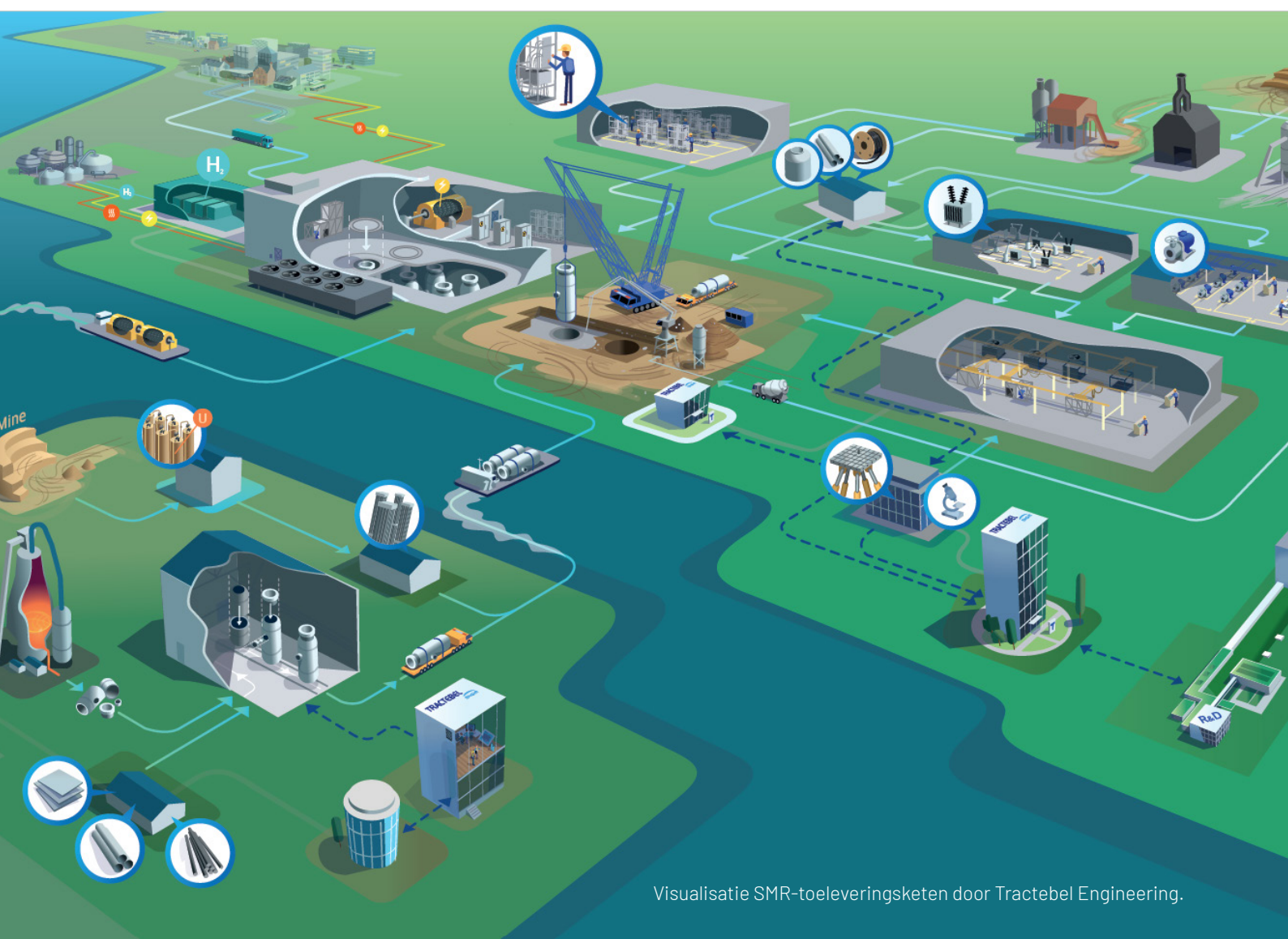


Verkennde studie naar de potentie van de SMR-toeleveringsketen voor de Rotterdamse haven

smartport.nl

Eindrapport (Nederlandse vertaling)



SmartPort is een samenwerkingsverband van het Havenbedrijf Rotterdam, Deltalinqs, de gemeente Rotterdam, TNO, Marin, Deltares, de Erasmus Universiteit Rotterdam en de Technische Universiteit Delft. Door inspireren, initiëren en allianties aangaan, stimuleert en financiert SmartPort wetenschappelijk onderzoek voor en door de bedrijven in de haven van Rotterdam, in samenwerking met kennisinstellingen. Het gaat om kennis ontwikkelen, delen en

gebruiken vanuit één collectieve ambitie. De transitie naar de beste en slimste haven kan alleen slagen wanneer alle betrokken partijen gezamenlijk oplossingen aandragen voor veranderingen in de toekomst. Wij zijn ervan overtuigd dat de grootste impact bij ontwikkeling van kennis is gebaseerd op specifieke vragen uit de markt en dat de beste resultaten worden bereikt door alles te halen uit de samenwerking van handel en industrie, overheden en wetenschap.

www.smartport.nl | [LinkedIn: smartportrdam](#) | [Instagram: smartportrdam](#)

SMARTPORT PARTNERS

Deltares

 **Deltalinqs**




Gemeente
Rotterdam

 Port of
Rotterdam

MARIN

TNO





VERKENNENDE STUDIE NAAR DE POTENTIE VAN DE SMR-TOELEVERINGSKETEN VOOR DE ROTTERDAMSE HAVEN

Eindrapport (Nederlandse vertaling)

Auteur(s)

Tractebel Engineering en Technopolis Group

Opdrachtgevers: SmartPort, Deltalinqs, het Havenbedrijf Rotterdam, de Gemeente Rotterdam en de Provincie Zuid-Holland

September 2026

Inhoud

Managementsamenvatting	6
Afkortingen	9
01 Inleiding	11
1.1 Over dit rapport	11
1.1.1 Context van de studie	11
1.1.2 Doelstellingen van de studie	11
1.1.3 Leeswijzer	12
1.2 Small Modular Reactors (SMR's)	12
1.2.1 Inleiding	12
1.2.2 Status van SMR-ontwikkeling en -implementatie	15
1.2.3 Generaties en technologiefamilies	19
1.2.4 Voorbeelden van binnenlandse en maritieme SMR-concepten	24
1.2.5 Potentieel van SMR's voor Nederland en Europa	26
02 SMR-toeleveringsketen	31
2.1 Structuur van de SMR-toeleveringsketen	31
2.2 Functionele segmenten in de SMR-toeleveringsketen	33
2.3 Beschrijving van fasen van SMR-projecten	36
2.3.1 Projectvoorbereiding	36
2.3.2 Productie en bouw	37
2.3.3 Fase voorafgaand aan en tijdens de bedrijfsvoering	37
2.4 Verschillen in landgebonden en offshore SMR-toeleveringsketens	38
2.5 Toeleveringsketens van de verschillende typen SMR's	40
2.6 Vereisten voor het betreden van de SMR-toeleveringsketen	44
03 Potentiële rol voor de haven van Rotterdam	47
3.1 Sterke en zwakke punten van de haven	47
3.1.1 Sterke punten	47
3.1.2 Zwakke punten	48
3.2 Kansen en uitdagingen van de haven	49
3.2.1 Kansen	49
3.2.2 Uitdagingen	51
3.3 Potentieel voor bedrijven in de haven van Rotterdam	52
3.3.1 Sectoren betrokken bij de toeleveringsketen	52
3.3.2 Potentieel in de toeleveringsketen	53
3.3.3 Potentieel in SMR-fasen	54
3.3.4 Totaal potentieel	57
3.4 Potentiële rollen voor de haven in de SMR-toeleveringsketen	61

04 Conclusies en aanbevelingen	64
4.1 Conclusies	64
4.2 Aanbevelingen	66
4.2.1 Stap 1: Definieer het ambitieniveau voor betrokkenheid bij de SMR-toeleveringsketen in lijn met de overkoepelende strategische visie van de haven voor 2050	66
4.2.2 Stap 2: Organiseer een publiek-private samenwerking om ambities in de SMR-toeleveringsketen te realiseren	67
4.2.3 Stap 3: Ontwikkel een gedeelde USP en actieplan om de haven en haar bedrijven te positioneren in de SMR-toeleveringsketen	68
4.2.4 Stap 4: Voer het actieplan uit en zorg dat aan randvoorwaarden wordt voldaan en uitdagingen worden opgelost	68
4.2.5 Financiering van stappen en maatregelen	69
05 Referenties	70
Bijlagen	71
Bijlage A: Methodologie	71
A.1. Gedetailleerde onderzoeksvragen	71
A.2. Methodologische aanpak	72
A.3. Geraadpleegde stakeholders	74
Bijlage B: Beoordelingsmatrix voor besluitvormingsfactoren	76

Managementsamenvatting

Dit rapport analyseert de mogelijke rol van de haven van Rotterdam en haar industriële ecosysteem in de opkomende toeleveringsketen voor Small Modular Reactors (SMR's). Het is het resultaat van een studie van Tractebel Engineering en Technopolis Group, uitgevoerd in opdracht van SmartPort, Deltalinqs, het Havenbedrijf Rotterdam, de Gemeente Rotterdam en de Provincie Zuid-Holland. Aanleidingen voor de studie zijn de groeiende belangstelling voor SMR's in Nederland en Europa en een motie van de Rotterdamse gemeenteraad uit 2025 om te komen tot een Rotterdamse Nucleaire Industrieagenda.

SMR's worden steeds vaker gezien als onderdeel van toekomstige CO₂-arme energiesystemen, onder meer voor elektriciteitsopwekking, industriële warmte, waterstofproductie en op termijn maritieme toepassingen. Door hun modulaire en deels geprefabriceerde karakter stellen zij tegelijkertijd nieuwe eisen aan productie, logistiek en integratie. Daardoor kunnen havens uitgroeien tot strategische knooppunten voor de toekomstige uitrol van SMR's.

De SMR-markt bevindt zich nog in een vroeg commercieel ontwikkelingsstadium. Wereldwijd zijn bijna honderd SMR-concepten in ontwikkeling, maar slechts een klein aantal is in bedrijf, in aanbouw of ver gevorderd in de regulatoire beoordeling. De toeleveringsketen is daardoor nog open en volop in ontwikkeling, wat kansen biedt voor nieuwe toetreders. Deze kansen zijn echter tijdgebonden en technologieafhankelijk. De eerste landgebonden SMR's worden in Europa rond 2030 verwacht, terwijl commerciële uitrol in Nederland waarschijnlijk pas eind jaren 2030 of begin jaren 2040 volgt. Offshore- en maritieme SMR's zullen naar verwachting later worden ontwikkeld vanwege hun lagere technologische volwassenheid en aanvullende regulatoire uitdagingen.

Tegen deze achtergrond concludeert de studie dat de haven van Rotterdam een sterke uitgangspositie heeft om zich te positioneren in de opkomende internationale SMR-toeleveringsketen. Die positie rust op een omvangrijk industrieel ecosysteem, sterke logistieke capaciteit, maritieme expertise en een strategische ligging met goede verbindingen naar het Europese achterland. In totaal zijn 92 bedrijven in of nabij de haven geïdentificeerd als mogelijk relevant voor deze toeleveringsketen. Zij zijn vooral actief in transport en logistiek, zwaar transport, mechanische en elektrische systemen, industriële dienstverlening, gespecialiseerde componenten en geïntegreerde modules. De grootste kansen liggen naar verwachting in niet-nucleaire componenten en diensten, omdat specifiek nucleaire capaciteit in de haven momenteel nog beperkt is.

Voor landgebonden SMR's kan de haven een rol spelen in transport en logistiek, de levering van componenten en specifieke bouwactiviteiten, vooral wanneer SMR's in of nabij de haven of elders in Nederland worden gerealiseerd. Stakeholders benadrukken daarnaast dat landgebonden SMR's kunnen bijdragen aan de industriële verduurzamingsambities van de haven via de productie van elektriciteit, warmte en waterstof.

Voor offshore- en maritieme SMR's lijkt de haven eveneens goed gepositioneerd, dankzij het bestaande offshore- en maritieme industriële ecosysteem. Mogelijke toekomstige rollen zijn verschillende niveaus van onderhoudsactiviteiten of ondersteuning voor nucleair aangedreven schepen en drijvende nucleaire energie-eenheden. Deze kansen worden echter vooral op langere termijn verwacht, vanwege de lagere technologische rijpheid van offshore-SMR's en de noodzaak van verdere ontwikkeling van regelgeving.

De studie onderscheidt vier mogelijke strategische rollen voor de haven van Rotterdam binnen de SMR-toeleveringsketen, oplopend van een lager naar een hoger ambitieniveau: (1) logistiek en transitknooppunt voor SMR-componenten en mogelijk nucleaire materialen; (2) industrieel ecosysteem voor de bouw en integratie van SMR-modules en componenten; (3) strategische Europese nucleaire haven voor maritieme routes en nucleair aangedreven vaartuigen; en (4) vestigingslocatie voor nucleair gerelateerde industriële activiteiten op het gebied van kernsplijtstof, onderhoud van SMR's en beheer van radioactief afval. Deze rollen verschillen in investeringsbehoefte, complexiteit en regelgeving. Ook combinaties van rollen zijn op termijn denkbaar.

Om deze kansen te benutten, adviseert de studie dat de haven van Rotterdam nu al proactief positie kiest. Daarvoor wordt een aanpak in vier stappen voorgesteld, weergegeven in de figuur op de volgende pagina. Eerst moeten de haven en haar stakeholders het gewenste ambitieniveau en de beoogde strategische rol bepalen, in lijn met de langetermijnvisie van de Rotterdamse haven voor 2050. Vervolgens is een publiek-privaat samenwerkingsplatform nodig om stakeholders op één lijn te brengen, het bewustzijn te vergroten en geïnteresseerde bedrijven te mobiliseren. Daarna moet deze samenwerking een gedeelde onderscheidende propositie (USP) en een actieplan ontwikkelen om de haven en haar bedrijven binnen de SMR-toeleveringsketen te positioneren. Tot slot moet dit actieplan worden uitgevoerd via gerichte maatregelen, zoals het koppelen van lokale bedrijven aan SMR-leveranciers, deelname aan nationale initiatieven rond de nucleaire toeleveringsketen, ondersteuning van talentontwikkeling en kwalificatie van personeel, en het bevorderen van werkbare regelgeving, met name voor maritieme SMR's.

De studie concludeert dat de haven van Rotterdam goed gepositioneerd is om kansen in de opkomende SMR-toeleveringsketen te benutten, vooral op het gebied van logistiek, industriële integratie en maritieme activiteiten. Succes hangt daarbij echter af van tijdige strategische keuzes, gecoördineerde publiek-private samenwerking en het vermogen om nucleaire capaciteit stapsgewijs op te bouwen in de snel veranderende en concurrerende internationale markt voor SMR's.

Stap 1 Definieer het ambitieniveau voor betrokkenheid bij de SMR-toeleveringsketen

- **Initieer een werkgroep** bestaande uit het havenbedrijf Rotterdam, Deltalinqs en de Gemeente Rotterdam om het ambitieniveau voor betrokkenheid bij de SMR-levering te definiëren en te bepalen
- Kies de **rol die het beste past bij de gedeelde ambitie en de visie van de haven** voor 2050, en die als **haalbaar en strategisch interessant** wordt beschouwd

Stap 2 Organiseer een publiek-privaat platform om ambities te realiseren

- **Ontwikkel en realiseer de ambitie** in een breder **publiek-privaat platform** met lokale bedrijven die geïnteresseerd zijn in de SMR-toeleveringsketen en publieke partners (inclusief InnovationQuarter, Provincie Zuid-Holland en Ministerie van Economische Zaken en Klimaat)
- **Creëer bewustzijn** over de potentiële kansen van de SMR-toeleveringsketen voor de haven en haar bedrijven via externe communicatie en *outreach*
- **Bevestig de interesse van geïdentificeerde bedrijven** in de SMR-toeleveringsketen, hun capaciteiten en bereidheid om te investeren in *business development* voor zo'n rol

Stap 3 Ontwikkel een gedeeld USP en actieplan om de haven te positioneren

- **Definieer met het platform de USP van de haven en stel een actieplan op** om de haven en haar bedrijven strategisch te positioneren in de gewenste rol(len) in de SMR-toeleveringsketen
- **Voer gezamenlijke *business development* uit** door personen die kennis hebben van nucleair:
 - **Promoot de USP** en gewenste rol op conferenties, in gesprek met SMR-leveranciers en belangrijke (tier-1/2) spelers in de SMR-toeleveringsketen
 - **Ondersteun lokale bedrijven** bij het ontwikkelen van hun SMR-propositie

Stap 4 Voer het actieplan uit, zorg voor randvoorwaarden en los uitdagingen op

- **Haak aan bij nationale activiteiten rondom de nucleaire toeleveringsketen** die worden georganiseerd in het kader van de bouw van grote kerncentrales in Nederland
- **Faciliteer matchmaking met SMR-leveranciers** en bedrijven in/nabij de haven van Rotterdam
- **Ondersteun en lobby voor faciliterende regelgeving** voor offshore en maritieme SMR's
- **Deel best practices en lessen** tussen bedrijven over het betreden van de SMR-toeleveringsketen
- **Pak behoeften op het gebied van personeel en onderwijs aan** door deze te verbinden met lopende nationale initiatieven (zoals de Nuclear Academy) en die te ondersteunen
- Voor individuele bedrijven:
 - **Word gekwalificeerd** voor de nucleaire toeleveringsketen (certificering, procedures)
 - **Registreer als toeleverancier** bij SMR-leveranciers die al ver ontwikkeld zijn

Figuur 1: Samenvattend overzicht van de vier stappen en bijbehorende maatregelen om de haven van Rotterdam te positioneren en voor te bereiden voor de gewenste rol in de toeleveringsketen voor SMR's¹

Afkortingen

AMR	Advanced Modular Reactor(s): geavanceerde modulaire reactor(en)
ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
ARDP	Advanced Reactor Demonstration Program (Amerikaans ministerie van Energie)
BWR	Boiling Water Reactor: kokendwaterreactor
COVRA	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval
EPC	Engineering, Procurement and Construction: engineering, inkoop en bouw
EU	Europese Unie
FOAK	First of a Kind: eerste exemplaar van een nieuw ontwerp
FPU	Floating Power Unit: drijvende energie-eenheid
GDA	Generic Design Assessment: generieke ontwerpbeoordeling (Verenigd Koninkrijk)
Gen	Generatie (bijv. Gen III/III+ en Gen IV)
GIF	Generation IV International Forum: Internationaal Forum voor Generatie IV
GSR	General Safety Requirements: algemene veiligheidseisen (IAEA-veiligheidsnormen)
GW	Gigawatt
HALEU	High-Assay Low-Enriched Uranium: laagverrijkt uranium met een hogere verrijkingsgraad
HTGR	High-Temperature Gas-cooled Reactor: hogetemperatuur-gasgekoelde reactor
HTR-PM	High-Temperature Reactor – Pebble-bed Module: hogetemperatuurreactor met kogelbedmodule (demonstratieproject in China)
IAEA	International Atomic Energy Agency: Internationaal Atoomenergieagentschap
I&C	Instrumentation and Control: instrumentatie en besturing
IEA	International Energy Agency: Internationaal Energieagentschap
ISO	International Organization for Standardization: Internationale Organisatie voor Standaardisatie
ITNS	Important to Nuclear Safety: van belang voor de nucleaire veiligheid
JER	Joint Early Review: gezamenlijke vroegtijdige beoordeling
LEU	Low-Enriched Uranium: laagverrijkt uranium

LFR	Lead-cooled Fast Reactor: loodgekoelde snelle reactor
LMFR	Liquid Metal Fast Reactor: snelle reactor met vloeibaarmetaalkoeling
LWR	Light Water Reactor: lichtwaterreactor
LWR-SMR	Light-Water Reactor Small Modular Reactor: lichtwater-SMR
MWe/ MW(e)	Megawatt elektrisch (elektrisch vermogen)
MSR	Molten Salt Reactor: gesmoltenzoutreactor
MSR-SMR	Molten Salt Reactor Small Modular Reactor: SMR van het type gesmoltenzoutreactor
MOX	Mixed Oxide Fuel: mengoxidesplijtstof
NEA	Nuclear Energy Agency: Agentschap voor Kernenergie van de OESO
NPP	Nuclear Power Plant: kerncentrale
NQA	Nuclear Quality Assurance: nucleaire kwaliteitsborging (zoals in ASME NQA-1)
OESO	Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (Engels: OECD)
OSGE	ORLEN Synthos Green Energy
PWR	Pressurised Water Reactor: drukwaterreactor
QA	Quality Assurance: kwaliteitsborging
QAP	Quality Assurance Program: kwaliteitsborgingsprogramma
QMS	Quality Management System: kwaliteitsmanagementsysteem
R&D	Research and Development: onderzoek en ontwikkeling
SFR	Sodium-cooled Fast Reactor: natriumgekoelde snelle reactor
SMR	Small Modular Reactor: kleine modulaire reactor
TL	Transport en logistiek
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek
TRISO	TRI-structural ISOtropic: isotrope splijtstofdeeltjes met drie structurele coatinglagen
VK	Verenigd Koninkrijk
VS/U.S.	Verenigde Staten (Engels: U.S.)

-01-

Inleiding

1.1 Over dit rapport

1.1.1 Context van de studie

Deze studie werd uitgevoerd door Tractebel Engineering en Technopolis Group voor een consortium van SmartPort, Deltalinqs, het Havenbedrijf Rotterdam, de gemeente Rotterdam en de provincie Zuid-Holland. Het consortium wil meer inzicht in de toekomstige kansen die voortvloeien uit de toeleveringsketen van Small Modular Reactors (SMR's) voor de haven van Rotterdam en de bedrijven in of nabij de haven. Deze studie helpt het consortium zich proactief op deze kansen voor te bereiden, tegen de achtergrond van de toenemende belangstelling voor SMR's in Nederland en Europa.

SMR's worden steeds vaker beschouwd als onderdeel van toekomstige CO₂-arme energiesystemen, met potentiële toepassingen variërend van industriële energievoorziening en warmteproductie tot waterstofproductie en toekomstige maritieme toepassingen. De modulaire en gedeeltelijk prefab-aard van SMR's stelt hoge eisen aan industriële productie- en logistieke ketens, waardoor havens zich kunnen positioneren als potentiële strategische knooppunten. Tegelijkertijd beschikt de haven van Rotterdam over een breed industrieel ecosysteem dat kan deelnemen aan verschillende segmenten van de SMR-toeleveringsketen.

Op regionaal niveau neemt de politieke en institutionele belangstelling voor kernenergie toe, ondersteund door recente gemeentelijke initiatieven en betrokkenheid van kennisinstellingen. Deze studie richt zich op het huidige gebrek aan duidelijkheid over de rol van havens in de SMR-toeleveringsketen, in het bijzonder het potentieel van de haven van Rotterdam en haar industrie, en vormt een eerste stap in de ontwikkeling van een Rotterdamse Nucleaire Industrieagenda. Deze agenda komt voort uit twee moties die in 2025 door de gemeenteraad van Rotterdam zijn aangenomen.

In de raadsmotie "SMR's, da's pas gers" van 5 juni 2025 wordt het Rotterdamse college van B&W verzocht om "een Rotterdamse Nucleaire Industrieagenda op te stellen, gericht op [de] realisatie [van SMR's] vóór 2035" en dat te doen "in samenwerking met [het] Havenbedrijf, Deltalinqs, de provincie Zuid-Holland en andere relevante partners".

De kwantitatieve aannames die in deze studie worden gebruikt, zijn bedoeld als indicatieve input en als uitgangspunt voor de analyse, aangezien de SMR-markt en de technologische ontwikkeling nog volop in beweging zijn en daarmee aan verandering onderhevig.

1.1.2 Doelstellingen van de studie

De doelstellingen van de studie zijn het verkrijgen van inzichten in de opkomende SMR-toeleveringsketen en het beoordelen van het potentieel van de haven van Rotterdam en haar bedrijven in deze toeleveringsketen. De studie formuleert concrete aanbevelingen voor de haven en haar stakeholders om de vastgestelde potentiële rollen in de SMR-toeleveringsketen optimaal te kunnen benutten.

De belangrijkste onderzoeksvragen van de studie zijn:

- In hoeverre kan de haven van Rotterdam een rol spelen in de toekomstige toeleveringsketen van SMR's?
- Wat zijn de potentiële rollen die de haven van Rotterdam binnen deze toeleveringsketen zou kunnen vervullen?
- Hoe kan de haven van Rotterdam zich positioneren en voorbereiden om deze rollen effectief te vervullen?

Meer gedetailleerde onderzoeksvragen zijn opgenomen in Bijlage A: Methodologie.

De studie is geografisch afgebakend tot het gebied van de haven van Rotterdam en haar directe omgeving. De studie onderzoekt het potentieel van de haven als logistiek knooppunt en van de bedrijven die in de haven van Rotterdam gevestigd zijn om een rol te spelen in de toekomstige toeleveringsketen van SMR's met betrekking tot SMR-modules en -componenten en SMR-splijtstof en radioactief afval.

1.1.3 Leeswijzer

Dit rapport bestaat uit vier hoofdstukken. Hoofdstuk 1 introduceert de studie, de verschillende typen SMR's en de relevante ontwikkelingen in Nederland en Europa. Hoofdstuk 2 beschrijft de structuur en actoren van de SMR-toeleveringsketen en de fasen van een SMR-project; deze kaders vormen de basis voor de analyse in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 3 onderzoekt welke rol de haven van Rotterdam kan vervullen en waar naar inschatting relevante lokale bedrijven zich in de toeleveringsketen en projectfasen kunnen positioneren. Hoofdstuk 4 presenteert de conclusies, aanbevelingen en geeft mogelijke acties waarmee de haven en haar stakeholders zich in de SMR-toeleveringsketen kunnen positioneren.

1.2 Small Modular Reactors (SMR's)

1.2.1 Inleiding

Volgens het Internationaal Atoomenergieagentschap (IAEA) zijn Small Modular Reactors (SMR's) geavanceerde kernreactoren met een elektrisch vermogen van maximaal 300 MW(e), waarvan de systemen en componenten in de vorm van modules in een fabriek kunnen worden vervaardigd. Deze modulaire aanpak vergemakkelijkt het transport en heeft als doel de bouwtijd op locatie en de totale projectkosten te verlagen.

SMR's kunnen naar verwachting flexibele oplossingen voor energieopwekking bieden voor een breed scala aan gebruikers en toepassingen. Ze kunnen worden ingezet als installaties met één module of als installaties met meerdere modules, en bieden de mogelijkheid tot integratie met andere energiebronnen, waaronder hernieuwbare energie.

Hoewel de grens van 300 MW(e) vaak als referentie wordt gebruikt, zijn er ontwerpen met een hoger vermogen die nog steeds vaak als SMR's worden gecategoriseerd. Dit komt doorgaans door hun geavanceerde veiligheidskenmerken, modularisatiestrategie en uitrolmodel, die aansluiten bij de kenkenmerken van SMR-technologie.

SMR's omvatten een breed en divers scala aan technologieën en kunnen op verschillende manieren worden geclassificeerd – bijvoorbeeld naar type koelmiddel, vermogensklasse, neutronenspectrum¹, splijtstofcyclusstrategie² of beoogde toepassing.

Voor dit rapport richten we ons op de vier belangrijkste technologiefamilies die momenteel het grootste deel van het wereldwijde SMR-landschap omvatten. Paragraaf 1.2.3 legt de volgende categorieën uit:

- Lichtwaterreactoren (LWR's),
- Hoogtemperatuur-gasgekoelde reactoren (HTGR's),
- Snelle reactoren met vloeibaarmetaalkoeling (LMFR's), en
- Gesmoltenzoutreactoren (MSR's).

Deze technologieën vallen ook binnen de bredere classificatie van **derde generatie (Gen III/III+) en vierde generatie (Gen IV)** nucleaire systemen, die verschillende niveaus van technologische volwassenheid, veiligheidsfilosofie en splijtstofcyclusstrategie weerspiegelen.

Toepassingen

Verschillende SMR-concepten zijn ontworpen om meerdere energiediensten te leveren, in tegenstelling tot conventionele kerncentrales die voornamelijk gericht zijn op elektriciteitsopwekking. Naast energieproductie kunnen SMR's het volgende ondersteunen:

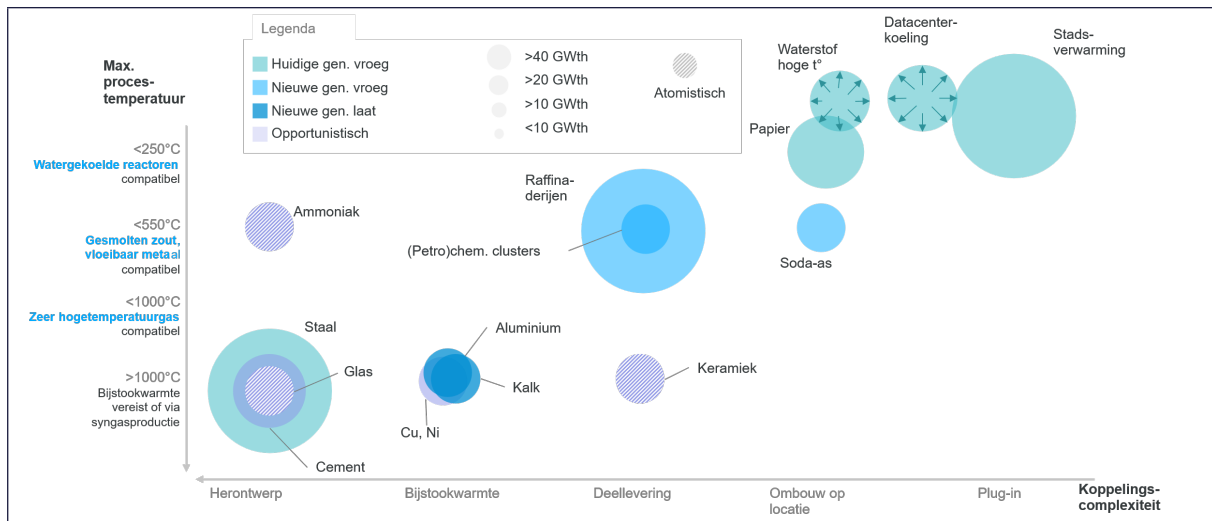
- Hogetemperatuurwarmte voor industriële processen;
- Waterstofproductie;
- Synthetische brandstoffen en e-brandstoffen;
- Stoomvoorziening;
- Warmtekrachtkoppeling;
- Maritieme voortstuwing.

Deze mogelijkheid om meerdere energieproducten te leveren kan relevant zijn in energie-intensieve industriële omgevingen waar elektriciteit, warmte en chemische grondstoffen nauw met elkaar verbonden zijn. Afhankelijk van de technische en economische haalbaarheid kunnen SMR's bijdragen aan de decarbonisatie van zowel de energie- als de warmtevraag bij dergelijke industriële processen.

