

RAPPORT

Ruimtelijke en Energetische inpassing Small Modular Reactors (SMR's) bij de industrie

Detailstudie t.b.v. beleidsontwikkeling SMR's

Klant: Ministerie van Klimaat en Groene Groei

Referentie: BK6813-HAS-XX-XX-RP-X-0001

Status: S0/P01.01

Datum: 28 november 2025

Inhoud

1	Management samenvatting	8
2	Inleiding	11
2.1	Bronnen en aanpak	11
2.2	Leeswijzer	12
3	Context SMR in de Schelde-Deltaregio	13
3.1	Context en afbakening	13
3.1.1	Onzekerheden in data van het toekomstig energiesysteem	14
3.2	Toekomstige elektriciteitsvraag Schelde-Deltaregio	15
3.3	Toekomstige warmtevraag	15
3.4	Aanbod van energie (wind op zee, kernenergie)	17
4	Beschikbare Ruimte	20
4.1	Potentiële percelen binnen het cluster	20
4.2	Selectie casussen	22
5	Overzicht typen SMR's	24
5.1	SMR-Technologieën	24
5.2	Gesprekken met techniekleveranciers	27
5.3	Modus operandi van SMR's	27
5.4	Leveringszekerheid van een SMR	29
5.5	Brandstofcyclus en logistiek Gen III+ en Gen IV SMR	29
5.6	Investeringskosten SMR's	31
6	Algemene overwegingen inpassing SMR	36
6.1	Koelsystemen	38
6.2	Tijdslijn voor introductie van SMR's in Nederland	40
6.3	Vergunningsaspecten conventioneel en nucleair	43
6.4	Veiligheidstechnische aspecten	46
6.5	SMR-veiligheidsaspecten van locatiekeuze en karakterisatie	47
7	Casus 1 – SMR voor de meter, in het cluster	50
7.1	Energetische inpassing	50
7.1.1	Elektriciteit	50
7.1.2	Leveringstemperaturen van SMR's	53
7.1.3	Warmte	53
7.1.4	Westerschelde-Noord	55
7.1.5	Westerschelde-Zuid	56

7.1.6	West-Brabant	57
7.2	Ruimtelijke inpassing	58
7.2.1	Leefomgeving	58
7.2.2	Veiligheid	59
7.2.3	Ecologie	60
7.2.4	Hoogwaterbescherming	62
7.2.5	Koelwaterbehoefte	63
7.2.6	Elektrische netaansluiting	64
7.2.7	Tussenconclusie: beschikbare ruimte voor SMR in cluster	65
8	Casus 2 – SMR achter de meter bij Dow	68
8.1	Energetische inpassing	68
8.1.1	Huidig en toekomstig energiesysteem van Dow	68
8.1.2	Inpassing SMR's	71
8.2	Ruimtelijke inpassing	74
8.2.1	Aangewezen gronden en bestaande functies	74
8.2.2	Leefomgeving	75
8.2.3	Veiligheid	76
8.2.4	Ecologie	77
8.2.5	Hoogwaterbescherming	77
8.2.6	Tussenconclusie	78
9	Vergelijking van casussen op basis van multi-criteria-analyse	79
10	Conclusies & Aanbevelingen	81
10.1	Conclusies SMR-inpassing in de Schelde-Delta	81
10.2	Aanbevelingen	82
11	Evaluatie en Lessen	83
12	Referenties	85

Tabellen

Tabel 4-1 Selectie Casussen met beschrijving	22
Tabel 5-1: Overzicht SMR criteria	26
Tabel 5-2: Overzicht brandstoffenmerken van geselecteerde SMR-ontwerpen	30
Tabel 5-3: Laag, Midden en Hoog investeringscondities	32
Tabel 5-4: Verschillende factoren die de LCOE beïnvloeden	32
Tabel 6-1: Thema's die worden meegenomen bij de analyse ruimtelijke inpassing	36
Tabel 6-2 Koeltechnieken en aspecten	38
Tabel 6-3: Veiligheidsaspecten Gen III+ en Gen IV	46

Tabel 6-4: Verschillende richtlijnen waar rekening mee gehouden moet worden	48
Tabel 7-1: Ruimtelijke inpassing SMR's in het Schelde-Delta cluster	66
Tabel 8-1: Criteria Energetische inpassing SMR	71
Tabel 8-2: Andere aspecten energetische inpassing	71
Tabel 8-3: Geschatte CO ₂ reductie van een SMR ten opzichte van de alternatieven.	72
Tabel 8-4: Verschillende mogelijkheden vervanging van de Elsta centrale door een SMR	73
Tabel 9-1: Overzicht Multi-criteria Analyse	79
Tabel 12-1 Energievraag SMR in de verschillende scenario's	90

Figuren

Figuur 3-1 Schelde-Deltaregio partners (links) en Scope 1 Emissiereductie (rechts)	13
Figuur 3-2: Spark Delta (links) en Hydrogen Delta Programma	14
Figuur 3-3 Verwachte groei in (piek)capaciteit (GW) in de Schelde-Deltaregio	15
Figuur 3-4 Schematische weergave van de methodiek ter bepaling van de totale warmtevraag	16
Figuur 3-5: Prognose aardgas Schelde-Deltaregio	17
Figuur 3-6 Ontwikkeling opgestelde productiecapaciteit (GWe) in de Schelde-Deltaregio	17
Figuur 3-7 Elektriciteitsbalans Schelde-Deltaregio in GWh/jaar (productie en verbruik)	18
Figuur 4-1 De uitgegeven (blauw) en uitgeefbare ruimte (groen) van de Schelde-Deltaregio	20
Figuur 4-4: Overzichtskaart te nader te onderzoeken gronden	21
Figuur 4-2: Gronden rondom Dow (linksboven) en de Ambachten.	21
Figuur 4-3: Gronden rondom Sas van Gent en Axelse vlakte	21
Figuur 4-5: Gronden bij het Sloegebied en industrieterrein haven Vlissingen	21
Figuur 5-1 Versimpelde weergave van een SMR volledig ingezet voor elektriciteitsproductie	28
Figuur 5-2 Versimpelde weergave van een SMR volledig ingezet voor warmtelevering	28
Figuur 5-3 Versimpelde weergave van een SMR volledig ingezet in cogeneratie-modus	29
Figuur 5-4: Typische CAPEX-verdeling SMR (NOAK); bron: INL, IAEA	31
Figuur 5-5: Indicatieve cumulatieve kasstroomontwikkeling van een SMR-energiecentrale	33
Figuur 6-1: Indicatieve tijdlijn ontwikkeling realisatie commerciële Gen III+ SMR in Nederland	42
Figuur 7-1 Elektriciteitsvraag per gebied tot 2050	50
Figuur 7-2 Vergelijking elektriciteitsaanbod en vraag per gebied in 2025 en 2050	51
Figuur 7-3. Potentiële locatie voor de bouw van 2 kerncentrales in het Sloegebied	52
Figuur 7-4. Warmtevraag opgesplitst per gebied	53
Figuur 7-5: Sas van Gent en Axelse vlakte met contouren gevoelige objecten	59
Figuur 7-6: Sloegebied met contouren rondom gevoelige objecten van 500 en 1.500 meter	59
Figuur 7-7: Beschermd gebied rondom Sas van Gent en de Axelse Vlakte	61
Figuur 7-8: Infrastructuur rondom de Mosselbanken / Dow Terneuzen	65

Figuur 8-1: Versimpeld processchema van het huidige energiesysteem van Dow	69
Figuur 8-2: Versimpeld processchema van het energiesysteem rond 2035-2040.	70
Figuur 8-3: Versimpeld processchema* van de situatie rond 2050	70
Figuur 8-4: Dow Terrein en omliggende ruimtelijke functies	75
Figuur 8-5: Gevoelige objecten op 500 en 1000 meter vanaf locatie de Mosselbanken	76
Figuur 8-6: Nadere beoordeling nodig rondom de Mosselbanken: bestaande risicocontouren	76
Figuur 8-7: Externe veiligheid en infrastructuur rondom locatie de Mosselbanken	76
Figuur 8-8: Beschermd gebied rondom locatie de Mosselbanken	77
Figuur 8-9: Overstromingskansen locatie de Mosselbanken	77
Figuur 8-10: Maximale waterdiepte in meters, locatie de Mosselbanken	77
Figuur 8-11: Ecologie, risicocontouren en leefomgeving 500 meter bij de Mosselbanken	78
Figuur 12-1 Versimpeld processchema van de huidige kraakinstallatie bij Dow	88
Figuur 12-3 Versimpeld processchema van de situatie rond 2035-2040	89
Figuur 12-4 Versimpeld processchema van de situatie rond 2050	90

Acroniemen

Acroniem	Acroniem beschrijving
ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
ATR	Auto Thermal Reactor (Autothermische Reforming)
CAPEX	Capital Expenditures (Investeringskosten)
EPC	Engineering, Procurement & Construction
EPCM	Engineering, Procurement & Construction Management
EPR	European Pressurised Reactor
FOAK	First-of-a-kind (eerste SMR gebouwd op industriële schaal)
HALEU	Hoog-verrijkt uranium
IDC	Interest During Construction
kWe	Elektrisch vermogen
kWth	Thermisch vermogen
LCOE	Levelised Costs of Energy (genivelleerde elektriciteitskosten)
LCOH	Levelised Costs of Heat (genivelleerde warmtekosten)
LEU	Laag-verrijkt uranium
MBA	Milieubelastende activiteit
MOX	Gemengde oxiden
MWe	Elektrisch vermogen
MWth	Thermisch vermogen
MWh	Energie hoeveelheid
NOAK	Nth-of-a-kind (commercieel beschikbare SMR)
NPE	Nationaal Plan Energiesysteem
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPEX	Operational Expenditures (Operationele Kosten)
PEH	Programma Energiehoofdstructuur
Seveso-inrichting	Bedrijf dat grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen produceert, verwerkt, gebruikt of opslaat
SMR	Small Modular Reactor
SOEC	Solid Oxide Electrolysis Cell (hogetemperatuurelektrolyse)
TRISO	TRi-structural ISOtropic
TRL	Technical Readiness Level
UO ₂	Uranium Dioxide
WKK	WarmteKrachtKoppeling

1 Management samenvatting

In deze studie is onderzocht hoe Small Modular Reactors (SMR's) energetisch en ruimtelijk kunnen worden ingepast in de Schelde-Deltaregio en de industrie. Het doel van deze studie is te verkennen of en onder welke condities SMR's een bijdrage kunnen leveren aan de verduurzaming van de industriële energievoorziening en leveringszekerheid in het cluster en de industrie in het algemeen.

