en pijpleidingen in het oppervlaktewater (rivier, zee) die nodig kunnen zijn voor koeling en/of het kruisen van waterkeringen (dijken).

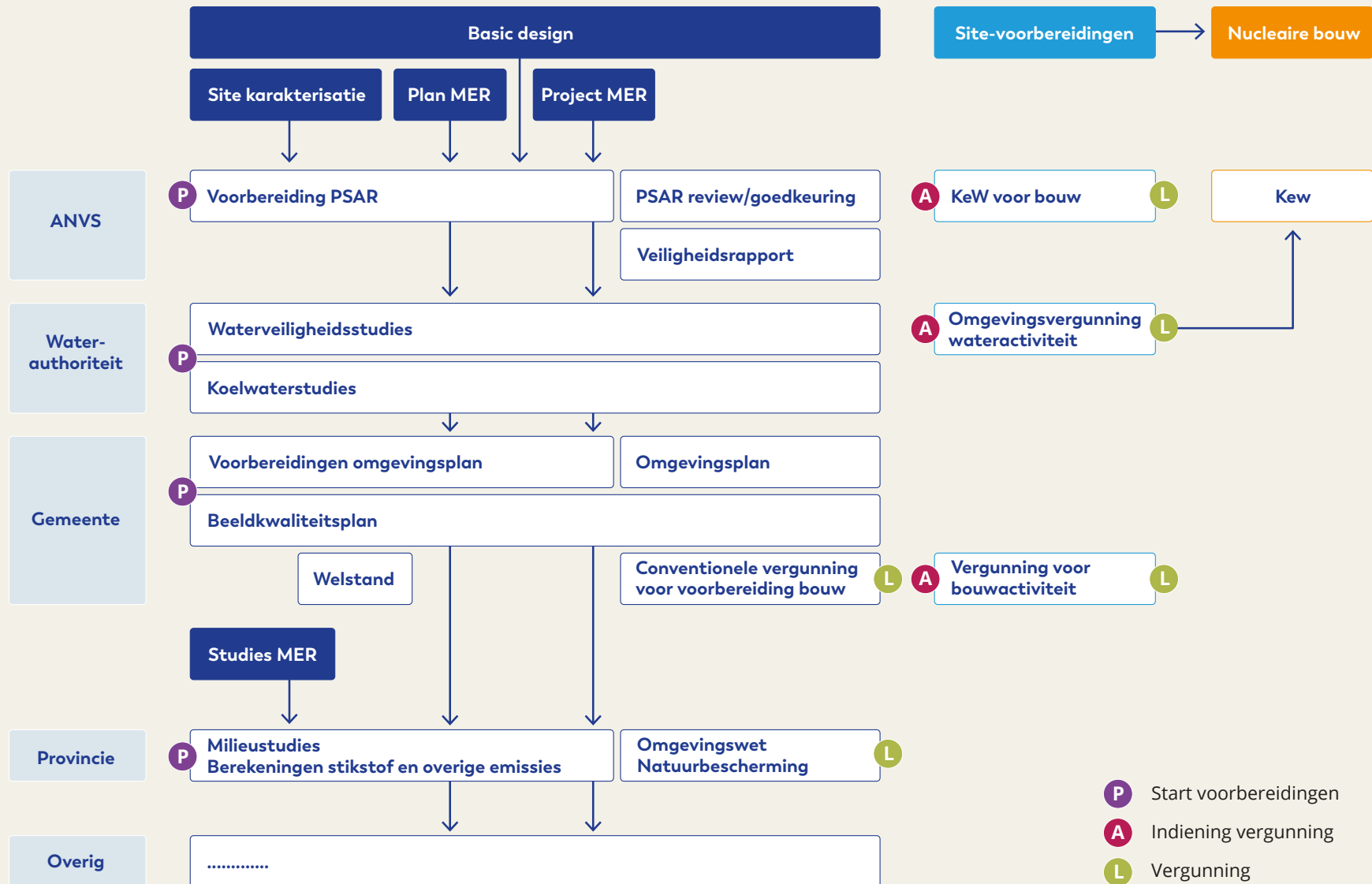
Vergunning voor milieubelastende activiteit

Een milieuwetvergunning kan nodig zijn voor alle activiteiten van de bouw van een SMR, voor de exploitatie van een SMR en voor het bouwrijp maken van het terrein.

Vergunning voor bouwactiviteit

Voor elk gebouw is een bouwvergunning nodig, ook voor wegen en hekken. Ook voor de leidingen en in- en afvoerconstructies en ontgravingen, afvoer of opvulling van het terrein. De belangrijkste aspecten die moeten worden beoordeeld zijn veiligheid (constructie, brandveiligheid), milieuplan (bouwrijpheid, afmetingen, functie en parkeren) en of de SMR en andere gebouwen en constructies voldoen aan de eisen in het Beeldkwaliteitsplan.

Figuur 1.1. Schematische weergave van een mogelijk SMR vergunningstraject



Wat is het ruimtebeslag van een SMR?

- 2.1 Wat is het ruimtebeslag door gebouwen? Wat is de terreingrens?
- 2.2 Wat zijn veiligheidszones en hoe worden ze bepaald?
- 2.3 Kan een SMR in een energie-intensief bedrijf of cluster worden ingepast? Op welke afstand kan bebouwing komen?

Figuur 2.1. Impressie van het AP300 (Westinghouse) reactorgebouw (directe ruimtebeslag) in vergelijking met een voetbalveld. Let op dat hier het indirecte ruimtebeslag – randgebouwen en de terreingrens – niet zijn meegenomen [REF.12].



2.1 GEBOUWGROOTTE EN TERREINGRENS

Er worden bij nucleaire installaties veelal twee verschillende oppervlaktes gegeven: het directe en indirecte ruimtebeslag.

- Het **directe** ruimtebeslag is het vaste benodigde oppervlakte voor een kern-centrale: dit omvat bijvoorbeeld het reactorgebouw met alle reactorsystemen en het beschermd gebied eromheen (*fenced area*). Het reactorgebouw zelf neemt hiervan relatief weinig ruimte in. Een voorbeeld van het reactorgebouw van een Westinghouse SMR, de AP300, is te zien in Figuur 2.1.
- Het **indirecte** ruimtebeslag wordt gedefinieerd door de ruimte om een installatie heen dat mogelijk belemmeringen in ruimtegebruik ondervindt t.g.v. de aanwezigheid van de installatie. Dit omvat alle bijgebouwen die nodig zijn voor het bedienen van de reactor, zoals koelinstallaties, kantoorgebouwen en warenhuizen, tot de terreingrens. Het indirecte ruimtebeslag kan flink verschillen per locatie en kan afhankelijk zijn van nationale regelgeving en specifieke inpassing.

Voor de terreingrens zijn veiligheidseisen bepalend, niet zozeer de daadwerkelijk benodigde ruimte voor de bijgebouwen. Soms wordt voor het indirecte ruimtebeslag de volledige preparatiezone meegenomen (zie Sectie 2.2), maar door het relatief lage vermogen van SMR's is de kans aanwezig dat de benodigde preparatiezone stopt bij de terreingrens. Dit zal echter per SMR-ontwerp onderzocht moeten worden.

In Tabel 2.1 wordt een aantal indicaties gegeven van de te verwachten beschermde gebieden, d.w.z. het directe ruimtebeslag, bij doorontwikkelde SM-LWR's. Deze drie SMR's leveren relatief veel vermogen (> 300 MWe). Dat betekent dat het ruimtebeslag voor deze SMR's als een ruwe bovengrens gezien kan worden.

Tabel 2.1. *Overzicht van het directe ruimtebeslag van een tweetal conventionele kerncentrales en een drietal SMR-ontwerpen (data uit NRG Marktanalyse SMR's)*

Reactor	Vermogen [MW _e]	Direct ruimtebeslag [ha]	Voetafdruk [GW/km ²]
EPR	1650	20*	8
AP1000	1000	10*	10
NuScale (VOYGR-12)	924	14	7
Rolls-Royce SMR	470	4,0	12
BWRX-300	300	2,6	12

* Geschat via Olkiluoto 3 (Finland) op Google Maps

* Uit [REF13] *Introduction and General Description of the Plant – AP1000 Design Control Document*

2.2 VEILIGHEIDSZONES OM HET TERREIN

Er gelden onder de Kernenergiewet geen bijzondere beperkingen voor het gebruik van de omgeving rond een kerncentrale. Wel gelden aan de terreingrens wettelijke eisen voor het groepsrisico en het individueel risico. Die zijn vastgelegd in het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse). Ook gelden er wettelijke limieten aan de effectieve dosis voor kinderen en volwassenen, zowel bij normaal bedrijf als tijdens ongevallen.

Daar staat tegenover dat de ruimte rond een kerncentrale (dus buiten de terreingrens) wel aan bepaalde voorwaarden moet voldoen [REF.14]. Het betreft het bepalen van zogenaamde Preparatiezones waarbinnen maatregelen, zoals evacuatie of schuilen, toegepast moeten kunnen worden (zie ook Sectie 5.2). Deze maatregelen moeten ook al zijn voorbereid. De grootte van deze zones verschilt per type maatregel.

Voor de preparatiezones rond nieuwe kernreactoren gelden randvoorwaarden. Die schrijven voor dat de preparatiezone niet groter dan 5 kilometer mag zijn (zie Sectie 5.2). Voor SMR's kan deze zone aanzienlijk kleiner zijn.

2.3 INPASSING ENERGIE-INTENSIEF CLUSTER

Als aan de veiligheidsvoorwaarden wordt voldaan, is een SMR inpasbaar in een energie-intensief bedrijf of cluster. Deze veiligheidsvoorwaarden betreffen:

- Het voldoen aan de voorwaarden die worden gesteld aan het individuele risico en het groepsrisico. Dit is vastgelegd in het Bkse [\[REF.25\]](#).
- Het voldoen aan de dosislimieten voor de bevolking zoals vastgelegd in het Bkse én het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) [\[REF.36\]](#).
- Het voldoen aan de voorwaarden die worden gesteld aan noodmaatregelen zoals preparatiezones.

Om vast te stellen of aan deze voorwaarden wordt voldaan, wordt een risico-beoordeling gemaakt waarbij de verschillende externe risico's meegenomen worden. Dit betreft risico's door omliggende activiteiten zoals vliegbewegingen, aardbevingen, overstromingen, nabijgelegen productie van explosieve stoffen, nabijgelegen opslag van brandbare materialen, etc. Ook moeten de noodmaatregelen uit de eerder besproken preparatiezones rondom het complex uitgevoerd kunnen worden; deze worden ook meegenomen in de risicoberekening.

Ten slotte kunnen aanvullende vereisten vanuit de omgevingswet of het bestemmingsplan van toepassing zijn. Echter de potentiële gevolgen in combinatie met de vereiste risicolimieten voor de bevolking bepalen uiteindelijk de minimale afstand van de SMR tot de (bewoonde of bedrijfsmatige) bebouwing. Dit moet specifiek voor een SMR-ontwerp op een bepaalde locatie per keer worden vastgesteld.

Figuur 2.2. Glastuinbouw is een voorbeeld van een energie-intensief cluster en heeft zowel warmte als elektriciteit nodig. SMR's kunnen hier aan een decentrale oplossing bijdragen.



3

Benodigde koelvoorzieningen

In dit hoofdstuk behandelen we de mogelijke koelvoorzieningen voor SMR's.

We behandelen hier de volgende vragen:

- 3.1 Op welke manieren kunnen SMR's gekoeld worden?
Welke koelmogelijkheden zijn geschikt voor locaties in Nederland?
- 3.2 Welke gevolgen heeft welke koelmethode?

3.1 KOELMETHODEN

Het meest gangbare koelsysteem van kernreactoren – en dus ook voor de meest gangbare SMR's – bestaat uit drie koelkringen.

1. In de reactor wordt met kernsplijting warmte geproduceerd. Die warmte wordt via het primaire (nucleaire) koelsysteem van de SMR uit de kern afgevoerd.
2. De primaire warmte wordt via een warmtewisselaar overgedragen aan het secundaire (niet-nucleaire) koelsysteem. Daar wordt de stoom geproduceerd die de stoomturbine aandrijft. Met de daaraan gekoppelde generator wordt vervolgens elektriciteit geproduceerd.
3. Een deel van de opgewekte warmte kan echter niet in de energieomzetting worden gebruikt. Er blijft zogenaamde restwarmte over. Deze restwarmte wordt meestal uit het secundaire koelsysteem afgevoerd naar een zogenaamd tertiair koelsysteem.

Deze drie kringlopen zijn strikt van elkaar gescheiden. Er kan door fysieke barrières geen radioactiviteit worden overgedragen vanuit de primaire naar de secundaire en tertiaire kringloop. Dit wordt voortdurend gemonitord.

Voor inpassing van SMR's in Nederland, is het vooral relevant om de afvoer van warmte vanuit dit secundaire koelsysteem naar de tertiaire koeling te beschrijven: de zogenaamde warmteput (de *heat sink*).

3.1.1 Algemeen

Alle koelsystemen die gebruikt worden bij fossiele elektriciteitscentrales (kolen, gas) en conventionele kerncentrales, zijn ook toepasbaar bij SMR's. Veelgebruikte oplossingen zijn bijvoorbeeld doorstroomsystemen, natte koeltorens en gesloten droge koelsystemen. Daarnaast kan er gekozen worden voor combinaties hiervan (hybride koelcircuits).

De koelbehoefte van een SMR wordt bepaald door een aantal ontwerpaspecten:

- **de specificaties van de reactor**
het thermisch vermogen en de algehele efficiëntie.
- **de omgeving**
de temperatuur van het innamewater en/of de omgevingslucht.
- **het ontwerp van het koelsysteem**

Karakteristiek voor doorstroomsystemen is de rechtstreekse wateropname uit bijvoorbeeld een rivier. Nadat de warmte uit het secundaire systeem van de reactor in een warmtewisselaar is weggekoeld, wordt het opgewarmde koelwater in het tertiaire systeem weer naar de rivier afgevoerd.

In het geval van koeling met een natte koeltoren wordt water van een koelsysteem in de koeltoren in contact gebracht met lucht. De koeling vindt in de toren plaats door verdamping. Dit is zichtbaar aan de grote wolken waterdamp boven de koeltoren.

De werking van gesloten droge koelsystemen is vooral gebaseerd op het gebruik van lucht in plaats van water. Hierbij vindt, in tegenstelling tot natte koelsystemen, geen contact plaats tussen het koelwater en de lucht (hierbij ontstaat dus ook geen witte waterdamp).