Figuur 2 illustreert de relatieve complexiteit van het integreren van SMR's met verschillende industriële sectoren, gebaseerd op zowel de vereiste procestemperatuur als het gemak van integratie in bestaande processen (gemak van systeemkoppeling). Toepassingen aan de rechterkant van de grafiek, zoals stadsverwarming, papierproductie, raffinaderijen en chemische clusters, zijn over het algemeen gemakkelijker te integreren met nucleaire systemen, omdat ze afhankelijk zijn van warmte bij lagere temperaturen en vaak directe retrofit- of plug-inoplossingen mogelijk maken die compatibel zijn met kortetermijn-LWR-technologieën. Daarentegen vereisen toepassingen aan de linkerkant, zoals staal, cement, glas en bepaalde keramiektoepassingen, zeer hoge procestemperaturen en diepere herstructurering van industriële processen, waardoor integratie aanzienlijk complexer wordt en meer afhankelijk wordt van geavanceerde Generatie IV-reactortechnologieën. De grootte van de cirkels weerspiegelt de schaal van de potentiële warmtevraag, terwijl de kleurcodering het volwassenheidsniveau aangeeft van de reactortechnologieën die waarschijnlijk voor elke toepassing nodig zijn.

1 Sommige reactoren gebruiken langzame (thermische) neutronen, die gemakkelijker te beheersen zijn en tegenwoordig gebruikelijk zijn in kerncentrales. Anderen gebruiken snelle neutronen, die met hogere energie bewegen en meer energie uit de brandstof kunnen halen of zelfs helpen bij het hergebruiken van bepaalde nucleaire materialen.

2 In een open brandstofcyclus wordt brandstof één keer gebruikt en vervolgens als afval opgeslagen. In een gesloten brandstofcyclus wordt een deel van de gebruikte brandstof hergebruikt om meer energie te produceren.



Figuur 2: Affiniteit van industriële sectoren met SMR-gebaseerde co-generatie

SMR versus conventionele grootschalige kerncentrales

Naast hun veelzijdige toepassingsmogelijkheden worden verschillende potentiële voordelen van SMR's ten opzichte van conventionele grootschalige kerncentrales genoemd, vooral in de context van geïntegreerde CO₂-arme energiesystemen.

Modularisatie en industrialisatie

SMR's zijn bedoeld om te profiteren van meer standaardisatie en meer gecentraliseerde fabricage in een centrale fabriek. Door een aanzienlijk deel van de bouwactiviteiten over te brengen naar gecontroleerde productieomgevingen, is deze aanpak gericht op het verbeteren van de kwaliteitsborging, het verminderen van de bouwcomplexiteit op locatie, het verkorten van bouw tijden en het mogelijk maken van herhaalbare, gestandaardiseerde implementatie. In hoeverre deze voordelen zich vertalen in meetbare kostenreducties hangt af van het uitoitvolume en de ontwikkeling van een voldoende grote markt.

Hoewel de meeste SMR-ontwikkelaars hun ontwerpen als modulaair beschrijven, kan het concept modulariteit in de praktijk verwijzen naar verschillende benaderingen. In sommige gevallen is de reactor zelf niet modulaair, maar wordt de installatie gebouwd met modulaire bouwtechnieken, zoals bij de Rolls-Royce SMR. Andere ontwerpen omvatten in de fabriek vervaardigde reactormodules die naar de locatie worden vervoerd voor installatie. Bepaalde concepten gebruiken meerdere reactormodules die aan één enkele turbine zijn gekoppeld, zoals HTR-PM, terwijl anderen vertrouwen op meerdere zelfstandige modules, die elk gekoppeld zijn aan een eigen turbine, zoals in het geval van NuScale Power. Sommige SMR-concepten combineren ook meerdere modulaire benaderingen binnen hetzelfde installatieontwerp.

In principe wordt verwacht dat modularisatie en fabrieksbouw de bouw tijd zullen verkorten, de standaardisatie verbeteren en bijdragen aan lagere totale projectkosten.

Veiligheidskenmerken

Veel SMR-ontwerpen bevatten intrinsieke en passieve veiligheidskenmerken die vertrouwen op natuurlijke fysische principes (bijv. door zwaartekracht aangedreven koeling, natuurlijke circulatie en negatieve terugkoppeling van de reactiviteit) in plaats van actieve systemen of door ingrijpen door een operator. Daarnaast werken verschillende concepten bij lagere drukken en bevatten ze vereenvoudigde systeemconfiguraties. De kleinere kerngrootte en de verminderde inventaris aan radioactieve stoffen van bepaalde SMR-ontwerpen kunnen invloed hebben op de overwegingen van noodplanning.

Locatieflexibiliteit en integratie van infrastructuur

SMR's hebben een relatief klein ruimtebeslag en schaalbare output. SMR's kunnen daarom meer flexibiliteit bieden bij locatiekeuze dan kerncentrales op gigawattschaal. Hetzelfde kan gelden voor de vereiste lagere koelwatervolumes, afhankelijk van het reactortype en de configuratie. Deze locatieflexibiliteit maakt het mogelijk om SMR's in de nabijheid van de industriële vraag in te zetten en te integreren met bestaande energie-infrastructuur, achter-de-meter leveringsmodellen en de herontwikkeling van brownfieldlocaties of voormalige locaties voor fossiele energieopwekking.

Netwerkcompatibiliteit en schaalbaarheid

De modularisatie maakt het mogelijk om geleidelijk extra eenheden toe te voegen om zo de elektriciteitsopwekking stap voor stap uit te breiden naarmate de vraag toeneemt. Hierdoor wordt de nieuwe capaciteit beter afgestemd op de werkelijke energiebehoefte. SMR's kunnen ook compatibel zijn met beperkte of veranderende elektriciteitsnetten. Bepaalde ontwerpen kunnen hun vermogen flexibel aanpassen om netstabiliteit mogelijk te maken, wat elektriciteitssystemen met een toenemend aandeel variabele hernieuwbare energie kan ondersteunen, afhankelijk van operationele en economische omstandigheden.

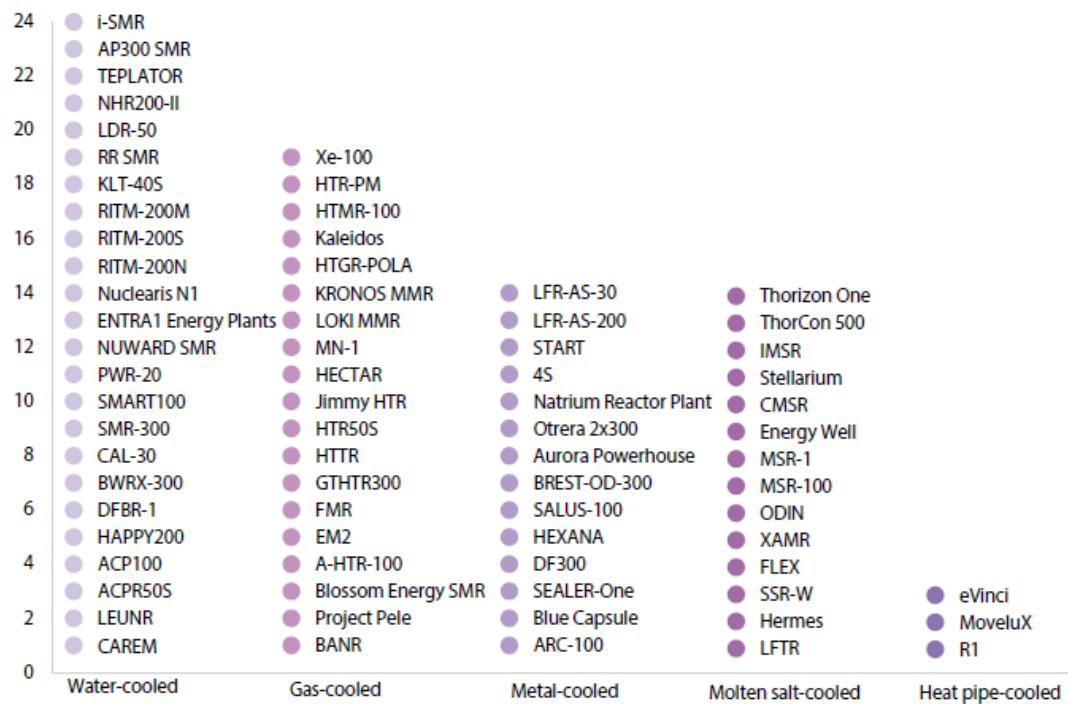
Financiering en gefaseerde ontwikkeling

In vergelijking met conventionele grote nucleaire projecten vereisen SMR's een lagere kapitaalinvestering per individuele eenheid. Hoewel multi-unit configuraties kunnen resulteren in vergelijkbare totale investeringsniveaus, kan gefaseerde inzet stapsgewijze kapitaalallocatie en gefaseerde projectontwikkeling mogelijk maken. Deze aanpak kan meer flexibiliteit bieden in investeringsplanning en risicoverdeling, vooral in omgevingen waar de energievraag in de loop van de tijd verandert.

1.2.2 Status van SMR-ontwikkeling en -implementatie

De SMR-sector is de puur conceptuele ontwerpfase voorbij en bevindt zich in verschillende landen inmiddels in een fase van demonstratie, ontwikkeling van regelgevingskaders en voorbereidende werkzaamheden op locaties. Desalniettemin bevindt de industrie zich nog in een vroeg commercieel stadium. De huidige SMR-markt zal naar verwachting in de komende jaren een aanzienlijke wereldwijde consolidatie ondergaan. Tegenwoordig concurreren ongeveer honderd SMR-ontwikkelaars om beperkte financiële middelen, gekwalificeerd personeel, testfaciliteiten, uitrollocaties, splijstoftoegang en commerciële contracten. Er wordt echter verwacht dat 80–90% van deze bedrijven op de lange termijn niet zal overleven. Van slechts een beperkt aantal koplopers, waarschijnlijk wereldwijd rond de 10 tot 15, met geavanceerde technologieën, sterke organisatorische capaciteiten en voldoende financiering, wordt verwacht dat ze succesvol de markt zullen betreden.

Figuur 3 geeft een overzicht van de vele SMR-concepten die momenteel in ontwikkeling zijn. Het komende decennium zal doorslaggevend zijn om te bepalen of SMR's overgaan van first-of-a-kindprojecten (FOAK) naar reproduceerbare en economisch concurrerende infrastructuuroplossingen. Succesvolle kostenvalidatie, stroomlijning van regelgeving, opschaling van de toeleveringsketen en marktadoptie zullen centraal staan in deze overgang.



Figuur 3: SMR-concepten momenteel in ontwikkeling³

Mondiale ontwikkelingslandschap

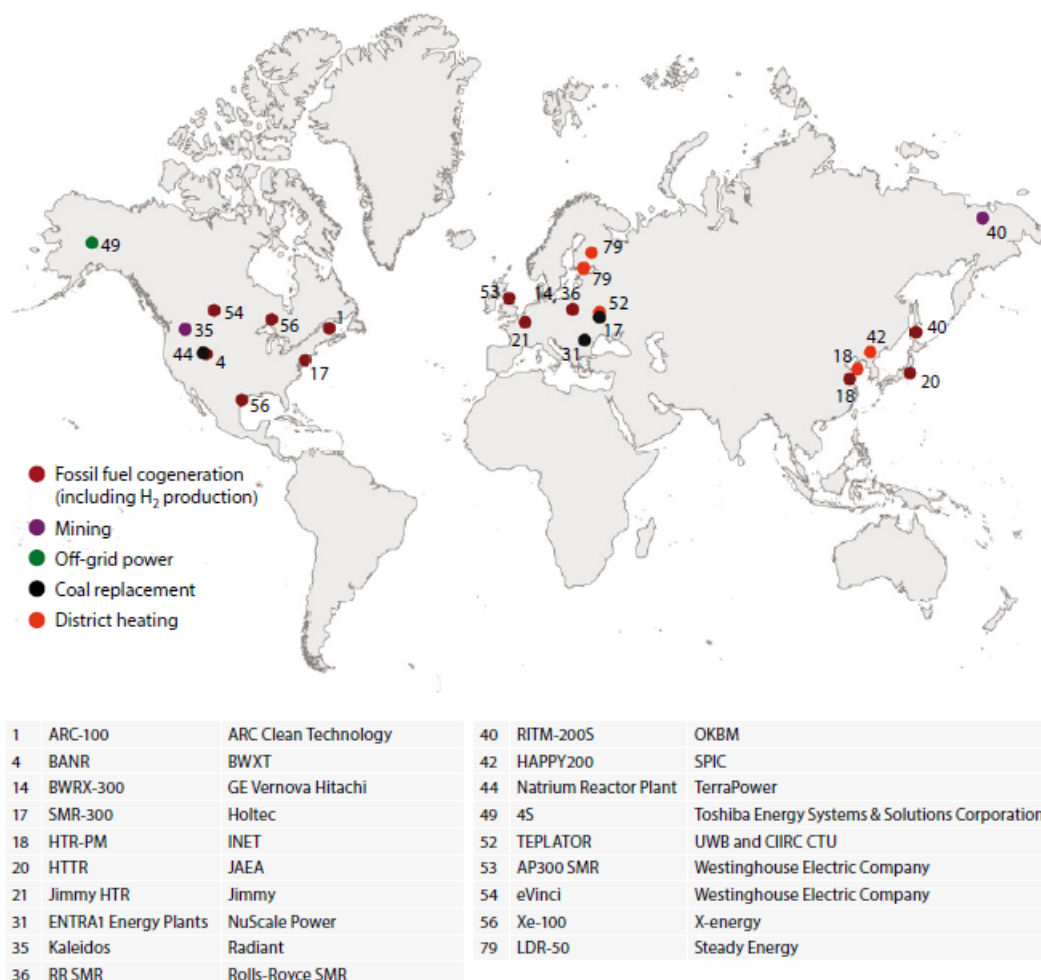
Volgens het meest recente SMR-dashboard van de OESO⁴ zijn er op dit moment wereldwijd 127 verschillende SMR-concepten. Hiervan worden er 99 momenteel actief ontwikkeld en 74 worden door de OESO gemonitord. Deze omvatten zowel Generatie III/III+ lichtwaterreactorontwerpen (LWR) als een breed scala aan geavanceerde reactortechnologieën van Generatie IV. De diversiteit aan concepten weerspiegelt uiteenlopende strategische prioriteiten, waaronder decarbonisatie van het net, industriële warmtetoepassingen, waterstofproductie, energiezekerheid en langetermijnduurzaamheid in de splijtstofcyclus.

Dezelfde editie van het SMR Dashboard identificeert 25 projecten die echte vooruitgang boeken op specifieke locaties met commerciële klanten in zes kortetermijnmarkten. Figuur 4 toont de locaties van deze projecten wereldwijd.

³ OESO, Agentschap voor Kernenergie (OESO, NEA)(2025). Het NEA Small Modular Reactor Dashboard: Derde editie. NEA nr. 7737. Parijs: OESO NEA.

⁴ OESO, Agentschap voor Kernenergie (OESO, NEA)(2025). Het NEA Small Modular Reactor Dashboard: Derde editie. NEA nr. 7737. Parijs: OESO NEA.

Figure 18. Map of near-term markets for SMRs



Figuur 4: Kaart van kortetermijnmarkten voor SMR's⁵

Projecten in werking

Tot nu toe zijn er slechts een beperkt aantal SMR's commercieel in gebruik. Het meest prominente voorbeeld is de drijvende kerncentrale in Rusland, gebaseerd op twee KLT-40S-reactoren, die sinds 2020 elektriciteit en warmte levert (zie Figuur 5).

5 OESO, Agentschap voor Kernenergie (OESO, NEA)(2025). Het NEA Small Modular Reactor Dashboard: Derde editie. NEA nr. 7737. Parijs: OESO NEA.



Figuur 5: SMR Akademik Lomonosov, de drijvende krachtbron (FPU), gevestigd in Pevek, Tsjoeotka (Rusland's Verre Oosten), fotocredits Rosatom.

China heeft ook haar hogetemperatuur-gasgekoelde reactordemonstratieproject (HTR-PM) aangesloten op het net, wat de eerste commerciële inzet van een Generatie IV-type SMR-systeem op commerciële schaal vertegenwoordigt.

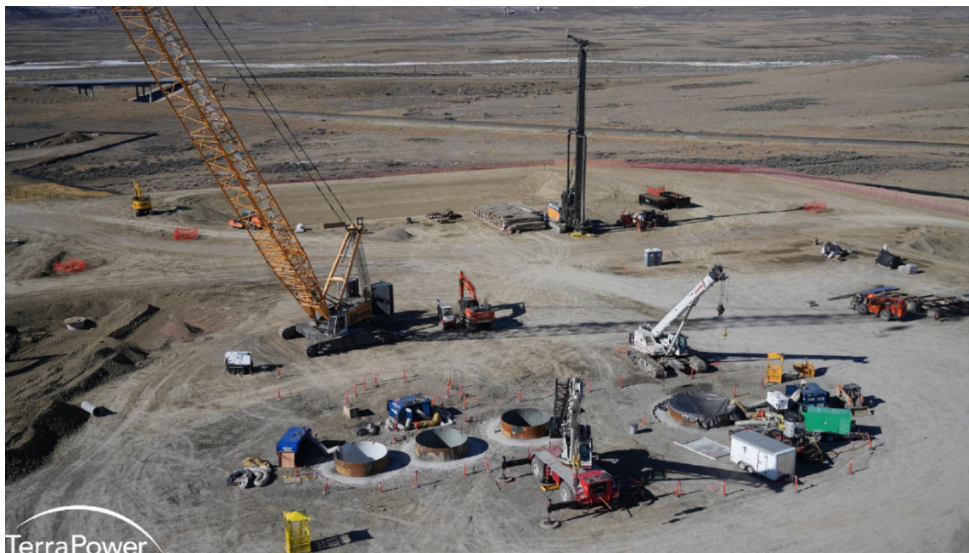
Projecten in aanbouw

In Noord-Amerika behoort het BWRX-300-project op de locatie Darlington in Ontario tot de meest geavanceerde westerse initiatieven voor de uitrol van SMR's. Hier wordt de locatie voorbereid en de bouw wordt later in het decennium verwacht. In Polen zijn samenwerkingsakkoorden gesloten voor de mogelijke inzet van dezelfde technologie.



Figuur 6: Bouwplaats van BWRX-300, locatie Darlington in Ontario. Fotocredits GE Vernova

In het Verenigd Koninkrijk vordert het Rolls-Royce SMR-programma door de regulatoire beoordeling en locatie-identificatie, ondersteund door nationale overheidsfinancieringsmechanismen. Daarnaast vorderen geavanceerde reactorontwikkelaars zoals TerraPower (natriumgekoelde snelle reactor) en X-energy (Xe-100 HTGR) met hun demonstratieprojecten in de Verenigde Staten, ondersteund door federale financieringsprogramma's.



Figuur 7: TerraPower bouwactiviteiten in 2025 op de locatie Kemmerer. Fotocredits TerraPower

1.2.3 Generaties en technologiefamilies

In deze paragraaf worden de **derde generatie (Gen III/III+)** en de **vierde generatie (Gen IV)** nucleaire systemen en de belangrijkste technologiefamilies beschreven, waarbij hun kenmerkende eigenschappen worden uiteengezet.

Generatie III / III+

Reactoren van Generatie III zijn evolutionaire verbeteringen ten opzichte van reactoren van Generatie II. De **Gen III-reactoren** werden grotendeels ontworpen en gebouwd van de jaren zeventig tot en met de jaren negentig en zijn nog steeds veel in gebruik. Generatie III-ontwerpen begonnen op te komen in de jaren negentig en vroege jaren 2000.

Generatie III+ ontwerpen bevatten verbeterde passieve veiligheidssystemen, vereenvoudigde installatieconfiguraties, langere bedrijfsduur (meestal 60 jaar of langer) en verbeterde weerstand tegen ernstige ongevallen.

Belangrijke kenmerken zijn onder andere:

- Bewezen watergekoelde technologie – Meestal gebaseerd op lichtwaterreactortechnologie, gebruikmakend van gewoon water als koelmiddel en moderator, voortbouwend op decennia operationele ervaring;
- Sterke afhankelijkheid van passieve veiligheidsvoorzieningen – Veiligheidssystemen die functioneren volgens natuurkundige principes (bijv. zwaartekracht, natuurlijke circulatie) zonder externe energievoorziening of ingrijpen door een operator;
- Vastgestelde regelgevende kaders – Ontworpen binnen gevestigde licentieregimes, met goed gedefinieerde veiligheidsnormen en eerdere certificeringservaring in meerdere landen;
- Open splijtstofcyclus (in de meeste gevallen) – Een eenmalige splijtstofcyclusstrategie waarbij bestraalde splijtstof niet wordt hergebruikt, maar als afval wordt beheerd voor langdurige opslag en eindberging;
- Incrementele innovatie in plaats van disruptieve verandering – Evolutionaire verbeteringen ten opzichte van eerdere reactorgeneraties, met de nadruk op verbeterde veiligheid en betrouwbaarheid in plaats van fundamenteel nieuwe reactorconcepten.

Binnen het SMR-landschap vallen de meeste lichtwater-SMR's in de categorie Generatie III/III+, omdat ze voortbouwen op conventionele druk- of kokendwaterreactortechnologie.

Generatie IV

Reactoren van generatie IV vormen een meer geavanceerde en transformerende klasse van nucleaire systemen. Het concept werd geformaliseerd onder het Generation IV International Forum (GIF),⁶ met als doel reactoren te ontwikkelen met:

- Efficiënter splijtstofbenutting – Verhoogde efficiëntie van de splijtstofbenutting door meer energie uit uranium (en mogelijk thorium) te halen, onder andere door te kweken (de reactor produceert meer bruikbaar splijtbaar materiaal in de splijtstof) of een hogere opbrandgraad.
- Gesloten splijtstofcycli – Laat herverwerking en recycling van bestraalde splijtstof toe om bruikbare materialen terug te winnen en de vraag naar nieuwgewonnen uranium te verminderen.
- Reductie in langlevend radioactief afval (>1.000 jaar) – Minimalisatie van het volume en de radiotoxiciteit van hoogradioactief afval, met name door transmutatie van langlevende radionucliden.
- Verbeterde inherente en passieve veiligheid – Sterker vertrouwen in fysieke eigenschappen van materialen en reactorfysica (bijv. negatieve terugkoppeling van de reactiviteit) en passieve systemen om veilige werking te waarborgen.
- Verbeterde proliferatiebestendigheid – Geïntegreerde ontwerpkenmerken en benaderingen van splijtstofcyclus die de ongeoorloofde onttrekking of het misbruik van nucleair materiaal beperken.⁷
- Ondersteuning van industriële toepassingen met hoge temperaturen – Leveren hogere uitgangstemperaturen die geschikt zijn voor proceswarmte, waterstofproductie, ontzilting of andere industriële toepassingen.

Kernsystemen van Generatie IV gebruiken doorgaans alternatieve koelmiddelen, zoals heliumgas, vloeibaar natrium, lood of gesmolten zouten, in plaats van conventioneel water. Daardoor kunnen reactoren bij hogere temperaturen en onder andere fysische omstandigheden werken. Veel Generatie IV-ontwerpen werken bovendien met een snel neutronenspectrum. De kernreacties worden dan hoofdzakelijk in stand gehouden door hoogenergetische, niet-afgeremde neutronen, in tegenstelling tot de thermische neutronen die in de meeste huidige reactoren worden benut. Dit kan een efficiënter gebruik van splijtstof mogelijk maken en bijdragen aan de vermindering van bepaalde langlevende radioactieve afvalstoffen.

Binnen het SMR-domein:

- **HTGR's** worden vaak beschouwd als onderdeel van de Gen-IV-familie (Very High Temperature Reactor-concept).
- **LMFR's** komen overeen met de natriumgekoelde Fast Reactor (SFR) en loodgekoelde Fast Reactor (LFR) concepten.
- **MSR's** zijn direct afgestemd op het Molten Salt Reactor-concept onder Gen IV.

6 GIF Technologie Roadmap Update voor Generatie IV Kernenergiesystemen (2014) Parijs: OESO

7 De verspreiding van nucleaire technologie, splijtbaar materiaal en kernwapens naar staten of niet-statelijke actoren die ze nog niet bezitten.

Figuur 8 geeft een overzicht van de verschillende technologiefamilies voor SMR's.

	Lichtwaterreactoren	Hogetemperatuur-gasgekoelde reactoren	Snelle reactoren met vloeibaar metaal	Gesmoltenzout-reactoren
	✓ Eind jaren '20 (in bedrijf in Rusland)	✓ Eind jaren '20 (in bedrijf in China)	? Eind jaren '20 / begin jaren '30	✗ Midden tot eind jaren 2030
	✓ Uitstekende passieve veiligheid			
	? Mogelijke lastvolging Lage T_{out} & efficiëntie	✓ Lastvolging & hoge T_{out} & efficiëntie		
	? Afvaloplossing voor lange termijn nodig		✓ Gesloten splijtstofcyclus en transmutatie	✓ Perspectief op afvaloplossing
	✓ Veel ervaring	? Enige ervaring	? Weinig ervaring	✗ Zeer weinig ervaring
	? In afwachting van bevestiging			

TRL = technologiegereedheidsniveau

Figuur 8: Overzicht van SMR-technologieën

Naast deze vier technologiefamilies vormen kleinere concepten, zoals warmtepijpgekoelde reactoren, ook wel microreactoren genoemd, een andere opkomende categorie. Deze microreactoren zijn doorgaans ontworpen voor zeer lage vermogen en gespecialiseerde toepassingen.

1.2.3.1 Lichtwater-SMR's (LWR-SMR's)

Lichtwater-SMR's zijn gebaseerd op conventionele watergekoelde reactortechnologie en vormen een evolutionaire stap ten opzichte van de grote kerncentrales van vandaag. Net als traditionele reactoren gebruiken ze water om zowel de reactorkern te koelen als om de neutronen af te remmen.

Van alle SMR-concepten zijn LWR-gebaseerde ontwerpen het meest volwassen. Sommige zijn al operationeel (in Rusland), terwijl anderen naar verwachting tegen het einde van de jaren 2020 in gebruik zullen worden genomen. Hun belangrijkste voordelen zijn sterke passieve veiligheidskenmerken, vereenvoudigde systeemindelingen en compatibiliteit met bestaande regelgevingskaders.

GE Vernova Nuclear Energy BWRX-300 is een 300 MWe kokend water SMR die momenteel vordert richting de eerste bouw op de locatie in het Canadese Darlington. Daarnaast is er interesse in de bouw van deze SMR in Polen, de Verenigde Staten en andere markten. Het ontwerp maakt gebruik van uitgebreide operationele ervaring met conventionele BWR-technologie, terwijl vereenvoudigings- en modularisatieprincipes worden geïntegreerd om de kapitaalkosten en bouw tijden te verlagen.

Het Rolls-Royce SMR-programma in het Verenigd Koninkrijk, dat een 470 MWe op een drukwaterreactor gebaseerde SMR ontwikkelt, ondergaat momenteel de UK Generic Design Assessment (GDA). Het project legt de nadruk op fabrieksfabricage, modulaire bouw en sterke lokalisatie van toeleveringsketens binnen de Britse industriële basis.

Vanwege de fysieke beperkingen van waterkoeling werken LWR-SMR's bij lagere temperaturen dan sommige geavanceerde reactorontwerpen. Dit maakt ze minder geschikt voor industriële processen met zeer hoge temperaturen, zoals grootschalige waterstofproductie, petrochemisch kraken of bepaalde chemische productieprocessen. Ze zijn echter zeer geschikt voor elektriciteitsopwekking, stadsverwarming, ontzilting, stoomvoorziening en industriële toepassingen bij matige temperaturen, zoals voor de papier- en pulpindustrie, voedselverwerking en lichte industriële warmtevraag.

De meeste LWR-SMR's werken op basis van een open splijtstofcyclus, wat betekent dat de splijtstof eenmaal wordt gebruikt en vervolgens als bestraalde splijtstof wordt opgeslagen. Ze zijn niet specifiek ontworpen om langlevend radioactief afval te verminderen door splijtstofrecycling.

Over het algemeen vormen LWR-SMR's het laagste technologische risico onder SMR-technologieën en staan ze momenteel het dichtst bij grootschalige commerciële implementatie.

1.2.3.2 Hogetemperatuur-gasgekoelde SMR's (HTGR-SMR's)

Hogetemperatuur-gasgekoelde reactoren gebruiken heliumgas in plaats van water om de reactor te koelen, en grafiet als moderator om neutronen af te remmen. Dit ontwerp maakt het mogelijk om bij veel hogere temperaturen te werken dan conventionele watergekoelde reactoren, wat de efficiëntie verbetert en hun potentiële industriële toepassingen uitbreidt.

Verschillende demonstratie- en vroege commerciële HTGR-projecten worden tegen het einde van de jaren 2020 verwacht.

De X-energy Xe-100 is een toonaangevend voorbeeld van een HTGR. De Xe-100 is een modulaire hogetemperatuur-gasgekoelde reactor van ongeveer 80 MWe die gebruikmaakt van TRISO-deeltjessplijtstof en helium als koelmiddel. De reactor is ontworpen om zowel elektriciteit als industriële warmte bij hoge temperaturen (tot ~750-800°C) af te leveren. Het project wordt ondersteund door het Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP) van het Amerikaanse Department of Energy, met de eerste toepassing gepland op de Dow Seadrift-locatie in Texas. X-energy investeert ook in binnenlandse TRISO-splijtstofproductiecapaciteit via haar dochteronderneming TRISO-X.

Omdat ze warmte bij hoge temperatuur kunnen produceren, zijn HTGR's bijzonder aantrekkelijk voor energie-intensieve industrieën. Potentiële toepassingen zijn onder andere waterstofproductie, chemische productie, olieraffinage, staalproductie, cementproductie en andere industriële processen die grote hoeveelheden warmte vereisen in plaats van alleen elektriciteit.

In vergelijking met lichtwaterreactoren heeft HTGR-technologie echter minder langdurige commerciële operationele ervaring. De meeste huidige ontwerpen zijn gebaseerd op een open splijtstofcyclus, wat betekent dat de splijtstof eenmaal wordt gebruikt en daarna wordt opgeslagen.

Over het algemeen worden HTGR's gezien als een veelbelovende optie voor industriële decarbonisatie, met hogere temperatuurcapaciteiten dan LWR-SMR's, terwijl ze een matig technologisch en regelgevend risico hebben in vergelijking met meer geavanceerde reactorconcepten.

1.2.3.3 Snelle SMR's met vloeibaarmetaalkoeling (LMFR-SMR's)

Snelle reactoren met vloeibaarmetaalkoeling zijn een type geavanceerde kernreactor die vloeibare metalen, zoals natrium of lood, gebruiken in plaats van water om de reactor te koelen. Ze gebruiken ook een snel neutronenspectrum, waardoor ze meer energie uit dezelfde hoeveelheid splijtstof kunnen halen. Snelle reactoren zijn in het verleden gebouwd en geëxploiteerd, maar er is beperkte recente ervaring met hun commerciële exploitatie. Nieuwe LMFR-ontwerpen zijn momenteel in ontwikkeling, met enkele projecten die gepland zijn voor inzet begin jaren 2030.