Bij dit rapport hoort een niet-publieke bijlage met detailinformatie over de technische onderbouwing van de casus Dow Terneuzen en onderliggende data-analyses.

Cluster

De Schelde-Deltaregio kent een groot en groeiend energieverbruik, met name door de chemische industrie. Tegelijkertijd is er momenteel én op termijn een structureel overschot aan elektriciteit door het harder groeiende aanbod uit wind op zee en de mogelijke komst van grootschalige kerncentrales. Naar verwachting blijft de warmtevraag van de industrie substantieel en kan de waterstofvraag in het cluster maar deels met lokale productie worden ingevuld. De meerwaarde van SMR's ligt in deze regio daarom niet primair in extra elektriciteitsproductie, maar juist in de mogelijkheid om naast elektriciteit ook hoogwaardige warmte en waterstof te leveren, direct gekoppeld aan industriële afnemers.

Hiertoe zijn twee casussen onderzocht:

- Casus 1 – Publiek, cluster breed (voor de meter): een SMR die elektriciteit en eventueel warmte levert aan meerdere industriële partijen in de regio.
- Casus 2 – Privaat, achter de meter bij Dow: een SMR op het terrein van Dow als vervanging van hun Elsta warmtekrachtcentrale, direct gekoppeld aan de interne elektriciteits- en warmtevraag.

Ruimtelijke inpassing

De analyse van de leefomgeving, externe veiligheid, ecologie, koelwater en hoogwaterbescherming toont dat er een beperkt aantal geschikte locaties in het cluster, met mitigerende maatregelen mogelijk zijn. Alle onderzochte locaties liggen in of nabij beschermde natuurgebieden (Natura 2000 en NNN). Tijdens de aanlegfase is stikstofdepositie een belangrijk knelpunt: overschrijding van drempelwaarden ligt voor de hand, waardoor een Passende Beoordeling en een omgevingsvergunning voor een Natura 2000-activiteit vereist zijn. Realisatie binnen een NNN-gebied leidt bovendien tot direct verlies van beschermde natuurgonden. Nader ecologisch onderzoek per locatie is noodzakelijk om de feitelijke geschiktheid te bepalen.

De drukte van andere energieprojecten vormt een uitdaging, het meest kansrijk lijken het Sloegebied en Dow Terneuzen, door de ligging aan de Westerschelde, voldoende ruimte en de nabijheid van mogelijke aansluitingen op het 380 kV net. De Axelse Vlakte ligt verder van de Westerschelde af, waardoor het aangewezen zou zijn op koeltorens of koelmodules. Daarnaast blijkt de locatie ecologisch beperkter. Sas van Gent lijkt minder geschikt vanwege de ruimte, geen mogelijkheden tot oppervlakte koeling (alternatieve koeling is mogelijk) en grotere afstanden tot de netaansluitingspunten. De Mosselbanken komt als aangrenzend Dow-perceel naar voren als reële optie, maar ligt binnen de huidige veiligheidscontouren waardoor aanvullend onderzoek nodig is.

Kosten en businesscase

Van de verschillende SMR-technologieën zal Gen III+ als eerste commercieel beschikbaar komen, welke geschikt is voor elektriciteit, maar onvoldoende hoge temperaturen voor proceswarmte levert. Gen IV biedt wel hoge temperatuur (400–600°C) én is geschikt voor warmte en waterstofproductie, maar is pas

na 2040 realistisch. Daarnaast vereist deze technologie dat nieuwe brandstofketens (zoals TRISO, HALEU) doorontwikkeld worden naar een commercieel niveau en aanvullende veiligheidsnormen.

Het is op dit moment niet mogelijk om betrouwbare uitspraken te doen over de toekomstige kosten van SMR's. De technologie bevindt zich nog in een vroege ontwikkelfase en zal pas op middellange termijn, over ongeveer vijftien jaar, grootschalig beschikbaar zijn. Daardoor zijn huidige kosteninschattingen voornamelijk gebaseerd op modelberekeningen en aannames, die gepaard gaan met aanzienlijke onzekerheid. Uit de literatuur blijkt dat SMR's kapitaalintensief zijn: investeringskosten worden momenteel geschat rond de €3.000–7.000/kWe, met een LCOE €60–120/MWh. Hoewel SMR's in theorie voordelen bieden door standaardisatie, kortere bouw tijden en leereffecten, moeten deze nog in de praktijk worden bewezen. Recente ervaringen met grote kerncentrales tonen aan dat dergelijke factoren de totale projectkosten aanzienlijk kunnen verhogen. Een succesvolle businesscase vereist overheidsregie, voorspelbare vergunningen, seriebouw/standaardisatie en integratie met infrastructuur (stoomleidingen, koelwater, net). Zonder naast de productie en verkoop van elektriciteit aanvullende verdienmodellen mee te nemen, zoals warmte en waterstof, is de businesscase voor het plaatsen van een SMR in het cluster beperkt.

Investerings- en risicodeling

De industrie is terughoudend om zich voor 30–40 jaar te committeren aan SMR's zolang commerciële voorbeelden (FOAK) ontbreken. Investeringsbereidheid is laag door hoge technische en financiële risico's, het sterk gereguleerde nucleaire kader en afhankelijkheid van overheidsbeleid. Dit maakt SMR's onaantrekkelijk zonder duidelijke risicodeling met de overheid.

Beleidsboodschap en aanbeveling

Voor bredere elektriciteitsproductie zijn SMR's in de Schelde-Deltaregio, waar een structureel overschot aan elektriciteit verwacht wordt, minder zinvol. Van de onderzochte percelen lijken de Mosselbank nabij Dow Terneuzen en het Sloegebied de enige realistische locaties; Gen III+ kan op korte termijn elektriciteit leveren, maar niet de benodigde proceswarmte; Gen IV is qua energetische inpassing (met name warmte technisch) en intrinsieke veiligheid kansrijker, maar zal niet voor 2040 beschikbaar zijn. Het realiseren van een SMR achter de meter bij een grote industriële afnemer met een grote warmte én elektriciteitsvraag, zoals bijvoorbeeld Dow is mogelijk aantrekkelijker dan een publieke, clusterbrede SMR in de Schelde-Deltaregio.

1. **Kies voor verdere uitwerking daar waar de eerste commerciële SMR het meest kansrijk is:** De meerwaarde van SMR's in de Schelde-Delta regio ligt vooral in de directe koppeling met grote industriële afnemers: met voldoende vraag aan elektriciteit én warmte (en eventueel waterstof). Bij grote industriële afnemers kunnen de stabiele afname en lange contractuur worden gevonden die nodig zijn om een SMR te ontwikkelen en rendabel te exploiteren. Bovendien beschikken industriële clusters vaak over de bestaande infrastructuur, zoals stoom- en warmtenetten en een aansluiting op het hoogspanningsnet.
2. **Creëer een aantrekkelijk investeringsklimaat door publieke en private risicodeling te organiseren:** De ontwikkeling van SMR's vraagt om vroege betrokkenheid en garanties van de overheid, omdat private partijen de financiële en technologische risico's niet zelfstandig kunnen dragen. Er liggen kansen voor Nederland in de nog niet volledig uitgerijpte toeleveringsketens voor SMR's: productiefabrieken, modulaire bouw, gespecialiseerde toeleveranciers en aannemers zijn uiteindelijk essentieel om de seriebouw mogelijk te maken.
3. **Ontwikkel richtafstanden voor SMR's** en veranker deze in een handreiking welke praktische input geeft bij omgevingstrajecten voor provincies. Ontwikkel deze richtafstanden voor ruimtelijke



inpassing, passend bij het schaalniveau en omgevingseffecten van dit type installaties. Dit zorgt voor een versneld en transparant, consistent vergunningstraject dat meer overzicht creëert in de mogelijkheden voor inpassing van SMR's.

2 Inleiding

Small Modular Reactors (SMR's) zijn energiecentrales gebaseerd op kleine kernreactoren. Ten opzichte van conventionele kerncentrales kennen SMR's een aantal onderscheidende kenmerken die relevant zijn voor de ontwikkeling van beleid. SMR's hebben door hun kleinere schaal en modulaire karakter een kortere bouwtijd, waardoor zij mogelijk sneller en flexibeler kunnen worden ingezet en beter aansluiten bij de toenemende vraag naar modulaire, lokaal inpasbare energieoplossingen. De lagere initiële investeringskosten en het modulaire karakter maken SMR's aantrekkelijker voor private initiatiefnemers en samenwerkingsverbanden. Tegelijkertijd vraagt deze andere schaal om een aangepaste beleidsmatige en juridische benadering, op onder andere het vlak van bevoegd gezag, financiering en ruimtelijke afweging.

Deze studie is uitgevoerd in het kader van de ontwikkeling van de nationale strategie op de inzet van SMR's (Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2025) en gericht op de inzet in de energie-intensieve industrie. Het kabinet verkent de mogelijkheden voor SMR's nadrukkelijk in de context van industriële clusters te verkennen omdat SMR's in potentie geschikt om direct in te spelen op de specifieke elektriciteits- en warmtebehoefte van industriële grootgebruikers en zo koppelkansen te realiseren met andere verduurzamingstrajecten binnen het industriële cluster.

Deze studie is ingebed in het *programmaliijn 2 Anticiperen* van het nationale SMR-programma. In deze studie wordt een casus in de Schelde-Deltaregio uitgewerkt. Dit cluster kent een hoge concentratie van energie-intensieve industrie met een sterke afhankelijkheid van betaalbare en betrouwbare energievoorziening én een directe koppeling met de nationale energie-infrastructuur. Dit maakt dat de potentie voor een levensvatbare casus voor een SMR in deze regio hoog is. In deze context worden twee voorbeeldconfiguraties onderzocht waarmee inzicht kan worden verkregen in zowel de private als publieke toepassingen van SMR-technologie:

1. **(Publiek) Een SMR voor de meter** ten behoeve van het gehele cluster
2. **(Privaat) SMR achter de meter** bij Dow Terneuzen

De haalbaarheid wordt bepaald via een integrale techno-economische, energetische en ruimtelijke analyse met aandacht voor veiligheid, systeemintegratie en operationele randvoorwaarden. Hiermee genereert de studie generieke lessen voor andere industriële clusters in Nederland. De studie levert daarmee een beleidsmatig kader om inzicht te krijgen hoe SMR's kunnen bijdragen aan de verduurzaming van de industrie, hoe dit zich verhoudt tot bestaande beleidsprogramma's zoals het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) en het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) en welke randvoorwaarden noodzakelijk zijn om de eerste initiatieven te faciliteren.