In het geval van een hybride koelcircuit wordt de af te voeren warmte het grootste deel van het jaar afgevoerd met een droog koelsysteem. Hier wordt gebruik gemaakt van de omgevingslucht. In de situaties waar de omgevings temperatuur te hoog wordt, schakelt het systeem over op natte koeling. Daarbij wordt gebruik gemaakt van het koeleffect van verdampend water.

Bij de keuze voor een koelsysteem bestaat er dus geen kant-en-klare of 'beste' oplossing. De keuze is altijd maatwerk: een afweging tussen verschillende variabelen en aspecten. Er moeten bijvoorbeeld afwegingen gemaakt worden tussen emissies zoals warmte en gebruikte additieven (zoals chloor tegen algen en schelpaangroei), wateronttrekking en efficiëntie.

3.1.2 Beschikbaarheid van voldoende koelwater in Nederland

SMR's zijn op meerdere plekken in Nederland inpasbaar. Er is in het Nederlandse oppervlaktewater voldoende koelcapaciteit voor SMR's. Dat valt af te lezen uit de technische criteria in de handreiking voor Wvo³- en Wwh⁴-vergunningverlening. Voor de mogelijkheden van koelwater in oppervlaktewateren, zoals rivieren, zal verder onderzoek nodig zijn om zeker te stellen dat er voldoende afvoercapaciteit op de desbetreffende plek beschikbaar is. Daarnaast dient er nader gekeken te worden naar ecologische randvoorwaarden, danwel interferentie met bijvoorbeeld drinkwaterbronnen. Geschikte inpassingsplaatsen zijn in eerste instantie te vinden aan de grote rivieren (zoals de Waal, de Maas, de IJssel, en de Nederrijn), het IJsselmeer en de Noordzee.

Daarnaast zouden SMR's ook ingepast kunnen worden aan de kleinere rivieren en op locaties met beperkte beschikbaarheid van oppervlaktewater. Er kan dan gebruik gemaakt worden van droge koelsystemen, koeltorens, of hybride systemen.

³ Wvo: Wet verontreiniging oppervlaktewateren

⁴ Wwh: Wet op de waterhuishouding

De uiteindelijke keuze voor het type koelsysteem en/of de locatie wordt in Nederland vooral bepaald door eisen die vastliggen in regelgeving. Zo moet de beoogde koeltechniek en het specifieke ontwerp voldoen aan criteria voor de 'Best Beschikbare Techniek'. Die criteria zijn door de Europese Commissie gedefinieerd in de BREF-koeling [REF.15].

Aanvullend bestaan er meerdere manieren voor het beoordelen van de ecologische effecten die ontstaan bij het lozen van warmte [REF.16] en conditioneringsmiddelen [REF.17], evenals het onttrekken van oppervlaktewater [REF.16].

3.2 GEVOLGEN VAN VERSCHILLENDE KOELMETHODEN

Algemeen kan gesteld worden dat hoe groter het thermisch vermogen van de reactor, hoe groter de koelbehoefte. Zoals in paragraaf 3.1 beschreven kan de restwarmte zowel door lucht als door water worden weggekoeld. De keuze voor water- of luchtkoeling heeft invloed op de bruikbare koelcapaciteit. De keuze bepaalt ook de kosten en het ruimtebeslag van de koelsystemen. Een watergekoeld systeem is efficiënter. Het is eenvoudiger om warmte over te dragen naar water dan naar lucht. Hierdoor zal een open natte koeltoren bijvoorbeeld veelal goedkoper zijn en ook minder ruimte in beslag nemen dan een droog koelsysteem.

Tabel 3.1 vergelijkt de impact van enkele relevante aspecten voor vier koelmethodes.

Tabel 3.1: Impact van aspecten voor vier verschillende koeltechnieken

Koelsysteem	Doorstroom	Open natte koeltoren	Open hybride koeltoren	Gesloten droge koeling
Energieverbruik	weinig	veel	veel	veel
Waterverbruik	veel	veel	weinig	weinig
Ecologische schade door onttrekking	veel	weinig	weinig	weinig
Warmte emissie oppervlaktewater	veel	weinig	weinig	weinig
Additieve emissie oppervlaktewater	veel	veel	veel	weinig
Lucht gedragen emissie	weinig	weinig	weinig	weinig
Pluimformatie	weinig	veel	weinig	weinig

De hoeveelheid af te voeren restwarmte heeft niet alleen invloed op het ontwerp van het koelsysteem. Het heeft ook invloed op de directe omgeving.

Het onttrekken én het lozen van koelwater beïnvloedt immers het betreffende waterlichaam. Binnen de wetgeving voor natuurbescherming geldt een drietal criteria waarop getoetst moet worden [REF.38]:

- **Mengzone:** limitering van de geometrie van de koelsysteemuitlaat op basis van de waterhoogte,
- **Onttrekking:** limitering van de koelbehoefte in m³/s of m³/h,
- **Opwarming:** limitering van de temperatuurverhoging van het koelwater.

De criteria *mengzone* en *opwarming* zorgen ervoor dat geldende waterkwaliteitsdoelstellingen voor temperatuur niet worden overschreden. Daarnaast waarborgt het criterium *mengzone* de mogelijkheid voor migratie van organismen langs de koelwaterpluimen⁵ die ontstaan ten gevolge van warmtelozingen. Met het criterium *onttrekking* wordt een relatie gelegd tussen de omvang van de onttrekking en het oppervlaktewater waaraan het water wordt onttrokken. Naast deze verhouding zijn er voor onttrekking geen getalsmatige normen geformuleerd.

De criteria *onttrekking* en *opwarming* zijn min of meer direct gekoppeld aan de hoeveelheid af te voeren restwarmte. Er is ook een relatie met de algehele efficiëntie van de installatie. Als de efficiëntie hoog is, zal er een lagere onttrekking nodig zijn. En andersom: als de af te voeren restwarmte groter is, zal er een grotere onttrekking nodig zijn.

In het ontwerp van een koelsysteem kan er gestuurd worden op de onttrekking met een bepalend criterium op opwarming. Of er kan gestuurd worden op opwarming met een bepalend criterium op onttrekking. Een combinatie van deze twee kan ook: zodanig dat de SMR thermisch is uitgebalanceerd. Deze combinatie kan aangetoond worden met een eenvoudige energiebalans. De restwarmte die voor kerncentrale Borssele moet worden afgevoerd is grofweg 800 MW. Als de reactor wordt bedreven met een limiet van 10 graden Celsius opwarming dan moet er (in het geval van een doorstroomsysteem) koelwater met een debiet van ongeveer 19 m³/s vanuit een waterlichaam onttrokken worden.

⁵ Organismen die zeer gevoelig zijn voor veranderlijke omgevingstemperaturen kunnen slechter floreren indien koelwaterpluimen in te hoge temperaturen resulteren.

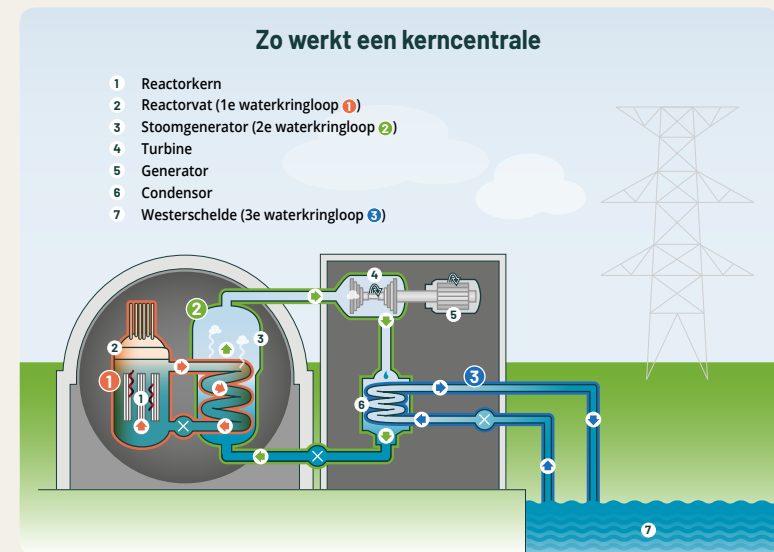
Rekenvoorbeeld:

Voor de kerncentrale Borssele geldt dat er grofweg 1.400 MW aan warmte gegenereerd wordt door kernsplijting en dat er grofweg 600 MW aan elektrische energie mee wordt opgewekt.

Dit komt overeen met een efficiëntie van ongeveer 35%, wat gebruikelijk is voor omzetting bij thermische opwekking.

De fractie die overblijft, ongeveer 65%, is de af te voeren restwarmte. Dit komt overeen met ongeveer 800 MW. Deze wordt in het geval van Borssele weggekoeld richting de Westerschelde.

$$\begin{aligned}
 Q [W] &= m [kg/s] * 4\,200 [J/kg \cdot ^\circ C] * 10 [^\circ C] \\
 m [kg/s] &= Q [W] / (4\,200 [J/kg \cdot ^\circ C] * 10 [^\circ C]) \\
 w [m^3/s] &= m [kg/s] / [kg/m^3] \\
 w [m^3/s] &= Q [W] / (4\,200 [J/kg \cdot ^\circ C] * 10 [^\circ C]) / [kg/m^3] \\
 &= 800\,000\,000 [W] / (4\,200 * 10) / 1\,000 \\
 &= 800\,000\,000 / (42\,000) / 1\,000 \approx 19 [m^3/s]
 \end{aligned}$$



(Bron afbeelding: epz.nl)

Hoe dragen SMR's bij aan de betrouwbaarheid van het energiesysteem?

- 4.1 Hoe kan de inzet van SMR's gecombineerd worden met de inzet van hernieuwbare energiebronnen? Welke mogelijkheden bieden SMR's naast elektriciteitsopwekking?
- 4.2 In hoeverre kunnen SMR's voor *load following* worden ingezet, en welke technische voorwaarden zijn hieraan verbonden?
- 4.3 Wat is de mogelijke rol van SMR's binnen waterstofproductie?

4.1 BIJDRAGE BETROUWBAARHEID ENERGIESYSTEEM

In een energiesysteem dat voornamelijk zal draaien op variabele hernieuwbare energiebronnen kunnen relatief stabielere en flexibelere energiebronnen een belangrijke toevoeging zijn om de betrouwbaarheid van het energiesysteem te waarborgen en de haalbaarheid van de energietransitie te vergroten. Op dit moment wordt stabiliteit voornamelijk geleverd door fossiele energiebronnen zoals kolen- en gascentrales, die naar wens op- en afgeschakeld kunnen worden afhankelijk van de energievraag en het energieaanbod uit hernieuwbare energiebronnen. Kerncentrales bieden een CO₂-vrij alternatief om dezelfde stabiliserende functie te vervullen. Aanvullend kunnen SMR's de mogelijkheid bieden om gebieden met een grote energievraag lokaal van hun energiebehoefte te voorzien, d.w.z. decentrale energielevering. Zo kan de druk op het landelijk elektriciteitsnet worden verlicht. SMR's kunnen op die manier de noodzaak aan overcapaciteit van hernieuwbare energiebronnen (besproken in 4.1.1), flexibiliteitsystemen en netverzwaring verminderen.

Een belangrijke factor bij de stabiliserende inpassing van SMR's is de mogelijkheid om het geleverde vermogen op- en af te schalen, ook wel *load following* genoemd. Vanwege het belang van *load following* worden de mogelijkheden en technische voorwaarden apart behandeld in Sectie 4.2. Wel is het belangrijk om te noemen dat SMR's vanuit een technisch en efficiëntie standpunt idealiter altijd op vol vermogen draaien. Ook heeft op- en afschalen impact op de businesscase van SMR's.

Er zijn twee leveringsmethodes te onderscheiden in hoe SMR's een bijdrage kunnen leveren aan een betrouwbaar energiesysteem:

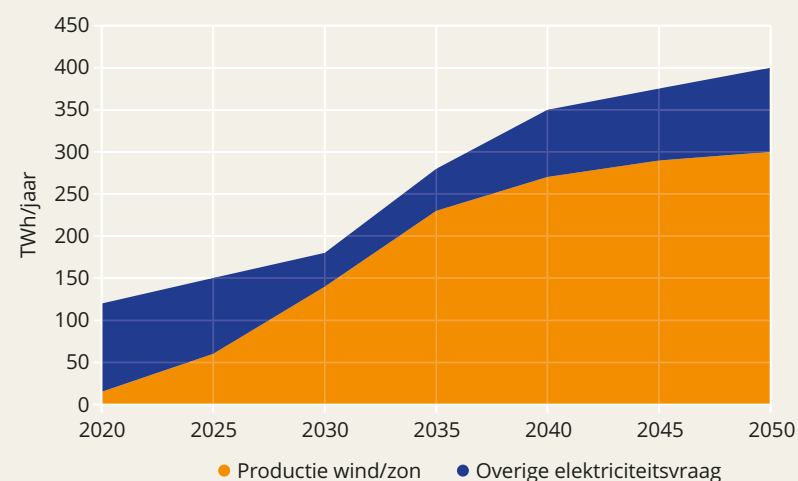
- 1 **Via elektriciteitsproductie** (behandeld in paragraaf 4.1.1) als aanvulling op hernieuwbare energiebronnen om gezamenlijk tot een stabiel elektriciteitsnet te komen, ofwel als stabiliserende factor op het landelijk elektriciteitsnet of als decentrale elektriciteitsbron om het net te verlichten.
- 2 **Via warmtelevering** (behandeld in paragraaf 4.1.2) om processen die moeilijker te elektrificeren zijn of mogelijk economisch voordeliger zijn direct van warmte te voorzien. Denk aan hoge-temperatuurindustriewarmte (via geavanceerde SMR's) en stadsverwarming.

Waterstofproductie (behandeld in 4.3) kan gezien worden als een vervolgp-product van elektriciteitsproductie, of een combinatie van elektriciteitsproductie en warmtelevering. Waterstof is in die context dus niet een primair product van een SMR, maar is wel een mogelijke inzet van SMR's bij een solide businesscase.