De TerraPower Natriumreactor™ behoort tot de meest prominente LMFR-projecten wereldwijd. Het combineert een 345 MWe natriumgekoelde snelle reactor met een geïntegreerd systeem voor opslag van gesmolten zout, waardoor een flexibele output tot 500 MWe mogelijk is om netbalans in systemen met veel hernieuwbare energie mogelijk te maken. Het project vordert in Wyoming onder Amerikaanse federale cofinancieringsregelingen via het ARDP-programma. Het proces van vergunningverlening bij de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission is gaande.

Hexana ontwikkelt een compact, natriumgekoeld snelreactorconcept (in het bereik van 160 MWe) dat zich voornamelijk richt op industriële warmte- en waterstofproductie. Het bedrijf positioneert zijn ontwerp binnen het Franse ecosysteem van nucleaire innovatie en voert vroege regelgevende discussies met betrokken autoriteiten. Het project bevindt zich nog in de conceptuele en pre-vergunningsfase, met partnerschappen in de toeleveringsketen die nog in voorbereiding zijn.

In tegenstelling tot de meeste conventionele reactoren kunnen LMFR's mogelijk een deel van het materiaal uit verbruikte splijtstof hergebruiken. Dit betekent dat sommige van de langlevende radioactieve elementen die normaal als afval worden beschouwd, kunnen worden omgezet in bruikbare energie. Als gevolg hiervan zouden LMFR's zowel het volume als het langetermijngevaar van kernafval kunnen verminderen.

Omdat LMFR's splijtstof beter kunnen benutten en mogelijk langdurig afval kunnen verminderen, worden LMFR's als veelbelovend gezien voor duurzaamheid op de lange termijn. Ze zijn echter technisch complexer en ondervinden grotere regelgevende uitdagingen dan meer kleine modulaire reactoren gebaseerd op conventionele lichtwatertechnologie.

1.2.3.4 SMR's van het type gesmoltenzoutreactor (MSR-SMR's)

Gesmoltenzoutreactoren zijn een geavanceerd type kernreactor die een speciaal gesmolten zout gebruiken in plaats van water om het systeem te koelen. Deze reactoren werken op zeer hoge temperaturen, wat ze efficiënter kan maken in het produceren van elektriciteit en industriële warmte. MSR's worden als veelbelovend beschouwd omdat ze mogelijk nieuwe manieren bieden om kernafval te beheren en splijtstof beter te benutten. Sommige ontwerpen zouden mogelijk bepaalde langlevende radioactieve materialen kunnen verminderen. Daarnaast kunnen de fysieke eigenschappen van het vloeibare zout bijdragen aan inherente veiligheidskenmerken – zo kan de splijtstof in bepaalde situaties natuurlijk afkoelen zonder in sterke mate afhankelijk te zijn van mechanische systemen.

MSR's bevinden zich echter nog in een vroeg ontwikkelingsstadium. Er zijn er maar weinig geëxploiteerd, en de meeste ontwerpen worden nog steeds getest of verfiend. Grootchalige commerciële inzet wordt over het algemeen niet eerder dan het midden tot einde van de jaren 2030 verwacht.

Het Thorizon One-concept van Thorizon vertegenwoordigt de ontwikkeling van de Europese MSR. Het ontwerp is een gesmoltenzoutreactor in de ~100 MWe-klasse, gebruikmakend van een cartridge-gebaseerd splijtstofsysteem dat bedoeld is om gerecyclede nucleaire materialen uit bestraalde splijtstofstromen te integreren. Thorizon boekt vooruitgang door strategische industriële partnerschappen te ontwikkelen in Frankrijk en Nederland.

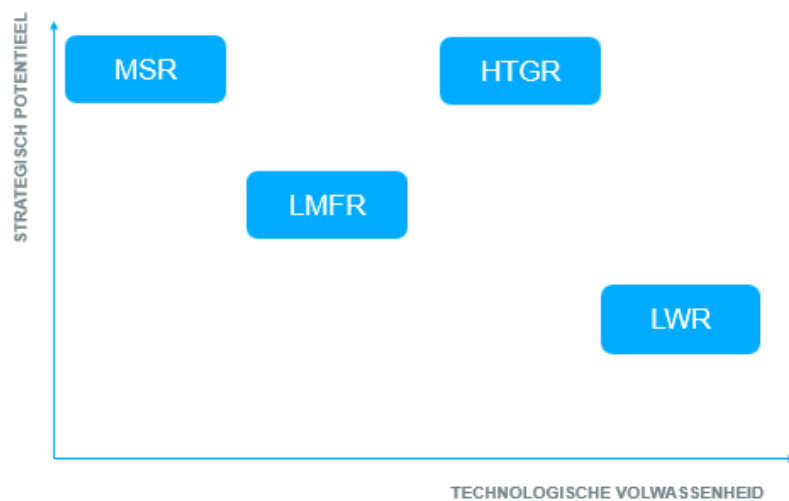
Om deze redenen worden MSR's gezien als zeer innovatief en potentieel transformerend, maar ze brengen ook meer technische onzekerheid en regelgevende uitdagingen met zich mee in vergelijking met meer gevestigde reactortechnologieën.

Vergelijkend perspectief

Samenvattend kunnen de vier SMR-technologiefamilies worden onderscheiden langs twee hoofdassen: technologische volwassenheid en langetermijn-strategisch potentieel (zie Figuur 9).

- LWR-SMR's zijn het meest volwassen en het dichtst bij commerciële inzet.
- HTGR's bieden hoge temperatuurmogelijkheden die geschikt zijn voor industriële toepassingen, zoals waterstofproductie, chemische productie of het leveren van warmte aan zware industrieën.

- LMFR's maken gesloten splijtstofcyclusstrategieën en verbeterde splijtstofbenutting mogelijk, waardoor de hoeveelheid langlevend radioactief afval wordt verminderd.
- MSR's vertegenwoordigen een innovatievere maar minder volwassen technologische route.



Figuur 9: Positionering van SMR-technologieën over de assen strategisch potentieel en technologische volwassenheid

Elke categorie kan daarom een aanvullende rol spelen in toekomstige kernenergiesystemen, afhankelijk van de tijdlijn tot toepassing, regelgeving en specifieke eisen van de eindgebruiker.

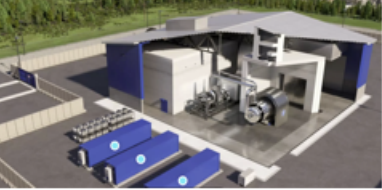
1.2.4 Voorbeelden van binnenlandse en maritieme SMR-concepten

Voortbouwend op het overzicht van technologie en generatie dat in de voorgaande paragrafen werd gepresenteerd, geeft deze paragraaf voorbeelden van zowel landgebonden (Figuur 10) en maritieme (Figuur 11) SMR-concepten die momenteel wereldwijd in ontwikkeling zijn.

Deze voorbeelden benadrukken de diversiteit aan benaderingen die worden gevolgd binnen Generatie III- en Generatie IV-technologieën, evenals het brede scala aan gerichte toepassingen, van elektriciteitsopwekking voor de basislast en industriële warmtevoorziening tot offshore energiehubbs en maritieme voortstuwing. Ze illustreren ook het brede spectrum van reactorgroottes, uitrolmodellen en modularisatiestrategieën die momenteel door ontwikkelaars worden voorgesteld, wat de ontwikkeling en zeer dynamische aard van het wereldwijde SMR-landschap weerspiegelt.

Figuur 10 en 11 tonen daarnaast indicatieve tijdlijnen voor first-of-a-kindprojecten (FOAK) en mogelijke commerciële implementatie, gebaseerd op openbaar beschikbare informatie en actuele verwachtingen in de sector.

Generatie 3 (voorbeelden)

	Grote SMRs (> 250 MWe)	Micro-SMRs (< 50 MWe)
		
<i>Voorbeelden</i>	- Rolls-Royce – RR SMR 470 MWe - GE Hitachi – BWRX-300 300 MWe - Westinghouse – AP300 300 MWe - Nuward – Nuward SMR 2 x 200 MWe - NuScale – 4NPM 4 x 77 MWe - Holtec – SMR-300 2 x 320 MWe - KHNP – i-SMR 4 x 170 MWe	- Voor stadsverwarming Thermisch vermog. - Steady Energy 50 MWth - Calogena 30 MWth
<i>Toepassingen</i>	- Basislastelektriciteit - Beperkte lastvolging (tot 50%) - Ook voor WKK, waterstofproductie en/of stadsverwarming	- Kleinschalige elektriciteit (achter de meter) - Alleen stadsverwarming
<i>Wanneer?</i>	- Eerste exemplaren (FOAKs) 2030–2032 - Commerciële uitrol in NL na 2035, waarschijnlijker 2040	- FOAKs 2032–2035 - Commerciële uitrol in NL na 2040

Generatie 4 (voorbeelden)

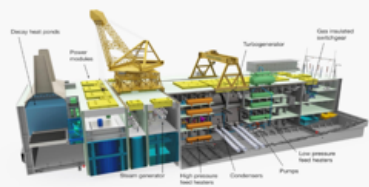
	Grote SMRs (> 250 MWe)	Kleine & micro-SMRs (< 250 MWe)
		
<i>Voorbeelden</i>	- X-Energy – Xe-100 4 x 80 MWe - Newcleo – LFR-AS-200 2 x 200 MWe - Terrestrial – IMSR400 2 x 195 MWe - Terrapower – Natrium Reactor 335 MWe	- Kairos Power – KP-FHR 2 x 75 MWe - Thorizon – Thorizon One 100 MWe - Oklo 75 MWe - Hexana 50 MWe - Copenhagen Atomics 40 MWe - Westinghouse - eVinci 5 MWe
<i>Toepassingen</i>	- Elektriciteit, WKK, waterstof - Meer opties voor warmteopslag en lastvolging - Hogetemperatuurstoom (350–600+ °C)	- Elektriciteit, WKK, waterstof - Meer opties voor warmteopslag en lastvolging - Hogetemperatuurstoom (350–600+ °C)
<i>Wanneer?</i>	- FOAKs 2031–2035 - Commerciële uitrol in NL na 2037	- FOAKs 2031–2035 - Commerciële uitrol in NL na 2037

Figuur 10: Representatieve Generatie III- en IV-SMR-concepten op land

Generatie 3 (voorbeelden)

Drijvende kerncentrales Grote SMRs (> 100 MWe)		Drijvende kerncentrales Kleine SMRs (< 100 MWe)	
			
ACP100S marine nuclear power platform			
Voorbeelden	• VBER-300 (Rusland) 325 MWe • ACP100S (China) 125 MWe	• KTL – 40S (Rusland) 2x35 MWe • RITM – 200M (Rusland) 50 MWe • BANDI (Korea) 60 MWe • ABV- 6E (Rusland) 9 MWe	
Toepassingen	• Elektriciteit voor kustgebieden • Industriële warmte & WKK • Ontzilting • Nucleaire scheepvoortstuwing	• Afgelegen regio's • Havens & industriehubs • Offshore-ondersteuningsschepen • Ijsbrekers	
Wanneer?	• FOAKs 2030–2035 • Commerciële inzet na 2035	• KLT-40S al operationeel • FOAKs in de jaren 2030	

Generatie 4 (voorbeelden)

Drijvende kerncentrales Grote SMRs (> 100-150 MWe)		Civiele nucleaire voortstuwing Kleine SMRs (< 100-150 MWe)	
			
ThorCon Saltfoss SMART 100		Allseas	
Voorbeelden	• ThorCon (USA) 2x250 MWe • Saltfoss (Denemarken) 200 MWe • SMART 100 (Zuid-Korea) 100 MWe	• Allseas (Nederland) 25 MWe	
Toepassingen	• Offshore energiehubs • Waterstof & e-fuels • Grote maritieme & industriële toepassingen	• Offshoreplatforms • Maritieme hulpstroom • Nucleair aangedreven commerciële scheepvaart	
Wanneer?	• FOAKs 2032–2038	• FOAKs 2030–2037 • Bredere inzet na 2040	

Figuur 11: Representatieve Generatie III- en IV-SMR-concepten voor maritieme toepassingen SMR-concepten

1.2.5 Potentieel van SMR's voor Nederland en Europa

1.2.5.1 Potentieel en ontwikkelingen in Nederland

In Nederland wordt de potentiële rol van SMR's steeds vaker meegenomen in de modellering van energiesystemen en in industriële decarbonisatiestrategieën.

De relevantie van SMR's in de Nederlandse context is nauw verbonden met:

- Geconcentreerde industriële warmtevraag in grote industriële clusters;
- Ambities voor grootschalige waterstofproductie;
- Toenemende elektrificatie van industriële processen;
- Netcongestiebeperkingen in bepaalde regio's;
- De geleidelijke uitfasering van fossiele industriële warmtebronnen.

Een recente studie van TNO onderzocht de rol die SMR's kunnen spelen bij het bereiken van nationale klimaatneutraliteit tegen 2050.⁸ Afhankelijk van aannames over industriële warmtevraag, elektrificatieroutes, waterstofproductie en systeemintegratie, geeft de modellering aan dat een inzet variërend van meerdere eenheden tot ongeveer 10–13 SMR's tegen 2050 kan bijdragen aan een kosteneffectieve klimaatneutraliteit in Nederland. Het bovenste deel van dit bereik wordt geassocieerd met scenario's waarin SMR's niet alleen worden gebruikt voor elektriciteitsopwekking, maar ook om industriële proceswarmte te leveren en waterstofproductie op grote schaal te ondersteunen. In meer gematigde situaties zou het vereiste aantal eenheden lager zijn.

We merken op dat deze cijfers zijn afgeleid van scenario-gebaseerde modellering en geen beleidsverplichtingen vormen. Het daadwerkelijke inzetniveau hangt af van de regulatoire haalbaarheid onder Nederlandse nucleaire wet- en regelgeving, economisch concurrentievermogen ten opzichte van alternatieve decarbonisatietechnologieën, publieke acceptatie, financieringsvoorwaarden en integratie in nationale infrastructuurplanning.

Beleidsontwikkelingen

Op dit moment blijft de Nederlandse aanpak grotendeels verkennend en is er geen speciaal SMR-implementatieprogramma of formeel proces voor selectie van leveranciers gestart. Het nieuwe kabinet heeft echter ambities gesteld om vier nieuwe kernreactoren te bouwen, waarbij ook SMR's expliciet tot de mogelijkheden worden benoemd. Daarnaast is in juni 2026 een marktconsultatie gestart over de financiering van SMR's.⁹ De realisatie van dergelijke ambities zal afhangen van de regulatoire haalbaarheid onder de Nederlandse nucleaire wet- en regelgeving, economisch concurrentievermogen, financieringskaders, publieke acceptatie en afstemming op nationale energie- en klimaatstrategieën.

In oktober 2025 deelde het ministerie van Klimaat en Groene Groei zijn SMR-strategie. Deze strategie zet het standpunt van de Nederlandse overheid ten opzichte van SMR's uiteen. Hoewel de Nederlandse provincies verantwoordelijk zijn voor beslissingen over lokale SMR's, heeft de landelijke overheid ervoor gekozen het voortouw te nemen in het eerste SMR-project in Nederland. Dit maakt het mogelijk om initiële knelpunten te overwinnen en zou provincies moeten helpen bij latere SMR-projecten (waarvoor zij het bevoegde gezag zijn).

De strategie beschrijft vier verschillende gebieden waar SMR's als het meest relevant worden beschouwd en volgens de Nederlandse overheid het grootste potentieel voor Nederland hebben:

1. Energieproductie binnen het nationale energiesysteem;
2. Toepassing binnen industriële clusters (vooral warmte);
3. Kleinschalige SMR's voor zogenaamde cluster-6-bedrijven (d.w.z. grote regionale industriële bedrijven buiten de vijf belangrijkste industriële clusters);
4. Innovatieprojecten (met name Gen IV-reactoren of AMR's).

Er is een grote interesse in SMR's in Nederland, vooral op regionaal niveau. De nationale overheid financiert de SMR-initiatieven echter niet en laat het initiatief voor SMR's over aan de provincies. Verschillende provincies en gemeenten in Nederland onderzoeken daarom zelf het potentieel van SMR's in hun regio. Eén gemeente, Opmeer, heeft de concrete ambitie om tussen 2035-2040 een SMR in haar

⁸ TNO (2024). Kleine modulaire reactoren in het Nederlandse Energiesysteem (studiesamenvatting en ondersteunende materialen). Den Haag: TNO.

⁹ Zie: <https://www.overkernenergie.nl/actueel/nieuws/2026/04/16/oproep-aan-bedrijven-marktconsultatie-over-financiering-kleine-modulaire-kernreactoren-smrs>—call-market-consultation-on-financing-small-modular-reactors-smrs

gemeente te laten bouwen. Opmeer werkt daarvoor samen met Allseas om te onderzoeken of de eerste SMR FOAK van Allseas in Opmeer kan worden gebouwd.¹⁰

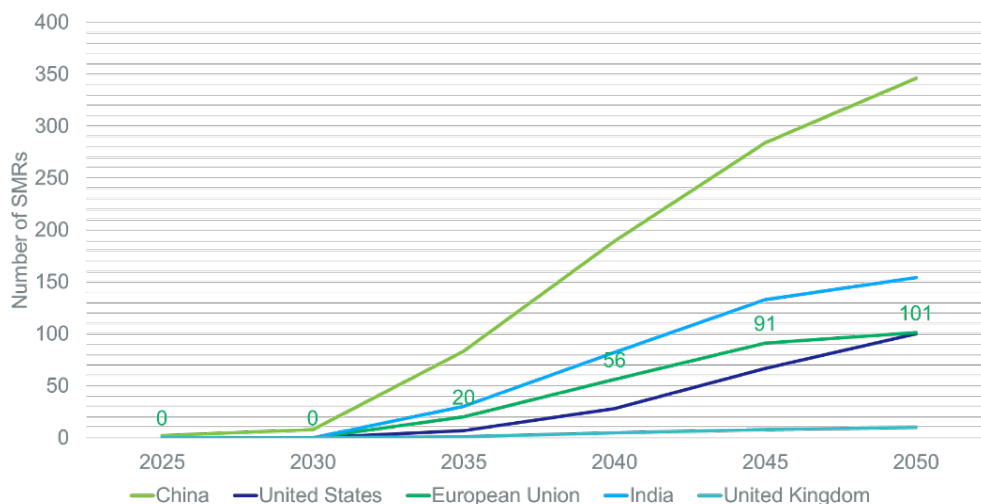
1.2.5.2 Potentieel en ontwikkelingen in Europa

In heel Europa bewegen SMR's zich van "belangstelling voor concepten" naar gestructureerde beleidsinitiatieven, regelgeving en vroege projectontwikkeling, hoewel commerciële inzet nog steeds voornamelijk in de jaren 2030 wordt verwacht. Het Europese vooruitzicht voor SMR's wordt bepaald door:

- I Coördinatie op EU-niveau om een ondersteunend ecosysteem voor SMR's op te bouwen; en
- II Een groeiend aantal nationale programma's en bilaterale partnerschappen op het gebied van SMR's.

Het Internationaal Energieagentschap (IEA) ziet de vraag naar schone, inzetbare elektriciteit uit de private sector als een belangrijke drijfveer voor de interesse in SMR's.¹¹ Op basis van huidige plannen en verdere modellering verwacht het IEA dat de wereldwijde SMR-capaciteit tegen 2050 40-120 GW bereikt. Hun verwachting is dat in de jaren 2030 de eerste SMR's in de EU zullen worden geïnstalleerd. De modellen van het IEA voorspellen 6 GW geïnstalleerde capaciteit van SMR's in de EU in 2040 en meer dan 15 GW in 2050. Op basis van deze modellen verwacht het IEA 56 SMR's in de EU tegen 2040 en 101 SMR's tegen 2050 (zie Figuur 12). Dit suggereert een duidelijk potentieel voor SMR's in de EU en een markt voor SMR's die zich ontwikkelt en schaaft na 2030.

De wereldwijde marktomvang voor SMR-technologie wordt door het IEA geschat op 670 miljard USD in de periode 2024-2050, uitgaande van succesvolle ontwikkeling.¹² Dit moet worden beschouwd als een schatting uit 2025 van de potentiële marktgroottes voor SMR-technologie wereldwijd, aangezien de huidige fase van SMR-ontwikkeling, bouw en regionale verschillen nog steeds veel onzekerheid met zich meebrengt over SMR-realisatie en marktgroottes.



Figuur 12: Aantal geïnstalleerde SMR's geprojecteerd door het scenario op basis van aangekondigde toezeggingen van de IEA (bron: IEA, 2025)

¹⁰ ANP (2026). Opmeer wil eerste mini-kernreactor huisvesten.

<https://www.binnenlandsbestuur.nl/ruimte-en-milieu/opmeer-wil-eerste-mini-kernreactor-huisvesten>

¹¹ IEA (2025). Het pad naar een nieuw tijdperk voor kernenergie. Parijs: IEA.

<https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>

¹² IEA (2025). Het pad naar een nieuw tijdperk voor kernenergie. Parijs: IEA.

<https://www.iea.org/reports/the-path-to-a-new-era-for-nuclear-energy>

EU-initiatieven

In maart 2026 lanceerde de Europese Commissie een strategie voor de ontwikkeling en inzet van SMR's in Europa.¹³ In deze strategie benadrukt de Commissie het potentieel van SMR's om bij te dragen aan Europa's industriële concurrentiekracht, decarbonisatie, strategische autonomie en doelstellingen over energiezekerheid. De strategie bestaat uit negen gecoördineerde acties van EU-instellingen, de EU-lidstaten, de industrie en onderzoeksorganisaties. Deze omvatten maatregelen om een concurrerende Europese toeleveringsketen voor SMR's te ontwikkelen (vooral gericht op productie). Regionale toeleveringsketens worden benadrukt, evenals de betrokkenheid van industriële sectoren zoals scheepsbouw. Andere acties richten zich op regelgeving, standaarden, financiering en ondersteuningsregelingen, het wegnemen van barrières en internationale samenwerking.



Figuur 13: Visualisatie van de acties onder de EU SMR-strategie (bron: presentatie Europese Commissie SMR IA: Huidige status en kernkwesties A. AL MAZOUZIEDF R&D/ SNETP-Algemeen Secretariaat)

Het meest zichtbare EU-initiatief is de European Industrial Alliance on Small Modular Reactors, gelanceerd om de ontwikkeling, demonstratie en eerste implementaties van SMR's in Europa begin jaren 2030 te versnellen, met een sterke nadruk op het revitaliseren van toeleveringsketens, vaardigheden, financieringsvoorwaarden en regelgevende samenwerking. De Alliantie publiceerde in 2025 haar Strategisch Actieplan, waarin een meerjarig werkprogramma en concrete acties staan om marktgereedheid te bevorderen.

Verenigd Koninkrijk (inzet en regelgeving)

Het Verenigd Koninkrijk heeft een van Europa's meest geavanceerde SMR-regelgevingstrajecten via de Generic Design Assessment (GDA). De Rolls-Royce SMR heeft GDA Step 2 afgerond en is doorggegaan naar de volgende fase, wat wijst op blijvende regelgevende betrokkenheid van de overheid. Tegelijkertijd koos de Britse regering Rolls-Royce SMR als voorkeursleverancier om samen te werken met Great British Energy - Nuclear voor SMR-uitrol (onder voorbehoud van definitieve goedkeuringen en contractering), wat een sterke door de staat gesteunde intentie aangeeft om halverwege de jaren 2030 naar realisatie te gaan.

13 EC DG Energie (2026). Strategie voor de ontwikkeling en implementatie van SMR's in Europa.
https://energy.ec.europa.eu/publications/strategy-development-and-deployment-smrs-europe_en

Frankrijk (ontwerpontwikkeling en vroege beoordeling door meerdere autoriteiten)

Frankrijk bevordert de ontwikkeling van SMR's voornamelijk via het NUWARD-programma, geleid door EDF, dat momenteel bezig is met ontwerpoptimalisatie en regelgevingsvoorbereiding. Een opmerkelijk Europees initiatief dat bij dit programma hoort, is (JER)-proces voor de gezamenlijke vroegtijdige beoordeling (Joint Early Review), uitgevoerd met verschillende Europese nucleaire veiligheidsautoriteiten, gericht op het vroegtijdig identificeren en aanpakken van belangrijke regelgevingsonderwerpen om toekomstige vergunningverlening te bevorderen. In bredere zin heeft Frankrijk SMR's en geavanceerde modulaire reactoren gepositioneerd als onderdeel van zijn langetermijnstrategie voor nucleaire innovatie van het investeringsplan France 2030.

Naast NUWARD ondersteunt dit kader meerdere initiatieven langs verschillende technologische paden, waaronder Hexana (natriumgekoelde snelle reactor gericht op cogeneratie), Calogena (kleine drukwaterreactor gericht op warmtelevering), Newcleo (loodgekoelde snelle reactor met ambities voor gesloten splijtstofcyclus), Jimmy Energy (hogetemperatuur-microreactor voor industriële warmte), Thorizon (concept van gesmoltenzoutreactor gericht op het recycleren van nucleaire materialen), Otrera Nuclear Energy (natriumgekoelde snelle modulaire reactoren). In totaal werden elf innovatieve reactorprojecten geselecteerd onder het nationale programma, wat de Franse strategie weerspiegelt om zowel op het gebied van evolutionaire SMR's als Gen IV-technologieën capaciteit op te bouwen.

Tsjechië (locatiespecifieke voortgang en industrieel partnerschap)

Het Tsjechische programma is een van de duidelijkste voorbeelden van een staatsbedrijf dat vordert richting SMR-implementatie. ČEZ (het door de staat gecontroleerde Tsjechische energiebedrijf) en Rolls-Royce SMR kondigden een strategisch partnerschap aan gericht op de ontwikkeling van SMR's en hebben sindsdien een Early Works Agreement ondertekend om locatiegebonden werkzaamheden in Temelín te starten.

Polen (vlootambitie en locatiekeuze)

Polen voert een groot SMR-programma uit via ORLEN / Synthos (OSGE) gebaseerd op de BWRX-300. Recente aankondigingen bevestigen de locatiekeuze (Włocławek) en activiteiten rondom milieu- en locatiewerkzaamheden, als vervolg op eerdere nationale principebesluiten voor meerdere locaties.

Roemenië (koplopersambitie in Zuidoost-Europa)

Roemenië heeft een SMR-project in Doicești op basis van NuScale-technologie, waarbij openbare berichtgeving de voortgang van projectontwikkeling en investeringsbesluitvorming benadrukt.

Scandinavië (ecosysteemontwikkeling in een vroege fase)

In Noord-Europa verlopen de activiteiten via een mix van nationaal beleid en initiatieven van ontwikkelaars/locaties. Zweden heeft bijvoorbeeld verschillende SMR-gerelateerde ontwikkelingen (waaronder locatieontwikkelingsinspanningen door private actoren en verdere nationale stappen rondom het mogelijk maken van nieuwe kernenergie). Finland is ook direct betrokken op regelgevend niveau door deelname aan vroegtijdige evaluatieactiviteiten van NUWARD in meerdere landen.

SMR-toeleveringsketen

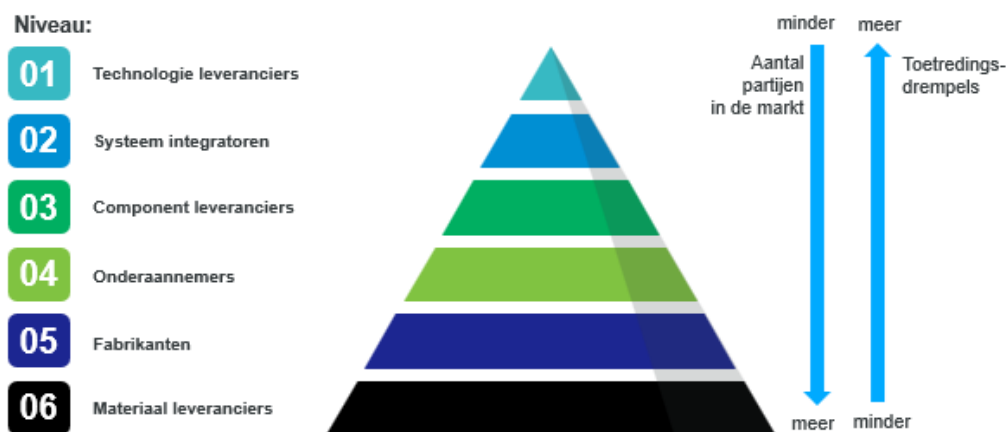
2.1 Structuur van de SMR-toeleveringsketen

In deze studie structureren we de SMR-toeleveringsketen aan de hand van een indeling in industriële niveaus.

Deze aanpak weerspiegelt het hybride karakter van de uitrol van SMR's, waarbij kenmerken van productie volgens nucleaire kwaliteitseisen worden gecombineerd met die van grootschalige infrastructuurprojecten. De benadering kiest het perspectief van het industriële ecosysteem in plaats van een uitsluitend technische systeemindeling.

Hoewel traditionele nucleaire analyses toeleveringsketens vaak indelen naar technische systemen, zoals het nucleaire eiland, het turbine-eiland en de overige centrale systemen (balance of plant), geeft een dergelijke systeemindeling onvoldoende inzicht in de industriële gelaagdheid, contractuele raakvlakken en verdeling van waarde over de keten. Juist deze factoren zijn bepalend voor de prestaties bij de uitrol, de schaalbaarheid, regionale industriële deelname en de integratie van logistiek en infrastructuur.

De gekozen indeling van de toeleveringsketen maakt een gerichte beoordeling mogelijk van de wijze waarop bedrijven in de haven van Rotterdam kunnen toetreden tot de opkomende SMR-toeleveringsketen, bijvoorbeeld via systeemintegratie, componentenproductie, fabricage, logistiek of grondstoffenverwerking. Daarmee ondersteunt de indeling het identificeren van realistische positioneringsmogelijkheden en kansen voor waardecreatie binnen het regionale industriële cluster.



Figuur 14: Indeling van de SMR-toeleveringsketen

De indeling die in deze studie wordt toegepast, bestaat uit zes industriële niveaus (Figuur 14). Hoe hoger het niveau, hoe dichter een bedrijf bij de eindklant staat en hoe hoger over het algemeen de toegevoegde waarde is. Meer gespecialiseerde producten en diensten worden doorgaans op hogere niveaus aangeboden, waardoor het aantal deelnemers op de markt kleiner is en de toetredingsdrempels hoger

zijn. Onderaan de toeleveringspiramide leveren bedrijven meer generieke producten (of zelfs grondstoffen). Deze bedrijven ondervinden sterkere concurrentie, omdat er over het algemeen meer concurrenten zijn en de drempels om de markt te betreden lager zijn.