2.1 Bronnen en aanpak

Voor deze studie is gebruikgemaakt van een breed palet aan informatiebronnen. Gesprekken met betrokken partijen, waaronder Dow Terneuzen, de Smart Delta Resources (SDR) en diverse marktpartijen (OEMs en projectontwikkelaars) leverden actuele informatie op over energieverbruik, technische specificaties en mogelijkheden van de SMR-technologie, ruimtelijke plannen en uitbreidingsopties.

De uitkomsten van deze interviews zijn aangevuld met openbare datasets, zoals de laatste update van de Cluster Energiestrategie (CES) 3.0, technische literatuur over SMR-prestaties, internationale referentieprojecten en relevante beleidsdocumenten, zodat de analyse aansluit bij zowel de praktijk als het actuele beleid.

Daarnaast is gebruik gemaakt van geografische data om de ruimtelijke component zo zorgvuldig mogelijk te beoordelen. Door de combinatie van onder meer GIS-kaarten van het clustergebied, veiligheidscontouren, milieuzonering en infrastructuurkaarten (elektriciteitsnet en waterstofnetwerk) ontstaat een integraal en actueel overzicht van het gebied.

De beoordeling van de casussen is uitgevoerd binnen een integraal analysekader dat de energetische en ruimtelijke inpassing samenbrengt:

- Allereerst is via energetische modellering de potentiële bijdrage van SMR's aan de elektriciteits- en warmtelevering in kaart gebracht, inclusief mogelijkheden voor waterstofproductie. Dit is gebaseerd op referentie-ontwerpen en aannames over de SMR load-factors.
- Daarnaast zijn de ruimtelijke randvoorwaarden en implicaties uitgewerkt, waaronder de veiligheid- en vergunningsaspecten, de koelwaterbehoefte en de interacties met bestaande en voorgenomen infrastructuur.
- De techno-economische analyse omvat vervolgens een inschatting van de economische haalbaarheid, met aandacht voor investerings- en operationele kosten, en relevante transportkosten. Ter vergelijking is ook gekeken naar conventionele technieken.

Bepaalde kostenposten en beleidsdimensies zijn in deze analyse nadrukkelijk buiten beschouwing gelaten. Zo zijn overheidskosten, zoals toezicht, vergunningverlening en beleidsuitvoering, grondkosten en mogelijke baten via compensatie of subsidieregelingen niet meegenomen. Ook zijn geen kosten of economische effecten op of van bestaande, aanvullende of aangepaste energie-infrastructuur (HV/MV net, toekomstige wind en zon ontwikkelingen) in deze berekeningen opgenomen. Hoewel deze elementen belangrijk zijn voor een integrale besluitvorming, worden deze in dit stadium nog niet onderzocht. Zij vergen een bredere beleidsmatige en financiële analyse, waarin meerdere overheidslagen en private partijen worden betrokken.

De focus in deze studie ligt primair op de energetische, ruimtelijke en indicatieve economische dimensies die relevant zijn voor de inpasbaarheid van SMR's in industriële clusters, zoals de Schelde-Deltaregio. Tot slot is via een multi-criteria-analyse (MCA) een gewogen beoordeling gemaakt van de casussen op technische, economische, ruimtelijke, milieu- en leveringszekerheidscriteria.

Om te waarborgen dat de resultaten robuust en reproduceerbaar zijn, is gewerkt met een zorgvuldige aanpak waarin meerdere databronnen zijn gecombineerd, de uitkomsten getoetst onder meerdere scenario's en de technische experts van zowel Haskoning als Tractebel de aannames en resultaten hebben beoordeeld. Daarnaast zijn onze bevindingen gespiegeld aan internationale referentieprojecten.

2.2 Leeswijzer

De opbouw van deze rapportage volgt de logica van de casestudie en beleidsvragen die daarbij centraal staan. Aan het einde van ieder hoofdstuk is een tussenconclusie opgenomen. Het rapport is als volgt opgebouwd:

Hoofdstuk 3 beschrijft de energievraag in de Schelde-Deltaregio en de context van een mogelijke SMR

Hoofdstuk 4 gaat in op de beschikbare ruimte en casusselektie van een SMR in het cluster

Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de typen SMR's en de bijbehorende investeringskosten

Hoofdstuk 6 behandelt algemene overwegingen over de inpassing van SMR's: o.a. ruimte, koeling, tijdlijn

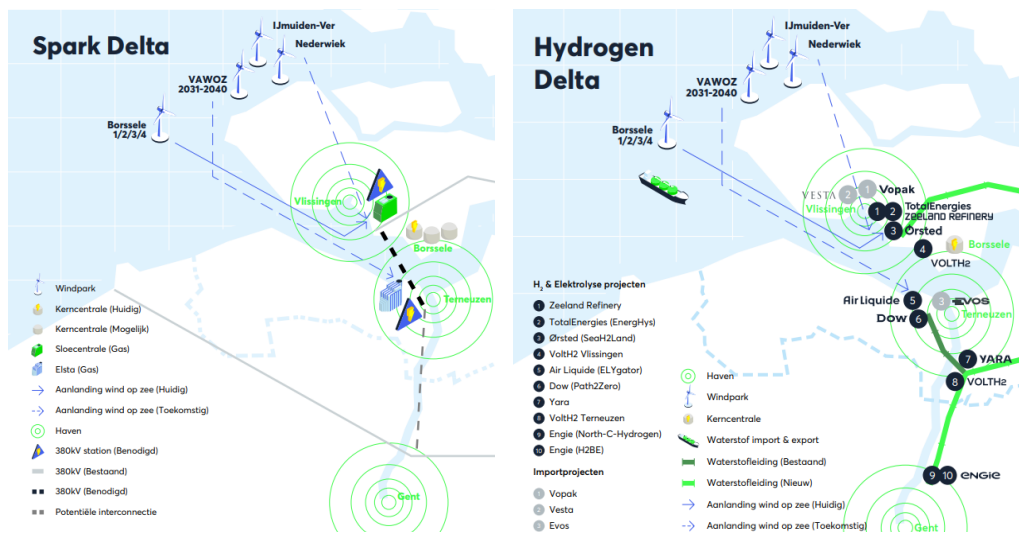
Hoofdstuk 7 beschrijft de veiligheid- en vergunningsaspecten.

Hoofdstuk 8 presenteert de resultaten van de onderzochte casus 1 (voor de meter).

Hoofdstuk 9 presenteert de resultaten van de onderzochte casus 2 (achter de meter).

Hoofdstuk 10 Bevat de vergelijking een MCA die beide casussen integraal tegen elkaar afweegt

Hoofdstuk 11 sluit af met de belangrijkste lessen voor andere industriële clusters



Figuur 3-2: Spark Delta (links) en Hydrogen Delta Programma

In het cluster bevinden zich meerdere grote energieverbruikers waaronder Dow Terneuzen, Yara Sluiskil, Zeeland Refinery, Cargill en SABIC. Deze bedrijven hebben een hoge vraag naar elektriciteit, warmte en in sommige gevallen waterstof, én beschikken deels over eigen installaties voor procesenergie.

3.1.1 Onzekerheden in data van het toekomstig energiesysteem

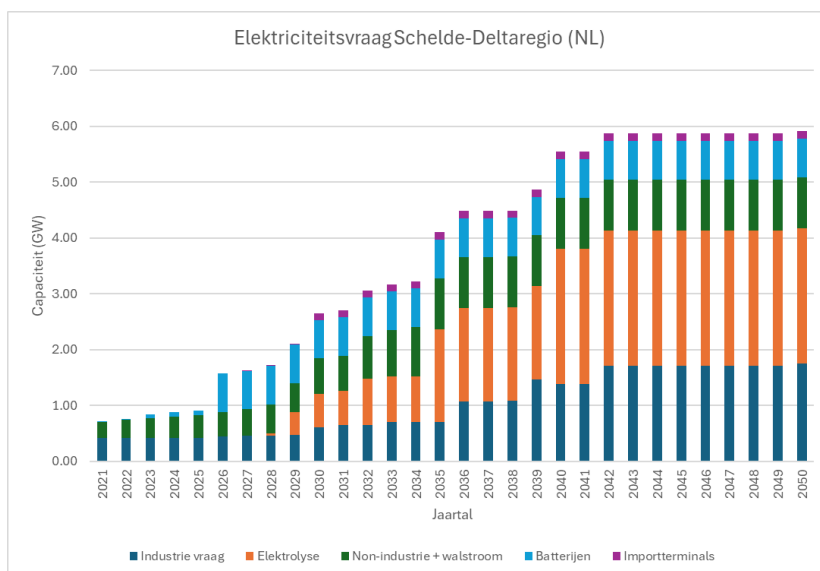
In het vervolg van deze studie wordt gebruikt gemaakt van een aantal datasets die het toekomstig energiesysteem, elektriciteit en aardgas voorspellen, voornamelijk de data achter de Cluster Energiestrategie (CES 3.0) vormt de basis. Echter is de toekomstige elektriciteits- en warmtevraag (afgeleid vanuit de aardgasvraag) onderhevig aan verschillende dynamieken die de toekomstige elektriciteits- en warmtevraag erg lastig te voorspellen maakt. Bijvoorbeeld:

- **Elektrificatie van de industrie**
De toekomstige elektriciteitsvraag en warmtevraag als gevolg van elektrificatie van de industrie zorgt voor een mogelijke afname in warmtevraag en toename in elektriciteitsvraag. Of de elektrificatie daadwerkelijk doorzet, is sterk afhankelijk van het toekomstige energiesysteem
- **Onvoorziene sluiting van bedrijven**
Vertrekkende industrie kan een significante impact hebben op elektriciteits- en/of warmtevraag
- **Onzekerheid in toekomstig energieaanbod**
Met name het toekomstige aanbod van elektriciteit is onzeker en afhankelijk van meerdere factoren. Ontwikkelingen rond wind op zee en het uiteindelijke locatiebesluit voor nieuwe kerncentrales in de regio Zeeland zullen in belangrijke mate bepalen hoeveel elektriciteit regionaal beschikbaar komen, en daarmee invloed hebben op de toekomstige energievoorziening.
- **Onvoorziene groei van nieuwe industrie.**
De data is hoofdzakelijk gebaseerd op bestaande en reeds geplande industrieën en hun toekomstplannen. Als er andere, onverwachte industrie zich in de toekomst in de Schelde-Deltaregio vestigt, heeft dit impact op de toekomstige elektriciteits- en warmtevraag.
- **Veranderende markt en toekomstig beleid.**
Toekomstig stimulerings- of ontmoedigingsbeleid en de toekomstige markt van elektriciteit, warmte, of energiedragers zoals waterstof kan de toekomstige elektriciteits- en warmtevraag beïnvloeden. Ook andere randvoorwaarden, zoals benodigde infrastructuur, kunnen in de toekomst veranderen en daarom impact hebben op toekomstige elektriciteits- en warmtevraag van de industrie. Bijvoorbeeld het wel of niet oplossen van netcongestieproblematiek

Er is dus een aantal onzekerheden die de daadwerkelijke toekomstige elektriciteits- en warmtevraag van de ingeschatte hoeveelheden o.b.v. de gebruikte dataset kan doen afwijken. De gepresenteerde getallen dienen daarom als richtinggevend en indicatief te worden opgevat en niet als een precieze weergave van de toekomst.