4.1.1 Elektriciteit

Door de inzet op elektrificatie in praktisch alle sectoren van de samenleving, is de verwachting dat de vraag naar elektriciteit in 2050 fors zal stijgen ten opzichte van nu: als voorbeeld schat het onderzoek van TNO en NRG PALLAS een ruime verdrievoudiging van de elektriciteitsvraag in bij significante industriële elektrificatie [REF.32] (zie Figuur 4.1). Door de relatief lage kosten van wind- en zonne-energie, is het aantrekkelijk de benodigde elektriciteit voornamelijk uit deze twee elektriciteitsbronnen te halen. Voor een groot gedeelte van de elektriciteitsvraag is dit ook een reële mogelijkheid. De moeilijkheid binnen een elektriciteits-systeem opgebouwd uit hernieuwbare energiebronnen zit vooral bij het te allen tijde voldoen aan de volledige elektriciteitsvraag. Dit vraagt om extra maatregelen, zoals het installeren van meer hernieuwbare energiebronnen dan op de meeste momenten nodig is (een zogenaamde overcapaciteit) en de aanwezigheid van flexibiliteitssystemen (zoals batterijparken of waterstofopslag) om elektriciteit beschikbaar te stellen op momenten van productietekorten. Het TNO en NRG PALLAS onderzoek toont aan dat SMR's vooral op dit vlak een aanvulling

Figuur 4.1. Prognose van elektriciteitsvraag in Nederland tot en met 2050



op het energiesysteem kunnen vormen: met SMR's kan de noodzaak voor overcapaciteit en flexibiliteitssystemen worden vermindert, waardoor het energiesysteem als geheel economisch rendabeler kan worden gemaakt [REF.32].

Zoals tot dusver een aantal keer genoemd, zijn economische factoren grotendeels bepalend bij concrete SMR-inpassing. Het economische plaatje rondom elektriciteitsproductie wordt vaak samengevat in de *Levelised Cost of Electricity* (LCOE). Dit zijn de kosten per eenheid energie, vaak uitgedrukt in €/MWh. Voor de LCOE is bekend dat zowel wind-, kern- als zonne-energie economisch competitief zijn met hetgeen wat ze vervangen, namelijk fossiele elektriciteitsbronnen, maar dat de LCOE voor wind- en zonne-energie over het algemeen lager ligt dan de LCOE voor kernenergie. Dit is echter alleen het geval in de huidige elektriciteitsmarkt die nog niet voor een groot deel gesatureerd (verzadigd) is met hernieuwbare energiebronnen. Zo worden in de LCOE bijvoorbeeld de toekomstige behoefte aan overcapaciteit, netverzwaring en

flexibiliteitssystemen niet meegenomen. Nieuwe methodes zoals de *Levelised Full System Costs of Electricity* (LFSCOE) proberen deze factoren mee te nemen, maar exacte waardes voor zowel hernieuwbare energiebronnen als SMR's zijn hier moeilijker te bepalen omdat beide systemen nog niet doorontwikkeld zijn en sterk afhankelijk zijn van de specifieke systeemconfiguratie.

Uiteindelijk is het vooral belangrijk om bij vergelijkingen van LCOE of LFSCOE in het achterhoofd te houden dat hernieuwbare energiebronnen en SMR's niet per definitie elkaars concurrent zijn op de elektriciteitsmarkt. SMR's kunnen aanvullen daar waar hernieuwbare energiebronnen minder economisch rendabel worden, of waar ze minder geschikt voor zijn. Het uiteindelijke doel is om de elektriciteitsproductie in Nederland in 2035 CO₂-neutraal te maken en andere sectoren vervolgens ook van voldoende elektriciteit te voorzien, om deze sectoren via elektrificatie ook te decarboniseren. Het energiesysteem moet hierbij op een zo betrouwbaar mogelijke en qua maatschappelijke kosten zo laag mogelijke manier zijn ingericht. Hernieuwbare energiebronnen en SMR's kunnen elkaar aanvullen in dit doel, niet vervangen.

4.1.2 Warmtelevering en warmtekrachtkoppeling

Het primaire energieaanbod van een kerncentrale is warmte. In conventionele kerncentrales wordt deze opgewekte warmte-energie bijna altijd omgezet in elektriciteit, via eenzelfde soort proces als in kolen- en gascentrales. In dat proces gaat ongeveer 60-70% van de warmte-energie verloren. Het is echter ook mogelijk om de warmte-energie direct te gebruiken voor een proces dat warmte vraagt, bijvoorbeeld in industriële processen. Dit maakt de omzetting naar elektriciteit overbodig, wat een aanzienlijk efficiënter gebruik van de opgewekte energie tot gevolg heeft. Omdat SMR's mogelijk dicht bij industrie geplaatst kunnen worden en beter kunnen inspelen op variabele energievraag dan conventionele kerncentrales, wordt directe warmtelevering gezien als een veelbelovende SMR-toepassing.

Er zijn in warmtelevering globaal twee opties:

1. Volledige warmteproductie: de SMR levert alleen warmte.

2. Warmtekrachtkoppeling, ook wel co-generatie genoemd: een SMR levert zowel elektriciteit als warmte. Er wordt gebruik gemaakt van hetzelfde primaire warmtecircuit.

Volledige warmteproductie heeft enkele voordelen. Er wordt zo efficiënt mogelijk gebruik gemaakt van de opgewekte warmte-energie. Ook kent de afnamekant een relatief simpele opbouw van het secundaire warmtecircuit. Een nadeel is dat door standaard SMR-ontwerpen en vermogens het lastig kan zijn exact de juiste hoeveelheid warmte-energie te produceren voor een bepaald proces. Dan moet ofwel het vermogen van de SMR verlaagd worden, ofwel de extra warmte-energie ergens anders voor gebruikt worden (voor ander proces, bijvoorbeeld waterstofproductie).

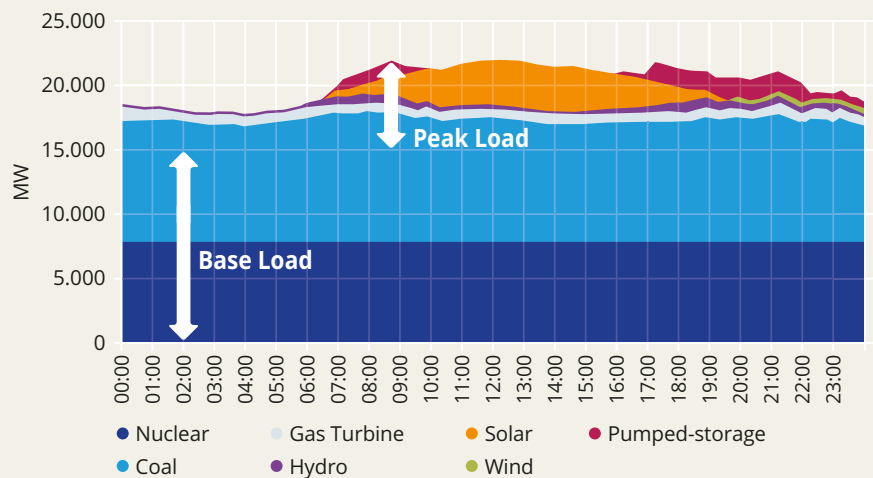
Warmtekrachtkoppeling is hiervoor een alternatief. Warmteproductie vindt gelijktijdig plaats met elektriciteitsproductie. Als warmtelevering het primaire doel is, kan het overschot aan warmte-energie gebruikt worden voor elektriciteitsproductie. Of vice versa als juist elektriciteitslevering het primaire doel is. Het voordeel van warmtekrachtkoppeling is dat SMR's op deze manier praktisch altijd op vol vermogen kunnen blijven draaien. Wel vraagt warmtekrachtkoppeling een complexer secundair systeem. Daarnaast is het niet altijd rendabel om bij een variabele energievraag de restenergie voor een ander proces te gebruiken. Dit komt omdat processen zoals elektriciteits- en waterstofproductie het efficiëntst werken op constante energielevering en bij variabiliteit minder rendabel zijn (teruglopend rendement).

Welke van de twee vormen geschikter is, verschilt sterk per situatie en is zoals de situaties hiervoor benoemd voornamelijk economisch gedreven. Het is in beide gevallen belangrijk om te benadrukken dat aanleveringstemperatuur en afstand tot warmteafnemer bepalende factoren zijn bij warmtelevering. Zo leveren SM-LWR's alleen temperaturen aan onder de 350 °C en zijn voor processen met een hogere temperatuurvraag geavanceerde SMR's geschikter. Daarnaast gaat het vervoeren van warmte gepaard met warmteverliezen, dus is de afstand tot de warmteafnemer idealiter zo kort mogelijk.

4.2 LOAD FOLLOWING

Vanuit het huidige economische en technische standpunt wordt een SMR idealiter gebruikt als basislast in een energiesysteem. Figuur 4.1 laat een voorbeeld zien van deze situatie. Kort uitgelegd is basislast het gedeelte uit een variabele energievraag dat over de dag en over het jaar heen altijd nodig is. Binnen de functie van basislast kan een SMR altijd op vol vermogen draaien. Het kan echter noodzakelijk zijn dat een SMR zijn vermogen kan op- en afschalen afhankelijk van de energievraag. Dat geldt zowel binnen de elektriciteitslevering aan een elektriciteitsnet bestaande uit hernieuwbare energiebronnen als bij warmtelevering aan een proces met variabele warmtevraag. Ook geldt zeker als een SMR de traditionele *load following* opties vervangt zoals kolen- en gascentrales. De mogelijkheid om vermogen op- en af te schalen wordt *load following* genoemd, vrij vertaald naar 'regelbaar vermogen'.

Figuur 4.1. Voorbeeld van een elektriciteitssysteem, waar 'base load' en 'peak load' aangeduid worden (bron: nuclear-power.com)



Load following in SMR's kent enige nadelen, afhankelijk van het ontwerp. Met name voor ontwerpen die niet specifiek voor *load following* zijn ontworpen of aangepast, zijn er hogere onderhoudskosten. Door op- en afschalen van vermogen ontstaat een verhoogde slijtage van reactorcomponenten. Daarnaast zorgt veelvuldig toegepaste *load following* voor minder efficiënt gebruik van splijstof ten opzichte van het bedrijven op maximaal vermogen. *Load following* zal dus tot hogere brandstofkosten leiden. Op dit moment kent de vergunningsaanvraag ook extra veiligheidsanalyses als een SMR specifiek voor *load following* wordt ontworpen en ingezet. Daardoor kan het vergunningstraject langer duren ten opzichte van een basislasttoepassing.

4.2.1 Snelheid op- en afregelen

De Europese exploitanten van kerncentrales hebben een gemeenschappelijke set specificaties ontwikkeld waaraan nucleaire nieuwbouw in Europa, waaronder SMR's, moet voldoen: de EUR [REF.18]. In de EUR wordt ook aandacht besteed aan eisen voor *load following* waar moderne kernreactoren minimaal aan moeten voldoen. Dit houdt bijvoorbeeld in dat een reactor in staat moet zijn naar een bepaald vermogen af te schalen, meestal 50% van het maximale vermogen, om daarna weer op te schalen naar vol vermogen. Het volledig op- en afschalen moet daarnaast een minimaal aantal keer kunnen worden gedaan per tijdsperiode:

- 2 keer per dag;
- 5 keer per week;
- 200 keer per jaar.

De eis voor veranderingssnelheid van vermogen is hierbij 3–5% per minuut.

SMR's die speciaal ontworpen zijn en ingezet zullen worden voor *load following*, zullen naar verwachting ruim aan deze *load following* eisen vanuit de EUR voldoen. De meeste SM-LWR's kunnen bijvoorbeeld een minimaal vermogensniveau halen tot 20% van het maximale vermogen en halen een veranderingssnelheid van vermogen van 5–10% per minuut.

4.2.2 Mogelijkheden per type SMR

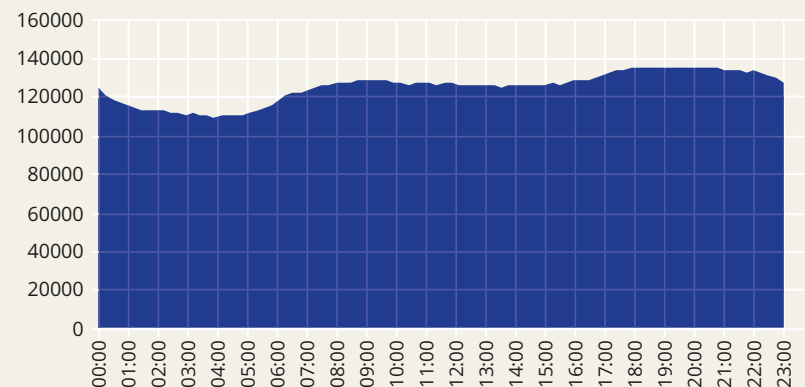
LWR's hebben een bewezen track-record met *load following*. *Load following* wordt regelmatig toegepast in Frankrijk, zoals te zien in Figuur 4.2. Van de twee meest gangbare types LWR's – drukwaterreactoren (*Pressurized Water Reactors* – PWR's) en kokendwaterreactoren (*Boiling Water Reactor* – BWR's) – zijn om technische redenen PWR's geschikter voor *load following*. Een overzicht van *load following* mogelijkheden bij enkele van de bekendste SMR-ontwerpen staat in Tabel 4.1. De tabel maakt het verschil tussen een PWR en BWR zichtbaar.

Tabel 4.1. Overzicht van *load following* eigenschappen van een aantal SMR ontwerpen

SMR-ontwerp	Type	Bereik <i>load following</i> [%]	Snelheid [%/min]
NUWARD	PWR	20 – 100	5
BWRX-300	BWR	50 – 100	0,5
VOYGR	PWR	20 – 100	10
RR SMR	PWR	50 – 100	3 – 5

Voor de hier verder niet besproken geavanceerde SMR's is het in mindere mate duidelijk of en hoe deze *load following* zullen toepassen. Sommige ontwerpen, zoals Thorizon, willen dit doen door tijdelijke opslag van energie (in dit geval in gesmolten zouten). De exacte specificaties van *load following* zijn dus nog niet duidelijk voor geavanceerde SMR's. Omdat flexibele energievraag een belangrijk onderwerp is, ook in de toekomst, kan ervan uitgegaan worden dat een optie voor *load following* meegenomen zal worden in de verdere ontwikkeling van geavanceerde SMR-ontwerpen.

Figuur 4.2. Voorbeeld van *load following* in Franse kerncentrales gedurende één dag in november 2024 [REF.19]



4.3 WATERSTOFPRODUCTIE

Duurzame waterstofproductie gaat voornamelijk via elektrolyse, het maken van waterstof uit water d.m.v. elektriciteit. Hierbij wordt over het algemeen gekeken naar drie technologieën, onderverdeeld in lage- en hoge-temperatuur elektrolyse. Hieronder worden de drie technologieën kort omschreven, met elk een voor- en nadeel:

Low-Temperature Electrolysis (LTE)

- **Alkaline Water Electrolysis (AEL):**
 - Meest volwassen technologie, wordt gezien als de huidige 'standaard' in H₂-productie. Goedkoopste van de drie technologieën;
 - Ontwikkeld voor vaste procescondities; minder goed flexibel inzetbaar.
- **Proton-Exchange Membrane (PEM) Electrolysis:**
 - Zeer flexibel, hoge waterstofzuiverheid en compact design;
 - Relatief hoge kosten en snellere membraandegradatie.