De volgende tabel beschrijft de verschillende niveaus in de piramide.

Niveau	Wat ze doen	Illustratieve bedrijven & typische scope
Niveau 1: Technologieleverancier	De Technologieleverancier vertegenwoordigt de ontwerpautoriteit en de houder van het intellectueel eigendom van de SMR-technologie. De Technologieleverancier behoudt doorgaans de controle over de standaardisatie van het ontwerp en de strategie voor vlootreplicatie. Dit niveau opereert voornamelijk binnen het domein van nucleaire productie. Dit niveau is verantwoordelijk voor: • Reactorontwerp en -engineering • Ontwikkeling van veiligheidscasussen • Licentiedocumentatie • Configuratiebeheer • Langdurige technische verantwoordelijkheid	Rolls-Royce SMR, Allseas, GE-Vernova, TerraPower, X-energy, Thorizon, Saltfoss
Niveau 2: Systeemintegratoren	Systeemintegratoren verbinden nucleaire productie en projectuitvoering op locatie. Gezien de modulaire aard van SMR's is effectieve systeemintegratie cruciaal om de planning te handhaven en de verwachte kostenefficiëntie te realiseren. Hun verantwoordelijkheden omvatten doorgaans: • Algehele installatie-integratie • Coördinatie van engineering, inkoop en bouw (EPC) • Interfacebeheer tussen modules en civiele werken • Planning/volgorde van projectoplevering	Bechtel, Fluor Corporation, Kiewit, GE Vernova Kernenergie, AtkinsRealis
Niveau 3: Componentleveranciers (original equipment manufacturer (OEM)'s)	Componentleveranciers leveren de nucleaire en conventionele apparatuur die nodig is voor de werking van de installatie. Dit niveau omvat zowel nucleair gekwalificeerde leveranciers als conventionele industriële fabrikanten, afhankelijk van componentclassificatie en veiligheidsrelevantie. Componenten omvatten: • Reactorinterne onderdelen • Mechanische en elektrische systemen • Instrumentatie en besturing • Hulp- en veiligheidssystemen	Framatome en ENSA (componenten van het nucleaire eiland, stoomgeneratoren), Doosan Enerbility (reactordrukvaaten), Siemens Energy (stoomturbine-generatorsets wanneer ze als discrete apparatuur worden geleverd), GE Vernova (elektrische systemen), Emerson (I&C-systemen), Schneider Electric, Rolls-Royce Controls (I&C)
Niveau 4: Onderaannemers	Onderaannemers zijn voornamelijk actief voornamelijk op het gebied van infrastructuur en bouw. Dit niveau weerspiegelt de infrastructuurdimensie van de uitrol van SMR's en speelt een belangrijke rol in locatiespecifieke kosten en beheersing van de planning. Hun werkzaamheden omvatten doorgaans: • Civieltechnische werkzaamheden • Projectvoorbereiding van de locatie • Installatie en assemblage • Lokale bouwwerkzaamheden	Cavendish Nuclear (nucleaire installatie en onderhoud), Laing O'Rourke (modulaire bouw en civiele werken), BAM Infra (civiele techniek), Dura Vermeer (locatie-infrastructuur en civiele werken)

Niveau	Wat ze doen	Illustratieve bedrijven & typische scope
Niveau 5: Fabrikanten	Fabrikanten omvatten productiewerkplaatsen en industriële faciliteiten die verantwoordelijk zijn voor de productie van modules en subassemblages en belangrijke componenten. Voor SMR's is dit niveau strategisch belangrijk vanwege de nadruk op fabrieksmatige fabricage en serieproductie. Productiecapaciteit, kwalificatie en schaalbaarheid binnen dit niveau zijn belangrijke factoren voor de realisatie van SMR's.	Škoda JS, Ansaldo Nucleare, Tenaris, Saint-Gobain PAM, Vallourec (leidingen en buizen van nucleaire kwaliteit)
Niveau 6: Materiaalleveranciers	Het niveau van materiaalleveranciers omvat industriële afhankelijkheden aan het begin van de keten, waaronder: • Staal- en smeedstukken van nucleaire kwaliteit • Geavanceerde legeringen • Grafiet • Vloeibare metalen of gesmolten zouten • Uraniumconversie- en verrijkingsdiensten	Urenco en Orano (uranium-verrijking en -conversie), ArcelorMittal (speciaalstaal), Industeel (staalplaten en smeedstukken van nucleaire kwaliteit), Mersen en Tokai Carbon (nucleair grafiet), Heidelberg Materials en Holcim (cement en beton)

2.2 Functionele segmenten in de SMR-toeleveringsketen

De SMR-toeleveringsketen kan functioneel worden beschreven in vijf functionele deelketens:

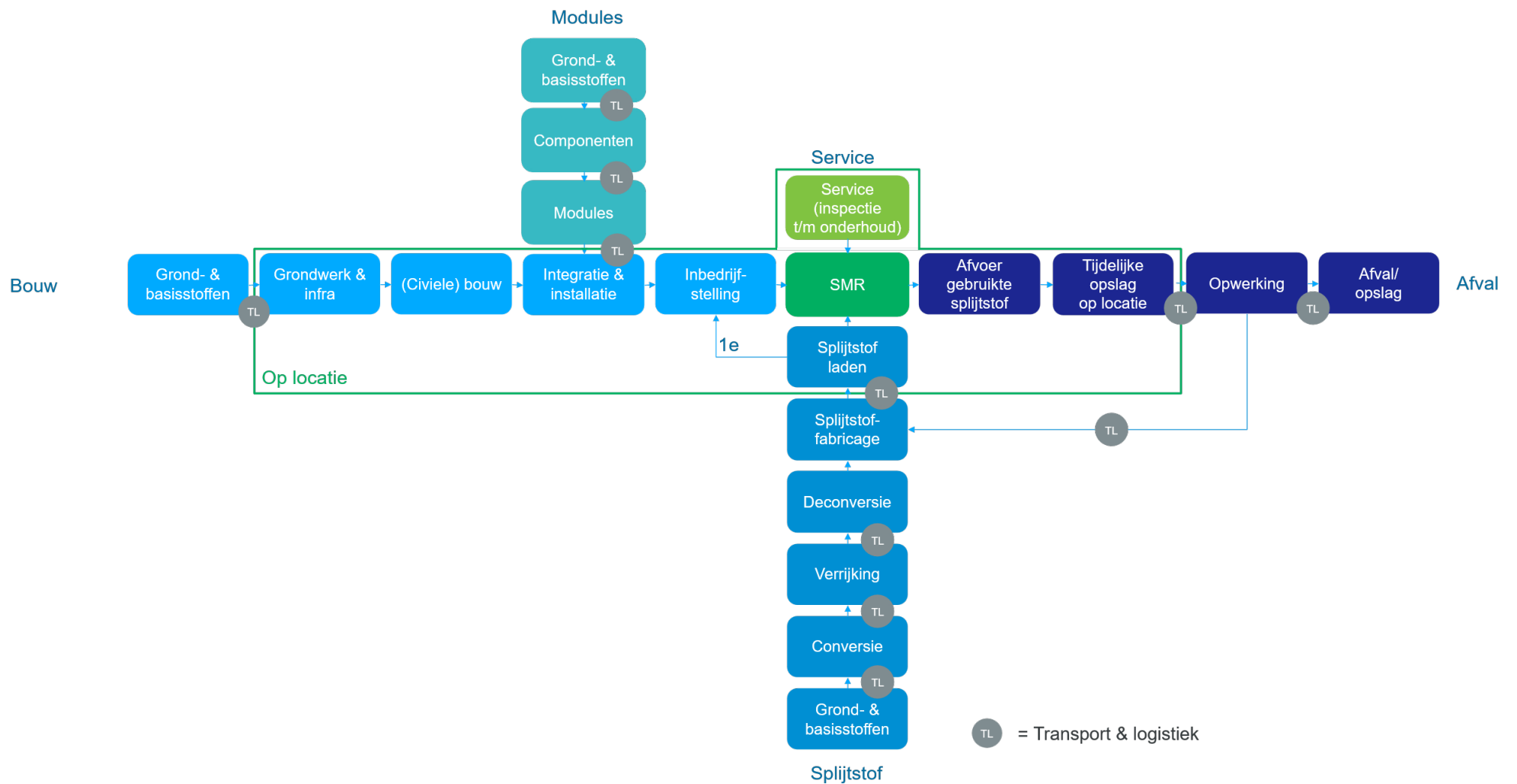
- **De moduleketen:** omvat segmenten gerelateerd aan de industriële productie van componenten en modules die in de SMR worden geïntegreerd. Deze segmenten betreffen generieke en specifieke componenten, onderdelen en modules die geleverd kunnen worden ongeacht de locatie waar de SMR wordt gebouwd. Dit biedt mogelijkheden voor bedrijven in de haven van Rotterdam die betrokken zijn bij het ontwerp, de fabricage en het transport en logistiek van mechanische en elektrische componenten of de integratie hiervan in functionele modules van SMR's.
- **De bouwketen:** omvat segmenten die verband houden met de bouw van een SMR vanaf de aanvang tot en met de inbedrijfstelling. Deze segmenten worden meestal uitgevoerd op de locatie waar de SMR wordt gebouwd, wat voor maritieme SMR's ook de scheepswerf kan zijn waar het nucleair aangedreven schip of ander vaartuig wordt gebouwd. Voor landgebonden SMR's vereisen deze segmenten meestal bedrijven die dicht genoeg bij de bouwplaats liggen. Het potentieel voor betrokkenheid van bedrijven in de haven van Rotterdam is er daarom vooral als de bouw plaatsvindt in of nabij de haven.
- **De serviceketen:** omvat diensten die verband houden met operationele SMR's, van inspectie tot onderhoud van SMR's. Deze diensten worden ter plaatse uitgevoerd en kunnen betrekking hebben op de componenten en modules die in de moduleketen worden geleverd. Veel dienstverleners zullen waarschijnlijk dicht bij de locatie van de SMR zijn, afgezien van gespecialiseerde dienstverleners of diensten geleverd door de oorspronkelijke fabrikanten. Het potentieel voor betrokkenheid van bedrijven in de haven van Rotterdam ligt daarom vooral bij SMR's in of nabij de haven, of bij bedrijven die componenten of modules aan SMR's hebben geleverd.
- **De splijtstofketen:** omvat segmenten gerelateerd aan de productie van kernsplijtstof die in de SMR wordt gebruikt. Deze keten vereist zeer specifieke nucleaire expertise die momenteel slechts bij een beperkt aantal bedrijven in Europa aanwezig is. Nieuwe toetreders in deze keten zijn onwaarschijnlijk vanwege hoge drempels om deze segmenten binnen te komen. Logistiek en transport tussen deze segmenten betreffen radioactieve materialen en vereisen daarom specifieke vergunningen en vereisten. Het potentieel voor huidige bedrijven in de haven van Rotterdam is daarom beperkt tot

transport en logistiek (inclusief mogelijke ondersteuning bij het laden van splijtstof en extra beveiliging ter plaatse of in het transport), afhankelijk van de logistieke routes voor de splijtstof – die afhankelijk zijn van de locaties van SMR's.

- **De afvalketen:** omvat segmenten gerelateerd aan het radioactieve afval dat door de SMR wordt gegenereerd. Deze keten is grotendeels afhankelijk van de splijtstofleverancier voor de herverwerking en de wettelijk aangestelde afvalbeheerorganisatie; in Nederland is dat COVRA. Logistiek en transport tussen deze segmenten betreffen radioactieve materialen en vereisen daarom specifieke vergunningen en vereisten. Het potentieel voor bedrijven in de haven van Rotterdam is daarom beperkt tot transport en logistiek (inclusief mogelijk ondersteuning bij het verwijderen van bestraalde splijtstof en extra beveiliging ter plaatse of tijdens transport), afhankelijk van de logistieke routes voor de splijtstof – die afhankelijk zijn van de locaties van SMR's.

Elk van deze ketens levert unieke producten en diensten voor SMR's waarbij over het algemeen verschillende bedrijven betrokken zijn. Tussen de verschillende segmenten in deze ketens vindt transport plaats. Aan het begin van elke keten zijn bulkgoederen nodig. Dit zou enig potentieel kunnen bieden voor bedrijven in de haven van Rotterdam die deze materialen kunnen leveren, maar aangezien dit over het algemeen commodities zijn, is het waarschijnlijk dat alleen levering aan lokale bedrijven in de bouw- en moduleketen realistisch is.

In Figuur 15 zijn de vier functionele deelketens van de SMR-toeleveringsketen, inclusief de relevante segmenten, weergegeven. Transport en logistiek tussen segmenten zijn aangegeven met TL.

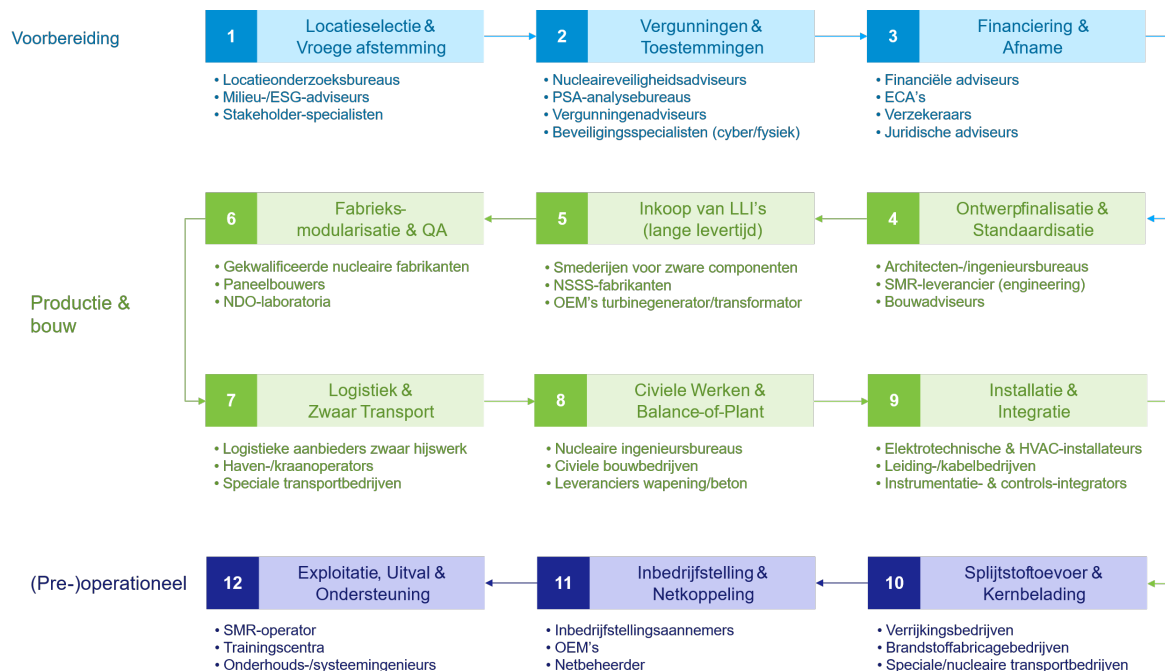


Figuur 15: Functionele segmenten van de SMR-toeleveringsketen

2.3 Beschrijving van fasen van SMR-projecten

Naast de toeleveringsketen is het ook nuttig om de fasering van SMR-projecten te beschouwen. De fasering kan helpen om te begrijpen in welke fase van de ontwikkeling van een SMR de haven van Rotterdam of haar bedrijven betrokken kunnen zijn.

De volgende figuur geeft een overzicht van de verschillende fasen van start tot bouw van een SMR. Dit overzicht geldt voor landgebonden SMR's en met enkele kleine aanpassingen (slechts in de interpretatie van een fase) ook voor offshore SMR's. Voor elke fase worden enkele voorbeelden gegeven van typische organisaties en bedrijven die bij de fase betrokken zijn. We hebben deze fasen gegroepeerd in de stadia (A) voorbereiding, (B) productie en bouw en (C) (pre)operationeel.



Figuur 16: Fasering van SMR-projecten

2.3.1 Projectvoorbereiding

In het voorbereidingsstadium vinden er voorbereidingen rondom het SMR-project voor voordat de productie van onderdelen begint. Het voorbereidingsstadium bestaat uit drie fasen:

- 1. Locatieselectie & Vroege afstemming:** in deze fase wordt een potentiële locatie voor een landgebonden SMR onderzocht op basis van geschiktheid, milieu en externe gevaren. De voorbereidingen omvatten ook publieke acceptatie en het betrekken van relevante stakeholders.
- 2. Vergunningen & Toestemmingen:** in deze fase worden er studies uitgevoerd over veiligheid, beveiliging en omgeving om de benodigde informatie te verschaffen voor vergunningen. Er vindt interactie plaats met de nucleaire regelgevende en toezichthoudende instantie (ANVS), milieu- en andere toezichthouders om vergunningen te verkrijgen.
- 3. Financiering & Afname:** in deze fase worden financiering, contracten en verzekeringen geregeld voordat het SMR-project volledig van start kan gaan.

In dit stadium zou de haven van Rotterdam slechts een rol als belanghebbende kunnen spelen, maar heeft het geen directe betrokkenheid. Er is in deze fase geen concreet zakelijk potentieel voor huidige bedrijven in de haven van Rotterdam.

2.3.2 Productie en bouw

Het productie- en bouwstadium betreft de inkoop van materialen, componenten en diensten, de productie van onderdelen, de integratie van onderdelen en modules, logistiek en de bouw van de SMR.

- 1. Ontwerpfinalisatie & Standaardisatie:** in deze fase wordt het ontwerp van de SMR en haar modules afgerond. In principe is het ontwerp gestandaardiseerd om serieproductie mogelijk te maken. Waar nodig worden lokale wijzigingen aangebracht om specifieke vereisten voor landgebonden SMR's te accommoderen; deze hebben geen betrekking op modules, maar op de bouw ter plaatse.
- 2. Inkoop van Long-Lead Items:** in deze fase worden componenten met lange levertijden vooraf besteld om tijdige levering te garanderen. Deze betreffen voornamelijk gespecialiseerde, nucleaire en veiligheidskritische componenten op hogere niveaus van de toeleveringsketen. Over het algemeen kan slechts een beperkt aantal leveranciers deze componenten produceren volgens de benodigde specificaties. Deze omvatten bijvoorbeeld stoomgeneratoren, nucleaire kleppen, nucleaire panelen, grote warmtewisselaars en turbinegeneratoren.
- 3. Fabrieksmodularisatie & Kwaliteitsborging:** in deze fase produceren verschillende gecentraliseerde fabrieken modules voor de SMR. Ze bestellen componenten, produceren onderdelen en integreren deze in de module. Deze modules zijn vaak zo ontworpen dat een module via de weg, het spoor of het water kan worden vervoerd. Ze kunnen uit elkaar worden gehaald om in een zeecontainer en op een standaard vrachtwagen te plaatsen. Slechts enkele grote onderdelen vereisen mogelijk speciaal transport.
- 4. Logistiek & Zwaar Transport:** in deze fase worden componenten, modules en splijtstof vervoerd. Het vindt plaats gedurende de hele productie- en bouwfase. Het omvat vervoer over water, spoor en weg, en betreft mogelijk het liften van zwaar materieel, gespecialiseerd transport, konvooi-escorte, opslag, terminalafhandeling, douane, enzovoort. Modules worden naar de bouwplaats of scheepswerf vervoerd (voor offshore SMR's), terwijl componenten van leveranciers naar fabrieken worden vervoerd waar de modules worden geproduceerd.
- 5. Civiele werken & Balance-of-Plant:** in deze fase worden de grondwerken, infrastructuur en bouw ter plaatse gerealiseerd. Dit is relevant voor landgebonden SMR's. Dit omvat het leggen van betonnen funderingen, gebouwen waarin modules worden geplaatst, lokale infrastructuur, enzovoort.
- 6. Installatie & Integratie:** in deze fase worden de verschillende modules ter plaatse geïnstalleerd en geïntegreerd. Voor offshore SMR's kan dit in scheepswerven voor pontons en schepen plaatsvinden, voor landgebonden SMR's op de bouwplaats.

In dit stadium zou de haven van Rotterdam een rol kunnen spelen als logistiek knooppunt, maar ook bedrijven in de haven van Rotterdam zouden potentieel leverancier kunnen zijn in sommige van deze fasen.

2.3.3 Fase voorafgaand aan en tijdens de bedrijfsvoering

Het (pre)operationele stadium betreft activiteiten die moeten worden uitgevoerd na de bouw van de SMR en vóór de exploitatie en activiteiten tijdens de exploitatie.

- 1. Splijtstoftoevoer & Kernbelading:** deze fase omvat de levering van gefabriceerde kernsplijtstof aan de SMR en het laden van splijtstof in de reactorkern. Daarnaast vinden er beveiligd transport van kernsplijtstof en veiligheidsmaatregelen ter plaatse plaats.
- 2. Inbedrijfstelling & Netkoppeling:** deze fase betreft het testen van alle componenten en systemen om te waarborgen dat de SMR functioneert zoals bedoeld en dat de trainingen voor het operationeel personeel worden afgerond. Tijdens deze fase wordt kritikaliteit in de reactor bereikt en wordt, in het geval van landgebonden SMR's of offshore pontons, de reactor verbonden met het elektriciteitsnet en getest. Deze fase moet de SMR klaarmaken voor een veilige werking.
- 3. Exploitatie, Uitval & Ondersteuning:** in deze fase is de SMR operationeel. Tijdens de exploitatie vereist het onderhoud, splijtstofwissels, trainingen en inspecties.

In dit stadium zou de haven van Rotterdam mogelijk een kleine rol kunnen spelen, sterk afhankelijk van de locatie van de SMR. Voor landgebonden SMR's die in de haven liggen of maritieme SMR's die in de haven zijn gebouwd, kan er zakelijk potentieel zijn voor lokale bedrijven om betrokken te raken.

2.4 Verschillen in landgebonden en offshore SMR-toeleveringsketens

Het onderscheid tussen landgebonden en offshore SMR-systemen is niet alleen een kwestie van locatie. Het beïnvloedt fundamenteel hoe de toeleveringsketen is gestructureerd, waar industriële waarde wordt gecreëerd, hoe logistiek wordt georganiseerd en hoe risico's worden verdeeld. Hoewel de reactortechnologie in beide gevallen identiek kan zijn, bepaalt het leveringsmodel of het zwaartepunt van het project ligt in landgebonden bouwecosystemen of in offshore industriële hubs. Het belangrijkste verschil tussen landgebonden en offshore-SMR's ligt in de locatie van aansluiting/werking en het betrokken industriële ecosysteem. Dit onderscheid is vooral relevant bij het beoordelen van positioneringskansen voor havengebonden industriële clusters.

De volgende tabel geeft een overzicht van de verschillen tussen landgebonden en offshore SMR-toeleveringsketens.

	Onshore	Offshore
Locatie en installatie	Installatie op land en integratie in landgebonden infrastructuur De definitieve installatie en systeemintegratie vinden plaats binnen civiele structuren die op de locatie worden gebouwd.	Offshore integratie vóór inzet. Configuratie verschuift grotendeels van fabricage- en integratieactiviteiten naar scheepswerven of industriële faciliteiten langs kust of water.
Industriële configuratie	Bij landgebonden toepassing: • Reactormodules worden in fabrieken gefabriceerd • Transport (mogelijk maritiem voor internationale leveranciers) • Binnenlandse logistiek • Civiele techniek en installatie ter plaatse Als modules buiten Europa worden gefabriceerd en naar een Europese haven worden verscheept, wordt het maritiem transport onderdeel van de upstream toeleveringsketen. Het project blijft echter structureel landgebonden omdat: • Funderingen, gebouwen en koelsystemen op land worden gebouwd • De verbinding met het elektriciteitsnet landgebonden is • De finale integratie plaatsvindt op de implementatielocatie Het industriële ecosysteem dat door landgebonden SMR's wordt geactiveerd, omvat daarom nucleaire fabrikanten, landgebonden logistieke aanbieders, civiele aannemers en actoren op het gebied van netinfrastructuur.	Bij offshore toepassing: • Reactormodules worden in fabrieken gefabriceerd • Reactormodules worden geïntegreerd in maritieme platforms in scheepswerven • Mechanische en elektrische systemen worden geïnstalleerd vóór inzet • Pre-inbedrijfstelling kan plaatsvinden in gecontroleerde industriële omgevingen Dit concentreert waardecreatie in maritieme industriële clusters in plaats van op verspreide binnenlandse locaties. Havens en scheepswerven worden centrale actoren in: • De assemblage van zware modules • Offshore integratie • Projectvoorbereiding van de exploitatie/operatie • Ondersteuning van offshore installaties

	Onshore	Offshore
Logistiek en Beperkingen	Beperkingen in landgebonden transport (weg, spoor en binnenwateren) beïnvloeden de grootte en volgorde van modules. Zware transportvergunningen, routeplanning en afmetingen kunnen ontwerpbeslissingen en installatiestrategie beïnvloeden. Zelfs wanneer maritiem transport wordt gebruikt voor langeafstandsliefering, blijft het laatste binnenlandse segment een structurele beperking.	Zeetransport vermindert veel van de dimensionale beperkingen van landgebonden transport. Grotere geïntegreerde constructies kunnen worden vervaardigd en direct naar de inzetlocatie worden vervoerd. Dit vermindert de afhankelijkheid van zware transportcorridors in het binnenland en kan de installatievolgorde vereenvoudigen.
Risico en schaalbaarheid	Risico's bij landgebonden SMR's liggen op het vlak van: • Vertragingen door gereedheid van de locatie • Coördinatie tussen productie en bouw • Weerseffecten bij buitenwerkzaamheden • Locatie-specifieke vergunningen en stakeholderprocessen Hoewel seriële productie de standaardisatie verbetert, introduceert elke locatie variabiliteit. Daardoor hangt schaalbaarheid niet alleen af van fabrieksoutput, maar ook van lokale bouw- en vergunningsprestaties.	Offshore projecten brengen extra regelgevende aspecten met zich mee, waaronder maritieme autoriteiten en vergunningsregelingen voor de kust. Het risico verschuift van vertragingen in civiele bouw naar offshore-specifieke operationele factoren, zoals: • Weersomstandigheden voor offshore installatie • Afmeer- en verankeringswerkzaamheden • Naleving van maritieme veiligheidsvoorschriften Omdat integratie echter plaatsvindt in gecontroleerde scheepswerfomgevingen, kunnen fabricagerisico's voorspelbaarder zijn. Offshore SMR's kunnen profiteren van een grotere centralisatie van fabricage en integratie. Gestandaardiseerde maritieme platforms en herhaalde scheepswerfprocessen kunnen vlootreplicatie ondersteunen met minder locatiespecifieke variabiliteit.
Mate van ontwikkeling	De toeleveringsketen lijkt tot op zekere hoogte op die van grote kerncentrales. Sommige leveranciers zijn begonnen met het opzetten van toeleveringsketens, maar geen van de toeleveringsketens is nog volledig gevormd.	De toeleveringsketen voor offshore SMR's is nog niet gevormd. Offshore SMR's bevinden zich in een lagere ontwikkelingsfase dan landgebonden SMR's.
Potentieel voor nieuwe toetreders	Goede mogelijkheden voor nieuwe toetreders, vooral voor de constructie- en moduleketens. De eerste is echter afhankelijk van de locatie. Voor de splitsstof- en afvalbeheerketens zijn de mogelijkheden beperkt, mogelijk alleen voor transport en logistiek.	Zeer goed potentieel voor nieuwe toetreders omdat de toeleveringsketen nog grotendeels ontwikkeld moet worden. Het potentieel voor nieuwe toetreders ligt in de bouw- en moduleketens, opnieuw hebben de splitsstof- en afvalbeheerketens te hoge drempels voor toetreding buiten transport en logistiek.

In het onderstaande kader staat een samenvattend overzicht van de vergelijking tussen landgebonden en offshore-SMR's, met de nadruk op verschillende belangrijke dimensies. Het geeft aan dat het potentieel voor de haven van Rotterdam om betrokken te zijn bij de SMR-toeleveringsketen groter is in offshore SMR's en de rollen die de haven kan vervullen diverser is. Voor offshore SMR's biedt een haven een relevant

industriële ecosysteem voor integratie, inzet en logistiek, waarbij meer activiteiten in de haven worden uitgevoerd. Offshore SMR's bieden echter meer (onontgonnen) uitdagingen op het gebied van regelgeving.

Dimensie	Onshore SMR	Offshore SMR
Definitieve integratie	Landgebaseerde locatie	Scheepswerf / maritiem platform
Rol van de haven	Logistieke toegangspoort	Integratie- en implementatiehub
Afhankelijkheid van binnenlands vervoer	Hoog	Laag
Intensiteit van civiele werken	Significant	Beperkt op de inzetlocatie (integratie)
Regelgevende reikwijdte	Voornamelijk nucleair en milieu-technisch	Nucleair + maritiem + kust
Primaire risicoblootstelling	Bouwvolgorde	Maritieme activiteiten
Schaalbaarheidsmodel	Replicatie van fabriek + locatie	Gecentraliseerde replicatie van fabricage

2.5 Toeleveringsketens van de verschillende typen SMR's

Hoewel SMR's vaak worden gepresenteerd als een homogene categorie, gedefinieerd door een kleinere eenheidsgrootte en een modulaire bouwfilosofie, vragen de onderliggende reactortechnologieën fundamenteel verschillende configuraties in de toeleveringsketen. De mate van benodigde industriële transformatie varieert aanzienlijk per technologiefamilie. Sommige ontwerpen maken gebruik van decennia aan gevestigde nucleaire productiecapaciteit, terwijl andere de ontwikkeling van nieuwe materiaal-ecosystemen, chemische verwerkingscapaciteit of geavanceerde splijtstofinfrastructuur vereisen.

Deze paragraaf schetst de implicaties van de vier belangrijkste SMR-technologiefamilies op de toeleveringsketen. De analyse richt zich op structurele verschillen in industriële vereisten, productiebeperkingen, afhankelijkheden van splijtstofcyclus en schaalbaarheid. Onderstaande tabel geeft een samenvattend overzicht van deze dimensies van de toeleveringsketen voordat we verder ingaan op elk van de verschillende typen SMR's.