3.2 Toekomstige elektriciteitsvraag Schelde-Deltaregio

Voor deze studie is gebruik gemaakt van de meest recente publicatie van de CES 3.0. De onderliggende clusterdata is in 2023 opgehaald en in 2024 gepubliceerd. Waar mogelijk zijn in overleg met Smart Delta Resources in dit rapport de meest actuele inzichten verwerkt, waardoor figuren en cijfers iets afwijken van de CES 3.0-rapportage (Smart Delta Resources, 2024). In de laatste update van de CES 3.0 wordt uitgegaan van een sterke toename van de elektriciteitsvraag in de regio: van 0,7 GWe in 2021 (basisjaar) tot circa 5,9 GWe in 2050, een verachtvoudiging (Figuur 3-3).



Figuur 3-3 Verwachte groei in (piek)capaciteit (GW) in de Schelde-Deltaregio

In Figuur 3-3 is te zien dat er in 2026 een forse sprong in de elektriciteitsvraag plaatsvindt door de ingebruikname van grootschalige batterijen, waardoor de totale vraag stijgt naar 1,6 GWe. Vanaf 2028 neemt ook de elektrolyse zichtbaar toe (0,6 GWe in 2030), waardoor de totale vraag rond 2030 uitkomt rond 2,6 GWe. Tegen 2035 groeit de vraag verder door de toenemende industriële elektrificatie en nieuwe elektrolysecapaciteit naar 4,1 GWe. Na 2035 zet deze trend door, waarbij de vraag in 2040 oploopt tot 5,5 GWe en stabiliseert op 5,9 GWe in 2050.

3.3 Toekomstige warmtevraag

We schatten de warmtevraag van het cluster door de totale aardgasvraag van de industrie in de Schelde-Deltaregio als basis te nemen, daar gasverbruik van geselecteerde industriële grootverbruikers af te trekken en het resterende gasverbruik te vertalen naar een warmteproductie tot een schatting te komen met 50MJ/kg en 80% ketelrendement. Voor grootverbruikers is hierin een onderscheid gemaakt tussen aardgas t.b.v. stoomproductie (potentieel substitueerbaar door stoom afkomstig uit een SMR) en overig gebruik (grondstof of verbranding voor > 600 °C), waarvoor SMR-stoom geen reëel alternatief is. Zo telt aardgas in de Sloecentrale niet mee voor warmtevraag, omdat de stoom volledig tot elektriciteit wordt benut.

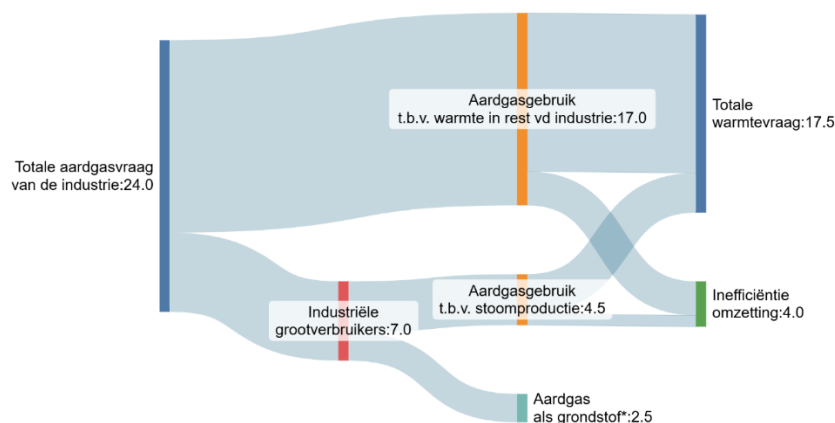
Aannames

- De warmtevraag blijft tot 2050 grosso modo stabiel.
- De twee nieuwe grootschalige kerncentrales leveren geen warmte aan het cluster.

Processen waarbij aardgas gebruikt wordt, dat niet aan stoomvraag toe te rekenen is:

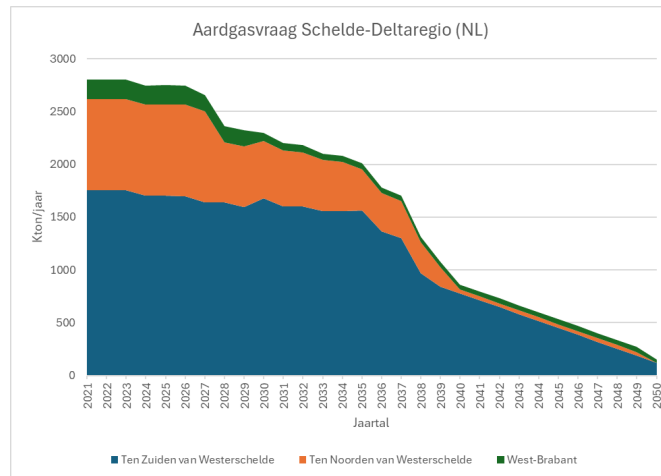
- Kunstmestproductie (met name Yara)
- Raffinaderijen (met name Zeeland Refinery)
- Gascentrales (met name de Sloe centrale)
- Chemische industrie
- Waterstofproductie middels steam methane reforming, het verwerken van aardgas tot waterstof en CO₂.

In Figuur 3-4 staat schematisch weergegeven hoe m.b.v. de bovengenoemde methode de totale warmtevraag in de vorm van stoom voor de regio Westerschelde-Zuid is bepaald.



*Figuur 3-4 Schematische weergave van de methodiek ter bepaling van de totale warmtevraag voor de regio Zuid binnen het SDR cluster. *aardgas als grondstof wordt hier bedoeld als al het aardgasgebruik dat niet t.b.v. stoom productie is, zoals de inzet als grondstof, maar ook bijvoorbeeld de verbranding van aardgas voor het bereiken van temperaturen van boven de 600 °C, waar stoom geen realistisch alternatief biedt. Eenheid diagram: TWh /jaar.*

De voorspelling is dat de aardgasvraag op den duur grotendeels zal verdwijnen door elektrificatie van de productieprocessen en warmtelevering vanuit andere industrieën. Het betekent echter niet dat de warmtevraag compleet verdwijnt.

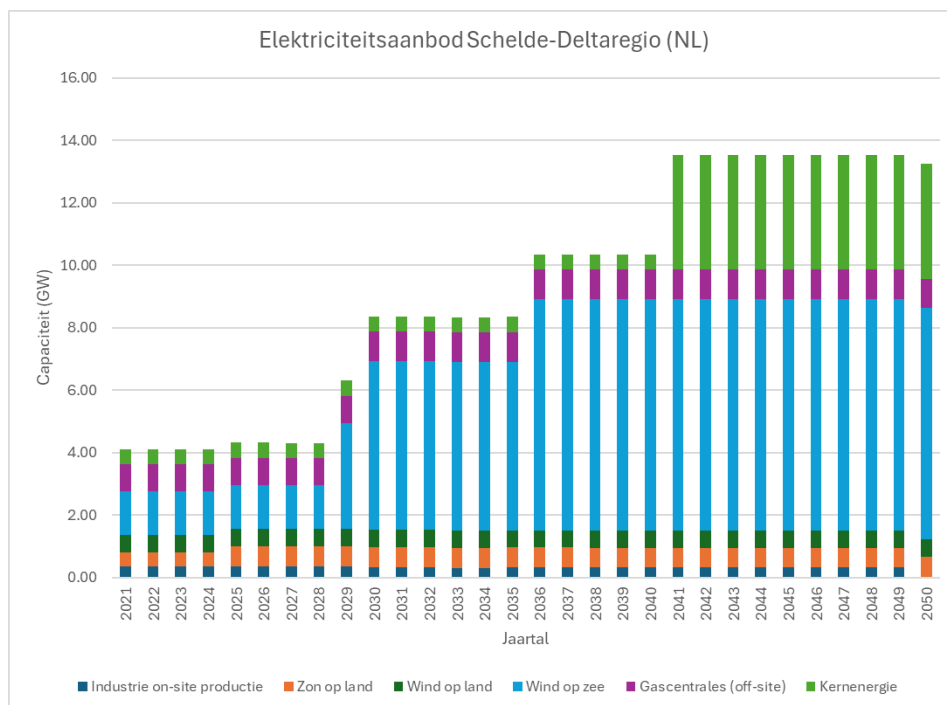


Figuur 3-5: Prognose aardgas Schelde-Deltaregio

3.4 Aanbod van energie (wind op zee, kernenergie)

Toekomstig opgesteld elektrisch productievermogen

Ondanks de huidige energie-intensiteit kent de Schelde-Deltaregio op dit moment nog een licht elektriciteitsoverschot, o.a. dankzij de 485 MWe kerncentrale Borssele en grote offshore windparken. Aan de aanbodzijde is de regionale capaciteit grotendeels stabiel, met een mix van industriële en on-site productie, wat in totaal op zo'n 4,1 GWe uitkomt (zie Figuur 3-6).



Figuur 3-6 Ontwikkeling opgestelde productiecapaciteit (GWe) in de Schelde-Deltaregio

Vanaf 2025 groeit de capaciteit door zon op land (+ ~0,63 GWe) en enig extra gas (~ 0,95 GWe in 2030). De grootste sprongen komen uit wind op zee (naar ~ 3,4 GW in 2029 en ~ 5,4 GWe in 2030), waardoor het totaal rond 8,4 GWe (2030) komt. Verdere uitbreiding van wind op zee leidt tot ~ 9,9 GWe (2036). Na 2040 verandert de mix door nieuwe kernenergie (in scenario's oplopend tot ~ 3,7 GWe in 2041).

Het totale aanbod is daarmee > 13 GWe richting 2050. Industriële on-site fossiele productie neemt af (van ~ 0,37 GWe in 2021 naar ~ 0,03 GWe in 2050).