High-Temperature (Steam) Electrolysis (HT(S)E)

- **Solid Oxide Electrolyser Cell (SOEC):**
 - Hoogste elektriciteit-waterstof efficiëntie;
 - Minst volwassen, nog geen ervaring met kerncentralekoppeling.

De belangrijkste technische eigenschappen van de drie technologieën staan weergegeven in Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Eigenschappen van de verschillende elektrolysetechnieken

		AEL	PEM	SOEC
Temperatuur	[°C]	60 – 80	50 – 80	700 – 1000
Elek. efficiëntie	[%]	63 – 70	56 – 60	74 – 81
Ruimte	[m ² /MWe]	100	50	150

* Schatting voor 30 MW LTE en 19,27 MW HTE.

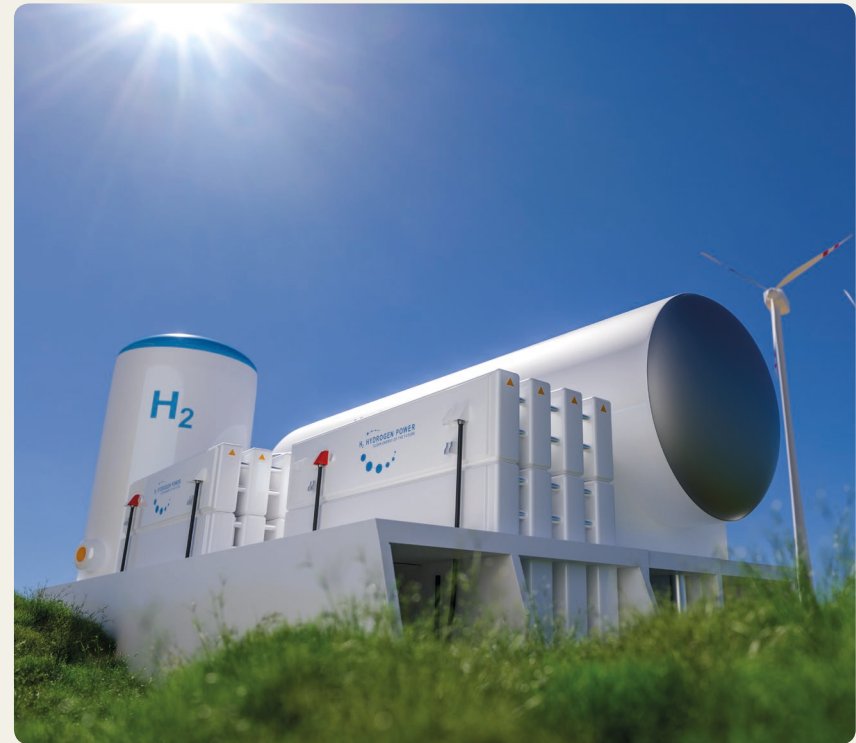
De integratiescenario's bevatten ook modificatiekosten van een kerncentrale.

SMR's kunnen met elk van deze technologieën gekoppeld worden. In het geval van lage-temperatuur elektrolyse levert de SMR simpelweg elektriciteit aan een *electrolyser*. Hoge-temperatuur elektrolyse is ook mogelijk via bijvoorbeeld warmtekrachtkoppeling. Wel vraagt deze techniek om dusdanig hoge aanleveringstemperaturen dat hiervoor de geavanceerde SMR's geschikter zullen zijn. Er bestaat ook een mogelijkheid om systemen van de SMR en de waterstofproductie-eenheid te integreren. Dit gaat dan bijvoorbeeld om systemen als de afvalwaterzuivering, koelwatervoorziening en de stoomtoevoer in het geval van hoge-temperatuur elektrolyse. Integratie kan voordelig zijn vanwege het optimaliseren van landgebruik en het simplificeren van monitoring. De investering vooraf zal bij integratie gemiddeld groter zijn, met achteraf het voordeel dat gedeelde systemen gezamenlijk onderhouden kunnen worden.

Waterstofproductie bij variabele elektriciteitsproductie is complexer: frequente onderbrekingen zijn niet acceptabel voor elektrolyse-installaties. Onderbrekingen veroorzaken storingen, extra onderhoud en versnelde achteruitgang van de installatie. *Load following* in combinatie met waterstofproductie op basis van lage-temperatuur elektrolyse zal daarom alleen onder bepaalde randvoorwaarden mogelijk zijn. Denk bijvoorbeeld aan beperking van bereik en snelheid van *load following*. Mogelijk bieden toekomstige waterstofproductie-methoden een rendabeler alternatief bij sterk variërend elektriciteitsaanbod.

Op dit moment wordt het grootste gedeelte van de waterstof geproduceerd op basis van fossiele brandstoffen. De zogenaamde *Levelized Cost of Hydrogen* voor fossielvrije alternatieven is over het algemeen concurrerend, maar exacte cijfers hangen sterk af van bijvoorbeeld de aanwezige infrastructuur, afnamemogelijkheden en de elektriciteitsprijs. Voor waterstofproductie-eenheden geldt over het algemeen: hoe dicht bij de directe afnemer/gebruiker van waterstof, hoe goedkoper de totale productiekosten.

Artist's impression van een waterstoffabriek



Wat houdt nucleaire veiligheid in en hoe kenmerken SMR's zich hierin?

- 5.1 Wanneer is radioactiviteit gevaarlijk? Komt er extra straling in de omgeving bij normale bedrijfsvoering? Komt er radioactiviteit vrij bij ongevallen en zo ja, wat zijn dan de gevolgen?
- 5.2 Hoe is de veiligheid voor de omwonenden/omgeving geregeld?
- 5.3 Hoe zit het met security/data risico's bij externe aansturingen?
- 5.4 Is schade veroorzaakt door nucleaire installaties verzekerd?

Bestraling



Uitwendige besmetting



Inwendige besmetting



(Bron: epz.nl)

5.1 RADIOACTIVITEIT

5.1.1 Algemeen

Ioniserende straling, in de volksmond ook wel radioactieve straling genoemd, is overal om ons heen. Het is een natuurlijk fenomeen dat wordt veroorzaakt door instabiele atoomkernen die spontaan vervallen (overgaan) naar stabiele atoomkernen. Tijdens dat verval zenden ze ioniserende straling uit.

Ioniserende straling komt uit het heelal op ons neer en ook de aarde zelf straalt. Dus ook de grond waarop je loopt. Een granietbodem straalt bijvoorbeeld iets meer dan een veenbodem. Deze natuurlijke straling is heel gering en varieert van plek tot plek. We noemen dit de 'natuurlijke achtergrondstraling'.

De ontvangen stralingsdosis voor mensen wordt uitgedrukt in effectieve dosis. Deze is afhankelijk van het type straling, de bestraalde lichaamsdelen en de wijze waarop de blootstelling plaatsvindt (inwendig, uitwendig). De jaarlijkse effectieve dosis die Nederlanders gemiddeld ontvangen bedraagt ruim 2 mSv (milliSievert).

Straling brengt pas in hoge doses een aantoonbaar (vaak tijdelijk) effect toe. Je moet dan denken aan een effectieve dosis die hoger is dan 500 mSv en die in korte tijd wordt opgelopen. De kans op langetermijneffecten is dan overigens nog steeds gering.

Het basisprincipe van de stralingsbescherming is echter om de blootstelling zo gering te laten zijn als redelijkerwijs mogelijk is. Economische en sociale factoren worden hierbij meegewogen. Dit noemen we het ALARA-principe: *'as low as reasonably achievable'*. Er bestaan dan ook strenge wettelijke limieten voor de blootstelling van werknemers in reguliere arbeidsomstandigheden. Volgens het *Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming* mogen 'gewone' werknemers een effectieve stralingsdosis tot 1 mSv per jaar ontvangen en zogenoemde beroepsmatig 'blootgestelde' werknemers een effectieve stralingsdosis tot 20 mSv per jaar.

Bij een nucleaire noodsituatie waarbij niet aan de dosislimieten kan worden voldaan, moet volgens het Bbs een referentieniveau van 100 millisievert worden gehanteerd. In zeer uitzonderlijke situaties waarin ook van de 100 millisievert moet worden afgeweken, gelden andere (hogere) referentieniveaus.

De ANVS ziet erop toe dat de nucleaire veiligheid en stralingsbescherming in Nederland voldoen aan de hoogste eisen. De ANVS stelt daarvoor regels op, verleent vergunningen voor diverse nucleaire activiteiten, en ziet toe op de naleving daarvan.

5.1.2 Normale bedrijfsvoering

Bij lichtwatergekoelde reactoren (zoals de kerncentrale in Borssele en de meeste SMR-ontwerpen) staat de splijtstof altijd onder water. Dat is zo tijdens normale bedrijfsvoering (elektriciteitsproductie) en wanneer de reactor buiten bedrijf is (onderhoud). Dit is nodig om de vervalwarmte af te voeren (koelen). De door kernsplijting ontstane radioactieve splijtingsproducten produceren namelijk nog lange tijd warmte die moet worden afgevoerd. Ook zorgt het water voor de afscherming van straling. Er zijn in een kerncentrale meerdere reservesystemen en watervoorraden die los van elkaar en onder alle omstandigheden ervoor zorgen dat de splijtstof bedekt blijft met water. Natuurlijk is de exploitant van een kernreactor gebonden aan strenge radiologische limieten ten aanzien van blootstelling aan straling voor medewerkers en bezoekers op het terrein. Op het kerncentrale-complex wordt licht radioactief afval opgeslagen in speciale verpakkingen en gebouwen. Hoogradioactief afval, zoals opgebrande splijtstof, wordt onder water bewaard. In Borssele gebeurt dit in het splijtstofopslagbassin in het reactorgebouw zelf (de koepel). Daar wordt de gebruikte splijtstof gekoeld en de straling afgeschermd tot het kan worden afgevoerd naar de opwerf fabriek in Frankrijk. De combinatie van speciale verpakkingen (insluitingen) en opslag (eventueel onder water) binnen speciale gebouwen beschermen mens en omgeving tegen radioactiviteit en straling. Bij normaal bedrijf van een kernreactor (en dus ook een SMR) is buiten de terreingrens van het kerncentrale-complex daardoor geen verhoogd stralingsniveau aanwezig.

5.1.3 Veiligheidskenmerken

Alles in een kerncentrale is gericht op het handhaven van de drie basisveiligheidsfuncties die te allen tijde veiliggesteld moeten worden:

- 1 Beheersen van de splijtingsreacties van de splijtstof
- 2 Koelen van de splijtstof
- 3 Insluiten van radioactieve stoffen

Deze basisveiligheidsfuncties zorgen ervoor dat bij verreweg de meeste ongewenste gebeurtenissen in kerncentrales er geen beschadiging van splijtstof plaatsvindt en er geen radioactiviteit vrijkomt in de omgeving. Er zijn namelijk veel veiligheidssystemen en veiligheidsvoorzieningen waarmee de basisveiligheidsfuncties kunnen worden gegarandeerd. Ook zijn veel maatregelen getroffen om ongevallen te voorkomen, te beheersen en te beperken. Zo wordt er gebruik gemaakt van betrouwbare veiligheidssystemen. Denk bijvoorbeeld aan passieve koelsystemen die werken op basis van zwaartekracht (water stroomt van hoog naar laag) of dichtheidsverschillen (bij een ruimte met onderdruk stroomt lucht van buiten naar binnen). Daarnaast zijn er actieve veiligheidssystemen (deze worden door een energiebron in werking gesteld zoals automatische pompen en bedienbare kleppen) die meervoudig (redundant) en verschillend zijn uitgevoerd (diversiteit).

De veiligheidssystemen vergroten de autonomietijd: de periode dat de kerncentrale zelfvoorzienend kan zijn als de centrale in een ongevalstoestand verkeert en van de buitenwereld is afgesloten. Denk aan energievoorzieningen (zoals noodgeneratoren en batterijen) en koeling (opslagtanks met koelwater, verbindingen met natuurlijke waterbronnen). Sinds het ongeval in Fukushima (2011) wordt geëist dat de warmteafvoer (koeling) en energievoorziening (noodstroom) voor tenminste zeven dagen met hoge betrouwbaarheid zijn verzekerd. In de tussentijd kan hulpverlening aan de kerncentrale worden georganiseerd.

Onverhoopte ongevallen met nucleaire installaties worden in oplopende categorieën ingedeeld. Het Atoombureau van de Verenigde Naties (IAEA) heeft daarvoor zeven zogenaamde INES-niveaus (International Nuclear and radiological Event Scale) gedefinieerd, zie Figuur. De gebeurtenissen met de meest ernstige gevolgen (van niveau 4 tot en met 7) worden ongevallen genoemd. De gebeurtenissen op niveau 1 tot en met 3 worden incidenten genoemd. Vergunninghouders zijn verplicht om ongewone gebeurtenissen tijdig te melden aan de ANVS en onderzoek te doen naar de oorzaak van de gebeurtenis. Ook kleine afwijkingen (zoals overschrijding van bepaalde operationele grenswaarden) die buiten de schaal vallen (INES = 0), worden gemeld



Er zijn twee gebeurtenissen van een niveau 7 ongeval: het ongeval in Tsjernobyl in 1986 (USSR) en in Fukushima 2011 (Japan). Het ongeval met de kerncentrale in Three Mile Island (VS) in 1976 is ingedeeld in niveau 5. Bij het beoordelen van een gebeurtenis worden drie criteria gehanteerd: gevolgen voor mens en leefomgeving, gevolgen voor de installatie, en vermindering van het veiligheidsniveau.

De INES-schaal is vooral bedoeld als een communicatiehulpmiddel om de ernst van radiologische en nucleaire incidenten en ongevallen te duiden. De schaal is niet bedoeld om risico's vooraf te classificeren of om tijdens een dreigende ongevalssituatie maatregelen op te baseren. Hier zijn andere analysemethoden voor.