Dimensie	LWR-SMR's	HTGR-SMR's	LMFR-SMR's	MSR-SMR's
Mate van volwassenheid	Hoog, kan vertrouwen op de bestaande productiebasis voor grote kerncentrales	Medium, kan slechts gedeeltelijk vertrouwen op de bestaande productiebasis	Laag, vereist aanzienlijke veranderingen aan en uitbreidingen van de bestaande productiebasis	Laag, vereist aanzienlijke veranderingen aan en uitbreidingen van de bestaande productiebasis
Structurele verschillen in industriële vereisten	Laag, kan groten-deels afhankelijk zijn van bestaande industriële vereisten	Medium, vereist materialen bestand tegen hoge temperaturen en gekwalificeerd grafiet, strenge lekdichte koelsystemen	Hoog, vereist verschillende materialen, waaronder corrosieve en chemisch reactieve vloeistoffen en industriële procedures	Hoog, stelt hoge eisen aan materialen en vereist hoogwaardige productie van gesmolten zouten
Productiebeperkingen	Opschalen van nucleair gekwalificeerde productiecapaciteit	Opschalen van splijtstoffabricage en gekwalificeerde materialen	Ontwikkeling van industriële capaciteiten voor vloeibare materialen en gespecialiseerde legeringen en lasprocessen	Ontwikkeling van industriële capaciteiten voor gesmolten zouten en gespecialiseerde materialen en opslag-/conditionerings-infrastructuur
Afhankelijkheden van de splijtstofcyclus	Klein, afhankelijk van de bestaande splijtstofcyclus	Medium, beperkte industriële basis voor TRISO-splijtstof	Medium-hoog, er zijn uitgebreide fabricage- en herverwerkingscapaciteiten vereist, mogelijk moet een gesloten splijtstofcyclus worden opgezet	Hoog, vereist aanzienlijke veranderingen in de toeleveringsketen voor splijtstof met andere materialen en processen
Schaalbaarheid	Hangt af van industriële opschaling, standaardisatie en kosten-/planningsvoordelen	Hangt daarnaast af van de opschaling van splijtstoffabricage en gespecialiseerde industriële capaciteit voor hoge-temperatuur-materialen	Hangt daarnaast af van splijtstoffabricage, herverwerking van gebruikte splijtstof en industriële capaciteiten voor vloeibare en corrosie-/chemisch bestendige materialen	Hangt daarnaast af van splijtstoffabricage en industriële capaciteiten voor gesmolten zouten en hogetemperatuur- en corrosieve materialen
Potentieel voor nieuwe toetreders	Medium, technologieleveranciers zoeken nog steeds toeleveranciers voor diversificatie en opschaling van hun toeleveringsketen	Hoog, minder ontwikkeld concept met daardoor een minder ontwikkelde toeleveringsketen	Hoog, minder ontwikkeld concept (in de R&D-fase) en toeleveringsketen, en bovendien uitdagende eisen	Hoog, minder ontwikkeld concept (in de R&D-fase) en toeleveringsketen, en bovendien uitdagende eisen

1. Lichtwaterreactor SMR's (LWR-SMR's)

Lichtwater-SMR's vormen de dichtstbijzijnde voortzetting van de bestaande commerciële nucleaire industrie. Deze ontwerpen, of het nu gaat om geïntegreerde drukwaterreactoren of kleine kokendwaterreactoren, behouden de fundamentele kenmerken van conventionele watergekoelde systemen. Hun toeleveringsketens zijn dan ook grotendeels geworteld in de gevestigde nucleaire productiebasis.

De nucleaire eilandcomponenten – waaronder het reactordrukvat, interne structuren, stoomgeneratoren (in PWR-varianten), containmentsystemen en leidingen met hoge veiligheidsklasse – zijn gebaseerd op bekende ontwerpprincipes en vastgestelde nucleaire codes en normen. Gekwalificeerde leveranciers voor deze componenten bestaan al binnen de wereldwijde nucleaire industrie, en productietechnieken, inspectieregimes en kwaliteitsborgingsprocessen zijn volwassen.

De splijtstoftoeleveringsketen voor LWR-gebaseerde SMR's is doorgaans afhankelijk van conventioneel laagverrijkt uranium (LEU), dat profiteert van een uitgebreide wereldwijde infrastructuur voor conversie, verrijking, fabricage, transport en vergunningen. Deze continuïteit vermindert het splijtstofgerelateerde inzetrisico aanzienlijk vergeleken met geavanceerde reactorconcepten die nieuwe splijtstofvormen of hogere verrijkingsniveaus vereisen.

De primaire transformatie die door LWR SMR's wordt geïntroduceerd, ligt niet in de componententechnologie, maar in het productiemodel. Modularisatie verplaatst een aanzienlijk deel van de bouwwerkzaamheden van de locatie naar de fabrieksomgeving. Dit vereist stabiel beheer van de ontwerpconfiguratie, herhaalbare productieprocessen en gedisciplineerde coördinatie van de toeleveringsketen om serieproductie mogelijk te maken. Industriële beperkingen vloeien dus niet voort uit technologische vernieuwing, maar uit het opschalen van nucleair gekwalificeerde productiecapaciteit met behoud van strenge kwaliteitsnormen.

LWR-gebaseerde SMR's vereisen een evolutionaire aanpassing van de bestaande nucleaire toeleveringsketen in plaats van een structurele herconfiguratie. De belangrijkste uitdagingen hebben betrekking op industriële schaalvergroting, standaardisatie en het waarborgen dat modularisatie de beoogde kosten- en planningsvoordelen bereikt.

2. SMR's van het type hoogtemperatuur-gasgekoelde reactoren (HTGR-SMR's)

Gasgekoelde reactoren bij hoge temperatuur brengen een substantiële differentiatie binnen de toeleveringsketen met zich mee, vooral op basis van hun splijtstofvorm en materiaalbehoeften. HTGR's werken bij aanzienlijk hogere temperaturen dan watergekoelde reactoren en gebruiken helium als koelmiddel, waardoor de industriële focus verschuift naar hogetemperatuurmaterialen en gespecialiseerde splijtstofproductie.

Het kenmerkende aspect van HTGR-technologie is TRISO-splijtstof, bestaande uit gecoate splijtstofdeeltjes die in een matrix zijn ingebed. De fabricage van TRISO-splijtstof vereist zeer gespecialiseerde industriële processen, waaronder kernproductie, meerdere coatingfasen, verdichting en uitgebreide kwaliteitsborging. In vergelijking met conventionele LWR-splijtstoffabricage is de wereldwijde industriële basis voor TRISO-productie beperkt en nog niet opgeschaald voor grote commerciële inzet. In veel ontwerpen beperkt het gebruik van hogere verrijkingsniveaus de splijtstofvoorziening verder gereed.

Naast splijtstof zijn HTGR's ook sterk afhankelijk van grafiet voor moderatie en structurele doeleinden. Dit introduceert een duidelijke materiaalketen, die een gekwalificeerde grafietproductiecapaciteit en hoogtemperatuurtesten vereist voor materialen. Heliumkoelsystemen moeten voldoen aan strenge lek dichtheidseisen, en hoogtemperatuurwarmtewisselaars moeten bestand zijn tegen veeleisende thermische en mechanische omstandigheden.

In tegenstelling tot LWR-gebaseerde SMR's zijn de belangrijkste beperkingen in de toeleveringsketen voor HTGR's niet zware smeedstukken of drukgrenscomponenten, maar eerder de volwassenheid en schaalbaarheid van splijtstoffabricage en kwalificatie voor hoogtemperatuurmaterialen. Inzet op grote schaal zou daarom sterk afhangen van het uitbreiden van gespecialiseerde industriële capaciteit in deze gebieden.

3. SMR's van het type snelle reactoren met vloeibaarmetaalkoeling (LMFR-SMR's)

Snelle reactoren vertegenwoordigen een duidelijkere structurele afwijking van conventionele nucleaire technologie. Door te werken zonder neutronenmoderator en vloeibare metaalkoelmiddelen zoals natrium of lood te gebruiken, introduceren deze systemen nieuwe vereisten in de toeleveringsketen die verder reiken dan de traditionele lichtwaterindustrie.

De koelvloeistof zelf wordt een centrale overweging in de toeleveringsketen. Industriële inkoop-, zuiverings- en verwerkingsinfrastructuur voor vloeibaar natrium of lood moet worden opgezet, naast compatibele opslag- en veiligheidssystemen. Materialen die in primaire systeemcomponenten worden gebruikt, moeten bestand zijn tegen corrosie en chemische interactie met het gekozen koelmiddel. Dit vereist gespecialiseerde legeringen, op maat gemaakte lasprocedures en toegewijde inspectiemethoden.

Overwegingen ten aanzien van de splijtstofcyclus onderscheiden deze snelle reactoren verder. Veel ontwerpen voorzien het gebruik van metalen splijtstof of gemengde oxide (MOX) splijtstof, en sommige bevatten gesloten splijtstofcyclusstrategieën. Deze benaderingen kunnen herverwerkingscapaciteit, splijtstofrecyclinginfrastructuur of geavanceerde fabricagefaciliteiten vereisen die niet breed beschikbaar zijn. Als gevolg hiervan kan de paraatheid van de splijtstoftoeleveringsketen een strategisch en regelgevend probleem worden, vooral in rechtsgebieden zonder bestaande snelle reactor- of herverwerkingsinfrastructuur.

Hoewel snelle reactoren doorgaans onder lagere druk werken dan watergekoelde systemen, waardoor de afhankelijkheid van grote drukgrenssmeden afneemt, is het bredere industriële ecosysteem dat nodig is voor koelmiddelbeheer, materiaalcompatibiliteit en integratie van splijtstofcyclus commercieel minder volwassen. Het opschalen van snelle inzet van reactoren vereist daarom gecoördineerde ontwikkeling van zowel de productiecapaciteit als de regelgeving.

4. SMR's van het type gesmoltenzoutreactor (MSR-SMR's)

Gesmolten zoutreactoren introduceren de meest significante transformatie van de toeleveringsketen binnen SMR-technologieën. MSR's werken bij hoge temperatuur en lage druk en gebruiken gesmolten fluoride- of chloridezouten als koelmiddel – en in sommige gevallen als splijtstofdrager – en verschuiven de industriële nadruk van mechanische drukgrensproductie naar hoogtemperatuurmaterialkunde en chemische procestechniek.

In vaste zoutgekoelde varianten behoudt de reactor conventionele splijtstofassemblages, maar vereisen de koelsystemen met gesmolten zout productie van hoogzuiver zout en corrosiebestendige materialen. In vloeibare splijtstof MSR's wordt de splijtstof direct opgelost in het circulerende zout, wat het traditionele splijtstoffabricagemodel fundamenteel verandert. In plaats van afzonderlijke splijtstofassemblages die elders worden vervaardigd, moet nucleair materiaal worden omgezet in zoutvorm en kan het tijdens de werking chemisch worden verwerkt. Dit introduceert een hybride nucleair-chemische toeleveringsketen, die expertise vereist in zoutchemie, online verwerkingssystemen en materiaalaccountancy compatibel met veiligheidseisen.

MSR's stellen veeleisende materiaalvereisten. De chemisch agressieve aard van gesmolten zouten bij hoge temperatuur vereist nikkelgebaseerde superlegeringen of andere geavanceerde corrosiebestendige materialen. Langdurig materiaaltesten, legeringskwalificatie en gespecialiseerde lasprocessen worden kritieke componenten in de toeleveringsketen. De beperking verschuift van zware smeedstukken naar metallurgie en corrosiebeheer.

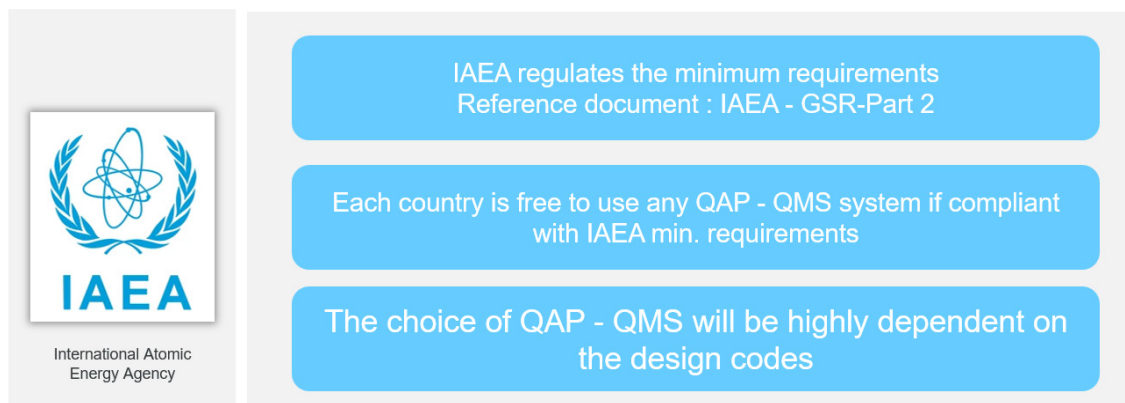
Daarnaast wordt industriële productie van nucleaire gesmolten zouten nog niet op grote schaal toegepast. Het opschalen van MSR's voor commerciële inzet vereist de ontwikkeling van zoutzuivering, opslag- en afvalbeheersingsinfrastructuur. Regelgevende kaders moeten zich ook ontwikkelen om het beheer van vloeibare splijtstoffen en nieuwe veiligheidsbenaderingen aan te pakken.

Als gevolg hiervan vereisen MSR's niet alleen uitbreiding van de productiecapaciteit, maar ook een gedeeltelijke herconfiguratie van het industriële ecosysteem, waarbij nucleaire techniek, geavanceerde wetenschap en chemische verwerkingsindustrieën worden geïntegreerd.

2.6 Vereisten voor het betreden van de SMR-toeleveringsketen

Voor het havenecosysteem van Rotterdam zal betekenisvolle deelname aan de opkomende SMR-markt grotendeels afhangen van het vermogen van lokale bedrijven om te voldoen aan nucleair-specifieke kwaliteits- en kwalificatie-eisen. Deze eisen worden gedefinieerd door een combinatie van regelgeving, ontwerpcodes en leveranciersspecifieke verwachtingen, en zijn nog niet volledig geharmoniseerd tussen SMR-projecten. Daarom moeten bedrijven zien te navigeren tussen certificeringsprocessen, klantkwalificatie en naleving van toepasselijke normen, wat tijd en gerichte investering kan vereisen. In de praktijk omvat het betreden van de nucleaire toeleveringsketen verschillende elementen, waaronder certificering van het Quality Management System (QMS), kwalificatie van klanten of leveranciers (zoals goedgekeurde leverancierslijsten en audits), naleving van ontwerpcodes en normen, en, afhankelijk van de reikwijdte, specifieke vergunningen of toestemmingen (bijvoorbeeld transport- of beveiligingsgerelateerde goedkeuringen).

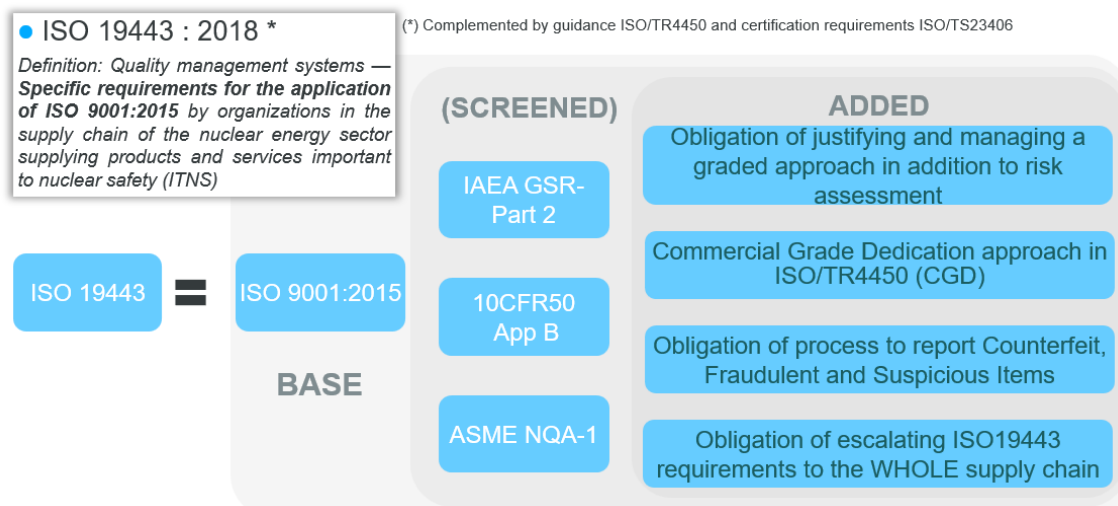
De kern van deze eisen zijn robuuste kwaliteitsmanagementsystemen. Het Internationaal Atoomenergieagentschap definieert via IAEA GSR Deel 2 hoge verwachtingen op het gebied van veiligheid en kwaliteit, terwijl landen specifieke normen mogen aannemen die aansluiten bij hun regelgevingskaders en ontwerpcodes. In de praktijk resulteert dit in een gelaagde benadering van kwaliteitsbeheer binnen de nucleaire sector. De vereiste QMS en bijbehorende bewijsniveaus worden bepaald door een combinatie van factoren, waaronder nationale regelgevingskaders (wettelijke vereisten of verwachtingen van vergunninghouders), de door de leverancier geselecteerde ontwerpcodes en de veiligheidsclassificatie die aan de scope is toegekend. De eisen worden strenger voor componenten die belangrijk zijn voor nucleaire veiligheid (ITNS) en variëren afhankelijk van de ontwerpcodes en normen die door de leverancier zijn gekozen.



Figuur 17: Regelgevend kader voor kwaliteitsmanagementsystemen in de nucleaire toeleveringsketen (IAEA-perspectief). QAP=Kwaliteitsborgingsprogramma, QMS=Kwaliteitsmanagementsysteem?

Hoewel ISO 9001 de basis vormt voor de meeste industrieën, vereist de nucleaire sector extra, sectorspecifieke normen. Een belangrijk voorbeeld is ISO 19443, dat ISO 9001 uitbreidt om nucleaire specifieke eisen zoals veiligheidscultuur, traceerbaarheid en betrouwbaarheid te behandelen. Ontwikkeld door internationale harmonisatie-inspanningen, weerspiegelt het de hoge verwachtingen die aan nucleaire leveranciers worden gesteld.

Regelgevende verplichtingen liggen voornamelijk bij de vergunninghouder, die verantwoordelijk is voor het aantonen van naleving aan nationale autoriteiten. De vergunninghouder selecteert de toepasselijke kaders, normen en codes, die vervolgens via technische specificaties en contractuele vereisten door de toeleveringsketen worden doorgegeven. In deze context richt ISO 19443 zich op de toeleveringsketen in plaats van op het algehele managementsysteem van de vergunninghouder en wordt het voornamelijk toegepast via contractuele vereisten.



Figuur 18: Positionering van ISO 19443 binnen nucleaire kwaliteitsbeheerstandaarden en de bijbehorende vereisten

Certificeringen vormen het praktische toegangspunt tot de nucleaire toeleveringsketen. Het stelt leveranciers in staat om naleving aan te tonen en door klanten te worden overwogen. Certificering alleen is echter niet voldoende. Klanten vereisen doorgaans aanvullende aantoonbare kwalificaties afhankelijk van de veiligheidsclassificatie en -scope, waaronder proceskwalificaties, laskwalificaties en audits van interne processen en subleveranciers, en op maat gemaakte traceerbaarheidsgegevens.

Het certificeringsproces volgt doorgaans een gestructureerd traject, beginnend met een gap-analyse of pre-assessment, gevolgd door auditfasen om benodigde verbeteringen te identificeren, de implementatie van corrigerende maatregelen en uiteindelijk een certificeringsaudit door derden. Het behalen van certificering stelt leveranciers in staat om toegang te krijgen tot de markt en deel te nemen aan SMR-gerelateerde kansen.

Kwaliteitsnormen zoals ISO 19443 zijn niet per definitie verplicht. Hun bindende karakter hangt af van hoe ze worden gehandhaafd – via regelgeving, technische codes of contractuele vereisten. Zo is 10 CFR 50 Appendix B (de Amerikaanse regelgeving die kwaliteitseisen voor kerninstallaties definieert) verplicht als onderdeel van de Amerikaanse wetgeving, terwijl ASME NQA-1 (een standaard die eisen aan kwaliteitsborging voor nucleaire projecten en leveranciers specificiert) doorgaans vereist is door reactorleveranciers of projecten die Amerikaanse nucleaire normen gebruiken. Daarentegen is er in Frankrijk geen enkele “verplichte” kwaliteitsnorm als zodanig; zelfs bij het toepassen van RCC-codes bestaan er eisen, maar zonder een uniforme referentie-norm voor kwaliteitsmanagementsystemen. In de praktijk kunnen organisaties zoals EDF echter ISO 19443 contractueel opleggen aan hun niveau 1- en niveau 2-leveranciers, waardoor het feitelijk verplicht wordt binnen specifieke projecten.

Dit leidt tot een structurele kip-en-eisituatie voor leveranciers. Van hen wordt verwacht dat zij zich vooraf voorbereiden door kwaliteitsmanagementsystemen te implementeren en certificeringen te verkrijgen, maar de exacte vereisten hangen af van de reactorleverancier en technologie die voor het betreffende project is gekozen. Een project geleid door EDF kan bijvoorbeeld ISO 19443 vereisen, terwijl een project waarbij Westinghouse Electric Company betrokken is, doorgaans ASME NQA-1 hanteert. Deze onzekerheid maakt het voor leveranciers moeilijk om te beslissen waarin zij moeten investeren.

Daardoor hangt de paraatheid van de toeleveringsketen nauw samen met de selectie van reactorleveranciers en het inzicht in toekomstige projecten. Het gebrek aan harmonisatie tussen projecten en het beperkte inzicht in tijdlijnen en volumes kunnen de voorbereiding vertragen.

In de praktijk volgen veel nieuwe toetreders tot de toeleveringsketen een geleidelijke aanpak. Ze beginnen met niet-veiligheidsrelevante werkpakketten en breiden geleidelijk uit naar ITNS-gerelateerde te leveren producten en diensten naarmate hun capaciteiten en aantoonbare kwalificaties zich ontwikkelen. Dit noemt men een graded approach.

Potentiële rol voor de haven van Rotterdam

Dit hoofdstuk analyseert de potentiële rollen die de haven van Rotterdam en de daar gevestigde bedrijven kunnen vervullen in de SMR-toeleveringsketen. De analyse is voornamelijk gebaseerd op het huidige bedrijvenbestand en bestaande capaciteiten in de haven van Rotterdam. Voor deze analyse hebben we relevante bedrijven in of nabij de haven van Rotterdam geïdentificeerd en gesprekken gevoerd met bedrijven, stakeholders en deskundigen.

3.1 Sterke en zwakke punten van de haven

De haven van Rotterdam beschikt over verschillende kenmerken die een toekomstige rol in de Europese SMR-toeleveringsketen kunnen ondersteunen, dankzij haar sterke industriële basis, logistieke capaciteit, haar maritieme ecosysteem en strategische positie binnen het Europese energie- en transportnetwerk. Tegelijkertijd blijven er belangrijke beperkingen bestaan, die met name verband houden met het ontbreken van specifieke nucleaire infrastructuur en kaders, beperkte nucleaire deskundigheid binnen het ecosysteem van de haven, en onzekerheden over het toekomstige tempo en de schaal van uitrol van SMR's in Europa.

De volgende paragrafen geven een overzicht van de belangrijkste sterke en zwakke punten die tijdens het onderzoek zijn vastgesteld met betrekking tot de mogelijke positionering van de haven van Rotterdam binnen de toekomstige SMR-gerelateerde toeleveringsketen.

3.1.1 Sterke punten

Logistiek en industrieel knooppunt van wereldklasse

Een van de belangrijkste sterke punten van de haven van Rotterdam is haar positie als een logistiek en industrieel centrum van wereldklasse. De haven heeft uitgebreide ervaring met het verwerken van zwaartransportoperaties, buitenmaatse lading, industriële apparatuur en complexe internationale toeleveringsketens. Deze mogelijkheden zijn vooral relevant in de context van SMR's, waar modularisatie naar verwachting een centrale rol zal spelen in toekomstige implementatiemodellen. Transport, opbouw, opslag, assemblage en integratie van grote modules en componenten zijn gebieden waarin de haven al aanzienlijke expertise bezit.

Groot en gediversifieerd industrieel ecosysteem met capaciteiten in de energie-industrie

De haven profiteert ook van een groot en gediversifieerd industrieel ecosysteem, waaronder ingenieursbedrijven, offshore-specialisten, productiewerven, maritieme dienstverleners en belangrijke energie- en industriële actoren. Bestaande capaciteiten ontwikkeld via offshore wind-, waterstof-, petrochemische, koolstofafvang- en opslagindustrieën (CCS) en maritieme industrieën kunnen een sterke basis vormen voor deelname aan toekomstige nucleaire activiteiten. Verschillende stakeholders benadrukten dat kansen op het gebied van industrialisatie en modulaire integratie bijzonder relevant kunnen worden als Europa overgaat op seriële inzet van SMR's.

Goed verbonden strategische ligging van de haven

Een ander belangrijk voordeel is de strategische geografische ligging van de haven. Als Europa's grootste haven en een belangrijk toegangspunt tot Europese industriegebieden biedt Rotterdam directe toegang tot industriële gebieden in Nederland, België, Duitsland en Midden-Europa via zeetransport, binnenwateren, spoor- en wegverbindingen. Deze multimodale connectiviteit kan waardevol worden voor het vervoer van grote componenten, apparatuur en mogelijk nucleaire materialen die gespecialiseerde logistieke oplossingen vereisen.

Ervaring met het omgaan met gevaarlijke stoffen en in de sterk gereguleerde industrie

De haven heeft ook ruime ervaring met het afhandelen van gevaarlijke en streng gereguleerde industriële activiteiten. Rotterdam beheert al grote hoeveelheden chemicaliën, LNG, brandstoffen en andere gereguleerde materialen onder strikte veiligheids- en beveiligingseisen. Hoewel deze ervaring niet direct vertaalt in nucleaire paraatheid, toont het wel de aanwezigheid van een sterke industriële veiligheidscultuur en ervaring met complexe regulatoire en operationele omgevingen.

Positie als belangrijk Europees centrum voor energietransitie

Daarnaast heeft de haven van Rotterdam zich gepositioneerd als een belangrijk Europees centrum voor energietransitie. Bestaande initiatieven op het gebied van waterstof, koolstofarme brandstoffen, elektrificatie, offshore wind en CCS dragen bij aan de geloofwaardigheid van de haven als platform voor toekomstige koolstofarme industriële activiteiten. Sommige stakeholders merkten ook op dat industrieën binnen de haven uiteindelijk afnemers kunnen worden van door SMR opgewekte elektriciteit en warmte, vooral in de context van industriële decarbonisatie en groeiende energievraag.

Sterk maritiem en offshore industrieel ecosysteem

Ten slotte kan het sterke maritieme en offshore ecosysteem binnen de haven kansen creëren met betrekking tot drijvende SMR's, offshoretoepassingen of toekomstige nucleair aangedreven schepen. Bestaande scheepsbouw, scheepsonderhoud, offshore integratie en maritieme engineering kunnen een basis vormen voor het ondersteunen van opkomende nucleaire maritieme toepassingen als deze markten zich verder ontwikkelen in Europa.

3.1.2 Zwakke punten

Ondanks de sterke industriële en logistieke basis kampt de haven van Rotterdam momenteel met verschillende beperkingen die haar positie binnen toekomstige SMR-toeleveringsketens kunnen beperken.

Geen nucleaire infrastructuur, governance-kaders en vergunningsregelingen

Een van de belangrijkste zwaktes is het ontbreken van specifieke nucleaire infrastructuur, governance-kaders en vergunningsregelingen binnen het ecosysteem van de haven. Op dit moment beschikt de haven niet over speciale infrastructuur of vastgestelde procedures voor het omgaan met nucleair materiaal, splijtstoflogistiek, drijvende kerncentrales of nucleair aangedreven schepen. Evenzo is er momenteel geen duidelijk gedefinieerd kader met betrekking tot de verantwoordelijkheden en het toezicht die van toepassing zouden zijn op toekomstige nucleaire maritieme activiteiten binnen de havenomgeving.

Beperkte nucleaire deskundigheid binnen het ecosysteem van de haven

Een andere beperking is de relatief beperkte nucleaire deskundigheid die momenteel beschikbaar is binnen het bredere ecosysteem van de haven. Hoewel veel bedrijven over geavanceerde industriële capaciteiten beschikken, opereren momenteel slechts een beperkt aantal bedrijven onder specifiek nucleaire kwaliteitsborgings- en kwalificatiekaders. Deelname aan nucleaire toeleveringsketens vereist doorgaans naleving van veeleisende normen met betrekking tot traceerbaarheid, kwaliteitsmanagement, documentatie en veiligheidscultuur. Kwalificatieprocessen kunnen langdurig, kostbaar en veeleisend zijn, vooral voor bedrijven zonder eerdere nucleaire ervaring.

Gefragmenteerd stakeholderlandschap

Het stakeholderlandschap dat samenhangt met potentiële nucleaire activiteiten is ook gefragmenteerd. Toekomstige positionering vereist coördinatie tussen meerdere actoren, waaronder de havenautoriteit, industriële bedrijven, toezichhouders, ministeries, lokale autoriteiten en noodplanningsorganisaties. Op dit moment lijkt geen enkele entiteit een duidelijk gedefinieerde coördinerende rol te hebben voor nucleaire activiteiten die verbonden zijn aan het havenecosysteem.

Onzekere toekomstige marktvraag en zakelijke kansen

Een andere belangrijke zwakte betreft de beperkte zichtbaarheid op de toekomstige marktvraag en zakelijke kansen. Veel van de tijdens de studie geïdentificeerde kansen, met name die gerelateerd aan modulaire integratie, serieproductie of logistieke knooppunten, zouden pas economisch haalbaar worden bij grootschalige Europese SMR-implementatiescenario's. De timing, het tempo en de schaal van toekomstige SMR-implementatie in Europa blijven echter onzeker, waardoor investeringsbeslissingen moeilijk zijn voor industriële actoren.

Maatschappelijke acceptatie in dichtbevolkte stedelijke en industriële gebieden

Publieke gevoeligheid en maatschappelijke acceptatie kunnen ook beperkingen vormen voor toekomstige nucleaire activiteiten in de omgeving van de haven. Het vervoer of de hantering van nucleair gerelateerde materialen in een dichtbevolkt stedelijk en industrieel gebied kan zorgen oproepen met betrekking tot veiligheid, beveiliging, noodvoorbereiding en milieurisico's. Daarnaast brengen nucleaire activiteiten strikte beveiligings-, aansprakelijkheids- en operationele vereisten met zich mee, wat de complexiteit en kosten voor toekomstige havenactiviteiten kan verhogen.

Concurrerende havens in landen met gevestigde nucleaire ecosystemen en infrastructuur

Ten slotte krijgt de haven van Rotterdam concurrentie van andere internationale havens en industriële regio's die zich willen positioneren binnen toekomstige nucleaire en SMR-toeleveringsketens. Havens in landen met meer gevestigde nucleaire ecosystemen of bestaande nucleaire infrastructuur kunnen aanvankelijk profiteren van meer regulatoire bekendheid, industriële kwalificatie en institutionele ondersteuning.