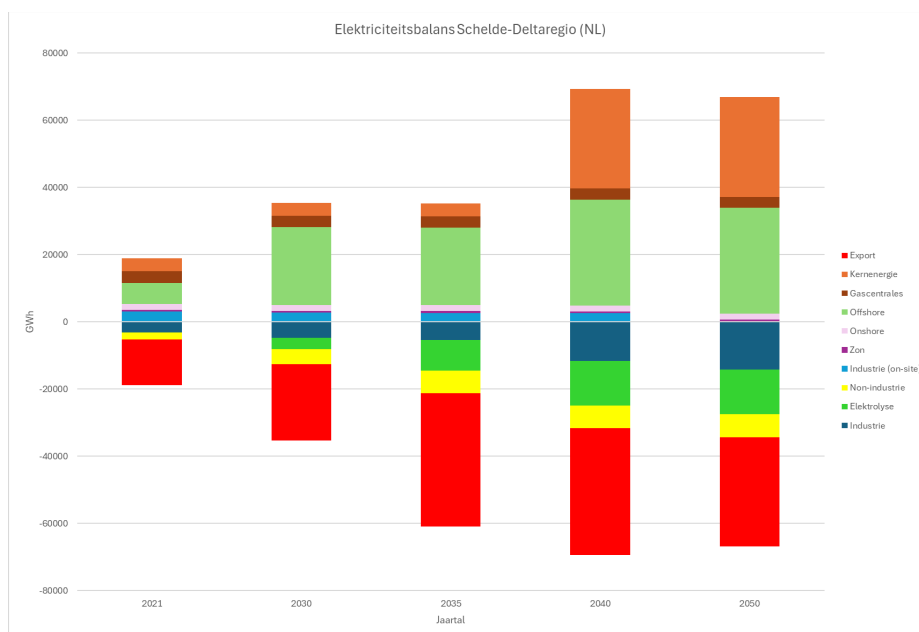
Het aanbod in het cluster ligt structureel boven de vraag:

- **2030:** vraag ~ 2,6 GWe; aanbod ~ 8,4 GWe.
- **2040:** vraag ~ 5,5 GWe; aanbod > 10 GWe.
- **2050:** vraag ~ 5,9 GWe; aanbod > 13 GWe.

Het is in verband met de benodigde continue energielevering noodzakelijk dat een elektriciteitsnetwerk met veel weersafhankelijk vermogen flink meer aanbod dan afname heeft, voldoende (flexibel) reservevermogen. In dit cluster is er echter een veel groter aanbod.

Systeemimpact

De Schelde-Deltaregio beschikt vandaag al over een aanzienlijke productiecapaciteit, met de kerncentrale Borssele (± 485 MWe) en grote offshore windparken als belangrijkste bronnen. Richting 2030 groeit het opgestelde vermogen dus sterk door nieuwe wind op zee en extra zon op land. Na 2040 komt daar additionele kernenergiecapaciteit¹ bij (Maximaal $2 \times 1,6$ GWe). Door de overcapaciteit ontstaat jaarlijks een structureel productieoverschot, oplopend tot meer dan 30 TWh/jaar export na 2040, zie Figuur 3-7.



Figuur 3-7 Elektriciteitsbalans Schelde-Deltaregio in GWh/jaar (productie en verbruik)

Om de voorziene groei van productie en vraag in de regio te faciliteren, zijn omvangrijke investeringen in de elektriciteitsinfrastructuur noodzakelijk. TenneT realiseert nieuwe 380 kV-verbindingen en converterstations (o.a. in het Sloegebied en Zeeuws-Vlaanderen) om de aanlanding van wind op zee en toekomstige kernenergie veilig te integreren. Ondanks deze uitbreidingen blijft er een reëel risico op knelpunten, zeker wanneer industriële elektrificatie en elektrolyse achterblijven of wanneer projecten vertraging oplopen.

Voor SMR's betekent dit dat hun meerwaarde sterk afhankelijk is van koppeling met lokale vraag (proceswarmte, waterstof of directe on-site elektriciteitsvraag). Zonder die koppeling draagt extra productie vooral bij aan exportdruk en niet aan de verduurzaming van het cluster.

¹ Terwijl Borssele zal afschakelen

Warmte en waterstof

Tegelijkertijd blijft er in het cluster een blijvende vraag naar proceswarmte (stoom) en waterstof. Hier kan een SMR, met de mogelijkheid tot gelijktijdige levering van elektriciteit en stoom, concreet invulling geven aan de verduurzaming van warmtevoorziening. Voor waterstof geldt dat de regio nu al de grootste gebruiker in de Benelux is. De toekomstige vraag groeit beperkt, maar blijft substantieel. Omdat grootschalige productie van groene waterstof slechts langzaam opschaaft, spelen blauwe waterstof en waterstof uit afgassen met CCS voorlopig een dominante rol. Ook hier kan een SMR op termijn bijdragen door levering van stabiele, CO₂-vrije elektriciteit of hogetemperatuurwarmte voor elektrolyse.

De Schelde-Deltaregio zal met de huidige plannen structureel een overschot aan elektriciteitsproductie kennen door de combinatie van wind op zee en nieuwe kernenergie. Een SMR als extra stroombron voegt daarom beperkt waarde toe en kan de exportdruk zelfs vergroten. De meerwaarde van een SMR ligt hier vooral in de levering van proceswarmte en de ondersteuning van waterstofproductie, waarbij koppeling van elektriciteit en warmte cruciaal is. Het inzetten van een SMR uitsluitend als extra baseload-elektriciteitscentrale wordt in dit cluster daarom niet als kansrijk beschouwd.

4 Beschikbare Ruimte

*Naast de energievraag is ook de ruimtelijke inpassing bepalend voor de haalbaarheid van SMR's. Dit hoofdstuk beschouwt daarom de **beschikbare ruimte** binnen de Schelde-Deltaregio in relatie tot potentiële locaties voor SMR's. Daarbij wordt gekeken naar de mate waarin fysieke ruimte en bestaande industriële terreinen mogelijkheden bieden voor realisatie. Specifieke factoren zoals veiligheid, netaansluitingen, koelwaterbeschikbaarheid en omgevingskwaliteit zijn in **Hoofdstuk 6** nader uitgewerkt.*

Ruimtelijke ontwikkelingen in de Schelde-Deltaregio

Voor de ontwikkeling en verduurzaming van de industrie in de Schelde-Deltaregio is aanzienlijke ruimte nodig: voor de vestiging van nieuwe bedrijven in groeimarkten en sleuteltechnologieën, de groei van bestaande bedrijven, de transitie naar circulaire processen en de aanleg van energie-infrastructuur. Het industriecluster Zeeland–West-Brabant beslaat ongeveer 2.488 hectare netto, waarvan zo'n 2.152 hectare al is uitgegeven. Daarmee resteert er slechts ongeveer 340 hectare uitgeefbare ruimte, grotendeels geleden in de Sloehaven in Vlissingen, zie Figuur 4-1.



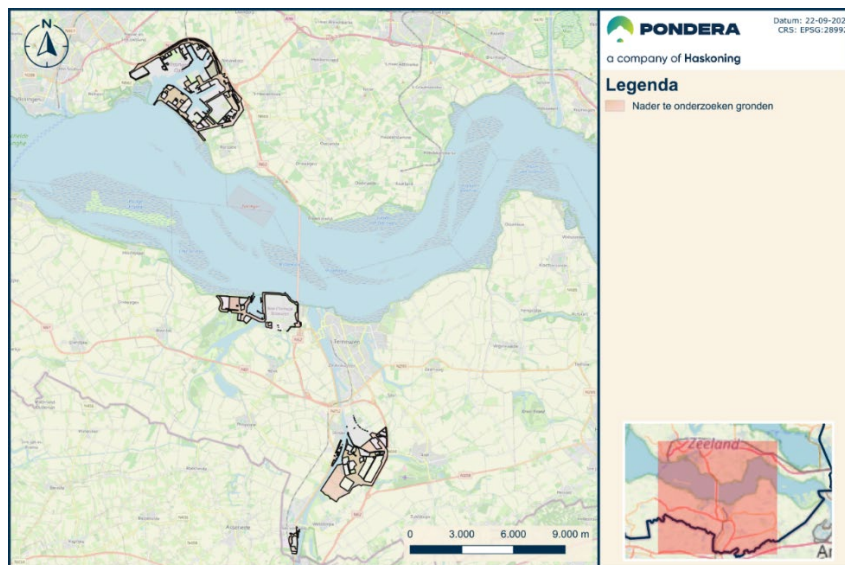
Figuur 4-1 De uitgegeven (blauw) en uitgeefbare ruimte (groen) van de Schelde-Deltaregio

Tot 2030 vraagt vanuit het energiesysteem met name de aanleg van het 380 kV-station ruimte (Sloegebied en Zeeuws-Vlaanderen ± 30-35 ha). Volgens het Plan Energie Hoofdstructuur (PEH) (Rijksoverheid, 2024) wordt voor energiefuncties gerekend met 100–325 hectare, exclusief de mogelijke komst van grootschalige kerncentrales (45–130 hectare). Daar bovenop kan economische groei mogelijk nog eens ~300 tot 605 hectare extra vragen. Volgens de rapportage *Nationale Prognose ruimtebehoefte industrieclusters* (Stec groep, Haskoning, PosadMaxwan, Generation Energy, April 2025) past de ruimtevraag tot 2030 nipt binnen de beschikbare ruimte van het cluster, maar dreigt er op langere termijn een tekort aan ruimte. Dit is sterk afhankelijk van het daadwerkelijke scenario voor energie en economie dat werkelijkheid wordt.

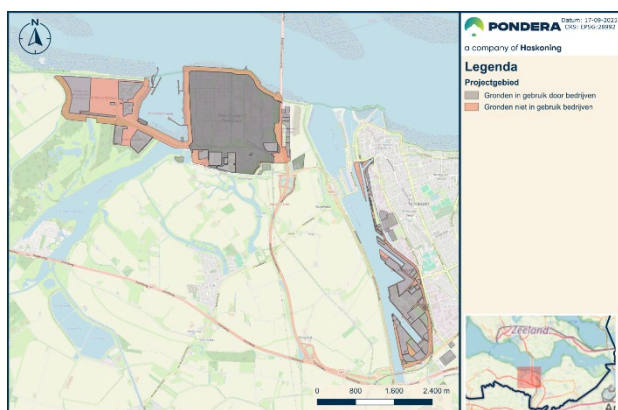
Deze beperkte ruimte, in combinatie met de hoge eisen aan leveringszekerheid en verduurzaming, maakt de Schelde-Deltaregio tot een relevante SMR-casus om nader te onderzoeken.