Een belangrijk vereist veiligheidsprincipe betreft de zogenaamde ‘gelaagde veiligheid’ ofwel ‘*Defence in Depth*’ (DiD). Vanuit de IAEA zijn vijf lagen gedefinieerd die in de Nederlandse Kernenergiewet zijn opgenomen. Elke laag kenmerkt een bedrijfstoestand (zie Tabel 5.1). De functie en onafhankelijkheid van systemen in de desbetreffende laag zorgt ervoor dat een actuele bedrijfstoestand niet overgaat naar een volgende, dieper gelegen laag. Zo dient een temperatuuroverschrijding tijdens normaal bedrijf (eerste laag) gecorrigeerd te worden door een systeem uit de eerste laag om daarmee te voorkomen dat condities (te hoge temperatuur) ontstaan die horen bij de tweede laag. Voor

Tabel 5.1. Gelaagde veiligheid als ontwerpprincipe [REF.20]

Niveau	Bedrijfstoestand	Doelstelling	Essentiële middelen
1	Normaal bedrijf.	Preventie van abnormale omstandigheden en ongevalscondities.	Conservatief (robuust) ontwerp en hoge kwaliteit in bouw en bedrijfsvoering.
2	Voorzienbare bedrijfsvoorvallen.	Beheersing van abnormale omstandigheden en detecteren van afwijkingen.	Controlerende, beperkende en bescherminggevend systemen en andere toezichtmiddelen.
3	Gepostuleerde begin-gebeurtenissen – basis: ontwerpbasis ongevallen.	Beheersing van ongevallen binnen ontwerp.	Ingebouwde veiligheidsvoorzieningen en ongevalsprocedures.
4	DEC-A: Gepostuleerde gebeurtenissen – uitbreiding: ontwerp-uitbreidingstoestanden zonder kernsmelt. DEC-B: Gepostuleerde kernsmeltongevallen.	Voorkomen van kernsmelt. Voor ongevallen die niet praktisch uit te sluiten zijn: voorkomen dat vroege of grote lozingen optreden.	Aanvullende mitigerende maatregelen en ongevalsmitigatie.
5	Vrijkomen van significante hoeveelheden radioactieve stoffen.	Mitigeren van radiologische gevolgen van significante lozing van radioactief materiaal.	On-site en offsite noodvoorzieningen en noodmaatregelen.

elke laag dient aan de bijbehorende eisen (functievervulling van de specifieke systemen bij de heersende condities) te worden voldaan. Bij de vijfde en diepste laag zullen significante hoeveelheden radioactieve stoffen vrijkomen.

De veiligheidseisen en ontwerpprincipes voor reactoren in Nederland worden beschreven in ‘Handreiking VOBK, handreiking voor een veilig ontwerp en het veilig bedrijven van kernreactoren, ANVS, 2023’ met hierin opgenomen de ‘Dutch Safety Requirements’ (DSR) [REF.20].

Kortom een kerncentrale is vanuit zijn ontwerp al veilig (robuust) en is uitgerust met diverse (passieve en actieve) veiligheidssystemen die automatisch in werking treden bij geregistreeerde afwijkingen. Het ontwerp in combinatie met een gecontroleerde bedrijfsvoering garanderen de drie basisveiligheidsfuncties van een kernreactor. Samen zorgen ze voor een uiterst lage kans op het vrijkomen van radioactief materiaal in de omgeving.

Gebruikte kentallen voor nucleaire risico’s

Voor de gehele installatie wordt een risicoberekening gemaakt. Deze berekening houdt rekening met de bedrijfsvoering en alle externe voorzieningen. In deze risicobeoordeling wordt gekeken naar mogelijke interne en externe gebeurtenissen zoals een brand, een leidingbreuk of systeemfalen, die elk een bepaalde kans van optreden hebben. Voor deze gebeurtenissen wordt vervolgens gekeken hoe de installatie hierop reageert. De uitkomst wordt uitgedrukt in een zogenaamd probabilistisch kental. Een voorbeeld hiervan is de kans per jaar, ‘de frequentie’, dat een willekeurig persoon in Nederland getroffen wordt door de bliksem. Deze frequentie bedraagt ongeveer eens in de 2 miljoen jaar (5×10^{-7} /jaar).

Een veelgebruikt kental is de *Large Release Fraction* (LRF). Dit betreft de kans op een grote radioactieve lozing, uitgedrukt in een frequentie van optreden per jaar. In Nederland wordt voor een dergelijke gebeurtenis geëist dat dit praktisch is uitgesloten door aan te tonen dat de kans hierop extreem laag is of fysisch onmogelijk is (zie DSR). Voor grote moderne, generatie III reactoren is deze kans kleiner dan 1×10^{-7} /jaar, oftewel minder dan eens per 10.000.000 jaar. Dat is al een uiterst lage kans. SMR's zijn veelal nog robuuster waardoor deze kans nog aanzienlijk lager kan liggen.

Een ander kental betreft de *Core Damage Frequency* (CDF), het optreden van smelten/beschadigen van de kern. Deze gebeurtenis leidt in sommige gevallen tot een radioactieve lozing buiten het reactorgebouw. De CDF ligt meestal rond de 1×10^{-6} per jaar, ofwel eens per 1.000.000 jaar.

Artikel 18 van het *Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen* beschermt de omgeving en omwonenden tegen ioniserende straling. In dit artikel worden eisen gesteld aan de installatie door het opleggen van limietwaarden ten aanzien van eventuele radiologische emissies voor gepostuleerde inleidende gebeurtenissen. Dat zijn gebeurtenissen die een defect in de installatie veroorzaken met mogelijk radiologische emissies als gevolg. Het gaat hier om ongevallen die in het ontwerp van de kerncentrale zijn voorzien, d.w.z. dat op een dergelijk ongeval geanticipeerd kan worden op basis van het ontwerp, de beschikbare veiligheidsvoorzieningen en de training van het personeel. Daarnaast worden in Artikel 18 eisen gesteld aan zogenaamde buitenontwerp-ongevallen. Dat zijn ongevallen waarop het ontwerp van de installatie níet is berekend. Het artikel schrijft voor dat het risico dat iemand buiten de inrichting overlijdt als gevolg van een buiten-ontwerp ongeval kleiner moet zijn dan 10^{-6} /jaar (minder dan eens per 1.000.000 jaar).

5.2 VEILIGHEID VOOR OMWONENDEN EN OMGEVING

Maatregelen bij vrijkomen van radioactieve stoffen

Mocht er ondanks de onwaarschijnlijkheid en maatregelen tóch iets gebeuren, dan kunnen de bevolking en/of werknemers blootgesteld worden aan ioniserende straling. In zo'n geval is er een protocol voor potentieel te nemen maatregelen. Dit wordt 'interventie' genoemd. Net zoals bij elk ongeval moeten maatregelen in verhouding staan tot de effecten van het nucleaire ongeval. De te nemen maatregelen moeten dus worden geoptimaliseerd en gerechtvaardigd zijn. Daarom worden naast de stralingsbeschermingsprincipes maatschappelijke, economisch en (psycho-)sociale factoren meegewogen. De mate waarin deze aspecten worden meegewogen verschilt naargelang het ongeval vordert. De optimalisatie en rechtvaardiging is telkens het afwegen van diverse factoren. Aan de ene kant wil je de kans op blootstelling, het aantal blootgestelde individuen én de individuele dosis zo laag als redelijkerwijs mogelijk houden. Aan de andere kant wil je rekening houden met economische en maatschappelijke factoren. Bijvoorbeeld, weegt een grootschalige evacuatie met bijbehorende spanningen en fysieke implicaties op tegen een geringe dosistoename? De beoordeling of bij kernongevallen al dan niet tot interventie wordt overgegaan is derhalve tweeledig. Het gaat om de (verwachte) ontvangen dosis én om de dosis die met een maatregel vermeden kan worden.

In het *Landelijk Crisisplan Straling* zijn drie interventieniveaus voor directe beschermingsmaatregelen met bijbehorende preparatiezones voor bestaande nucleaire installaties vastgesteld. De interventieniveaus geven aan bij welk niveau van blootstelling aan ioniserende straling specifieke maatregelen moeten worden genomen voor de bescherming van de bevolking.

Die maatregelen zijn:

- evacuatie
- schuilen
- inname van jodiumtabletten

De preparatiezone is het gebied rondom een nucleaire installatie waar specifieke voorbereidingen voor bovenstaande maatregelen worden getroffen bij een (ernstig) nucleair ongeval. De zone is bedoeld om snel en effectief te kunnen reageren om zo de veiligheid van de inwoners te waarborgen. Naast deze drie interventieniveaus met bijbehorende preparatiezones kunnen ook maatregelen in de voedselketen worden genomen (bijvoorbeeld een verbod op het consumeren van voedselgewassen afkomstig uit een bepaald gebied). Hoe de veiligheid voor de omwonenden/omgeving geregeld is, wordt onder meer beschreven in het *Landelijk Crisisplan Straling, Ministerie van IenW, April 2021* [REF.14].

Ten aanzien van deze preparatiezones gelden voor nieuwe reactoren de randvoorwaarden (zie Tabel 5.2) zoals opgesteld in de *Handreiking VOBK* [REF.20]. Nieuwe reactoren moeten zo ontworpen worden dat de gevolgen voor de omgeving van alle ongevallen die niet praktisch uit te sluiten zijn beperkt zijn. Zo mag een ongeval niet leiden tot stralingsblootstelling die buiten een straal van 3 km rond de installatie evacuatie vereist en buiten 5 km schuilen of jodiumprofylaxe vereist. Voor kleine reactoren (zoals SMR's) zijn dergelijke voorwaarden doorgaans makkelijk haalbaar gezien de kleinere kernomvang (hoeveelheid splijtstof) in vergelijking met conventionele kernreactoren. Naar verwachting leidt dit in de nationale en regionale crisisplannen na analyse van de ongevals-scenario's dan ook tot relatief beperkte preparatiezones voor beschermingsmaatregelen.

Tabel 5.2. Ontwerprandvoorwaarden voor een kernsmeltongeval dat niet praktisch uitgesloten kan worden

Beschermmaatregel	Evacuatiezone (<3 km)	Schuilzone (<5 km)	Buiten schuilzone
Permanente evacuatie	Nee	Nee	Nee
Evacuatie	Kan nodig zijn	Nee	Nee
Schuilen	Kan nodig zijn	Kan nodig zijn	Nee
Jodiumprofylaxe	Kan nodig zijn	Kan nodig zijn	Nee

5.3 FYSIEKE SECURITY

De thema's 'fysieke security', 'cybersecurity' en 'safeguards' zijn ook belangrijke onderwerpen als het gaat om de veiligheid van SMR's.

'Fysieke security' en 'safeguards' zullen in een volgende update van deze kennismodule verder worden uitgewerkt. Het thema 'cybersecurity' wordt in de volgende paragraaf behandeld.

5.4 CYBERSECURITY

Ten opzichte van bestaande kerncentrales is bij bijna alle SMR-ontwerpen de digitalisering van (voorheen analoge) onderdelen een belangrijke ontwikkeling. Dit is vooral merkbaar in de regelkamer. Digitalisering helpt operators om sneller eventuele afwijkingen in het proces te identificeren en daarop te reageren. Daarnaast maken digitale middelen bij enkele SMR's het principe van een gedeelde regelkamer mogelijk. Dat houdt in dat meerdere reactoreenheden vanuit één regelkamer bestuurd kunnen worden.

De digitalisering brengt ook enkele nieuwe risico's met zich mee. Zo worden bijvoorbeeld *cybersecurity*-risico's geminimaliseerd door:

- Veiligheidssystemen alleen analoog beïnvloedbaar te maken: in SMR's is er een focus op passieve veiligheidssystemen en is directe controle vaak niet nodig;
- Reactoreenheden (reactormodules) en de bijbehorende systemen digitaal onafhankelijk van elkaar te maken bij besturing vanuit één regelkamer;
- De regelkamer in het reactorgebouw te plaatsen voor een directe verbinding met de installatie (zoals bij conventionele kerncentrales).

Hierbij is het belangrijk om te noemen dat *remote operation* – het besturen van een reactor vanaf een andere locatie dan in het reactorgebouw zelf – en het gebruik van bijvoorbeeld AI voor de eerste generatie SMR's niet in het ontwerp voorzien zijn. Er is nog geen ervaring met deze technologieën, waardoor de impact op het vergunningsproces groot is en het investeringsrisico verhoogd wordt.

Impressie van de NuScale SMR regelkamer [\[REF.21\]](#)



5.5 VERZEKERING VAN SCHADE

Op basis van de kernenergiewet is de schade veroorzaakt door nucleaire installaties verzekerd (belegd bij het Ministerie van Financiën).

De *Wet aansprakelijkheid kernongevallen* (WAKO) regelt de aansprakelijkheid van schade door nucleaire installaties [\[REF.34\]](#). De exploitant van een kernreactor is verantwoordelijk voor schade bij kernongevallen. De exploitant moet deze aansprakelijkheid verzekeren tot een maximum van € 1,2 miljard (art.5). Voor grotere schades geldt een staatsgarantie tot € 3,2 miljard (art.21). Voor de staatsgarantie betaalt de eigenaar jaarlijks een vergoeding aan de Nederlandse staat.

In de *Regeling aansprakelijkheid kernongevallen art.1* [\[REF.35\]](#) zijn voor een aantal exploitanten de bedragen van aansprakelijkheid opgenomen. De bedragen verschillen omdat de gevolgen bij het ernstigste ongeval voor de exploitanten verschillend zijn. Dit hangt voornamelijk af van de hoeveelheid en het type aanwezig radioactief materiaal in de nucleaire installatie, en hoe makkelijk dit materiaal zich onder de betreffende omstandigheden verspreidt.

Dit hoofdstuk beschrijft waar je op moet letten bij het ontstaan, behandelen en transporteren van radioactief afval. We leggen uit hoe in Nederland momenteel wordt omgegaan met radioactief afval en de mogelijke toename ervan in de toekomst.

We beantwoorden allerlei vragen die leven, zoals:

- 6.1 Wat zijn de belangrijkste kenmerken van radioactief afval? En hoe verhoudt dit afval zich tot andere vormen van afval? Kun je radioactief afval veilig insluiten en verpakken? Hoe lang moet je afval opslaan? Welke hoeveelheid/type afval betreft het op dit moment voor Nederland?
- 6.2 Welke logistiek kent Nederland m.b.t. radioactief afval?
- 6.3 Wat verandert er in het afvalmanagement in het geval er SMR's in Nederland worden gerealiseerd?
- 6.4 Welke opslagmogelijkheden zijn er en hoe wordt de toekomstige eindberging geregeld? Wat is een veilige eindberging?
- 6.5 Hoe worden de kosten voor ontmanteling geregeld?

6.1 KENMERKEN VAN RADIOACTIEF AFVAL

Net als bij andere vormen van energieopwekking ontstaat er ook bij kernenergie afval. Als we de hele keten bekijken begint die bij de uraniumwinning via mijnbouw en loopt door via de fabricage van splijtstof (onder meer uranium-verrijking) naar de bedrijfsvoering met een kerncentrale.