3.2 Kansen en uitdagingen van de haven

3.2.1 Kansen

Strategische positionering en knooppuntontwikkeling

Strategische positionering en knooppuntontwikkeling worden gezien als een belangrijke kans voor de haven van Rotterdam in een opkomende Europese SMR-toeleveringsketen. Vroege positionering van deze toeleveringsketen kan een first-mover voordeel bieden, met name op het gebied van logistiek, transport en integratie die gekoppeld zijn aan het modulaire karakter van SMR's. Rotterdam heeft het potentieel om zich te ontwikkelen tot een Europees logistiek en transitknooppunt voor SMR-modules en -componenten, voortbouwend op de bestaande industriële basis, connectiviteit en ervaring in grootschalige industriële toeleveringsketens. Deze mogelijkheden zijn internationaal van aard en zijn niet uitsluitend afhankelijk van de Nederlandse SMR-inzet.

Daarnaast kunnen geopolitieke ontwikkelingen, zorgen over energiezekerheid en de toenemende focus op Europese strategische autonomie de koploperpositie van Rotterdam als nucleaire haven en SMR-knooppunt versterken. Het bereiken van zo'n positie zou echter een duidelijke langetermijnvisie op nucleaire energie vereisen en een actieve strategische positionering van de haven en relevante stakeholders.

Industriële toeleveringsketen, integratie en diensten

Een andere kans betreft het potentieel van een industriële toeleveringsketen, integratie en diensten. Meer specifiek is er een potentiële rol in de off-site integratie en assemblage van SMR-modules en -componenten, ondersteund door het sterke gespecialiseerde transport- en achterlandlogistieknetwerk van de haven. Bestaande industriële actoren zouden ook niet-nucleaire componenten en niche-gecertificeerde componenten kunnen toeleveren, evenals langetermijnonderhoud en industriële ondersteuningsactiviteiten. In bredere zin kan afstemming met grote toeleveringsketens van kerncentrales in Europa Rotterdamse bedrijven helpen capaciteiten op te bouwen en de positie van de haven in toekomstige SMR-waardeketens te versterken, evenals nieuwe bedrijven en industrieën naar de haven te trekken.

Maritieme nucleaire operaties en onderhoudsactiviteiten

De toekomstige inzet van nucleair aangedreven schepen en drijvende kernenergievoorzieningen zou een nieuwe offshore kans kunnen creëren voor de haven van Rotterdam. In deze context zou de haven zich kunnen positioneren als een Europees knooppunt dat in staat is deze vaartuigen te huisvesten, te bedienen en te ondersteunen via de bestaande maritieme, industriële en logistieke infrastructuur. Potentiële activiteiten kunnen onder meer het huisvesten van schepen, bijtankondersteuning, onderhoud, inspectie en gespecialiseerde operationele diensten zijn die verband houden met maritieme nucleaire toepassingen.

Integratie van energiesystemen en industriële afname

SMR's zouden een bredere rol kunnen spelen in het ondersteunen van de integratie en decarbonisatie van het industriële cluster in Rotterdam. De productie van koolstofarme elektriciteit en warmte kan directe waarde bieden voor industriële afnemers binnen de haven, vooral voor energie-intensieve sectoren die hun CO₂-uitstoot willen verminderen. SMR's kunnen ook bijdragen aan het verminderen van de druk op het elektriciteitsnet door stabiele basislastopwekking en lokale energievoorziening te bieden. Daarnaast kunnen ze bijdragen aan de productie van waterstof voor industriële en grote transporttoepassingen in of nabij de haven. Hiermee kunnen SMR's de strategische positie van Rotterdam als Europees energie- en industrieel centrum verder versterken.

Capaciteitsopbouw, kwalificatie en leiderschap op het gebied van regelgeving

De ontwikkeling van SMR-gerelateerde activiteiten in Rotterdam creëert ook kansen voor capaciteitsopbouw en strategische positionering binnen het bredere nucleaire ecosysteem. Bestaande en toekomstige nucleaire projecten, waaronder grote kerncentrales, SMR's en onderzoeksreactoren, kunnen bedrijven helpen relevante kwalificaties, certificeringen en operationele ervaring op te bouwen. Dit zou de ontwikkeling van een geloofwaardige Nederlandse nucleaire staat van dienst kunnen ondersteunen en de concurrentiekracht van lokale toeleveringsactoren versterken. Tegelijkertijd zouden Nederland en Rotterdam een rol kunnen spelen in het vormgeven van toekomstige regulatoire kaders, normen en operationele richtlijnen, terwijl relatief efficiënte administratieve en vergunningsprocessen als concurrentievoordeel worden benut.

Verwachte vraag naar kernsplijtstof en ondersteunende infrastructuuractiviteiten

Er kan een kans ontstaan rond de ontwikkeling van ondersteunende nucleaire infrastructuur die gekoppeld is aan splijtstofcyclus- en onderhoudsactiviteiten. De verwachte toenemende vraag naar dergelijke splijtstofcyclusactiviteiten – als de verwachtingen van SMR-implementatie worden gehaald – vereist uitbreiding en innovatie in de huidige splijtstofcycluscapaciteiten in Europa. Om van deze kans gebruik te maken, zouden bedrijven met expertise in de nucleaire splijtstofcyclus zich in de haven moeten vestigen, aangezien dit momenteel ontbreekt. De industriële basis en logistieke connectiviteit van de haven zou geselecteerde splijtstofcyclusactiviteiten kunnen ondersteunen, waaronder geavanceerde splijtstofproductie, splijtstofconversie en gespecialiseerde splijtstofbehandelingsdiensten, met mogelijke kansen op het gebied van TRISO-splijtstoffen. De ontwikkeling van dergelijke capaciteiten kan de aantrekkelijkheid van Rotterdam vergroten voor internationale bedrijven op het gebied van

kernsplijtstof en nucleaire technologie en de opkomst van speciale nucleaire logistieke en onderhoudsinfrastructuur binnen het ecosysteem van de haven kunnen bevorderen.

3.2.2 Uitdagingen

Regulatoire onzekerheid en bestuur

Internationale regulatoire kaders, met name voor offshore nucleaire toepassingen, zijn onderontwikkeld en gefragmenteerd. Tegelijkertijd blijft er onzekerheid bestaan over de ambities van de Nederlandse overheid voor SMR's en de plannen voor inzet van SMR's in of nabij de haven van Rotterdam. In de vroege stadia van de ontwikkeling van de toeleveringsketen zijn investeringsbeslissingen sterk afhankelijk van overheidsbeleid, vergunningsprocedures en regulatoire stabiliteit. Hoewel toekomstige regelgevingsontwikkeling kansen kunnen creëren voor Nederlands leiderschap in normstelling en governance, bemoeilijkt het huidige gebrek aan beleidsduidelijkheid strategische planning en langetermijninvesteringsbeslissingen, vooral voor lokale inzet en bouw van SMR's.

Markt- en technologische onzekerheid

De toekomstige ontwikkeling van de SMR-markt blijft onzeker op verschillende aspecten, waaronder implementatietijden, langetermijnvraag, technologische volwassenheid en commerciële levensvatbaarheid. Bedrijven hebben vertrouwen in langetermijnmarktgroei en leveranciersstabiliteit nodig voordat ze zich verbinden aan grote investeringen of kwalificatieprocessen. Deze uitdaging wordt versterkt door het feit dat veel SMR-leveranciers nog relatief jonge bedrijven zijn, waardoor langdurige partnerschappen en investeringszekerheid moeilijker worden. Daarnaast blijft er onzekerheid bestaan over welke reactortechnologieën en leveranciers uiteindelijk als commerciële koplopers zullen uitkomen (marktconsolidatie), terwijl de vereisten in de toeleveringsketen aanzienlijk kunnen verschillen tussen reactorgeneraties en technologieën.

Investerings- en kwalificatiebarrières

Deelname aan de nucleaire toeleveringsketen vereist aanzienlijke investeringen in certificering, kwalificatie, naleving en business development activiteiten. De belangrijkste belemmering voor veel bedrijven is daarom niet per se bewustwording, maar eerder de hoge drempel die gepaard gaat met kwalificatie en regelgeving. Zelfs leveranciers van relatief standaard industriële componenten kunnen aanzienlijke certificeringsverplichtingen ondervinden voordat ze mogen deelnemen aan nucleaire projecten. De ontwikkeling van kernsplijtstofketenactiviteiten kan bijzonder uitdagend zijn vanwege hoge regelgevings-, verzekerings- en investeringskosten. Momenteel zijn nucleaire ervaring en kwalificaties binnen het havenecosysteem beperkt tot een relatief klein aantal bedrijven.

Kennis- en capaciteitsbeperkingen

Het industriële ecosysteem van de haven van Rotterdam heeft momenteel beperkte directe ervaring met de nucleaire sector, vooral bij bedrijven buiten de bestaande gespecialiseerde nucleaire toeleveringsketens. Het bewustzijn over mogelijke rollen binnen het toekomstige SMR-ecosysteem is relatief beperkt bij veel bedrijven en lokale actoren. Daarnaast is de bekendheid met nucleaire technologieën en bijbehorende risico's beperkt binnen delen van het bredere ecosysteem, waaronder overheidsinstanties. De gepercipieerde nucleaire risico's kunnen daarom het werkelijke risicoprofiel overschrijden in vergelijking met andere industriële activiteiten die al in de haven aanwezig zijn. Het opbouwen van de vereiste nucleaire capaciteiten, certificeringen en operationele geloofwaardigheid zal daarom naar verwachting aanzienlijke tijd en langdurige investeringen vergen.

Concurrentie en strategische positionering

Rotterdam wordt geconfronteerd met toenemende concurrentie van andere internationale havens en industriële regio's die zich willen positioneren binnen toekomstige SMR-waardeketens. Internationale koplopers zoals de haven van Hamburg, het Verenigd Koninkrijk en Zuid-Korea ontwikkelen al actief

capaciteiten en besteden aandacht aan strategische positionering op dit gebied. Vertraagde strategische acties kunnen het potentiële first-mover-voordeel van Rotterdam verzwakken en het vermogen om investeringen en toeleveringsketen activiteiten aan te trekken verminderen. Tegelijkertijd blijft de strategische positionering bemoeilijkt door onzekerheid over welke rol Rotterdam het beste kan vervullen binnen het bredere SMR-ecosysteem, waaronder logistiek, splijtstofcyclusactiviteiten, maritieme toepassingen, industriële integratie of bredere ecosysteemcoördinatie.

Infrastructuur- en systeembeperkingen

Verschillende infrastructuurgerelateerde beperkingen kunnen de toekomstige ontwikkeling van SMR-gerelateerde activiteiten in de haven van Rotterdam beïnvloeden. Bestaande problemen met de beschikbaarheid van energie en netcongestie kunnen de industriële uitbreiding en de ontwikkeling van nieuwe logistieke activiteiten beperken. Daarnaast vereisen nucleaire toeleveringsketens zeer betrouwbare en veerkrachtige coördinatiemechanismen, waarbij verstoringen aanzienlijke operationele en veiligheidsgevolgen kunnen hebben. Gespecialiseerd transport en achterlandlogistiek gekoppeld aan de bouw van modulaire reactoren kunnen ook extra complexiteit veroorzaken. Bovendien zouden activiteiten voor opslag, verwerking en bijtanken van splijtstof en radioactief afval speciale infrastructuur en aanvullende regulatoire goedkeuringen vereisen.

3.3 Potentieel voor bedrijven in de haven van Rotterdam

We hebben 92 bedrijven in het havenecosysteem van Rotterdam geïdentificeerd die mogelijk een rol kunnen spelen in de SMR-toeleveringsketen (zie Figuur 19 voor de aanpak). Voor deze bedrijven beoordeelden we hun relevantie voor de toeleveringsketen als gemiddeld of hoog. We hebben deze bedrijven verder ingedeeld op niveau in de waardeketen, sector, waardeketensegment, fase en fit met de binnenlandse of maritieme SMR-toeleveringsketens.



Figuur 19: Aanpak om relevante bedrijven in de haven van Rotterdam te identificeren en te selecteren

3.3.1 Sectoren betrokken bij de toeleveringsketen

In de SMR-toeleveringsketen kunnen verschillende sectoren een rol spelen. In deze studie analyseren we acht verschillende sectoren die relevant zijn voor de verschillende functionele segmenten van de toeleveringsketen en betrokken kunnen zijn bij de verschillende fasen van SMR-projecten. Figuur 20 geeft een overzicht weer, en beschrijft elk van de sectoren.

NUCLEAIR	BETREFT NUCLEAIRE COMPONENTEN / KENNIS
MECHANISCH	BETREFT WERKTUIGBOUWKUNDE, LASSEN, FABRICAGE VAN APPARATUUR ENZ.
ELEKTRISCH	BETREFT ELEKTRISCHE SYSTEMEN EN COMPONENTEN
BOUW	BETREFT CIVIELE WERKEN VOOR DE BOUW VAN DE SMR ZELF
INFRASTRUCTUUR	BETREFT CIVIELE WERKEN GERELATEERD AAN WEGEN, LAND, WATER ENZ.
TRANSPORT & LOGISTIEK	BETREFT TRANSPORT, LOGISTIEK, OPSLAG, SCHEEPVAART ENZ.
MARITIEM	BETREFT MARITIEME INDUSTRIËN
MATERIELEN	BETREFT RUWE OF GERAFFINEERDE PRODUCTEN

Figuur 20: Beschrijving van de verschillende sectoren die in de studie zijn opgenomen om de SMR-toeleveringsketen te analyseren

3.3.2 Potentieel in de toeleveringsketen

De geïdentificeerde bedrijven zijn per sector in de SMR-toeleveringsketen in kaart gebracht in Figuur 21.¹⁴ Hierbij staat het eerste getal (in de bijbehorende kleur) telkens voor het totale aantal bedrijven dat in een specifiek niveau en sectorcombinatie ingedeeld is, terwijl het tweede getal overeenkomt met het totale aantal bedrijven die mogelijk ook relevant is voor de offshore toeleveringsketen.

Belangrijkste bevindingen

De meeste bedrijven in het havenecosysteem van Rotterdam die relevant worden geacht voor de SMR-toeleveringsketen bevinden zich in de sector Transport en Logistiek (39), gevolgd door Mechanisch (17) en Elektro (15). Slechts enkele bedrijven (<10) zijn actief in de sectoren Infrastructuur, Bouw en Materialen. De sectoren Infrastructuur en Bouw zijn vooral relevant voor landgebonden SMR's, aangezien er weinig bedrijven in deze sectoren zijn geïdentificeerd die ook relevant kunnen zijn voor offshore-SMR's.

De meeste bedrijven zijn ingedeeld in niveaus 2-4. Dit toont aan dat de meeste bedrijven in het havenecosysteem van Rotterdam kunnen opereren in niveaus waar aanzienlijke waarde wordt toegevoegd en waar leveranciers en systeemintegratoren meerdere leveranciers zoeken om risico's in de toeleveringsketen te beperken en productieschaal mogelijk te maken. Dit biedt een goed potentieel voor de haven van Rotterdam om een positie te verzekeren in de SMR-toeleveringsketen bij één of meer reactorleveranciers.

Zeer weinig bedrijven (<3) zijn ingedeeld in niveau 1 en enkele bedrijven (<10) in niveaus 5 en 6. Het eerste niveau betreft technologieleveranciers, die rechtstreeks producten en diensten kunnen inkopen voor een SMR of een van haar belangrijkste werkstromen. Hier is Allseas een uitstekend voorbeeld dat zich in/nabij de haven van Rotterdam bevindt. Aangezien dit betrekking heeft op een offshore SMR, zou Allseas bovendien profiteren van een havengebaseerd industrieel ecosysteem buiten transport en logistiek. De lagere niveaus betreffen Fabrikanten en Materiaalleveranciers. Deze laatste ervaren de sterkste concurrentie. Echter voor landgebonden SMR's – die in of nabij de haven van Rotterdam gebouwd zouden worden – moeten grote hoeveelheden materialen zoals beton lokaal worden geproduceerd, wat duidelijke zakelijke kansen voor lokale leveranciers creëert.

¹⁴ Let op dat bedrijven actief kunnen zijn in meerdere sectoren, zodat het totale aantal bedrijven in de analyse van de toeleveringsketen hoger is dan de 92 bedrijven in het ecosysteem van de haven die zijn geïdentificeerd.

Voor Transport en Logistiek worden de meeste bedrijven in niveau 3 geplaatst. Deze bedrijven treden niet op als componentleveranciers, maar als logistieke knooppunten. Hun diensten kunnen worden ingekocht door zowel hogere als lagere bedrijven uit verschillende sectoren. Transport- en logistiekbedrijven in de haven bieden vaak geïntegreerde diensten aan, bovendien is hun concurrentie deels locatiegebaseerd – wat de concurrentie vermindert wanneer de haven van Rotterdam een belangrijk logistiek knooppunt is voor het importeren en exporteren van SMR-modules en onderdelen binnen of buiten het Europese vasteland. Om deze redenen zijn deze bedrijven ingedeeld in het midden van de toeleveringsketen.

De nucleaire sector is niet veel vertegenwoordigd in de haven van Rotterdam, hoewel verschillende bedrijven (11) nucleaire markten bedienen en daardoor over nucleaire deskundigheid (kennis en expertise) binnen hun (internationale) bedrijf beschikken. Deze bedrijven zijn toegewezen aan de nucleaire sector. De meeste zijn te vinden op het niveau van Systeemintegrator (niveau 2) of Subcontractor (niveau 4).

Potentieel in de SMR-toeleveringsketen

Het potentieel voor de haven van Rotterdam wordt als het grootst beschouwd in de sectoren Transport en Logistiek, Maritiem en Mechanisch. Hier hebben we de meeste bedrijven in de haven van Rotterdam geïdentificeerd die zowel aan landgebonden als maritieme SMR's zouden kunnen toeleveren.

Het potentieel voor de haven van Rotterdam wordt als het hoogst beschouwd op niveaus 2-4. Als logistiek/transitknooppunt voor SMR-onderdelen en componenten is het hoogste potentieel verreweg op niveau 3. Als het een industrieel ecosysteem is dat bijdraagt aan de bouw en integratie van onderdelen en componenten voor (offshore) SMR's, verschuift het potentieel meer naar niveau 4 en 2.

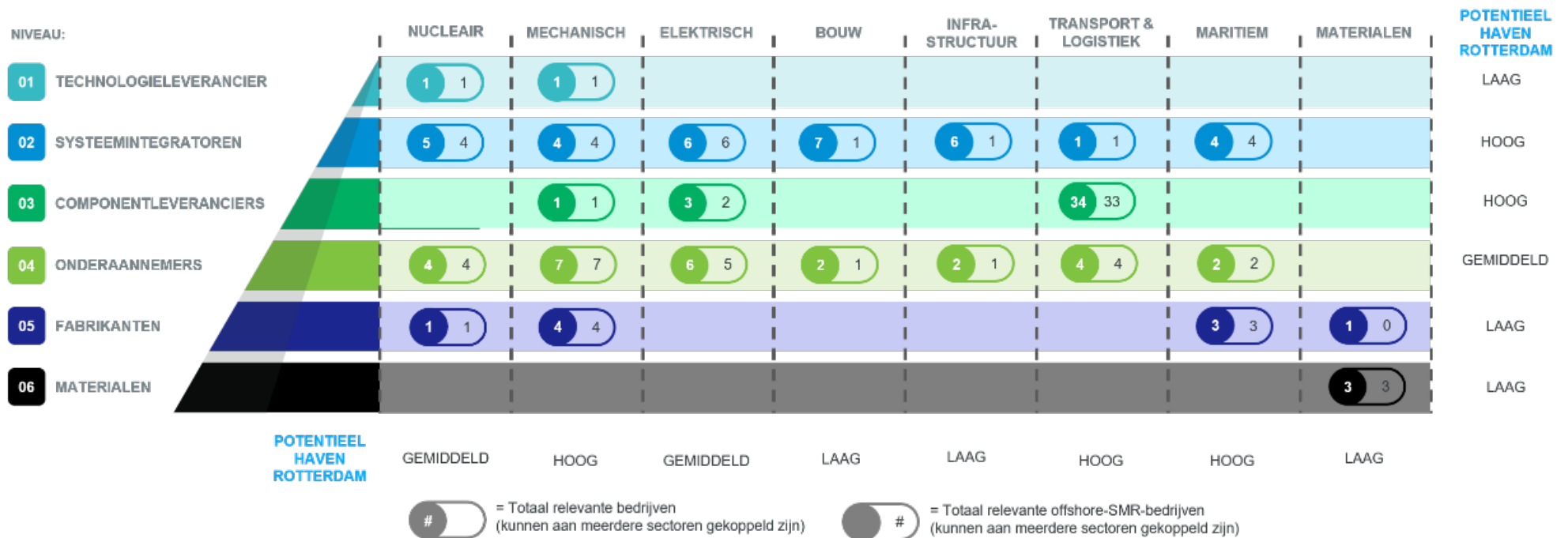
De haven van Rotterdam heeft een laag potentieel voor betrokkenheid bij de SMR-toeleveringsketen op het gebied van Infrastructuur of Materialen. Hier zien we potentie voor een relatief klein aantal bedrijven, voornamelijk voor landgebonden SMR's. Verder is het potentieel laag op de laagste niveaus: hier vonden we weinig relevante bedrijven, die waarschijnlijk felle concurrentie zullen ondervinden tenzij ze leveren aan een landgebonden SMR die is gebouwd in of nabij de haven van Rotterdam – aangezien de inkoop op deze niveaus waarschijnlijk meer lokaal zal zijn. Niveau 1 is ook beoordeeld op laag potentieel, aangezien er op dit niveau slechts twee bedrijven zijn geïdentificeerd. Toch kunnen ze, als ze succesvol zijn, een toeleveringsketen verder aandrijven waarbij andere bedrijven in de haven van Rotterdam betrokken zijn.

Het potentieel voor individuele bedrijven hangt af van hun specifieke dienstverlening en hun vermogen om te concurreren met vergelijkbare bedrijven. Dat wordt in deze analyse niet beoordeeld. Hier richten we ons op de haven van Rotterdam als geheel.

3.3.3 Potentieel in SMR-fasen

Geïdentificeerde relevante bedrijven in het ecosysteem van de haven van Rotterdam zijn in kaart gebracht langs de fasen van SMR-projecten in Figuur 22.¹⁵ Hierbij staat het eerste getal (in de bijbehorende kleur) telkens voor het totale aantal bedrijven dat in een specifieke tier en sectorcombinatie ingedeeld is, terwijl het tweede getal overeenkomt met het totale aantal bedrijven die mogelijk ook relevant is voor de offshore toeleveringsketen.

¹⁵ Let op dat bedrijven actief kunnen zijn in meerdere fasen, zodat het totale aantal bedrijven in deze fasen hoger is dan de 92 bedrijven in het ecosysteem van de haven die werden geïdentificeerd.



Figuur 21: Overzicht van relevante bedrijven in het havenecosysteem van Rotterdam op de SMR-toeleveringsketen per sector

Belangrijkste bevindingen

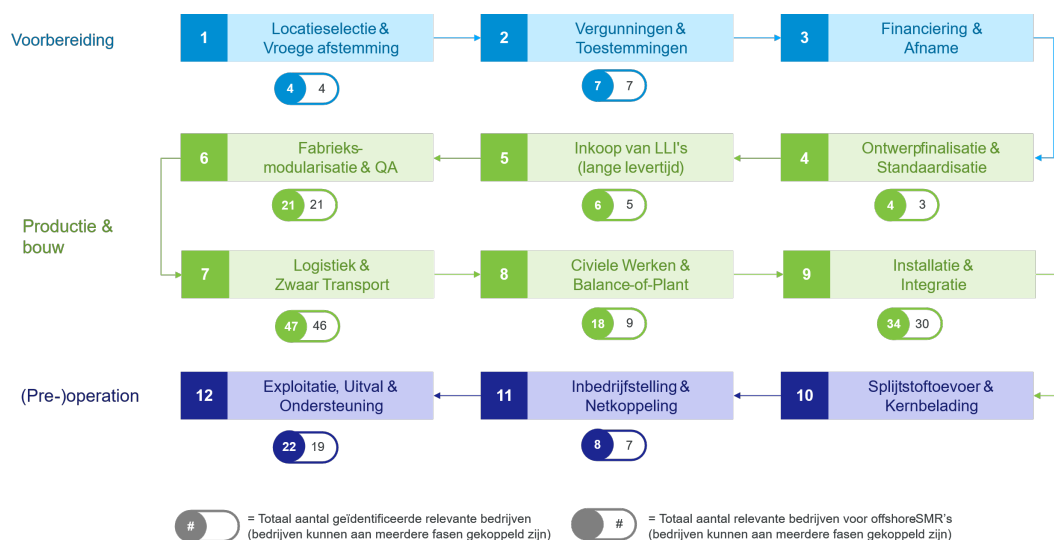
De meeste bedrijven die als relevant worden beschouwd voor SMR-projecten bevinden zich in het Productie- en Bouwstadium. Deze bedrijven kunnen bijdragen aan de bouw van componenten, modules, logistiek, transport, constructie en integratie. In het Voorbereidingsstadium zijn slechts enkele bedrijven mogelijk betrokken. Dit betreffen voornamelijk bedrijven die betrokken zijn bij engineering, milieu of andere adviesdiensten. In het stadium voorafgaand aan en tijdens de bedrijfsvoering kunnen mogelijk iets meer bedrijven betrokken zijn, voornamelijk voor ondersteuning van de bedrijfsvoering en het onderhoud. Betrokkenheid bij het Voorbereidingsstadium en het stadium voorafgaand aan en tijdens de bedrijfsvoering zal afhangen van de locatie van SMR's – betrokkenheid bij SMR's in of nabij de haven is het meest haalbaar.

Fasen 7 (logistiek en zwaar transport), 9 (installatie en integratie) en 6 (fabrieksmatige modularisatie en kwaliteitsborging) bieden de meeste kansen voor het ecosysteem van de haven van Rotterdam. In deze fasen is het grootste aantal bedrijven geïdentificeerd die mogelijk een rol kunnen spelen. In de fase logistiek en zwaar transport is het grootste aantal relevante bedrijven geïdentificeerd. In deze fasen kunnen de meeste bedrijven ook relevant zijn voor offshore-SMR's.

Sommige gespecialiseerde bedrijven in de haven van Rotterdam zouden een rol kunnen spelen in fase 4 (Ontwerp, Finalisatie & Standaardisatie) en 5 (inkoop van componenten met een lange levertijd). Fase 4 omvat leveranciers en bedrijven die onderdelen van de SMR (bijvoorbeeld de overige centrale systemen (balance of plant)) of locatiespecifieke bouwwerken kunnen ontwerpen. Fase 5 omvat grote bedrijven waarvoor over het algemeen weinig alternatieven bestaan. Deze bedrijven leveren grote en gespecialiseerde producten, zoals stoom- en turbinegeneratoren, kleppen van nucleaire kwaliteit en grote warmtewisselaars.

Bedrijven die in fase 8 (civieltechnische werkzaamheden & overige centrale systemen (balance of plant)) zijn ingedeeld, zijn vooral relevant voor landgebonden SMR's en omvatten activiteiten die op locatie plaatsvinden. Sommige van deze bedrijven kunnen ook activiteiten uitvoeren die relevant zijn voor maritieme SMR's, meestal gerelateerd aan mechanische constructie.

Er zijn geen relevante bedrijven in het ecosysteem van de haven van Rotterdam geïdentificeerd die een rol kunnen spelen in fase 3 (financiering en afname) en 10 (splijststofvoorziening en eerste kernlading).



Figuur 22: Positionering van relevante bedrijven langs de fasen van SMR-projecten

Potentieel in SMR-projectfasen

Het potentieel voor de haven van Rotterdam wordt als het hoogst beschouwd in het stadium van productie en bouw. Hierin hebben we verschillende relevante bedrijven geïdentificeerd, zowel voor landgebonden als voor offshore-SMR's. Een duidelijke potentiële rol voor de haven ligt binnen logistiek en zwaar transport – wat duidelijk aansluit bij de belangrijkste functie van een haven. Industriële capaciteiten in de haven kunnen betrokkenheid bij de productie van onderdelen, modules en de integratie daarvan mogelijk maken (fasen 6 en 9).

Het stadium van productie en bouw is aanstaande voor enkele landgebonden SMR's die dicht bij commercialisatie zijn. In de komende vijf jaar kunnen zich dus kansen voor de haven van Rotterdam voordoen. Voor offshore-SMR's, die goed aansluiten bij het industriële ecosysteem en de functie van de haven, worden kansen op langere termijn verwacht.

3.3.4 Totaal potentieel

Het totale potentieel van de haven van Rotterdam verschilt voor landgebonden en offshore-SMR's. Om het totale potentieel te analyseren, bekijken we de geïdentificeerde bedrijven die momenteel in de haven van Rotterdam actief zijn in de toeleveringsketen- en SMR-fasen en leggen we de relatie met de functionele segmenten in de SMR-toeleveringsketen.

3.3.4.1 Landgebonden SMR's

Het totale potentieel van de haven van Rotterdam in de landgebonden SMR-toeleveringsketen ligt voornamelijk in transport en logistiek en de Moduleketen, met name in de levering van componenten. Dit wordt gevisualiseerd in Figuur 23.

De bouwketen is sterk afhankelijk van de locatie. Voor SMR's die in of nabij de haven van Rotterdam zijn gebouwd, of ten minste in Nederland, kunnen bedrijven in de haven betrokken zijn bij grondverzet, infrastructuur, civieltechnische bouw, integratie, installatie en inbedrijfstelling. Materialen zullen dan waarschijnlijk ook lokaal worden geleverd. Daarnaast zou voor in het havengebied gevestigde SMR's het laden en ontladen van splijtstof in de haven moeten plaatsvinden, met mogelijk betrokkenheid van lokale bedrijven bij de afhandeling, transport en beveiliging.

Daarnaast biedt de serviceketen kansen op de locatie van een SMR. Sommige bedrijven in de haven zouden mogelijk diensten kunnen leveren die gerelateerd zijn aan geleverde componenten en modules – dit hangt echter af van betrokkenheid bij de Module-keten. Aanbieders van meer algemene onderhoudsdiensten zouden waarschijnlijk alleen SMR's kunnen leveren die in de haven/Nederland operationeel zijn.

De rol van de haven van Rotterdam bij de bouw en integratie van componenten in modules voor SMR's is onzeker. Dit hangt af van de leverancier en hun strategie. Momenteel wordt de fabrieksmatige productie van SMR-modules voorzien door andere bedrijven dan wij in de haven hebben geïdentificeerd.

De splijtstofketen en afvalketen vereisen specifieke nucleaire capaciteiten die niet beschikbaar zijn in de haven en moeilijk in de haven te vestigen zijn. Deze ketens worden waarschijnlijk vervuld door leveranciers die deze ketens momenteel afdekken voor grote kerncentrales. Het transport en de logistiek in deze ketens kunnen deels door de haven worden afgedekt, afhankelijk van de locatie van de SMR en de benodigde logistieke routes. Momenteel worden al enkele verrijkte materialen en splijtstoffen door de haven getransporteerd, terwijl voor gebruikte splijtstof verschillende logistieke routes bestaan (voornamelijk via weg en spoor).