4.1 Potentiële percelen binnen het cluster

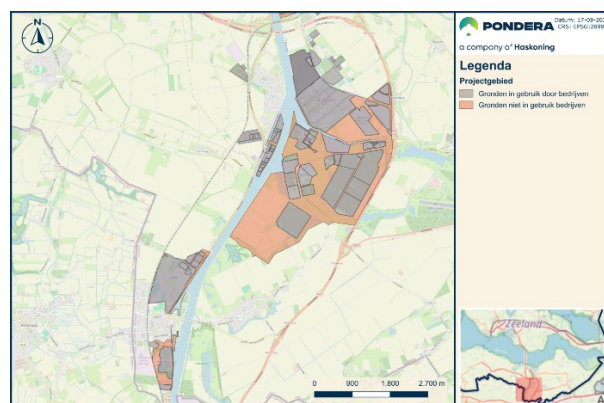
In deze rapportage onderzoeken we uitsluitend de gronden gelegen in het Nederlandse deel van het cluster. Er zijn grofweg vier gebieden te onderscheiden die nader onderzocht worden: het Sloegebied, de Mosselbank, de Axelse vlakte en het industrieterrein van Sas van Gent (zuidelijke deel). In de Figuur 4-1 De uitgegeven (blauw) en uitgeefbare ruimte (groen) van de Schelde-Deltaregio is enkel gekeken of de gronden momenteel benut worden door andere bedrijven, in Hoofdstuk 7.2 wordt onderzocht of deze terreinen in het kader van leefomgeving, veiligheid, ecologie en andere thema's haalbaar worden geacht.



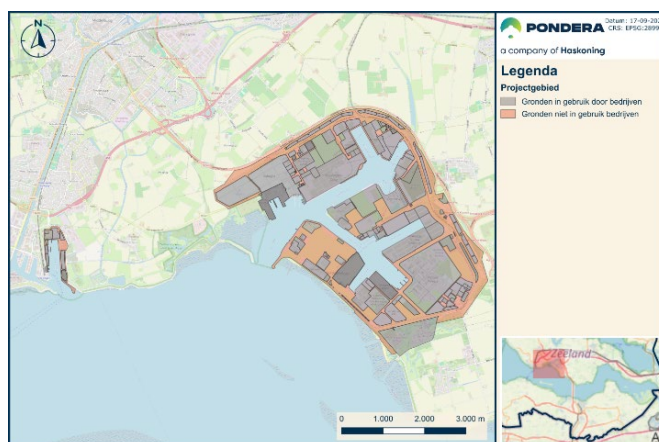
Figuur 4-2: Overzichtskaart te nader te onderzoeken om afstand tot rivier te visualiseren. Het meest noordelijk gebied is het Sloegebied in zuidelijke richting gevolgd door de Mosselbanken (DOW Terneuzen), de Axelse vlakte en tot Sas van Gent.



Figuur 4-3: Gronden rondom Dow (linksboven) en de Ambachten. Er is onvoldoende ruimte in de Ambachten.



Figuur 4-4: Gronden rondom Sas van Gent (linkerkant kanaal) en Axelse vlakte (rechterkant kanaal).



Figuur 4-2: Gronden bij het Sloegebied (rechts) en industrieterrein haven Vlissingen (links). Er is onvoldoende ruimte in Vlissingen.

Het startpunt voor deze rapportage zijn beschikbare gronden in het Nederlandse deel van het cluster. Als Uitgangspunt is: 3–10 ha voor middelgrote SMR's (tot en met 250 MW) en 10–15 ha voor grote SMR's (meer dan 250 MW) aangenomen. Tijdens de bouwfase is tijdelijk tot ongeveer tweemaal zoveel terrein nodig. Met deze uitgangspunten vallen er een aantal delen af als geschikte locatie voor een SMR met de gronden die momenteel beschikbaar zijn. Het gaat om het haventerrein van Vlissingen en het industrieterrein de Ambachten nabij Terneuzen. Er is daar onvoldoende grond beschikbaar voor een SMR.

4.2 Selectie casussen

De studie richt zich op twee representatieve configuraties voor de toepassing van SMR's in de Schelde-Deltaregio die kwantitatief worden gemodelleerd. Deze configuraties verschillen in eigendomsmodel, systeemrol en koppeling met industriële en netbehoeften. De selectie is gemaakt op basis van beleidsrelevantie, energetische rol en haalbaarheid in de Nederlandse context.

- **Casus 1 – Publiek, voor de meter:** Een SMR die elektriciteit (baseload) en eventueel warmte levert aan meerdere industriële partijen binnen het cluster. De productie wordt geleverd aan het publieke net of aan meerdere gebruikers, buiten de eigen site. Voor grootschalige warmtebenutting is een nieuw stoomnet in het cluster noodzakelijk.
- **Casus 2 – Privaat, achter de meter:** Een SMR op het terrein van Dow Terneuzen, als vervanging van de bestaande Elsta-centrale. De SMR voorziet primair in de interne vraag naar elektriciteit en stoom van Dow, met optionele koppeling aan waterstofproductie en beperkte netaansluiting.

Tabel 4-1 Selectie Casussen met beschrijving

Kenmerk	Casus 1: Publiek – Cluster, baseload, voor de meter	Casus 2: Privaat – Dow-site, achter de meter
Doel	Levering baseload elektriciteit en/of warmte aan meerdere industriële gebruikers	Vervanging Elsta, ondersteuning elektrisch kraken en lokale waterstofproductie
Tijdlijn	Mogelijk vanaf 2035–2040	2040-2050 Elsta vervanging en meer elektrificatie
Locatie	Beschikbare percelen in het cluster, bijvoorbeeld: de Mosselbank (Rondom Dow-terrein) / Paulinapolder of Zuid Terneuzen / Sloegebied	Mosselbanken (Rondom Dow-terrein, ±60 ha)
Netkoppeling	Voor de meter: levering van warmte en elektriciteit aan meerdere gebruikers of het publieke net	Achter de meter: intern thermisch gebruik door Dow, met beperkte uitgaande en inkomende publieke elektriciteits-netaansluiting
Warmtegebruik ¹	Binnen het cluster (bijv. Dow en Yara)	Intern bij Dow (incl. elektrische kraker)
Waterstoflink	Optioneel – H ₂ -productie als uitbreiding. In theorie kan een SMR, door de levering van hogetemperatuurwarmte, ook worden gekoppeld aan Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC's) voor waterstofproductie.	H ₂ -productie uit afgas (restproduct kraakproces) met optionele export (bijv. naar Yara)
Eigenaarschap & governance	Multiclient of publiek-privaat óf publiek geleid	Privaat (Dow)
Impact op grote kerncentrales	Aanvullend op kerncentrales.	Complementair aan kerncentrales

Impact op netcongestie	Neutraal tot potentieel belastend (<i>afhankelijk van gerealiseerde energiebalans in 2035</i>)	Gebruik bestaande netaansluiting, optie tot vraag-volgend: De SMR kan vermogen terugregelen als er veel aanbod op het net is, en opschakelen wanneer de vraag toeneemt. Dit verkleint de kans op congestie en maakt de SMR tot een stabiliserende factor in plaats van een extra belasting voor het net.
-------------------------------	--	--

¹ **Rol stadsverwarming** Het gebruik van een SMR uitsluitend voor stadsverwarming wordt in deze studie niet als primaire toepassing beschouwd, hier zijn meerdere redenen voor:

- De thermische output van een SMR (zelfs van de kleinere capaciteiten) ligt aanzienlijk hoger dan de gemiddelde warmtevraag van de bebouwde omgeving in de regio. Bovendien is de gelijktijdigheid tussen warmteproductie en warmtevraag waarschijnlijk beperkt, aangezien het grootste deel van de warmtevraag zich concentreert in de winterperiode. Volledige benutting van de warmtecapaciteit zou in dat geval slechts mogelijk zijn met grootschalige industriële afnemers als primaire klant.
- Economische inefficiëntie: Een SMR uitsluitend voor stadswarmte leidt vanwege de beperkte inzet tot een zeer hoge warmteprijs vergeleken met alternatieve warmtebronnen zoals industriële restwarmte of geothermie in combinatie met grootschalige warmtepompen. Daarnaast maakt de aanwezigheid van bestaande warmte-infrastructuur warmtelevering van een SMR financieel efficiënter. Echter ontbreekt in de regio een grootschalig stadverwarmingsnet.
- Een SMR vergt veiligheidscontouren en ruimtelijke inpassing die in de nabijheid van dichtbebouwde gebieden mogelijk complexer en kostbaarder is. Ook heeft de beveiliging van een nucleaire installatie impact op de ruimte. Transport van warm water over grotere afstanden is mogelijk, maar vergroot de energetische verliezen en investeringskosten in warmtetransportleidingen substantieel.
- De governance bij stadsverwarming uit een SMR vraagt om vroegtijdige en langdurige afspraken tussen SMR-exploitant, warmtenetbeheerder, provincie en gemeente over rollen, verantwoordelijkheden, prijsafspraken en risicoverdeling. Zonder deze afspraken is de kans klein dat warmtelevering vanuit een SMR rendabel, betrouwbaar en tijdig kan worden gerealiseerd.

Stadsverwarming kan in de onderzochte casussen hooguit een bijvangst zijn. De warmteproductie van een SMR zal primair gericht zijn op elektriciteits-, industriële stoom- en/of waterstofproductie. In dat scenario kan een deel van de restwarmte seizoensgebonden of continu worden ingezet voor lokale warmtenetten, mits de afzet voldoende zeker en daarmee techno-economisch haalbaar is.

De Schelde-Deltaregio beschikt nog maar over beperkte uitbreidingsruimte (circa 340 ha), terwijl de ruimtevraag door energie-infrastructuur, grootschalige kernenergie en industriële groei richting 2050 fors toeneemt. Hierdoor is de inpassing van SMR's niet vanzelfsprekend en alleen kansrijk op zorgvuldig gekozen locaties waar bestaande infrastructuur aanwezig is. Voor deze studie zijn twee representatieve casussen geselecteerd:

- **Casus 1 – Publiek, voor de meter: levering van elektriciteit (en eventueel warmte) aan meerdere industriële gebruikers in het cluster.**
- **Casus 2 – Privaat, achter de meter (Dow): vervanging van de Elsta-centrale en directe koppeling aan interne vraag.**

5 Overzicht typen SMR's

In dit hoofdstuk volgt een overzicht van de belangrijkste typen SMR's die internationaal in ontwikkeling zijn (drukwater, kokendwater, gesmoltenzout). Daarbij wordt aandacht besteed aan kosten, doorlooptijden en technologische rijpheid. Dit overzicht is locatie-onafhankelijk en schetst de externe mogelijkheden die voor elke techniek relevant zouden kunnen zijn.