Het merendeel van het afval (in termen van radioactiviteit) wordt geproduceerd tijdens de bedrijfsvoering. De splijtstof wordt in de reactor gebruikt voor de energiewinning. Uit een klein beetje uraniumsplijtstof kan erg veel energie worden vrijgemaakt. Dit levert een klein volume kernsplijtstofafval op. Wat het afval vooral bijzonder maakt, is de radioactiviteit. Het straalt, is vaak giftig en is dus gevaarlijk als het in het milieu komt.

Uitdagend is dus de geringe hoeveelheid hoogradioactief afval. Van dit bestanddeel weten we dat het heel lang blijft stralen (tien tot honderdduizenden jaren) en soms ook lang giftig blijft. Daarnaast is er nog een zekere hoeveelheid laag- en middenactief afval. Het merendeel van dit afval straalt slechts enkele tientallen jaren en is daarna ongevaarlijk.

Uiteindelijk 'verdwijnt' al het radioactief afval vanzelf. Dat komt door de natuurkundige eigenschappen: de vervaltijd. Naarmate de tijd vordert, straalt het afval steeds minder. Dit wordt uitgedrukt met de halfwaardetijd: de hoeveelheid tijd waarin een stof de helft van zijn straling verliest. Sommige stoffen hebben een

halfwaardetijd van (fracties van) secondes, andere stoffen in het kernsplijtingsafval doen er vele duizenden jaren over om de helft van hun radioactiviteit te verliezen.

Een voordeel van straling is dat je het bijzonder goed kunt meten. Daardoor kun je radioactief afval goed monitoren en beheren. Daar hebben we in Nederland goede technische oplossingen en voorzieningen voor. We gaan daar hieronder uitgebreid op in.

Voor de mens is radioactief afval in potentie kankerverwekkend (carcinogeen). Omdat radioactieve stoffen naar mate de tijd vordert minder gaan stralen, neemt dus ook de kans op kanker af. Radioactief afval wordt daarom geïsoleerd totdat de radioactiviteit onder een bepaalde drempelwaarde is gekomen. Onder die drempelwaarde kan het als gewoon afval worden behandeld.

Het radioactieve afval wordt over het algemeen ingedeeld in drie categorieën:

1. Laagactief afval:

afkomstig van ziekenhuizen, olie- en gasindustrie en de nucleaire sector. Bijvoorbeeld beschermingsmiddelen en laboratoriummaterialen.

2. Middelactief afval:

bijvoorbeeld operationele harsen en componenten afkomstig uit de bedrijfsvoering of uit de ontmanteling van een kerncentrale.

3. Hoogactief afval:

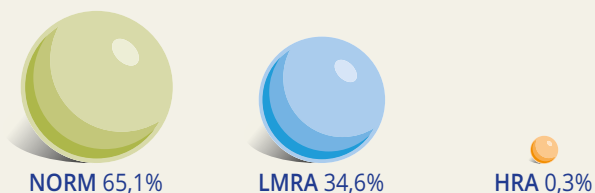
gebruikte splijtstof.

Al het radioactieve afval in Nederland wordt opgehaald en centraal verzameld door de COVRA (Nieuwdorp, Zeeland). Momenteel wordt daar elk jaar ongeveer 1000 m³ aan radioactief afval naartoe gebracht. Het overgrote deel is laag- en middelactief (LMRA)⁶.

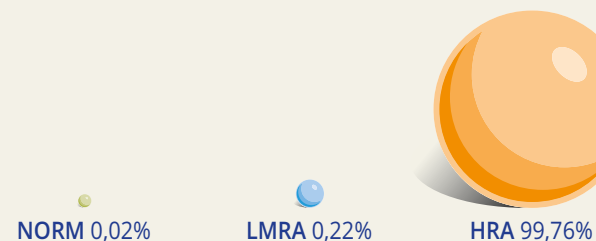
Slechts een klein deel is hoogactief (HRA), namelijk ongeveer 5 m³ per jaar (zie Figuur 6.1). Echter, als we dit uitdrukken in de totale hoeveelheid radioactiviteit, dan beslaat deze 5 kubieke meter verreweg het grootste aandeel radioactiviteit. Met andere woorden: een kleine hoeveelheid, maar wel heel erg (lang) radioactief.

Figuur 6.1. Volume en Activiteit voor de verschillende typen afval in Nederland

Volume



Activiteit



NORM-afval staat voor 'Naturally Occuring Radioactive Material'. Het betreft afval met een verhoogde natuurlijke radioactiviteit afkomstig van bijvoorbeeld de fosfaatindustrie. Het is een bijzondere vorm van LMRA.

⁶ De hoeveelheid afval zal bij de realisatie van nieuwe kerncentrales toenemen. COVRA verwacht dat de realisatie van twee nieuwe grote kerncentrales jaarlijks resulteert in ca. 37 m³ HRA en ca. 500 m³ LMRA [REF.22].

6.2 TRANSPORT

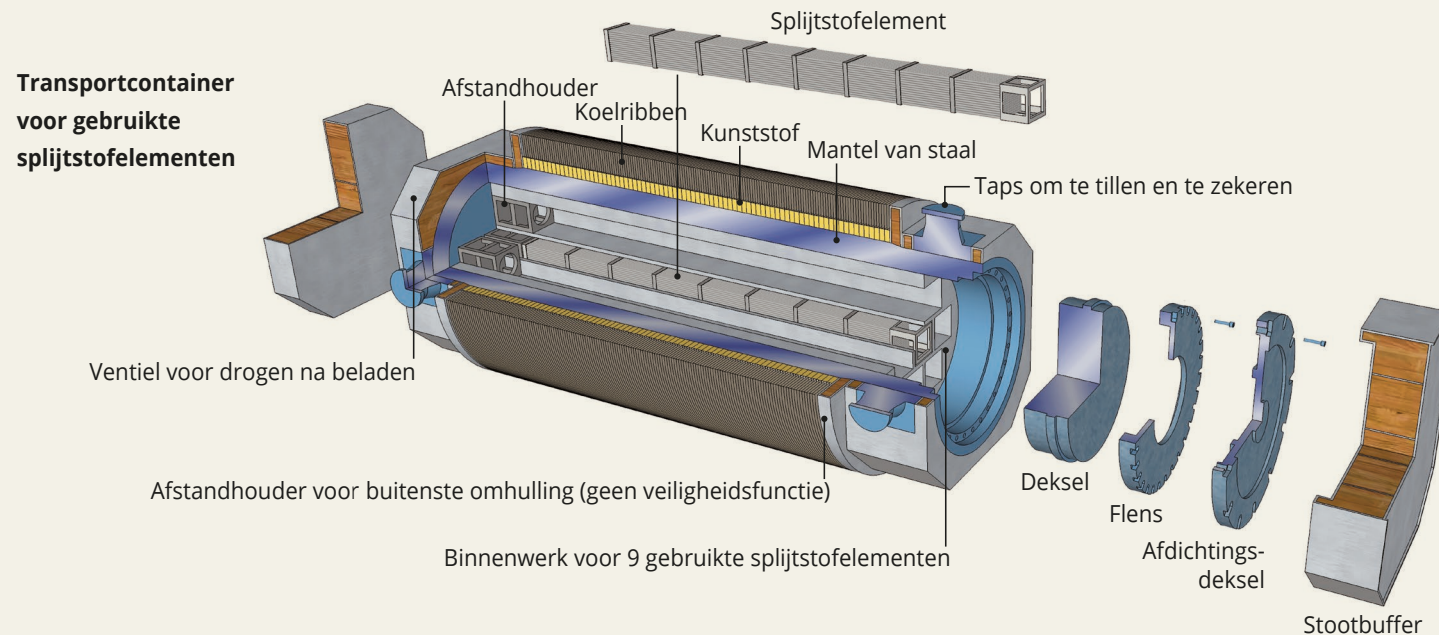
Het radioactief afval wordt via de weg of over het spoor naar de Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval (COVRA) vervoerd. Dit mag alleen gebeuren met een geschikte transportverpakking. Die moet voldoen aan strenge eisen om het vrijkomen van radioactief materiaal tijdens het transport te voorkomen. Uiteraard geldt: hoe radioactiever, hoe strenger de eisen.

Als we het over de 'zwaarste categorie' hebben, praat je over het vervoer van gebruikte splijtstof uit een kerncentrale. Een transportcontainer voor het

vervoeren van gebruikte splijtstof (of de bewerkte resten daarvan) is waterdicht, bestand tegen vallen van grote hoogte, stoot- en penetratieongelukken en hoge temperaturen. Bij elk voorzien ongeval blijft de integriteit (insluiting) van de container gewaarborgd. EPZ (kerncentrale Borssele) (zie Figuur 6.2) en NRG (Hoge Flux Reactor Petten) hebben hiervoor hun eigen transportcontainers in gebruik.

Er zijn internationale regels voor transport van gevaarlijke materialen over de weg en het spoor. Ze zijn vastgelegd in het *Accord Européen relatif au Transport des Merchandises Dangereuses par Route* (ADR) [\[REF.23\]](#).

Figuur 6.2. Container van EPZ voor het vervoeren van gebruikte splijtstofelementen (Bron: EPZ).



6.3 OPSLAG EN EINDBERGING

Het radioactief afval wordt op een veilige manier bij COVRA opgeslagen door het in te sluiten en te beheersen (onder andere via monitoring). Hoe dit gebeurt en hoe lang dit nodig is, hangt af van het type afval en de chemische samenstelling van het afval.

Laagactief afval, zoals beschermingsmiddelen (handschoenen, overalls), wordt opgeslagen in metalen vaten. Als zo'n vat vol zit, wordt het samengedrukt en in cement verpakt dat de (geringe) straling afschermt. Het neemt dan minder ruimte in en is relatief ongevaarlijk. De gecementeerde verpakkingen staan in 'gewone' loodsen opgeslagen. Het afval vervalt vaak in enkele jaren naar een stabiele vorm. Omdat het na een korte periode al niet meer straalt, is er voor het overgrote deel van dit laagactief afval geen eindberging nodig. Het kan dus na verloop van tijd worden vrijgegeven als regulier afval.

Middelactief afval, bijvoorbeeld gebruikte onderdelen van nucleaire installaties (filters, buizen of pompen), wordt grotendeels op dezelfde manier behandeld. Beide stromen worden daarom vaak samen genoemd als één categorie: LMRA (Laag- en middelradioactief afval).

Het hoogactieve afval, dat voornamelijk uit opgebrande splijtstof bestaat, wordt in Nederland op dit moment opgewerkt in het Franse La Hague. Opwerken is een vorm van recyclen. De bruikbare bestanddelen worden uit gebruikte splijtstof teruggewonnen en opnieuw verwerkt in verse splijtstof. Die gaat dan opnieuw vier jaar in de reactor.

Ongeveer 96 procent van de oude splijtstof is herbruikbaar, voornamelijk uranium dat niet is gespleten. Ongeveer 4 procent blijft over als hoogradioactief afval. Dat wordt vermengd met vloeibaar glas wat stolt in een roestvrijstalen vat waar het niet meer uit kan ontsnappen. Dit verglaasde afval wordt over het spoor in speciale containers weer naar Nederland gebracht (COVRA).

Opwerken wordt niet in alle landen gedaan. Het is ook mogelijk om opgebrande splijtstof direct op te slaan. Droog in containers of nat in bassins. Zowel opwerken als directe opslag hebben hun eigen specifieke voor- en nadelen.

Het hoogradioactieve afval van gebruikte splijtstof (zowel van recyclen als bij directe opslag) zal voor lange tijd (10.000 – 100.000 jaar) veilig moeten worden opgeslagen. Bij COVRA gaat het eerst in een interim-opslaggebouw, het zeer veilige en gebunkerde HABOG (Hoogactief Afval Behandel- en Opslag Gebouw). Op termijn verhuist dit afval naar een eindberging.

Een eindberging is de opbergplek voor radioactief afval in een stabiele aardlaag op zo'n 200 tot 1000 meter diepte. Deze diepe aardlagen zijn al miljoenen jaren stabiel en toekomstige gebeurtenissen op de aardoppervlakte (ijstijden of andere klimaatveranderingen) hebben dan ook geen invloed op de opslaglocatie. Het radioactief afval kan hier dus veilig worden geborgen om te vervallen. In de loop van honderdduizenden jaren verliest het afval al zijn radioactiviteit en vormt daarna geen gevaar meer voor mens of natuur. Een eindberging kan worden gebouwd in verschillende stabiele aardlagen zoals klei, zout of graniet. In Nederland hebben wij twee soorten aardlagen waarin je een eindberging kunt bouwen, namelijk klei en zout.

Een eindberging krijgt meerdere barrières die ervoor zorgen dat het afval niet ongecontroleerd vrijkomt. Dat begint bij de afvalmatrix, denk aan het gestolde glas, waar radioactiviteit niet uit kan. Ook de afvalverpakking is zo'n barrière. En ten slotte het gesteente zelf. Het geheel zal zo zijn ontworpen en samengesteld dat het zeer lang duurt voordat onverhoopt toch mobiel geworden radioactieve stoffen de oppervlakte bereiken. Alle barrières samen hebben zo'n groot vertragend effect dat de stoffen pas na tienduizenden jaren de oppervlakte bereiken. De radioactiviteit zal dan nagenoeg geheel zijn vervallen.

Omdat de hoeveelheid radioactief afval gering is (ongeveer 5 kubieke meter per jaar) kan het tijdelijk worden opgeslagen in het HABOG (dat zo nodig modulair nog verder uit te bereiden is). Voor de komende honderd jaar is dat een goede (interim)oplossing. Er is praktisch gezien dus geen haast met een eindberging. Tot op heden zijn er in Nederland nog geen concrete plannen voor een eindberging.

Tot voor kort was het Nederlandse beleid erop gericht om in 2100 een beslissing te nemen over de eindberging voor het radioactief afval. Deze eindbergingsfaciliteit zou in 2130 operationeel moeten zijn. Met de veranderende ambities waarbij ingezet wordt op een toename van het gebruik van kernenergie en de gevolgen daarvan voor de hoeveelheid radioactief afval, is dit beleid losgelaten. De besluitvorming voor een eindbergingsfaciliteit wordt daarmee naar voren gehaald [REF.24].

Landen zoals Zweden en Finland bouwen al aan een eindberging. Daarnaast zijn er landen die in de laatste stadia van voorbereiding zitten (Frankrijk, Zwitserland). En tenslotte zijn er nog landen die op de korte termijn een eindberging willen gaan bouwen (Japan, Canada, China, UK).

Het blijkt dat als er in landen een goede relatie is tussen overheid en plaatselijke bevolking (waar de eindberging gebouwd gaat worden) de kans groter wordt dat de eindberging ook daadwerkelijk kan worden gebouwd.