Desalniettemin moet de waardeketen voor splijtstof en radioactief afval verder worden versterkt om aan de vraag naar SMR's te voldoen zodra de verwachte adoptie van SMR's werkelijkheid wordt. Gespecialiseerde nucleaire bedrijven die momenteel bij deze ketens betrokken zijn, moeten hun activiteiten opschalen. Dergelijke bedrijven bevinden zich niet in de haven van Rotterdam. Het aantrekken van dergelijke bedrijven naar de haven van Rotterdam zou echter een mogelijkheid kunnen zijn die onderzocht kan worden om de betrokkenheid bij de SMR-toeleveringsketen te vergroten.

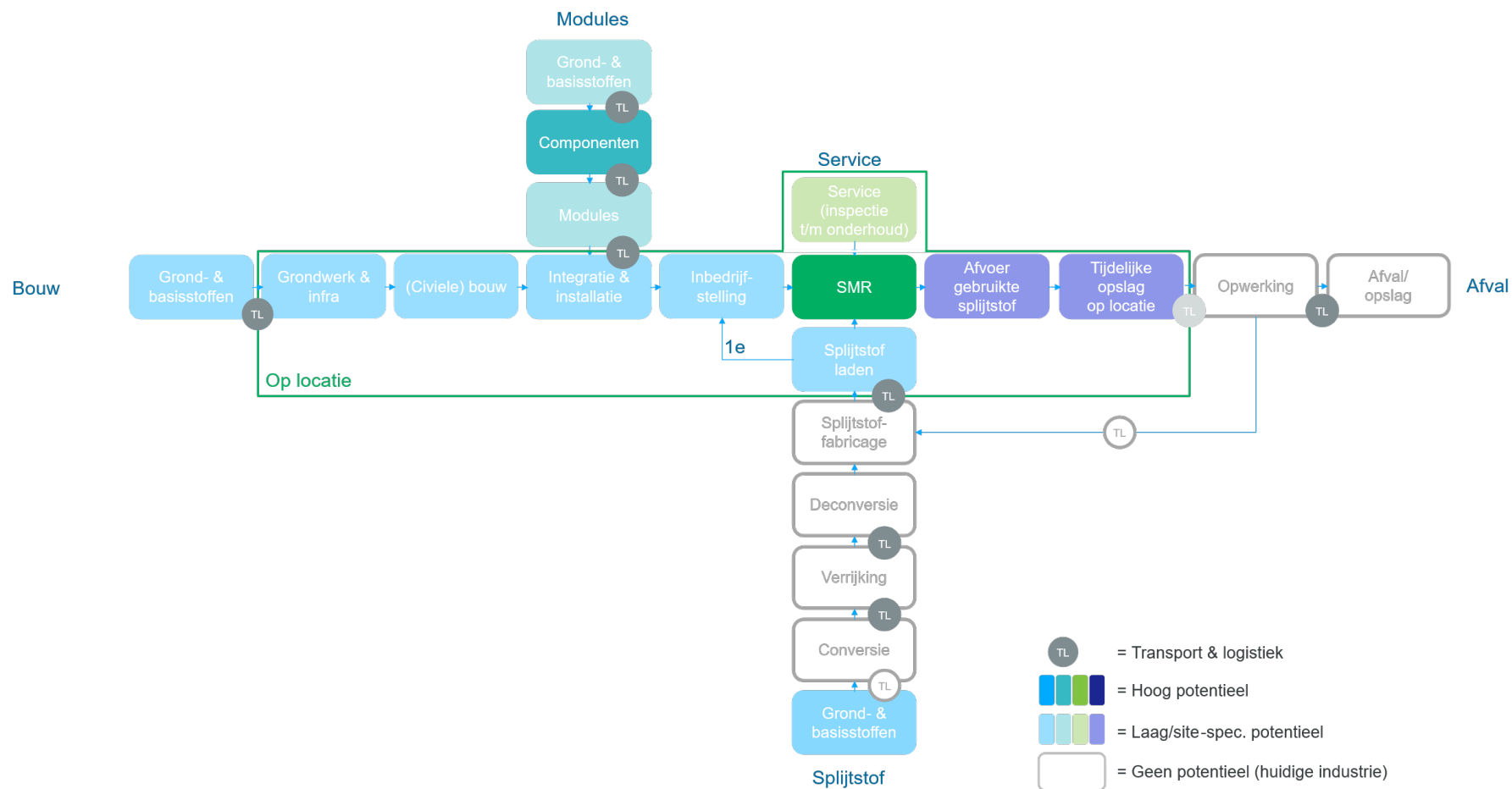
3.3.4.2 Offshore SMR's

Voor de offshore SMR-toeleveringsketen is het totale potentieel voor de haven van Rotterdam breder. Hier gaan we ervan uit dat de haven van Rotterdam een locatie zal zijn waar nucleaire schepen of pontons worden geassembleerd en onderhouden. De haven zou dan fungeren als industrieterrein voor maritieme SMR's, ongeacht of deze SMR's in de haven of elders worden ingezet. De haven heeft daarom potentie om betrokken te zijn bij de bouw-, module- en dienstenketen, met extra betrokkenheid bij transport en logistiek in andere ketens. Dit wordt gevisualiseerd in Figuur 24.

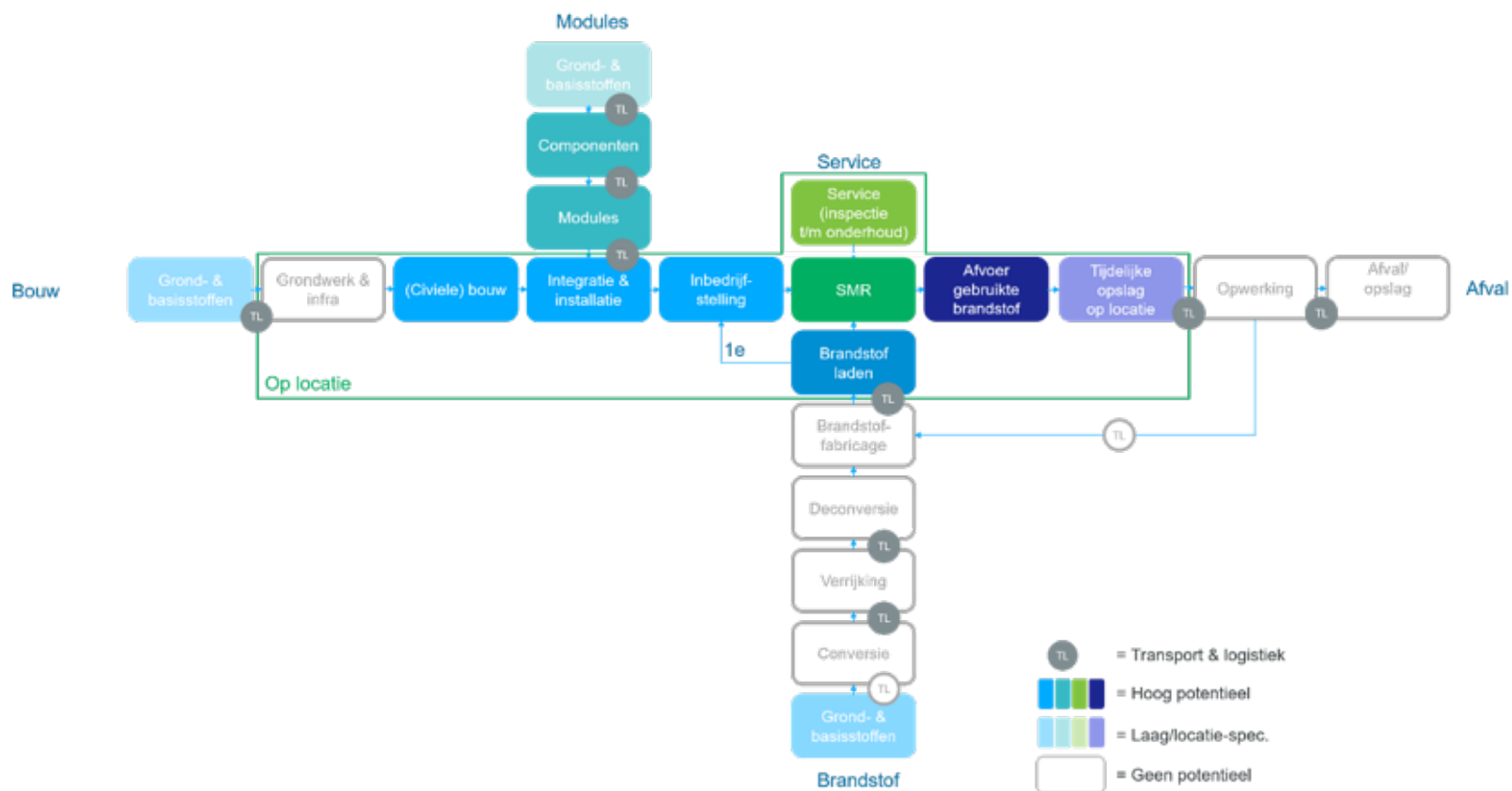
Aangezien offshore-SMR's in havengebieden kunnen worden gebouwd, zijn de bedrijven en capaciteiten in de haven van Rotterdam goed geschikt om hierin een rol te spelen. Het feit dat Allseas, dat de ambitie heeft offshore-SMR's te ontwikkelen, dicht bij de haven ligt, kan de potentiële rol van de haven van Rotterdam verder vergroten. De daadwerkelijke bouw van offshore-SMR's kan echter beperkt zijn tot meer gespecialiseerde componenten en integratie, aangezien generieke scheepsbouw over het algemeen plaatsvindt in goedkopere regio's in het buitenland. Desalniettemin zouden componenten, modules, onderdelen van de bouw en integratie mogelijk kunnen plaatsvinden in de haven van Rotterdam.

Als regulatoire en aansprakelijkheidsuitdagingen met betrekking tot nucleaire offshoretoepassingen worden opgelost, kan de haven van Rotterdam ook betrokken zijn bij het laden en verwijderen van gebruikte splijtstof. De haven van Rotterdam zou dan kunnen fungeren als een allround serviceknooppunt voor nucleaire schepen, waar dergelijke schepen worden bijgetankt en onderhouden. Dit biedt verbeterde mogelijkheden voor betrokkenheid bij onderhoud en service van apparatuur, systemen en geleverde componenten/modules. Bedrijfsmodellen waarbij het eigendom van kernreactoren en scheepseigendommen gescheiden zijn – scheepseigenaren zouden in feite de nucleaire voortstuwing leasen – zouden de rol van een nucleaire haven verder versterken als de reactoreigenaar in de haven van Rotterdam gevestigd is.

De splijtstofketen en afvalketen vereisen nog steeds specifieke nucleaire capaciteiten die momenteel niet beschikbaar zijn in de haven en niet gemakkelijk in de haven kunnen worden gevestigd. Deze ketens zullen waarschijnlijk ingevuld blijven door huidige leveranciers van grote kerncentrales of onderzoeksreactoren. Desalniettemin zou de haven kunnen onderzoeken om dergelijke bedrijven naar de haven te trekken.



Figuur 23: Schema van het potentieel voor de haven van Rotterdam per functioneel segment in de landgebonden SMR-toeleveringsketen



Figuur 24: Schema van het potentieel voor de haven van Rotterdam per functioneel segment in de maritieme SMR-toeleveringsketen

3.4 Potentiële rollen voor de haven in de SMR-toeleveringsketen

De haven van Rotterdam heeft het potentieel om een rol te veroveren in de toeleveringsketen van SMR's. We hebben vier rollen geïdentificeerd die de haven van Rotterdam zou kunnen vervullen, afhankelijk van haar ambitie (zie Figuur 25). Deze rollen en ambities kunnen worden afgestemd op de visie van de haven voor 2050.¹⁶ Deze visie bevat vijf strategische thema's, waarbij schone logistiek, klimaatneutrale industrie, strategische autonomie en energiezekerheid kernwoorden zijn. SMR's, zowel landgebonden als offshore, kunnen bijdragen aan deze ambities. Daarnaast benoemt de visie ook schepen met nucleaire voortstuwing in de haven. Betrokkenheid bij de SMR-toeleveringsketen kan richting geven aan deze visie.

De mogelijke rollen voor de haven van Rotterdam verschillen in ambitieniveau, strategische voordelen en benodigde inspanningen. Sommige functies liggen dicht bij business-as-usual in de haven, als zijnde een logistiek knooppunt en industrieel ecosysteem met een bestaande conventionele bedrijfsbasis. Andere functies vereisen dat de haven meer nucleaire capaciteiten faciliteert en uitdagingen op het gebied van regelgeving en aansprakelijkheden overwint, en mogelijk maatschappelijke acceptatie van nucleaire activiteiten in de haven.



Figuur 25: Rollen die de haven van Rotterdam zou kunnen nastreven in de SMR-toeleveringsketen, geordend op ambitieniveau en inspanning

De vier potentiële rollen van de haven van Rotterdam in de SMR-toeleveringsketen kunnen worden gerangschikt in termen van ambitieniveau en inspanning (zie Figuur 25, hier gepresenteerd van lage ambitie/inspanning naar hoge ambitie/inspanning):

A. Positioneer de haven als logistiek of transitknooppunt voor SMR-componenten, en mogelijk splijtstof en radioactief afval, die het Europese vasteland binnenkomen of verlaten.

Deze rol sluit goed aan bij de huidige logistieke rol van de haven van Rotterdam. Veel bedrijven in de haven zijn betrokken bij transport en logistiek, wat een goed potentieel biedt om zo'n rol in de SMR-toeleveringsketen te veroveren. Het zou een natuurlijke rol voor de haven zijn die waarschijnlijk de minste inspanning vereist en lijkt op de laagste ambitie qua rol in de SMR-toeleveringsketen.

In landgebonden SMR-implementatiescenario's zou de haven van Rotterdam kunnen fungeren als strategisch toegangspunt voor reactormodules en grote industriële componenten die internationaal

16 Havenvisie Rotterdam (2025), <https://www.portofrotterdam.com/sites/default/files/2026-01/Havenvisie-Rotterdam-2050.pdf>

worden geproduceerd en naar Europese inzetlocaties worden vervoerd. De diepwatertoegang, de gevestigde logistieke infrastructuur en de sterke binnenlandse connectiviteit via waterwegen, spoorwegen en wegennetwerken bieden gunstige voorwaarden voor deze rol. In deze configuratie zou de haven voornamelijk fungeren als een gecontroleerde logistieke gateway die wereldwijde productieknooppunten verbindt met toekomstige SMR-implementatieprojecten in heel Europa. Deze rol kan zich ook uitbreiden tot transportactiviteiten die samenhangen met de nucleaire splijtstofcyclus. Afhankelijk van toekomstige regelgevingskaders en de schaal van SMR-implementatie in Europa, zou de haven transport- en transitoperaties kunnen ondersteunen die verrijkt uranium, splijtstofassemblages, geavanceerde splijtstoffen zoals HALEU of TRISO-gerelateerde materialen, evenals logistiek voor gebruikte splijtstof omvatten. De haven van Rotterdam is al betrokken bij bepaalde nucleaire materiaaltransportactiviteiten, wat een initiële operationele basis biedt voor toekomstige uitbreiding in dit gebied.

B. De haven positioneert zich als een industrieel ecosysteem dat bijdraagt aan de bouw en integratie van SMR-onderdelen en -componenten voor binnenlandse en maritieme SMR's.

Een meer geavanceerde positie zou betekenen dat de haven niet alleen functioneert als logistiek knooppunt, maar ook als industrieel ecosysteem dat bijdraagt aan de bouw en integratie van SMR-onderdelen, componenten en modules voor zowel binnenlandse als maritieme toepassingen. Deze functie is ambitieus en vereist meer inspanning om te verkrijgen.

Lokale bedrijven in hogere lagen zijn beter gepositioneerd om te concurreren en de toeleveringsketen binnen te komen, terwijl andere bedrijven meer moeite moeten doen om een positie te bemachtigen (bijvoorbeeld in business development en certificering). Met het huidige bedrijvenbestand in de haven zou de rol vooral bestaan uit niet-nucleaire, conventionele componenten. Bedrijven in de haven kunnen een rol spelen bij zowel landgebonden als offshore-SMR's, maar hun ligging in de haven maakt ze het beste geschikt voor offshore-SMR's.

In offshore en drijvende SMR-scenario's kan de rol van de haven aanzienlijk breder worden. In plaats van alleen als transitpunt te dienen, zou de haven industriële integratieactiviteiten kunnen ondersteunen zoals de assemblage van drijvende constructies, de installatie van conventionele systemen en de pre-deployment integratie van modules en componenten. Het bestaande maritieme en offshore engineering-ecosysteem biedt overdraagbare deskundigheid in zware maritieme productie en systeemintegratie.

Successen van lokale SMR-leveranciers en lokale SMR-bouwprojecten kunnen helpen om succesvol de SMR-toeleveringsketen binnen te komen – vooral omdat functies in de bouw sterk locatiegebonden zijn.

C. Positioneer de haven als een strategische Europese nucleaire haven voor internationale maritieme routes en voor de bouw en onderhoud van nucleair aangedreven vaartuigen (en pontons).

Dit zou een zeer strategische rol zijn die goed aansluit bij de sterke huidige internationale positie van de haven en langdurige betrokkenheid bij de offshore SMR-toeleveringsketen mogelijk maakt, zowel in operationele fasen als mogelijk in de bouwfase. Deze positie is echter afhankelijk van de succesvolle ontwikkeling en adoptie van nucleair aangedreven schepen en nucleaire pontons en vereist een langetermijnperspectief.

Onder deze ambitie zou de haven de langdurige exploitatie en service van offshore-SMR's, drijvende kerncentrales en nucleair aangedreven schepen kunnen ondersteunen. Potentiële activiteiten kunnen onderhoudsoperaties, bijtankactiviteiten, maritieme nucleaire logistiek, het terugbrengen van drijvende eenheden voor revisie en uiteindelijk diensten gerelateerd aan het buiten gebruik stellen.

De lokale maritieme SMR-ontwikkelaar/leverancier Allseas en bedrijven in het NuclearDrive-consortium kunnen de basis vormen voor zo'n cluster van zowel conventionele als nucleaire bedrijven.

Tegelijkertijd zou deze rol een aanzienlijke evolutie van het huidige havenkader vereisen. Speciale nucleaire regelgeving, gespecialiseerde beveiligingsmaatregelen, aansprakelijkheidskaders, noodvoorbereidingsplanning en capaciteiten voor de verwerking en opslag van nucleaire splijtstof en radioactief afval zouden allemaal nodig zijn. Dit maakt zowel de ambitie als de benodigde inspanningen aanzienlijk, vooral bij groot onderhoud of bijtanken

Desalniettemin moet worden verwacht dat nucleair aangedreven schepen op middellange tot lange termijn zullen verzoeken om de haven binnen te varen of te passeren (zelfs zonder nucleair onderhoud).

D. De haven positioneren als een geïntegreerde nucleaire haven in de landgebonden en offshore SMR-toeleveringsketen door nucleaire bedrijven aan te trekken die zich bezighouden met splijtstof en radioactief afval.

De meest ambitieuze positie die tijdens de studie werd vastgesteld, zou zijn dat de haven van Rotterdam zich ontwikkelt tot een breder nucleair-industrieel ecosysteem dat zich uitstrekt tot de splijtstofcyclus en afvalbeheerketens. In dit scenario zou de haven niet alleen logistieke en industriële integratieactiviteiten ondersteunen, maar ook gespecialiseerde nucleaire bedrijven aantrekken die betrokken zijn bij splijtstofproductie, geavanceerde splijtstofontwikkeling, verwerking van radioactief afval en bijbehorende nucleaire diensten.

De capaciteit in de splijfstoftoeleveringsketen en de capaciteiten om specifieke splijtstof (met name TRISO) voor bepaalde SMR-ontwerpen te ontwikkelen, zijn momenteel beperkt. Met de bredere adoptie van landgebonden en offshore-SMR's in heel Europa zou extra capaciteit nodig zijn. De haven zou als facilitator kunnen optreden door gespecialiseerde bedrijven aan te trekken met deskundigheid in de splijtstof- en afvalbeheerketens (bijv. Framatome, Westinghouse, Orano) – zulke bedrijven zijn er nog niet in de haven. Het zou ook logistieke routes voor kernsplijtstof en afval via de haven van Rotterdam laten verlopen, waardoor de haven een grotere rol in transport en logistiek zou kunnen vervullen.

Deze optie vereist echter ook het hoogste niveau van industriële, institutionele en regulatoire transformatie. Specifieke nucleaire infrastructuur, beschikbaarstelling van terreinen, afstemming van het langetermijnbeleid, veiligheidskaders en aanzienlijke investeringen uit de private sector zouden noodzakelijk zijn. Bovendien is het aantrekken van grote bedrijven in de kernsplijtstofcyclus buiten hun bestaande industriële locaties onzeker en vereisen waarschijnlijk gerichte incentivering en inzicht in de marktontwikkeling op lange termijn. De haalbaarheid van deze ambitieuze optie moet eerst worden onderzocht, en deze rol moet worden gezien als een strategische langetermijnambitie in plaats van een kortetermijnpositie voor de haven van Rotterdam.

Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Wereldwijd zijn bijna honderd concepten voor Small Modular Reactors (SMR's) in ontwikkeling, gebaseerd op uiteenlopende technologieën. De meeste worden ontwikkeld voor toepassingen op land en sommige voor offshoretoepassingen. De meeste van deze SMR-concepten zijn nog in ontwikkeling. Sommige concepten hebben de demonstratiefase bereikt en ondergaan regulatoire beoordelingen of zijn begonnen met voorbereidende werkzaamheden op locatie. Alleen in Rusland en China zijn SMR's al operationeel. Er is één SMR in aanbouw in Canada en in het VK vindt er een regulatoire beoordeling en locatiekeuze plaats. Hoewel Nederland geen programma voor de uitrol van SMR's heeft, worden SMR's expliciet beschouwd als onderdeel van de toekomstige energiemix op nationaal en regionaal niveau en zijn diverse studies en consultaties in uitvoering om het potentieel en de kosten van de inzet van SMR's te beoordelen.

De SMR-industrie bevindt zich nog in een vroeg commercieel stadium en de toeleveringsketen voor SMR's is in ontwikkeling. De toeleveringsketen staat nog open voor nieuwe toetreders, maar is tijdgebonden en technologieafhankelijk. De eerste landgebonden SMR-projecten in Europa (first-of-a-kind, FOAK) worden rond 2030 verwacht, terwijl commerciële uitrol in Nederland eind jaren 2030 of begin jaren 2040 wordt verwacht. Het IEA verwacht in 2040 meer dan 50 SMR's in de EU en meer dan 100 in 2050. De wereldwijde marktgrootte voor SMR-technologie wordt door het IEA geschat op 670 miljard USD in de periode 2024-2050, uitgaande van een succesvolle ontwikkeling van SMR's. De marktgrootte en het daadwerkelijke aantal SMR's in bedrijf zijn echter onzeker en moeilijk goed te voorspellen in het huidige stadium van SMR-ontwikkeling.

Offshore-SMR's bevinden zich in een lager ontwikkelingsstadium en staan voor extra regulatoire uitdagingen. Hun demonstratie en commerciële uitrol worden daarom verwacht vijf tot tien jaar later dan voor landgebonden SMR's.

De SMR-markt kan worden gekarakteriseerd als een markt die zich ontwikkelt richting volwassenheid. In de loop van de tijd zal de markt waarschijnlijk consolideren, met minder reactorleveranciers en duidelijkere marktleiders. Dit maakt het momenteel moeilijk om te bepalen met welke reactorleveranciers of bedrijven samenwerking moet worden gezocht om een positie in de SMR-toeleveringsketen veilig te stellen. In deze context zal een vroege markttoetreding waarschijnlijk een belangrijke succesfactor zijn. De verwachtingen voor de vraag zullen ook bevestigd moeten worden zodra de markt meer volwassen is.

In hoeverre kan de haven van Rotterdam een rol spelen in de toekomstige toeleveringsketen van SMR's?

In deze context toont de studie aan dat de haven van Rotterdam een sterk potentieel heeft om een rol te spelen in de opkomende internationale SMR-toeleveringsketen. Het huidige industriële ecosysteem, de sterke logistieke capaciteiten en de strategische ligging maken dat de haven van Rotterdam goed gepositioneerd is om betrokken te zijn bij transport en logistiek, evenals bij de levering van componenten en industriële diensten. Dit zal vooral betrekking hebben op niet-nucleaire componenten en diensten, aangezien nucleaire capaciteiten binnen het huidige industriële ecosysteem van de haven zeldzaam zijn.

In het ecosysteem van de haven zijn 92 bedrijven geïdentificeerd die relevant kunnen zijn voor de SMR-toeleveringsketen. De meeste van deze bedrijven lijken de potentie te hebben om een rol te vervullen in middelhoge tot hoge niveaus van de SMR-toeleveringsketen, voornamelijk in transport en logistiek, werktuigbouwkunde en elektrotechniek. Het productie- en bouwstadium van SMR-projecten is het meest veelbelovende stadium waarin deze bedrijven betrokken kunnen zijn. Op basis van de kenmerken van de geïdentificeerde bedrijven wordt een potentiële betrokkenheid van de haven gezien in logistiek en zware transporten en bij de levering van gespecialiseerde componenten en (geïntegreerde) modules.

Het offshore- en maritieme industriële ecosysteem en de functie van de haven maken dat zij goed gepositioneerd is voor betrokkenheid bij de offshore SMR-toeleveringsketen. De haven, met haar huidige industriële ecosysteem, zou meer segmenten van de offshore SMR-toeleveringsketen kunnen veroveren dan van de landgebonden SMR-toeleveringsketen, met rollen in bouw, modules en onderhoud. De nabijheid van een offshore SMR-leverancier/ontwikkelaar versterkt het pleidooi voor betrokkenheid bij de offshore SMR-toeleveringsketen. Offshore-SMR's bevinden zich echter in een lager ontwikkelingsstadium en staan voor regulatoire uitdagingen, waardoor dit een langetermijnperspectief is.

Voor landgebonden SMR's kan de haven betrokken zijn bij de levering van componenten en bij transport en logistiek. De betrokkenheid bij de bouw van SMR's hangt af van de locatie waar SMR's worden gebouwd, want toelevering aan landgebonden SMR's is voor sommige bedrijven in de haven mogelijk wanneer de bouwplaats zich in of nabij de haven bevindt (althans binnen Nederland). Dit maakt de herhaalde levering aan landgebonden SMR's beperkt. Desalniettemin hebben stakeholders tijdens deze studie consequent het potentieel benadrukt van landgebonden SMR's om elektriciteit, warmte en waterstof te produceren voor de huidige activiteiten van de haven. De bouw van een SMR in een vroeg stadium van adoptie (bijvoorbeeld een FOAK) kan helpen de haven vroeg te positioneren in de binnenlandse SMR-toeleveringsketen.

Wat zijn de potentiële rollen die de haven van Rotterdam binnen deze toeleveringsketen zou kunnen vervullen?

We zien vier potentiële strategische rollen voor de haven van Rotterdam, elk met verschillende ambitieniveaus, inspanningen, uitdagingen en strategische baten. Deze rollen voor de haven, gerangschikt van laag tot hoog ambitieniveau/inspanning, zijn:

- A. Een logistiek of transitknooppunt voor SMR-componenten, en mogelijk splijtstof en radioactief afval, die het Europese vasteland binnenkomen of verlaten.
- B. Een industrieel ecosysteem dat bijdraagt aan de bouw en integratie van SMR-onderdelen en -componenten voor landgebonden en offshore SMR's.
- C. Een strategische Europese nucleaire haven voor internationale maritieme routes die nucleair aangedreven schepen (en pontons) bouwt en onderhoudt.
- D. Een geïntegreerde nucleaire haven in de landgebonden en offshore SMR-toeleveringsketen door (nieuwe) nucleaire bedrijven aan te trekken die zich bezighouden met nucleaire splijtstof en radioactief afval.

Combinaties van deze rollen zijn mogelijk, bijvoorbeeld om rollen te veroveren in zowel de landgebonden als de offshore SMR-toeleveringsketen op verschillende tijdschalen.

Functies waarin de haven nucleaire materialen (splijtstof of afval) of nucleaire installaties behandelt, vereisen nucleaire vergunningen evenals specifieke nucleaire infrastructuur, veiligheidsmaatregelen, regelgeving en aansprakelijkheden. Deze gaan gepaard met aanzienlijke investeringen.

4.2 Aanbevelingen

Wij adviseren dat de haven van Rotterdam nu handelt, aangezien de SMR-toeleveringsketens nu nog open zijn en het vaststellen van een strategische positie tijd kost.

Hoe kan de haven van Rotterdam zich positioneren en voorbereiden om deze rollen effectief te vervullen?

Om het potentieel van de haven van Rotterdam in de SMR-toeleveringsketen te realiseren, bevelen wij de volgende stappen aan:

Stap 1: Definieer het ambitieniveau voor betrokkenheid bij de SMR-toeleveringsketen in lijn met de overkoepelende strategische visie van de haven voor 2050.

Stap 2: Organiseer een publiek-private samenwerking om ambities in de SMR-toeleveringsketen te realiseren.

Stap 3: Ontwikkel een gedeelde USP en een actieplan om de haven en haar bedrijven te positioneren in de SMR-toeleveringsketen.

Stap 4: Voer het actieplan uit en zorg dat aan randvoorwaarden wordt voldaan en uitdagingen worden opgelost.

Aan deze vier stappen kunnen specifieke maatregelen worden verbonden om de haven te positioneren in de SMR-toeleveringsketen. In de volgende paragrafen beschrijven we elk van deze aanbevolen stappen en bijbehorende maatregelen in meer detail.

4.2.1 Stap 1: Definieer het ambitieniveau voor betrokkenheid bij de SMR-toeleveringsketen in lijn met de overkoepelende strategische visie van de haven voor 2050

In de conclusies hebben we vier rollen (A-D) uiteengezet die de haven van Rotterdam, afhankelijk van haar ambitieniveau, in de SMR-toeleveringsketen zou kunnen vervullen. Deze rollen gaan gepaard met verschillende inspanningen, strategische voordelen en haalbaarheid.

De eerste stap is te bepalen welke rol past bij de ambitie van de haven en die aansluit bij de Havenvisie Rotterdam voor 2050. De gekozen rol moet als haalbaar en strategisch interessant worden beschouwd. Wij raden aan dit besluit te nemen binnen een werkgroep bestaande uit het Havenbedrijf Rotterdam, Deltalinqs en de gemeente Rotterdam, die samen de haven, de bedrijven in de haven en de lokale overheid vertegenwoordigen.

Om de besluitvorming in deze fase te ondersteunen, stellen we voor om negen factoren te overwegen die in de volgende tabel zijn vermeld. Voor elk van deze factoren hebben we onze eerste beoordeling per rol in Bijlage B verstrekt.