5.1 SMR-Technologieën

Na de casuskeuze zijn voor de scenario's verschillende SMR-technologieën meegenomen. De SMR-configuraties zijn gebaseerd op een internationale scan van in ontwikkeling zijnde reactoren van verschillende Original Equipment Manufacturers (OEM's), die op middellange termijn (2035-2040) mogelijk commercieel beschikbaar zullen zijn binnen de Nederlandse context.

Volgens het meest recente SMR Dashboard van de OECD bestaan er wereldwijd inmiddels 127 verschillende SMR-concepten (OECD, 2025). Daarvan worden 99 op dit moment actief ontwikkeld door een diverse groep van OEM's en 74 daarvan worden gemonitord door de OESO. Een deel hiervan ontwikkelt SMR's op basis van technologie die ook wordt toegepast in bestaande kerncentrales: de zogenaamde Generatie III+ (**Gen III+**). Deze reactoren zijn ontworpen in een compact formaat, met modulaire bouw en verbeterde veiligheidssystemen. Het type reactor is vaak een variant van een licht-water reactor (LWR), zoals:

- Een drukwaterreactor (PWR), vergelijkbaar met die in Borssele
- Een kokendwaterreactor (BWR)

Deze reactoren gebruiken verrijkt uranium (3–5% U-235) als brandstof in de vorm van uraniumoxide, en maken gebruik van licht water voor zowel koelmiddel en als moderator. Een moderator is een materiaal (vaak gewoon water, zwaar water of grafiet), dat in een kernreactor wordt gebruikt om de snelle neutronen, die vrijkomen bij kernsplijting, af te remmen tot een langzamere snelheid en daarmee de nucleaire reactie gaande te houden.

Andere producenten richten zich op Generatie IV-kerntechnologieën (**Gen IV**) die gebruikmaken van nieuwe koelmiddelen (zoals gesmolten zout, helium of vloeibaar metaal) en alternatieve brandstof zoals TRISO. Hierbij kunnen ook thorium en gerecycled plutonium (gebruikte brandstof) worden ingezet, wat kan bijdragen aan minder kernafval en efficiëntere benutting van uranium. Een ander aspect is dat deze nieuwe concepten meer intrinsieke veiligheid bieden op basis van de fysische eigenschappen van de brandstoffen en koelmiddelen. Gesmoltenzoutreactoren gebruiken bijvoorbeeld geen water of hoge druk, zodat er geen escalatierisico's bestaan binnen het stoomcircuit. Gesmoltenzoutreactoren zijn ontworpen met inherente veiligheidsvoorzieningen: bij temperatuurstijging neemt de kernreactiviteit af (negatieve temperatuurcoëfficiënt. Bij een incident wordt de brandstof passief afgevoerd naar subkritische opslagtanks en is passieve noodkoeling beschikbaar, die geen externe stroomvoorziening of actieve interventie vereisen. Gen IV SMR's bieden het voordeel van inherente veiligheidsvoorzieningen die, in theorie, hun afhankelijkheid van elektrisch aangedreven koel- en veiligheidssystemen verminderen. Deze ontwerpen leggen de nadruk op passieve veiligheidsmechanismen, zoals natuurlijke convectie en faalveilige uitschakelingsprocessen, die de veerkracht in noodsituaties vergroten. Een belangrijk verschil met GenIII+-SMR's is de hogere bedrijfstemperatuur van Gen IV-SMR's, vaak tussen de 500 en 800°C, waardoor ze beter geschikt zijn voor warmtetoepassingen voor de industrie, ter vervanging van fossiele brandstoffen, en de productie van waterstof, indien gekoppeld aan een installatie voor hogetemperatuurelectrolyse (SOEC).

In deze studie categoriseren we de SMR's op basis van twee dimensies. Als eerste de grootte van het vermogen, omdat deze bepaalt in hoeverre de SMR aansluit op de (lokale) energiebehoefte en fysiek ingepast kan worden op de beschikbare locatie. Als tweede onderscheiden we generatie III+ en IV, omdat beide naar verwachting anders toegepast gaan worden. Voor deze studie zijn daarom twee groepen SMR's relevant:

1. *Grote SMR Generatie III+:* Grote Gen III+-SMR's zijn het meest vergevorderd in hun ontwerp, kennen de minste ontwikkelrisico's en kunnen daarom als eerste op de markt verwacht worden. Veelal worden ze ontwikkeld door gevestigde OEM's. Ze zijn met name geschikt voor de productie van basislast elektriciteit, typisch tussen de 300 en 470 MWe, maar ook in vraag-volgend en in WKK-toepassing, zie Hoofdstuk 5.3. De temperatuur is in het algemeen beperkt tot 300°C. Ook kunnen ze in de toekomst de energie leveren voor SOEC's waarbij zowel elektriciteit als stoom worden ingezet voor efficiënte productie van waterstof.
2. *Grote SMR Generatie IV:* Dit type vergt in het algemeen nog meer ontwikkeling van de technologie en toeleveringsketens en zal daardoor later op de markt komen dan Gen III+. Hoewel Gen IV-SMR's ook elektriciteit kunnen produceren, zullen ze naar met name worden ingezet voor industriële warmteproductie (typisch 700 tot 850 MWth), WKK en waterstofproductie. Vanwege de hoge temperatuur en intrinsieke veiligheid zijn ze goed in te passen op of nabij industriegebieden.

Een middelgrote SMR heeft vergelijkbare toepassingen als de grote SMR's maar heeft een kleiner vermogen van typisch 100-200 MWe of 250-450 MWth en een kleinere fysieke omvang, met name warmte technisch makkelijker inpasbaar voor middelgrote industrieën. Gezien dat alle toepassingsprincipes hetzelfde zijn, er weinig aanbod in middelgrote SMR-concepten is (mede omdat OEM's meerdere reactoren in hun ontwerp toepassen), wordt deze groep niet als een op zich staande groep meegenomen. Waar een grote SMR inpasbaar is, geldt dat ook voor meerdere middelgrote SMR's.

Naast de grote en middelgrote SMR's zijn ook *kleinere SMR's en microreactoren* in ontwikkeling zoals de eVinci van Westinghouse (5 MWe). Deze groep is hier weggelaten, omdat ze veelal voor afgezonderde locaties zijn bestemd en vanwege hun beperkte vermogen geen betekenisvolle bijdrage kunnen leveren binnen de scope van dit clusteronderzoek.

Van de 99 SMR's die wereldwijd in ontwikkeling zijn, zal slechts een deel daadwerkelijk geschikt zijn of beschikbaar komen in Nederland. Het is nadrukkelijk **niet** het doel van deze studie om een specifieke technologie te selecteren; de casestudie is technologie-agnostisch. Wel is het relevant om inzicht te krijgen in concrete SMR-concepten die op z'n vroegst vanaf ongeveer 2035 een bijdrage zouden kunnen leveren aan het energiesysteem industrieclusters als de Schelde-Deltaregio en bedrijven als Dow. Per categorie is daarom een mix van SMR's gekozen als voorbeeld, gebaseerd op de volgende criteria:

1. **Technologische volwassenheid en projectrijpheid**
 - TRL-niveau en vergunningservaring
 - Eerste oplevering (First-of-a-kind, FOAK) en referentieprojecten wereldwijd
2. **Relevantie en functionele aansluiting voor Nederland**
 - Aansluiting op de Nederlandse markt en regelgevend kader
 - Geschiktheid voor de casussen (vermogen, vraag-volgend, warmte-koppeling met H₂ productie)
3. **Technische en operationele haalbaarheid**

- Bewezen ontwerpprincipes, redundantie en bedrijfszekerheid
- Realistische uitvoerbaarheid in een industriële setting

4. Economische haalbaarheid

- Investeringskosten en schaalbaarheid
- Trade-off tussen elektriciteits- en warmteproductie (hogere elektriciteitsproductie gaat ten koste van warmteproductie en vice versa).

Op basis van deze criteria zijn de volgende voorbeelden van SMR-producenten geselecteerd:

Tabel 5-1: Overzicht SMR criteria

	Groot Gen III+ 250-500 MWe	Groot Gen IV 250-500 MWe	Middelgroot Gen IV 50-250 MWe
Voorbeelden	Rolls-Royce SMR (470 MWe) GE Hitachi BWRX-300 (300 MWe) NuScale 4NPM (4 x 77 MWe) Holtec SMR-300 (2 x 320 MWe) Westinghouse AP300 (300 MWe) KHNP i-SMR (4 x 170 MWe)	X-Energy Xe-100 (4 x 80 MWe) Newcleo LFR-AS-200 (2 x 200 MWe) TerraPower Natrium Reactor (335 MWe)	Terrestrial IMSR400 (195 MWe) Kairos Power KP-FHR (2 x 75 MWe) Thorizon Thorizon One (100 MWe)
Toepassing	Grootschalige elektriciteit, baseload (90-95% productiefactor) Sommige SMR's kunnen vraagvolgend doen tussen 50-100% van de capaciteit (op- en afschalen met 1 tot 5% per minuut) Ook geschikt voor WKK en koppeling aan (HT-)electrolyser voor productie van 60-90 kton waterstof per jaar	Elektriciteit is mogelijk, maar Gen IV is bij uitstek geschikt voor proceswarmte op hoge temperatuur voor industrie (700-850 MWth, 400-600°C), WKK en waterstofproductie (60-80 kton per jaar) Gen IV heeft meer mogelijkheden voor regelbaar vermogen en vraagvolgend (5 tot 15% per minuut) met eventueel batterij-functie doordat de reactor continu kan draaien en warmte (bv gesmolten zout) in tanks wordt opgeslagen	Elektriciteit is mogelijk, maar Gen IV is bij uitstek geschikt voor proceswarmte op hoge temperatuur voor industrie (250-450 MWth, 550-600°C), WKK en waterstofproductie (25-40 kton per jaar) Gen IV heeft meer mogelijkheden voor regelbaar vermogen en vraagvolgend (5 tot 10% per minuut) met batterij-functie doordat de reactor continu kan draaien en warmte (bv gesmolten zout) in tanks wordt opgeslagen
Ruimte	Inrichting: 10-15 Ha Tijdelijk bouwterrein: 20-30 Ha	Inrichting: 10-15 Ha Tijdelijk bouwterrein: 20-30 Ha	Inrichting: 3-10 Ha Tijdelijk bouwterrein: 6-20 Ha
Koeling	Meestal via koelmodules, in een enkel geval via oppervlaktewater	Idem als Gen III+, maar voor warmte-toepassing is minder koeling nodig	Veelal koeling zonder oppervlaktewater
Beschikbaarheid	De eerste 'First-of-a-kind'-projecten (FOAK's) wereldwijd binnen deze groep worden verwacht rond 2030-2032; leveringscontracten zijn getekend, daarna op z'n vroegst operationeel in Nederland vanaf 2035	Eerste FOAK's 2031-2035, naar verwachting operationeel in NL na 2037. Alleen nog techniek ontwikkelingscontracten getekend.	Eerste FOAK's 2031-2035, naar verwachting operationeel in NL na 2037

Bron: database en analyses van Tractebel en Haskoning, op basis van publieke bronnen en gesprekken met SMR-leveranciers. De capaciteit van waterstofproductie is geschat op basis van analyses van ULC-Energy en Tractebel.