Ondergrondse eindberging in aanbouw (Finland)



6.4 RADIOACTIEF AFVAL EN SMR'S

Ook SMR's zullen radioactief afval produceren. De SMR-reactoren die op de korte termijn gebouwd kunnen worden, gebruiken dezelfde soort splijtstof als nu in Borssele. Dus ook het soort afval zal daarop lijken en kan, na opwerking, opgeslagen worden in het huidige interim-opslaggebouw. De hoeveelheid afval die deze SMR-reactoren produceren verhoudt zich grofweg tot het vermogen van de reactor. Dus: minder vermogen dan de Borssele (circa 500 MW) dan ook minder afval. Als we ervan uitgaan dat de splijtstof van SMR's (net als in Borssele) zal worden opgewerkt, dan zal een SMR tussen de 1 en de 4 kubieke meter hoogradioactief afval per jaar produceren (Borssele circa 5m³). Uiteraard: meerdere SMR's maken samen natuurlijk ook meer afval.

Als er gekozen wordt om de splijtstof niet op te werken maar direct op te slaan, zal dit leiden tot een groter volume afval (bij gelijkblijvende hoeveelheid radioactiviteit). In dat geval zal de Nederlandse infrastructuur hierop moeten worden aangepast, het huidige HABOG kan dit afval namelijk niet ontvangen.

Geavanceerde SMR's lijken de potentie te hebben om radioactief afval opnieuw in te zetten tijdens de energieproductie in de reactor. Hierdoor zou de hoeveelheid radioactief afval verminderd kunnen worden. Tegelijkertijd zal ook de vervaltijd van het afval kunnen worden verkort.

6.5 ONTMANTELINGSKOSTEN

De exploitant van een kernreactor (de vergunninghouder) moet ervoor zorgen dat de reactor aan het einde van zijn levensduur wordt ontmanteld. Er moeten voldoende financiële middelen zijn om de ontmanteling van de reactor te kunnen bekostigen.

De door de vergunninghouder gepresenteerde financiële zekerheid wordt getoetst door de minister van Financiën en staatssecretaris van IenW. De zekerheid kan de vorm hebben van een borgtocht of bankgarantie of deelname aan een speciaal ingesteld fonds. Het kan ook een andere voorziening zijn die naar het oordeel van de minister en staatssecretaris voldoende garantie (zekerheid) geeft. In ieder geval moet het gewaarborgd zijn dat de kosten van buitengebruikstelling en ontmanteling van de reactor na afloop gedekt zijn.

De financiële zekerheid is gekoppeld aan de activiteiten die in het ontmantelingsplan staan. Dat plan wordt getoetst door de ANVS. De eisen voor het ontmantelingsplan zijn te vinden in het *Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen* (Bkse) [\[REF.25\]](#) en de *Regeling buitengebruikstelling en ontmanteling nucleaire inrichtingen* (Rboni) [\[REF.26\]](#).

NIET-ELEKTRISCHE TOEPASSING: LDR-50

Een Europees voorbeeld van een SMR op basis van lichtwatertechnologie dat specifiek ontworpen wordt voor een niet-elektrische toepassing is de **LDR-50** van Steady Energy uit Finland (**L**ow-Temperature **D**istrict Heating **R**eactor [REF.27]. Zoals de naam impliceert is de reactor primair ontworpen om warmte te leveren aan een warmtenet (*District Heating*), maar dezelfde warmte kan in principe ook gebruikt worden voor andere processen op lage temperatuur, zoals ontzilting en LT-industrie.

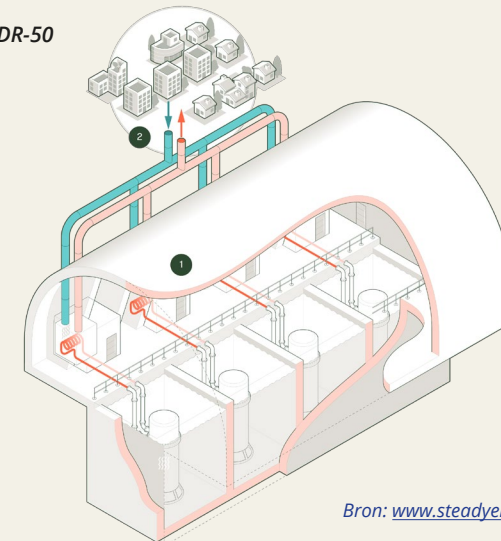
Kernenergie gebruikt voor stadsverwarming is een bestaande koppeling, conventioneel met restwarmte van elektriciteitsproductie, met als voorbeeld kerncentrale Beznau in Zwitserland [REF.28].

De focus die de LDR-50 legt op stadsverwarming is echter wat deze SMR uniek maakt. Het is mogelijk interessant om kernenergie te gebruiken voor warmtenetten door de aanzienlijke (lastig economische aantrekkelijk te verduurzamen) energievraag. Als voorbeeld: voor Helsinki, een stad van ~650.000 inwoners waar 90% van de stad aan het warmtenet is aangesloten, is over het jaar heen tussen de 250 – 2.500 MW_{th} aan warmte nodig [REF.29].

Basis Specificaties LDR-50

Ontwerper	Steady Energy (Finland)
Reactor type	Drukwaterreactor (PWR)
Toepassingen	Stadsverwarming, ontzilting, LT-industrie
Inlaat/uitlaat temperatuur kern	~150 °C
Thermisch vermogen	50 MW _{th}

Impressie van de LDR-50



Bron: www.steadyenergy.com/solution

In deze bijlage wordt van vier SMR ontwerpen de stand van zaken anno 2023/2024 op het gebied van realisatie samengevat.

Hierbij worden de volgende onderdelen beschouwd:

1. Vergunning
2. Locatie
3. Financiering
4. Toeleveringsketen
5. Splijtstof

Keuze ontwerpen

De gekozen ontwerpen betreffen twee lichtwater SMR's en twee geavanceerde SMR's. Genoemde lichtwater SMR's zijn in een relatief gevorderd stadium van ontwikkeling waardoor het interessant is om kennis te nemen van de wijze waarop de genoemde onderdelen zijn ingevuld. De geavanceerde SMR's zijn gekozen vanwege Thorizon (gesmoltenzout) als Nederlandse ontwikkelaar, en de Xe-100 betreft een andere technologie (hoge temperatuur gasgekoeld) met een goede potentie voor implementatie in de Nederlandse industrie.

De ontwerpen worden uitgebreider besproken in de *NRG Marktanalyse SMR's 2023*. Daar worden ook de andere reactorontwerpen besproken die momenteel in ontwikkeling zijn.

De gebruikte referenties voor deze samenvatting zijn:

1. The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition, OECD 2024 [\[REF.30\]](#)
2. SMALL MODULAR REACTOR CATALOGUE, A supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), IAEA, 2024 [\[REF.2\]](#)

De informatie is in sommige gevallen aangepast op basis van recentere ontwikkelingen (vermeld op de website van de betreffende organisatie). De genoemde onderdelen worden puntsgewijs beschreven op basis van informatie voornamelijk verkregen uit [\[REF.30\]](#). Hiermee wordt inzicht verkregen over de status van het betreffende onderdeel voor de verschillende reactorconcepten. Voltooiing/marktrijpheid voor deze onderdelen wordt hierbij als volgt gedefinieerd [\[REF.30\]](#):

1. **Vergunning:** dat de SMR vergund is voor bedrijfsvoering
2. **Locatie:** dat de bouw van de SMR is gestart op de locatie
3. **Financiering:** dat er bewijs is dat de FOAK volledig is gefinancierd en er voortgang is m.b.t. NOAK financiering
4. **Toeleveringsketen:** dat NOAK constructies gaande/afgerond zijn op meerdere vergunde locaties
5. **Splijststof:** dat er leveringscontracten zijn en het bedrijven met de splijstofsplijststof is vergund.

De volledige beschrijvingen van deze ontwikkelstadia zijn te vinden in referentie 32.

BWRX-300

Basis specificaties	
Ontwerper	GE Hitachi Nuclear Energy (U.S.A.) and Hitachi-GE Nuclear Energy (Japan)
Reactor type	Kokend Water Reactor (BWR)
Uitlaat temperatuur kern	288°C
Druk	71,2 bar
Vermogen: Thermisch/Elektrisch	870 MW _{th} / 300 MWe
Splijststof	UO ₂ (regulier gangbare LWR splijststof)
Grootte	11.500 m ² (~ 2 Voetbalvelden)
Toepassingen	Electriciteitsopwek, Co-generatie, procesintegratie, warmtenet

Vergunning

- ✓ In 2023 voltooide GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) een gecombineerde Vendor Design Review (VDR) bij de Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) voor de BWRX-300. In het VDR-rapport van de BWRX-300 heeft de CNSC geen fundamentele belemmeringen voor vergunningverlening vastgesteld.
- ✓ Ontario Power Generation (OPG) diende bij de CNSC een aanvraag in voor een vergunning om in 2022 één BWRX-300-reactor te bouwen op de locatie van OPG's Darlington New Nuclear Project in Canada.
- ✓ GEH is bezig met pre-licentie activiteiten met regelgevende instanties in de Verenigde Staten en het Verenigd Koninkrijk. De Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission (NRC) heeft vijf actuele rapporten voor BWRX-300 goedgekeurd.
- ✓ In 2023 heeft het Poolse ministerie van Klimaat en Milieu een algemene verklaring uitgegeven dat de BWRX-300 voldoet aan de nationale eisen voor nucleaire veiligheid.

Locatie

- ✓ OPG is begonnen met de voorbereidingen voor de bouw van één BWRX-300 in Darlington. In 2023 heeft de regering van Ontario aangekondigd dat ze samen met OPG begint met de planning en vergunningverlening voor drie extra BWRX-300 SMR's op de Darlington-locatie.
- ✓ BWRX-300 is ook geselecteerd voor mogelijke plaatsing door: SaskPower in Canada; Fermi Energia in Estland; en ORLEN Synthos Green Energy in Polen.
- ✓ Tennessee Valley Authority (TVA) is een partnerschap aangegaan met GEH voor mogelijke plaatsing op de Clinch River-locatie in de Verenigde Staten.
- ✓ BWRX-300 heeft ook een Memorandum of Understanding (MoU) met exploitant ČEZ voor mogelijke plaatsing in Tsjechië en is geselecteerd door Great British Nuclear met betrekking tot innovatieve nucleaire technologie van het Verenigd Koninkrijk.

Financiering

- ✓ GEH heeft particuliere en publieke steun verkregen voor de ontwikkeling van de BWRX-300 in Darlington. Deze omvat bijna CAD 1 miljard (ca. 680 miljoen EUR) aan publieke financiering van de Canadese federale overheid via de Canadese Infrastructuurbank en aanvullende subsidies via de *Advanced Research Projects Agency-Energy*-financiering van het Amerikaanse ministerie van Energie (DOE).
- ✓ In november 2021 stelde de provincie Ontario OPG in staat om de kosten voor de bouw en exploitatie van het project via elektriciteitsbelasting te verhalen, door middel van een wijziging in de regelgeving.
- ✓ In 2023 hebben GEH, TVA, OPG en Synthos Green Energy (SGE) een overeenkomst gesloten om te investeren in de ontwikkeling van de BWRX-300 met een investering van ongeveer USD 400 miljoen (ca. 380 miljoen EUR).

Toeleveringsketen

- ✓ Gezien de ervaring van GEH met de ontwikkeling van kokendwaterreactoren zijn er mogelijkheden om gebruik te maken van de bestaande toeleveringsketens.
- ✓ Om de uitrol van de BWRX-300 in Canada te ondersteunen, werkt GEH samen met OPG aan het ontwerp, plan, vergunning en voorbereiding van de Darlington-locatie.
- ✓ TVA is geïnteresseerd in de introductie van de SMR in de Verenigde Staten en heeft aparte overeenkomsten gesloten met zowel GEH als OPG met betrekking tot het delen van informatie en coördinatie op het gebied van ontwerp- en vergunningsvereisten.
- ✓ Samenwerking met een Brits architectenbureau om input te leveren voor het ontwerp.

Splijstof

- ✓ De BWRX-300 gebruikt splijstof die bewezen en commercieel beschikbaar is en die momenteel gebruikt wordt in werkende kokendwaterreactoren. Er worden geen obstakels verwacht in de toeleveringsketen van splijstof voor deze SMR.

ROLLS-ROYCE SMR

Basis specificaties	
Ontwerper	Rolls-Royce SMR Limited, Verenigd Koninkrijk
Reactor type	Druk Water Reactor (3-loop PWR)
Uitlaat temperatuur kern	322°C
Druk	155/74 bar (prim./sec.)
Vermogen: Thermisch/Elektrisch	1.358 MW _{th} / 470 MWe
Splijtstof	UO ₂ (regulier gangbare LWR splijtstof)
Grootte	54.500 m ² (~ 8 Voetbalvelden)
Toepassingen	Electriciteitsopwek; Co-generatie, warmtetoepassingen, procesintegratie

Vergunning

- ✓ De aanvraag voor certificering van het ontwerp van de Rolls-Royce SMR (RR SMR) is ter beoordeling ingediend bij het Britse Office for Nuclear Regulation (ONR). Het ontwerp is stap 3 van de ONR Generic Design Assessment-procedure ingegaan.

Locatie

- ✓ De Nuclear Decommissioning Authority (NDA) van het VK onderzoekt de mogelijkheden om NDA-grond te gebruiken ten behoeve van de energie-zekerheidsstrategie van het VK door een mogelijke vestiging van een RR SMR.
- ✓ De RR SMR werd ook geselecteerd als de voorkeurstechologie door de Solway Community Power Company, zo mogelijk te plaatsen in West Cumbria, Verenigd Koninkrijk.
- ✓ Rolls-Royce SMR heeft ook een Memorandum of Understanding (MoU) met de nucleaire exploitant ČEZ ten behoeve van Temelin, Tsjechië.
- ✓ In 2023 selecteerde Great British Nuclear de RR SMR samen met vijf andere SMR's om door te gaan naar de volgende fase van de competitie voor innovatieve nucleaire technologie voor mogelijke plaatsing in het VK.

Financiering

- ✓ Rolls-Royce SMR heeft meer dan 500 miljoen pond (599 miljoen EUR) aan gecombineerde financiering uit de publieke en private sector aangetrokken om de ontwikkeling en uitrol te ondersteunen.
- ✓ De Britse overheid heeft de RR SMR gesteund, onder andere met 210 miljoen GBP (250 miljoen EUR) aan financiering via het Britse onderzoeks- en innovatieprogramma.
- ✓ In de private sector hebben partners in de Rolls-Royce SMR hebben geïnvesteerd. In het bijzonder hebben de Rolls-Royce Group, BNF Resources, Constellation en de Qatar Investment Authority samen bijna 300 miljoen pond (360 miljoen EUR) opgehaald voor de RR SMR.