Besluitvormingsfactor	Beschrijving
Strategische aansluiting	In hoeverre sluit de rol aan bij de langetermijnvisie van de haven van Rotterdam, bestaande strategieën, energietransitie-ambities en gewenste positie binnen het Europese SMR-ecosysteem?
Economische waarde	In hoeverre versterkt deze rol mogelijk de concurrentiekracht van de haven, creëert zij zakelijke kansen en trekt zij investeringen aan?
Marktpotentieel	In hoeverre vergroot deze rol het potentieel voor de haven van Rotterdam om de wereldwijde/Europese SMR-markt en toeleveringsketen te betreden en een betekenisvol marktaandeel te veroveren?

Besluitvormingsfactor	Beschrijving
Haalbaarheid	Hoe realistisch is de implementatie van de rol gezien de bestaande industriële capaciteiten en de complexiteit van de implementatie (infrastructuur, investeringen, wettelijke vereisten, enz.)?
Investeringsbehoefte	In hoeverre zijn investeringen van verschillende stakeholders nodig of is (publieke/financiële) steun nodig?
Infrastructuur en ruimtebehoefte	In hoeverre is er nieuwe infrastructuur of zijn er specifieke eisen voor land/ruimte (footprint) nodig?
Risico op maatschappelijke en politieke acceptatie	In hoeverre is er een risico op verminderde publieke acceptatie of politieke steun die benodigd is voor een succesvolle implementatie?
Regelgevingscomplexiteit	Wat is het niveau van regulatoire paraatheid en welke vergunningsvereisten en institutionele kaders zouden nodig zijn om de rol mogelijk te maken?
Risico's en aansprakelijkheid	Welke operationele, financiële en juridische risico's zijn verbonden aan de implementatie van de rol?

Observatie vanuit stakeholderconsultaties met betrekking tot ambitieniveau

Hoewel dit buiten het bestek van deze studie valt, kwam de mogelijke inzet van een SMR in de haven van Rotterdam herhaaldelijk ter sprake tijdens interviews met stakeholders. Verschillende stakeholders noemden de lokale inzet van een SMR als een potentiële kans op de lange termijn om de decarbonisatie van de industrie te ondersteunen en te voorzien in betrouwbare, koolstofarme elektriciteit en proceswarmte. Hoewel deze studie de haalbaarheid van een dergelijke inzet niet beoordeelt, wijst de mate van belangstelling bij stakeholders erop dat dit onderwerp in de toekomst apart kan worden onderzocht en dat het in overweging kan worden meegenomen bij het vaststellen van het ambitieniveau.

4.2.2 Stap 2: Organiseer een publiek-private samenwerking om ambities in de SMR-toeleveringsketen te realiseren

De gekozen ambitie en positie in Stap 1 moeten vervolgens verder worden ontwikkeld en gerealiseerd. Wij raden aan om dit te doen in een bredere publiek-private samenwerking met geïnteresseerde lokale bedrijven en publieke partners (zoals de provincie Zuid-Holland, het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en de regionale ontwikkelingsmaatschappij InnovationQuarter), om steun en afstemming te waarborgen en voldoende capaciteit te creëren om acties uit te voeren.

Om deze publiek-private samenwerking tot stand te brengen, raden we aan om eerst bewustzijn te creëren over de kansen in de SMR-toeleveringsketen voor de haven en bedrijven in de haven. Het doel is vooral om het bewustzijn te vergroten bij relevante bedrijven. Dit kan via de bestaande communicatieactiviteiten van SmartPort, Deltalinqs en het Havenbedrijf Rotterdam, maar ook door het organiseren van een evenement voor geïnteresseerde bedrijven (bijvoorbeeld naar aanleiding van de publicatie van dit rapport of de besluitvorming in Stap 1). Verdere bewustwording, waar nodig, kan onderdeel zijn van de activiteiten van de publiek-private samenwerking.

In dit onderzoek hebben we op basis van beschikbare informatie en onze beoordeling bedrijven geïdentificeerd die mogelijk een rol zouden kunnen spelen in de SMR-toeleveringsketen. We raden aan om na te gaan of deze bedrijven daadwerkelijk interesse hebben om deel uit te maken van de SMR-toeleveringsketen, en of ze over de nodige capaciteiten en bereidheid beschikken om te investeren in business development met het oog op toetreding tot de SMR-toeleveringsketen. Geïnteresseerde bedrijven kunnen worden uitgenodigd voor het samenwerkingsplatform.

4.2.3 Stap 3: Ontwikkel een gedeelde USP en actieplan om de haven en haar bedrijven te positioneren in de SMR-toeleveringsketen

Het samenwerkingsplatform zou een gedeelde *unique selling point* (USP) voor de haven van Rotterdam richting belangrijke externe stakeholders in de SMR-toeleveringsketen (bijvoorbeeld niveau-1/2 bedrijven, zoals reactorleveranciers en hun industrialisatiepartners, en mogelijk de nationale overheid) moeten ontwikkelen. Deze USP is afgeleid van de gewenste rol van de haven van Rotterdam in de SMR-toeleveringsketen en de sterke punten en kansen die in hoofdstuk 3 zijn geïdentificeerd, en afgestemd op de behoeften van belangrijke stakeholders (behoefte aan gekwalificeerde leveranciers, logistieke vraag, behoefte aan strategische locaties, enz.).

Vervolgens moet er een actieplan worden opgesteld om de haven en de daar gevestigde bedrijven te positioneren in de SMR-toeleveringsketen. Dit moet onder meer bestaan uit gezamenlijke business development door een groep mensen met kennis van de nucleaire sector, zodat business development kan plaatsvinden op basis van een juist begrip van de sector, SMR's, regelgeving en vereisten. Business development omvat het onder de aandacht brengen van de USP en de gewenste rol in gesprekken met belangrijke stakeholders in de SMR-toeleveringsketen (waaronder reactorleveranciers) en op relevante SMR-conferenties. Bovendien kunnen deze gezamenlijke business developers lokale bedrijven helpen bij het ontwikkelen van hun SMR-aanbod en het afstemmen daarvan op de USP en de ambitie van de haven. Ten slotte moet de governance van het samenwerkingsplatform en de bijbehorende externe communicatiekanalen duidelijk zijn, zodat bedrijven of leveranciers hun weg naar het platform eenvoudig kunnen vinden.

Verdere aanbevelingen voor maatregelen onder het actieplan worden gegeven in Stap 4.

4.2.4 Stap 4: Voer het actieplan uit en zorg dat aan randvoorwaarden wordt voldaan en uitdagingen worden opgelost

Het actieplan moet worden uitgevoerd door een publiek-private samenwerking. Dit kan gebeuren in werkgroepen, verantwoordelijk voor specifieke maatregelen of actielijnen, of door een ondersteunende organisatie. Wij raden aan de volgende maatregelen uit te voeren onder het actieplan die gericht zijn op de voorbereiding op en positionering in de toeleveringsketen, maar ook om ervoor te zorgen dat aan de vereiste randvoorwaarden (bijv. regelgeving en personeel) wordt voldaan en geïdentificeerde uitdagingen worden opgelost:

- **Sluit aan bij nationale activiteiten rondom de nucleaire toeleveringsketen die door de nationale overheid worden georganiseerd voor de bouw van grote kerncentrales.** Dit kan lokale activiteiten voor de SMR-toeleveringsketen aanvullen en bedrijven in de haven helpen zich voor te bereiden op het toeleveren aan de nucleaire sector. Daarnaast kan inspiratie ook uit andere regio's worden gehaald: de regionale ontwikkelingsmaatschappijen in Zeeland, Noord-Brabant, Gelderland/Overijssel voeren diverse business development activiteiten uit om hun lokale bedrijven beter te positioneren in de nucleaire toeleveringsketen.
- **Faciliteren van matchmaking met reactorleveranciers en bedrijven in/nabij de haven van Rotterdam.** Matchmaking van bedrijven in de haven met supply chain managers bij SMR-leveranciers, vooral diegenen met een SMR dichtbij marktintroductie, kan bedrijven helpen zich beter te positioneren in de toeleveringsketen.
- **Faciliteren van en lobbyen voor een ondersteunende regelgeving voor offshore SMR's.** Regulering wordt beschouwd als een belangrijke belemmering voor offshore SMR's en voor havens die betrokken willen zijn bij offshore SMR's. Als de haven/het samenwerkingsplatform de ambitie heeft om een rol te spelen bij offshore SMR's, dan zouden Deltalinqs en het Havenbedrijf Rotterdam moeten lobbyen voor en bijdragen aan het opstellen van duidelijke en werkbare regelgeving voor offshore SMR's op nationaal en internationaal niveau.
- **Deel best practices en geleerde lessen tussen lokale bedrijven over het betreden van de**

SMR-toeleveringsketen. Het samenwerkingsplatform kan, samen met de hulp van betrokken bedrijven, best practices en lessen verzamelen van lokale bedrijven die al in de nucleaire sector werken of die al tot de SMR-toeleveringsketen zijn toegetreden. Vaak is er geen sprake van een belangenconflict, maar juist van een wederzijds belang bij het opbouwen van een sterk ecosysteem van (sub)leveranciers in de haven.

- **Inspelen op behoeften aan personeel en onderwijs door lopende nationale initiatieven (zoals de Nuclear Academy) te ondersteunen en te verbinden.** Arbeidsmarkt en onderwijs zijn een algemene zorg voor de industrie die in veel nationale initiatieven wordt aangepakt, ook specifiek voor kernenergie. Het ondersteunen van en samenwerken met deze initiatieven lijkt het meest efficiënt om eerste uitdagingen op dit gebied aan te pakken.

Voor individuele bedrijven:

- **Zorg dat uw bedrijf gekwalificeerd is voor de nucleaire toeleveringsketen (certificering en procedures).** Om dit te ondersteunen zou het samenwerkingsplatform kunnen overwegen om gezamenlijk professionele ondersteuning te organiseren.
- **Registreer uw bedrijf als leverancier bij SMR-leveranciers met een ontwerp dat al ver gevorderd is.** Hiervoor kan het samenwerkingsplatform informatie delen over hoe bedrijven zich als leverancier kunnen registreren.

4.2.5 Financiering van stappen en maatregelen

De aanbevolen stappen en maatregelen vereisen investeringen van betrokken publieke en private stakeholders in het samenwerkingsplatform en aanvullende externe financiering. Mogelijkheden voor externe publieke financiering zijn beperkt onder bestaande programma's en regelgeving, omdat de activiteiten niet zijn gericht op product- of procesinnovatie, maar op business development, marktcreatie en industriële ontwikkeling. Een deel van de maatregelen kan voldoen aan de eisen van bestaande publieke financieringsprogramma's (bijvoorbeeld met betrekking tot human capital) of kan in aanmerking komen voor ondersteuning op het gebied van regionale ontwikkeling of het aantrekken van buitenlandse investeringen (bijvoorbeeld om buitenlandse bedrijven naar de haven te trekken).

Wij adviseren om:

- Te onderzoeken of er bereidheid is bij deelnemers aan het samenwerkingsplatform om een financiële bijdrage of een bijdrage in natura te leveren aan onderdelen van het actieplan. Gezien de toegevoegde waarde van strategische samenwerking en gedeelde activiteiten verwachten wij dat dit haalbaar is.
- Met lokale en nationale overheden mogelijkheden te bespreken voor publieke cofinanciering, specifiek voor het samenwerkingsplatform en het actieplan. Gezien de strategische bijdrage van het publiek-private platform en de acties aan de doelstellingen van overheidsbeleid op het gebied van economie en energie, mede in relatie tot strategische autonomie, het concurrentievermogen van de industrie en nationale ambities op het gebied van kernenergie, kan publieke cofinanciering gerechtvaardigd zijn.
- De haalbaarheid van bijdragen uit bestaande financieringsprogramma's voor geselecteerde activiteiten onder het actieplan te onderzoeken. Mogelijk relevante programma's om te onderzoeken zijn JTF Rijnmond en EFRO-programma Kansen voor West.

Referenties

- [1] Small Modular Reactor Technology Catalogue (2024). A Supplement to the non-serial publication: Small Modular Reactors: Advances in Developments 2024. Vienna: IAEA.
- [2] Generation IV International Forum (GIF)(2014). Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
- [3] OECD Nuclear Energy Agency (OECD NEA)(2025). The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition. NEA No. 7737. Paris: OECD NEA.
- [4] European Commission (2025). European Industrial Alliance on Small Modular Reactors – Strategic Action Plan. Brussels: European Commission.
- [5] TNO (2024). Small Modular Reactors in the Dutch Energy System (study summary and supporting materials). The Hague: TNO.
- [6] TNO (2025). Integration of Nuclear Energy in the Energy System. TNO Report No. TNO 2025 R10612. The Hague: TNO.
- [7] Euratom Supply Agency (ESA)(2022). HALEU Report (May 2022). Luxembourg/Brussels: Euratom Supply Agency.
- [8] Euratom Supply Agency (ESA)(2024). Euratom Supply Agency Annual Report 2024. Luxembourg/Brussels: Euratom Supply Agency. (Published 2025)
- [9] International Atomic Energy Agency (IAEA)(2017). Industrial Involvement to Support a National Nuclear Power Programme. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-1.2. Vienna: IAEA.
- [10] International Atomic Energy Agency (IAEA)(2022). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Vienna: IAEA.
- [11] International Atomic Energy Agency (IAEA)(2014). Legal and Institutional Issues of Transportable Nuclear Power Plants: A Preliminary Study. IAEA Nuclear Energy Series. Vienna: IAEA.
- [12] NRG-PALLAS (2024). Localisation Perspectives of a Netherlands Nuclear New Build Programme – Supply Chain (Supply chain localisation / tiered hierarchy discussion). Petten: NRG-PALLAS.
- [13] OECD Nuclear Energy Agency (OECD NEA)(2021). Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities. Paris: OECD NEA.
- [14] U.S. Department of Energy (DOE)(n.d.). Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP): Advanced Reactor Demonstration Projects (programme overview and projects). Washington, DC: DOE Office of Nuclear Energy.
- [15] U.S. Department of Energy (DOE)(n.d.). HALEU Availability Program (programme overview). Washington, DC: DOE Office of Nuclear Energy.
- [16] World Nuclear Association (WNA)(2025). Facilitating Global Deployment of Floating Nuclear Power Plants (industry report). London: WNA

Bijlagen

Bijlage A Methodologie

A.1. Gedetailleerde onderzoeksvragen

#	Onderzoeksvraag
SMR's (inleiding)	
1	Wat zijn SMR's?
2	Wat zijn de verschillende soorten SMR's?
2A	Wat is de status van deze SMR's?
3	Welke bedrijven/actoren ontwikkelen/leveren SMR's?
4	In hoeverre is er al een toeleveringsketen voor SMR's?
5	Welke bedrijfscertificering of vergunning is (waarschijnlijk) nodig om in de SMR-toeleveringsketen te opereren?
Toeleveringsketen	
6	Hoe ziet de SMR-toeleveringsketen eruit?
6A	Hoe ziet de toeleveringsketen voor de splijtstof voor SMR's eruit? (bedrijven en actoren)
6B	Hoe ziet de toeleveringsketen van de componenten van SMR's eruit? (bedrijven en actoren)
6C	Hoe verschillen deze toeleveringsketens voor verschillende SMR-technologieën?
6D	In hoeverre is de toeleveringsketen voor landgebonden en offshoret toepassingen van SMR's verschillend?
Rollen en potentieel	
7	Welke bedrijven in de haven van Rotterdam leveren relevante diensten en producten voor de SMR-toeleveringsketen?
8	Welke potentiële rollen kan de haven van Rotterdam spelen in de SMR-toeleveringsketen?
8A	Wat is het potentieel van de haven van Rotterdam voor de productie en (voor)assemblage van SMR-componenten?

#	Onderzoeksvraag
8B	In hoeverre zou de bestaande maritieme en offshore-expertise van de haven van Rotterdam relevant kunnen zijn voor het ondersteunen van de productie en uitrol van SMR-modules?
8C	Welke rol zou de haven van Rotterdam kunnen spelen bij de veilige invoer, doorvoer en opslag van (verrijkt) uranium en kernsplijtstof voor SMR's?
8D	Hoe zou de haven van Rotterdam de ontmanteling van SMR kunnen ondersteunen door te demonteren, te recyclen of afgedankte modules terug te brengen?
Kansen, uitdagingen en aanbevelingen	
9	Wat zijn de kansen en uitdagingen voor de haven van Rotterdam om een rol te spelen in de toeleveringsketen voor SMR's?
9A	Zijn er regelgevende barrières voor de haven van Rotterdam om een rol te spelen in de toeleveringsketen van SMR's, met name bij de afhandeling en logistiek van kernsplijtstof en radioactief afval?
10	Hoe kan de haven van Rotterdam zelf een rol of positie verkrijgen in de toeleveringsketen van SMR's?
10A	Welke acties en fondsen kunnen helpen bij deze ambitie?

A.2. Methodologische aanpak

Deze studie werd uitgevoerd tussen januari en juli 2026 door Tractebel Engineering en Technopolis Group. In de studie werd een mixed-methods aanpak gehanteerd, waarbij kwalitatieve en kwantitatieve methoden werden toegepast. Meerdere methoden werden gebruikt om elk van de onderzoeksvragen te beantwoorden en zo de robuustheid van de bevindingen te waarborgen. Een overzicht van de methodologische aanpak staat weergegeven in Figuur 26.



Figuur 26: Overzicht van de methodologische aanpak

Deskstudie en data-analyse: de deskstudie bestond uit het analyseren van publiek beschikbare informatie uit betrouwbare nationale en internationale bronnen om een eerste antwoord op de onderzoeksvragen te formuleren en de analytische kaders voor de studie te ontwikkelen. De deskstudie werd aangevuld met data-analyse waarbij een lijst van bedrijven in het ecosysteem van de haven van Rotterdam werd opgesteld. Dat werd gedaan op basis van websites met bestaande lijsten van bedrijven in de haven en verder aangevuld met bedrijven die werden geïdentificeerd via deskstudie, interviews en de interne data science-tools van het studieteam (gebruikmakend van AI). Deze lijst is opgeschoond, gecontroleerd en verrijkt met verdere categorisatie en beoordelingen met behulp van AI en gecontroleerd

met deskundige beoordelingen van teamleden. Bedrijven buiten de scope van het onderzoek werden verwijderd, waarna de SMR-relevantie van de overige bedrijven werd beoordeeld. Bedrijven met gemiddelde of hoge relevantie werden in de analyse meegenomen en verder gecategoriseerd langs de analytische kaders voor de SMR-toeleveringsketen die in deze studie zijn gebruikt.

Interviews: om de deskstudie aan te vullen en te verrijken, werden diverse semigestructureerde interviews online afgenomen. Het doel van deze interviews was inzichten te verkrijgen om de strategische positie van de haven en haar bedrijven in de SMR-toeleveringsketen te versterken en om kansen te identificeren. Veertien organisaties, waaronder SMR-leveranciers, bedrijven in de haven van Rotterdam, toezichthouders en overheidsinstanties, werden geïnterviewd. Een overzicht van de geïnterviewden staat in paragraaf A.3.

Werksessies: interne en externe werksessies werden georganiseerd om kennis van deskundigen en stakeholders te benutten. Er werden drie interne werksessies georganiseerd met de interne deskundigen van Tractebel om onderzoeksvragen te bespreken, technische inzichten te verzamelen, bevindingen te valideren, gezamenlijk betekenis te geven aan de bevindingen, aannames te controleren, kennishiaten te identificeren, interpretaties te verfijnen en advies van deskundigen in te winnen. Er werd een externe werksessie georganiseerd met bedrijven en relevante stakeholders van de haven van Rotterdam, die in paragraaf A.3 zijn vermeld, en fysiek plaatsvond in Rotterdam. Het doel van de interactieve, gemodereerde werksessie was het delen, bespreken en valideren van de voorlopige bevindingen, het vaststellen en valideren van kansen en uitdagingen, het vaststellen en valideren van acties om de haven van Rotterdam te positioneren in de SMR-toeleveringsketen, en het prioriteren van acties en de mogelijke rol daarbij van betrokken partijen. Deze externe werksessie werd bijgewoond door twintig stakeholders van relevante lokale bedrijven, ondernemersverenigingen, de havenorganisatie, overheidsinstanties, SMR-leveranciers en -ontwikkelaars en toezichthouders.

Analyse en rapportage: de bevindingen uit de beschreven methoden zijn geanalyseerd, gesynthetiseerd en vastgelegd in dit rapport. Het conceptrapport werd voor commentaar voorgelegd aan het opdrachtgeversconsortium en vervolgens afgerond en automatisch vertaald (met handmatige controle) naar het Nederlands.

A.3. Geraadpleegde stakeholders

Interviews

In totaal zijn veertien organisaties geïnterviewd. Dit betrof zeven bedrijven binnen het Rotterdamse havenecosysteem, vijf SMR-leveranciers en -ontwikkelaars, één overheidsinstantie en één toezichthouder. De volgende tabel geeft een overzicht van de specifieke organisaties, het type stakeholder en de sector waarin zij actief zijn.

Organisatie	Type belanghebbende	Sector
Damen Shipyards Group	Bedrijf	Scheepsbouw
Siemens Energy	Bedrijf	Energietechnologie
BAM	Bedrijf	Bouw- en infrastructuuraannemer
Huisman	Bedrijf	Zware techniek en machineproductie
Bilfinger Engineering & Maintenance BeNe	Bedrijf	Aannemer voor industriële diensten en onderhoud
Broekman Logistics / Broekman Project Services	Bedrijf	Logistiek
Mammoet	Bedrijf	Zwaar tillen en transport
Gemeente Rotterdam	Publieke organisatie	Overheid
ANVS	Toezichthouder	Overheid
Thorizon	Leverancier/ontwikkelaar	Kernenergie/SMR
Allseas	Leverancier/ontwikkelaar	Kernenergie/SMR
Rolls-Royce SMR	Leverancier/ontwikkelaar	Kernenergie/SMR
ULC-energy	Leverancier/ontwikkelaar	Kernenergie/SMR
Saltfoss	Leverancier/ontwikkelaar	Kernenergie/SMR

Werksessie

In totaal namen twintig stakeholders van twaalf verschillende organisaties deel aan de werksessie. Dit betrof vijf bedrijven binnen het ecosysteem van de haven van Rotterdam, twee SMR-leveranciers, twee overheidsinstanties, een havenbedrijf, een toezichthouder en een ondernemersvereniging. De volgende tabel geeft een overzicht van de specifieke organisaties, het type stakeholder en de sector waarin zij actief zijn.

Organisatie	Type belanghebbende	Sector
Huisman	Bedrijf	Zware techniek en machineproductie
Bilfinger Engineering & Maintenance BeNe	Bedrijf	Aannemer voor industriële diensten en onderhoud
Broekman Logistics / Broekman Project Services	Bedrijf	Logistiek
Bureau Veritas	Bedrijf	Testen, inspectie en certificering
Royal Haskoning	Bedrijf	Adviesbureau voor engineering, ontwerp en projectmanagement
Deltalinqs	Ondernemersvereniging	Haven en Industrie
Havenbedrijf Rotterdam	Havenbedrijf	Overig
Gemeente Rotterdam	Publieke organisatie	Overheid
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat	Publieke organisatie	Overheid
DCMR	Toezichthouder	Overheid
Thorizon	Leverancier/ontwikkelaar	Kernenergie/SMR
ULC-energy	Leverancier/ontwikkelaar	Kernenergie/SMR
SmartPort	Vereniging	Haven en Industrie

Bijlage B

Beoordelingsmatrix voor besluitvormingsfactoren

Figuur 27 geeft een initiële beoordeling van elk van de voorgestelde besluitvormingsfactoren die in stap 1 van paragraaf 4.2 zijn geïntroduceerd (Aanbevelingen). Deze matrix is bedoeld om, samen met de belangrijkste stakeholders, de besluitvorming over het ambitieniveau en de beoogde rol van de haven in de SMR-toeleveringsketen te ondersteunen, in lijn met de overkoepelende strategische visie van de haven voor 2050.

	A - Logistieke of transitknoop voor SMR-onderdelen, en mogelijk brandstof en afval, die het Europese vasteland binnenkomen of verlaten	B - Industrieel ecosysteem dat bijdraagt aan de bouw en integratie van SMR-onderdelen en componenten voor onshore- en offshore SMR's	C - Strategische Europese nucleaire haven voor internationale maritieme routes, die nucleair aangedreven vaartuigen (en duwbakken) bouwt en onderhoudt	D - Geïntegreerde nucleaire haven in de onshore- en offshore SMR-toeleveringsketen door nucleaire bedrijven aan te trekken die zich bezighouden met brandstof en afval
Strategische fit Aansluiting bij bestaande strategieën en ambities	GEMIDDELD Sluit aan bij ambitie leidend te blijven in logistiek, maar versterkt het industriële cluster niet verder.	HOOG Sluit aan bij ambitie voor een concurrerend industrieel cluster en draagt bij aan de logistieke rol van de haven.	MOGELIJK HOOG Sluit aan bij ambitie voor een concurrerend industrieel cluster en leidend logistieke positie. Maar: is een sterke nucleaire rol ook ambitie?	MOGELIJK HOOG Sluit aan bij ambitie voor schone/klimaatneutrale industrie en concurrerend industrieel cluster. Maar: is een sterke nucleaire rol ook ambitie?
Economische waarde Potentieel om concurrentiekracht te versterken, bedrijvigheid te creëren en investeringen aan te trekken	GEMIDDELD Inkomsten verwacht uit transit, gespecialiseerde logistiek, heavy-lift en douane als de SMR-markt zich ontwikkelt.	HOOG Naast A, meer bedrijvigheid voor de industrie als de SMR-markt zich ontwikkelt.	ZEER HOOG Als nucleaire voortstuwing zich ontwikkelt, kan dit leiden tot een sterke concurrentiepositie, nieuwe bedrijvigheid en investeringen.	ZEER HOOG Als de SMR-markt en nucleaire voortstuwing zich ontwikkelen, worden nieuwe bedrijvigheid, investeringen en concurrentiepositie verwacht.
Marktpotentieel Potentieel om toe te treden tot SMR-markt en toeleveringsketen en significant marktaandeel te verwerven	HOOG Potentieel om een van de belangrijkste havens voor transport/logistiek te zijn.	HOOG Potentieel om een rol te spelen in industriële levering, integratie en gekwalificeerde productie.	MOGELIJK ZEER HOOG Bij koploperspositie potentieel om significant marktaandeel te verwerven met gespecialiseerde rol/USP; afhankelijk van ontwikkeling nucleaire voortstuwing.	MOGELIJK ZEER HOOG Bestaande markt, waarschijnlijk groeiend; integratie biedt strategisch potentieel om marktaandeel te verwerven en een industrieel ecosysteem te bouwen.
Haalbaarheid Mate waarin uitvoering van deze rol haalbaar is	ZEER HOOG Verschilt niet van huidige activiteiten, vooral bij niet-radioactieve componenten (lage complexiteit).	HOOG Bouwt voort op bestaande industriële, engineering- en maritieme capaciteiten (lage/matige complexiteit).	GEMIDDELD Vereist specifieke nucleair-maritieme capaciteiten, veiligheidsafspraken en dedicated infrastructuur (hoge complexiteit).	GEMIDDELD Vereist aantrekken van nucleaire bedrijven, ontwikkelen van vergunningspaden en beheer van brandstof/afvalreizen (hoge/zeer hoge complexiteit).
Investeringsbehoefte Benodigd niveau van investering of ondersteuning	LAAG Vereist weinig investering naast businessdevelopment/marketing.	GEMIDDELD Vereist intensiever businessdevelopment en mogelijk investeringen door bedrijven.	HOOG Naast businessdevelopment: investeringen in nucleaire voortstuwingscapaciteiten, infrastructuur, regelgeving, enz.	ZEER HOOG Naast businessdevelopment: investeringen om bedrijven aan te trekken en in infrastructuur, compliance, enz.
Infrastructuur- en ruimtebehoefte Ruimtebeslag en infrastructuureisen	LAAG Bestaande infrastructuur, weinig/geen extra ruimtebeslag; mogelijk dedicated zones voor gevoelige lading.	LAAG Grotendeels bestaande infrastructuur en industriële capaciteit.	HOOG Vereist dedicated servicegebieden, beveiligingsmaatregelen en mogelijk gespecialiseerde aanleginfrastructuur.	ZEER HOOG Vereist grond voor nieuwe faciliteiten/bedrijven en mogelijk speciale zones voor brandstof-/afvalactiviteiten.
Maatschappelijk/politiek acceptatierisico Risico op minder acceptatie en publieke steun	LAAG Niet wezenlijk anders dan de huidige situatie, vooral bij logistiek van componenten.	LAAG Betreft niet-radioactieve componenten en leidt tot verdere industriële ontwikkeling.	MOGELIJK HOOG Afhankelijk van acceptatie van nucleaire vaartuigen en onderhoud daarvan in de haven.	MOGELIJK HOOG Afhankelijk van acceptatie van nucleaire industrie en brandstof-/afvalactiviteiten in de haven.
Regelgevende complexiteit Regelgevingsgereedheid, eisen en vergunningverlening	LAAG Niet wezenlijk anders dan de huidige situatie, vooral bij logistiek van componenten.	GEMIDDELD Vooraf nucleaire kwaliteitsborging, standaarden en leverancierskwalificatie voor bedrijven.	HOOG Nucleaire maritieme veiligheid, beveiliging, internationale regelgevingsinterfaces, servicevereisten, enz.	ZEER HOOG Volledige nucleaire vergunningverlening, safeguards, beveiliging en aansprakelijkheidseisen.
Risico's en aansprakelijkheid Operationele, financiële en juridische risico's	LAAG Niet wezenlijk anders dan de huidige situatie, vooral bij logistiek van componenten.	LAAG Niet wezenlijk anders dan normale bedrijfsvoering in deze industrieën.	HOOG Onderhoud van nucleair aangedreven vaartuigen brengt financiële, operationele, juridische en reputatierisico's mee.	ZEER HOOG Behandeling/opslag van brandstof/afval en regelgevende verantwoordelijkheden leggen aanzienlijke operationele, financiële en juridische risico's op.

Figuur 27: Initiële beoordeling per rol en besluitvormingsfactor ter ondersteuning van de keuze van het ambitieniveau

Colofon

©SmartPort

September 2026

Ontwerp: IJzersterk.nu

Visualisatie op de cover: Tractebel Engineering

Alle opgenomen informatie is eigendom van de consortiumpartners uit dit onderzoeksproject.
Reproductie van inhoud, geheel of gedeeltelijk, is toegestaan mits bronvermelding is toegepast.

Vrijwaring

SmartPort heeft de grootst mogelijke zorg besteed aan de samenstelling van dit document. Desondanks accepteert SmartPort geen aansprakelijkheid voor eventuele onjuistheden in de informatie, noch voor schade, overlast of ongemak dan wel andersoortige gevolgen die voortvloeien uit of samenhangen met het gebruik van deze informatie.



connecting
knowledge

HEEFT U VRAGEN?

SmartPort
info@smartport.nl