Toeleveringsketen

- ✓ De RR SMR wordt ondersteund door een door Rolls-Royce geleid consortium dat het Britse National Nuclear Laboratory omvat, evenals de Britse engineeringbedrijven BAM Nuttall, Laing O'Rourke, Jacobs, Nuclear AMRC, Assystem en The Welding Instituut.
- ✓ Rolls-Royce SMR wil eigen fabrieken ontwikkelen om de SMR-modules te bouwen en om kant-en-klare engineering, fabricage en assemblage voor RR SMR op te zetten.
- ✓ Rolls-Royce SMR is bezig met het selecteren van een locatie voor een eerste fabriek en heeft verschillende overeenkomsten gesloten voor producten en diensten voor de ontwikkeling van de SMR.
- ✓ Het Britse team van AtkinsRéalis ondersteunt de werkzaamheden met betrekking tot het ontwerp en de opleveringsaspecten van de SMR.
- ✓ Rolls-Royce SMR heeft ook contracten lopen voor specifieke materialen, waaronder met Sheffield Forgemasters.

Splijtstof

- ✓ De RR SMR gebruikt splijtstof die de huidige industriestandaard is voor watergekoelde reactortechologieën met een vergelijkbaar ontwerp. Hierdoor worden geen belemmeringen verwacht in de toeleveringsketen van splijtstof voor deze SMR.
- ✓ In 2023 tekende Rolls-Royce SMR een overeenkomst met Westinghouse Electric Company voor de ontwikkeling en voortgang van het werk aan het ontwerp van de RR SMR splijtstof.

THORIZON

Basis specificaties	
Ontwerper	Thorizon B.V., Nederland
Reactor type	Gesmolten zoutreactor
Uitlaat temperatuur kern	800°C
Druk	Lage druk
Vermogen: Thermisch/Elektrisch	250 MW _{th} / 100 MWe
Splijstof	Splijtbaar materiaal in zout (Geavanceerde splijstof)
Grootte	Nog niet bekend
Toepassingen	Hoge temperatuur warmte, Electriciteitsopwek, Co-generatie, procesintegratie

Vergunning

- ✓ Het pre-vergunningsproces start in 2025 (bij de Nederlandse ANVS en Franse ASN; bron: website Thorizon).

Locatie

- ✓ Thorizon gaat samenwerken met EPZ om de haalbaarheid te beoordelen van de plaatsing van een demonstratiereactor op de locatie van de kerncentrale in Borssele.

Financiering

- ✓ In augustus 2022 haalde Thorizon EUR 12,5 miljoen (USD 13,2 miljoen) op bij private investeerders, waaronder Positron Ventures en Huisman, en publieke investeerders, waaronder Invest-NL, het Participatiefonds Duurzame Economie Noord-Holland (PDENH) en Impuls Zeeland.

Toeleveringsketen

- ✓ Thorizon werkt samen met diverse experts om de toeleveringsketen te ontwikkelen.
- ✓ Orano is partner voor de ontwikkeling van splijstof en bijbehorende toeleveringsketen.
- ✓ Voor technologie validatie wordt samengewerkt met o.a. de *Nuclear Research and Consultancy Group* (NRG) en de Technische Universiteit Delft.
- ✓ Thorizon is ook lid van het Nuclear Valley-netwerk, een groep van meer dan 400 bedrijven die betrokken zijn bij de Franse nucleaire toeleveringsketen.

Splijstof

- ✓ Thorizon introduceert een gesmolten chloridezoutmengsel van uranium en plutonium uit verbruikte splijstof en thorium. De splijstof zit in patronen die in de kern worden geplaatst die het gesmolten zoutkoelmiddel bevat.
- ✓ Thorizon is lid van MIMOSA (Multi-recycling strategieën van LWR SNF gericht op MOlten SAIt-technologie), een consortium van 14 partijen met Orano, EDF, de TU Delft en NRG. MIMOSA heeft een budget van EUR 5,75 miljoen (USD 6,05 miljoen) uit het Euratom HORIZON fonds om te werken aan multi-recycling van verbruikte splijstof uit lichtwaterreactoren.

XE-100

Basis specificaties	
Reactor type	Modulaire HTGR (High Temperature Gas cooled Reactor)
Inlaat/uitlaat temperatuur kern	260/750°C
Druk	60/165 bar
Vermogen: Thermisch/Elektrisch	200 MW _{th} / 82,5 MWe
Splijstof	TRISO-X korrels* HALEU**
Grootte	(340 x 385 m) 130.900 m ² (4 modules met 4 turbines → 32.725 per module)
Toepassingen	Proceswarmte, ontzilting, elektriciteit en Co-generatie
Ontwerper	X Energy, LLC, Verenigde Staten

* *TRistructural ISOtropic (TRISO)-deeltjes zijn ingebed in grafietkorrels. De deeltjes bevatten gecoate uraanoxide- en carbide (UCO).*

** *HALEU: splijstof speciaal voor geavanceerde reactoren, verrijgingsgraad tussen 5–20%.*

Vergunning

- ✓ De Xe-100 reactor wordt momenteel beoordeeld door zowel de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission (NRC) als de Canadese Nuclear Safety Commission (CNSC).
- ✓ X-energy heeft 23 themarapporten en *white papers* ingediend bij de Amerikaanse NRC, waarvan er 18 zijn beoordeeld.
- ✓ De NRC en de CNSC hebben in 2021 een gezamenlijke beoordeling gecoördineerd van X-energy over de bouw van reactordrukvatens.

Locatie

- ✓ Dow Chemical heeft X-energy geselecteerd om stroom en stoom te leveren met behulp van vier Xe-100 reactoren aan de productiefaciliteit in Seadrift, Texas (Verenigde Staten).
- ✓ Xe-100 is geselecteerd door Energy Northwest om tot 12 Xe-100 modules te plaatsen op de locatie met nucleaire licentie in Richland, Washington. Ook is de Xe-100 geselecteerd als SMR keuze door Grant County Public Utility District (PUD).
- ✓ X-energy werkt samen met de Maryland Energy Administration om te onderzoeken of het haalbaar is om een kolencentrale in Maryland van nieuwe energie te voorzien met een Xe-100 SMR.
- ✓ In 2022 tekende X-energy een kaderovereenkomst met Ontario Power Generation (OPG) om de potentiële inzet van Xe-100 in Canada op afgelegen en industriële locaties te onderzoeken.

Financiering

- ✓ X-energy werd geselecteerd als een van de twee begunstigden van het Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP) van het Amerikaanse DOE in 2020 en ontving 80 miljoen dollar (76 miljoen EUR) aan initiële financiering. Voor het ARDP is 1,23 miljard dollar (1,17 miljard EUR) uitgetrokken, gespreid over zeven jaar.
- ✓ De *Infrastructure Investment and Job Act* kent officieel financiering toe voor de rest van de programmatermijnen.
- ✓ X-energy heeft ook rond 6 miljoen dollar ontvangen in het kader van het Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) *digital twin*-project. Dit contract werd in juli 2023 afgerond.
- ✓ In 2022 kondigde Dow aan om een belang te nemen in X-Energy. In 2023 investeerden Doosan Enerbility en DL E&C 25 miljoen USD (24 miljoen EUR) in X-energy; tussen 2021 en begin 2023 investeerde OPG 40 miljoen USD (38 miljoen EUR) in het bedrijf.

Toeleveringsketen

- ✓ X-energy heeft geselecteerd: Zachry Group en een joint venture tussen Day & Zimmerman en Burns & McDonnell als constructeurs; Doosan voor belangrijke onderdelen waaronder de stoomgenerator en het reactordrukvat; Curtiss-Wright in Noord-Amerika voor primaire componenten; Howden in het Verenigd Koninkrijk voor heliumcirculatiepompen.
- ✓ X-energy heeft overeenkomsten met OPG, Cavendish Nuclear, Sheffield Forgemasters, Hatch en Kinectrics om de uitrol te ondersteunen.
- ✓ In 2023 heeft X-energy Kinectrics gecontracteerd voor het ontwerp, de bouw en de exploitatie van een Helium Test Facility.
- ✓ X-energy heeft ook overeenkomsten met Amsted Graphite voor nucleair grafiet en met SIMSA voor de ontwikkeling van de toeleveringsketen in Saskatchewan.
- ✓ In 2023 heeft X-energy een contract getekend met Mirion Technologies voor een gedetailleerd ontwerp van het opbrand meetsysteem.

Splijstof

- ✓ HALEU is een technisch bewezen splijstoftype; tot en met 2023 was er echter geen commerciële levering uit OESO landen, een beperkte commerciële levering wordt snel (2024) verwacht.
- ✓ X-energy werkt o.a. samen met MIT, Sargent & Lundy, Centrus om TRISO-X-splijstof te ontwerpen, te produceren en te vergunnen.
- ✓ In 2022 koos X-energy Oak Ridge als locatie voor de TRISO-X splijstoffabriek, geplande inbedrijfstelling in 2026. Deze zal voortbouwen op de proeflijn van X-energy in het Oak Ridge National Laboratory die sinds 2017 eigendom is van en geëxploiteerd wordt door X-energy.
- ✓ De NRC bestudeert momenteel een actueel Xe-100 rapport over de kwalificatiemethode voor TRISO-X-splijstof.

Lijst met afkortingen

ADR	Het verdrag voor vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg (Accord relatif au transport des marchandises dangereuses par route)
AEL	Alkaline Water Electrolysis
AMR	Advanced Modular Reactor
ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
Bbs	Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming
Bkse	Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen
BWR	Boiling Water Reactor
CfD	Contract for Difference
EUR	European Utility Requirements
FOAK	First Of A Kind. Het wordt gebruikt in de technische economie, waar het eerste item van de eerste generatie items die een nieuwe technologie of ontwerp gebruiken (veel) meer kosten dan de latere items of generaties. De latere items worden NOAK genoemd.
HRA	Hoog Radioactief Afval
HT(S)E	High-Temperature (Steam) Electrolysis
IAEA	International Atomic Energy Agency
IPO	Interprovinciaal Overleg
IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
KGg	Ministerie van Klimaat en Groene Groei

LCOE	Levelised Cost of Electricity
LMRA	Laag- en Middelaactief Radioactief Afval
LTE	Low-Temperature Electrolysis
LWR	Licht Water Reactor
MOU	Memorandum of Understanding
NOAK	n th of a kind; zie FOAK
NORM	Naturally Occurring Radioactive Material
PEM	Proton-Exchange Membrane Electrolysis
PPA	Power Purchase Agreement
(P)SAR	(Preliminary) Safety Analyses Report
PWR	Pressurized Water Reactor
RAB	Regulated Asset Base-model
RES	Regionale Energie Strategie
ROM	Regionale Ontwikkelingsmaatschappijen
SMR	Small Modular Reactor
SM-LWR	Small Modular Light Water Reactor
SOEC	Solid Oxide Electrolyser Cell
VNG	Vereniging van Nederlandse Gemeenten
VRE	Variable Renewable Energy
WAKO	Wet aansprakelijkheid kernongevallen

Lijst met referenties

REF.1	Programma-aanpak Small Modular Reactors (22 maart 2024) www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2024/03/22/bijlage-1-programma-aanpak-smr
REF.2	https://aris.iaea.org/publications/SMR_catalogue_2024.pdf
REF.3	https://www.gevernova.com/nuclear/carbon-free-power/bwr-300-small-modular-reactor
REF.4	www.oecd-nea.org/jcms/pl_96124/effective-frameworks-and-strategies-for-financing-nuclear-new-build
REF.5	https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/09/26/financing-models-for-nuclear-power-plants
REF.6	https://open.overheid.nl/documenten/1e198812-165b-4683-b3bc-efdb780517c1/file
REF.7	https://www.eurelectric.org/in-detail/cfds_explainer/
REF.8	https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:46006612
REF.9	https://intapi.sciendo.com/pdf/10.2478/ijme-2021-0020
REF.10	https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/publicatie/2018/02/02/handreiking-vergunningsaanvraag-toepassingen-splijtstoffen-radioactieve-stoffen-en-toestellen
REF.11	https://www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/projectprocedure
REF.12	https://westinghousenuclear.com/energy-systems/ap300-smr/
REF.13	Introduction and General Description of the Plant – AP1000 Design Control Document https://www.nrc.gov/docs/ml1117/ml11171a330.pdf
REF.14	https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2021/04/30/landelijk-crisisplan-straling
REF.15	https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/index.php/reference/industrial-cooling-systems

REF.16	https://open.rijkswaterstaat.nl/@195603/koelwater-handreiking-inspectiekader-wvo/?downloaditmid=195605
REF.17	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, "Handboek Immissietoets", 2019
REF.18	https://europeanutilityrequirements.eu/
REF.19	https://www.rte-france.com/eco2mix/synthese-des-donnees?type=production#
REF.20	https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/richtlijn/2023/04/05/handreiking-vobk
REF.21	NuScale Power, LLC (2024) https://www.nuscalepower.com
REF.22	https://covra.nl/app/uploads/2022/10/Nationale-Radioactief-Afval-Inventarisatie.pdf
REF.23	https://www.rivm.nl/vervoer-gevaarlijke-stoffen/vervoer-over-weg-adr
REF.24	https://open.overheid.nl/documenten/dpc-8149c7f95fd9c77e534e3e38e1e77670fd9d9041/pdf
REF.25	https://wetten.overheid.nl/BWBR0002667/2024-01-01
REF.26	https://wetten.overheid.nl/BWBR0029709/2017-08-01/
REF.27	https://www.steadyenergy.com/solution
REF.28	Axpo, "Brochure Beznau Nuclear Power Plant - Reliable, Environmentally Compatible Electricity Production" 2021
REF.29	Helsinki Energy Challenge, "Heating System in Helsinki", 2020
REF.30	https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_90816
REF.31	https://open.overheid.nl/documenten/1e198812-165b-4683-b3bc-efdb780517c1/file
REF.32	https://www.nrg.eu/en/news/small-modular-reactors-in-the-dutch-energy-system-combined-heat-and-power-production-in-industry
REF.33	https://www.pallasreactor.com/
REF.34	https://wetten.overheid.nl/BWBR0003234/2024-09-06
REF.35	https://wetten.overheid.nl/BWBR0046036/2024-01-01
REF.36	https://wetten.overheid.nl/BWBR0040179/2024-09-27
REF.37	https://wetten.overheid.nl/BWBR0041278/2024-01-01/#Hoofdstuk11_Afdeling11.2_Artikel11.16
REF.38	NBW-beoordelingssystematiek voor warmtelozingen, 21 juni 2005



NRG
PALLAS

Nuclear. For Life.

www.nrg.eu