Opmerkingen:

- De reactoren van Gen III+ zijn lichtwaterreactoren (PWR, BWR); de Gen IV-SMR's bestaan uit verschillende technologieën waaronder High Temperature Gas-cooled reactors (HTGR: X-Energy),

Molten Salt Reactors (MSR; Terrestrial Energy, Thorizon), Sodium-cooled Fast Reactors (SFR: TerraPower), Lead-cooled Fast Reactors (LFR: Newcleo) en Fluoride-salt cooled High temperature Reactor (FHR: Kairos Power).

- Een aantal OEM's zoals NuScale, Holtec, X-Energy en Newcleo hebben een reactor die in principe in de middencategorie (50-250 MWe) valt, maar bieden deze om economische redenen enkel aan met meerdere reactoren per locatie, waardoor ze effectief in de categorie 'groot' vallen.
- De typische reactortemperatuur van Gen III+-SMR's is 200-300°C; NuScale vormt hierop een uitzondering met 500°C, zodat deze reactor mogelijk ook geschikt is voor proceswarmte.
- Het jaar van de mogelijke eerste commerciële introducties in Nederland is geschat op basis van de verwachte periode waarop wereldwijd de eerste reactoren binnen de categorie (First-of-a-Kind) operationeel worden en de tijd die nodig is voor verdere commercialisering (Nth-of-a-Kind) en uitrol naar andere landen waaronder Nederland.

5.2 Gesprekken met techniekleveranciers

Gedurende het onderzoek zijn gesprekken gevoerd met verschillende technologieaanbieders, zowel van zogenoemde Gen III+ als Gen IV reactoren, en ook met projectontwikkelaars, een potentiële energie-afnemer en de ANVS (Autoriteit Nucleaire veiligheid en Stralingsbescherming).

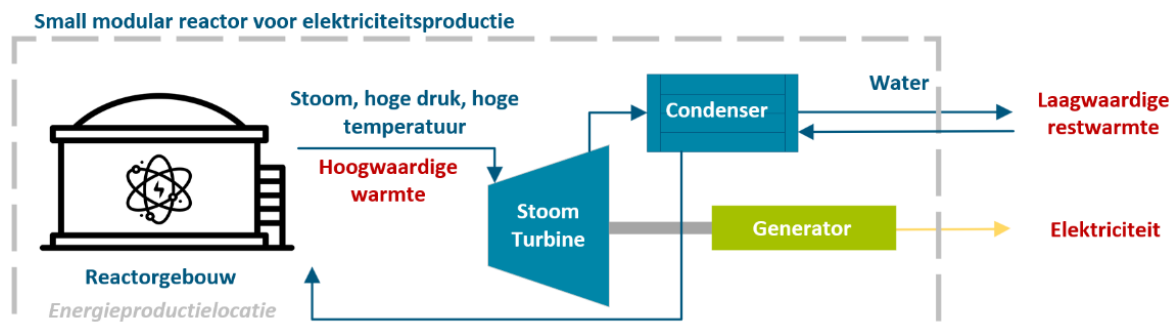
Deze gesprekken boden waardevolle inzichten in zowel de technische specificaties van de aangeboden technologieën als in de bredere context van hun ontwikkeling. Naast technische aspecten kwamen ook de organisatorische volwassenheid van de leveranciers en hun visie op het traject richting volledige commercialisatie en project realisatie in Nederland aan bod. Onze indruk is dat de aanbieders van Gen III+-technologieën over het algemeen verder gevorderd zijn en dichterbij daadwerkelijke projectontwikkeling staan. Daarentegen bevinden de Gen IV-technologieën zich nog in een eerder stadium van technologische ontwikkeling, waarbij verdere demonstratie en opschaling noodzakelijk zijn.

Tot slot zijn in de gesprekken ook de belangrijkste risico's in kaart gebracht, variërend van technische onzekerheden tot projectontwikkeling, markt- en regelgevingsaspecten. Zo kwam naar voren dat internationale harmonisatie van wet- en regelgeving de leveranciers kan helpen om ontwerpaanpassingen te voorkomen en zodoende de realisatie van een SMR in Nederland makkelijker maakt. Dit is mede gerelateerd aan de ontwikkeling van nucleaire brandstof- en afvalketens die internationaal worden ontwikkeld.

Ook kwam een unaniem beeld naar voren dat de projectrisico's te groot zijn om door private investeerders alleen te worden gedragen. Zoals in vrijwel alle nucleaire energiecentrales, is ook voor een SMR een publiek-private risicodeling een onmisbare schakel in een succesvolle projectontwikkeling.

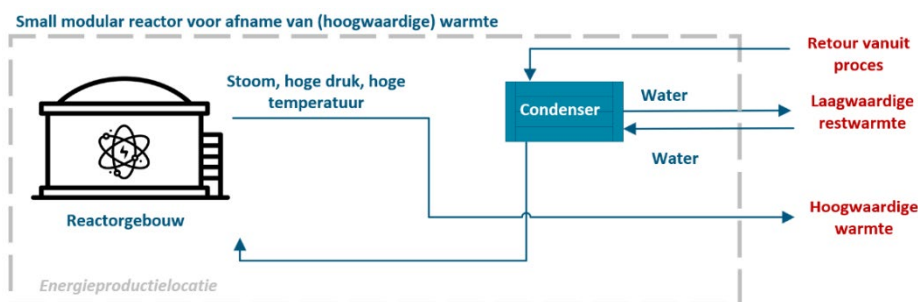
5.3 Modus operandi van SMR's

Een SMR produceert primair hogetemperatuur stoom (oververhit of verzadigd), die via een stoomturbine wordt omgezet in elektriciteit. Net als bij andere thermische centrales wordt daarbij gemiddeld één derde van het thermisch vermogen benut voor elektriciteitsproductie, terwijl de resterende laagwaardige warmte vaak wordt afgevoerd wegens gebrek aan afnemers, zie Figuur 5-1.



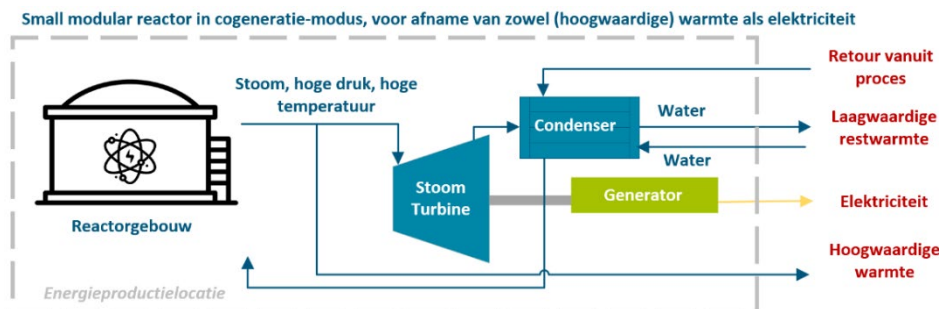
Figuur 5-1 Versimpelde weergave van een SMR volledig ingezet voor elektriciteitsproductie

Een alternatief is het direct inzetten van de geproduceerde stoom voor industriële warmtevraag (Figuur 5-2). De huidige Gen III+-SMR's zijn echter vooralsnog uitsluitend gericht op volledige elektriciteitsproductie en gezien de stoomtemperaturen van deze generatie SMR's is het potentieel om de SMR thermisch in te zetten in de industrie beperkt. Het direct uitkoppelen van stoom voor industriële processen zou daarom een nieuw concept zijn. Hoewel dit technisch haalbaar lijkt, zal het ontwerp van de SMR moeten worden aangepast en opnieuw worden gecertificeerd met enkele jaren vertraging tot gevolg. Deze vertraging maakt de Gen IV voor thermische inzet van SMR's relatief aantrekkelijker, aangezien dit de beoogde tijdswinst van een Gen III+ t.o.v. Gen IV beperkt.



Figuur 5-2 Versimpelde weergave van een SMR volledig ingezet voor warmtelevering

Een combinatie van de twee is ook mogelijk, waarbij een deel van de geproduceerde stoom direct wordt ingezet om (gedeeltelijk) in de warmtevraag te voorzien en een ander deel om (gedeeltelijk) in de elektriciteitsvraag te voorzien, de zogeheten cogeneratie-modus, of *warmtekrachtkoppeling (WKK)*. De verhouding tussen het direct inzetten van de geproduceerde hogetemperatuur stoom en de elektriciteitsproductie kan binnen bandbreedtes worden gevarieerd al naar gelang de behoefte van de gebruiker. De volledig thermische inzet en volledig elektrische inzet van de SMR's vormen dan ook de uitersten van een spectrum aan mogelijke combinaties tussen warmte- en elektriciteitslevering. Ook voor een SMR in cogeneratie-modus geldt dat een Gen III+ een aanpassing in het ontwerp vereist, mogelijk met enkele jaren vertraging tot gevolg.



Figuur 5-3 Versimpelde weergave van een SMR volledig ingezet in cogeneratie-modus, voor zowel warmtelevering als elektriciteitsproductie

Voor alle drie de modus operandi geldt dat er altijd een laagwaardige restwarmtestroom zal zijn van rond de 100 °C, afkomstig van de condenser die de afgewerkte stoom afkoelt. Deze warmte kan alsnog worden uitgekoppeld of moet worden weggekoeld.

Flexibele inzet van SMR's

De meeste SMR's bieden ook de mogelijkheid om regelbare flexibele productie (load-balancing) te leveren, om eventuele veranderingen in het afnameprofiel (thermisch, dan wel elektrisch) te kunnen accommoderen. Flexibele inzet op korte tijdsschalen (minuten) wordt in feite gefaciliteerd door meer of minder warmte weg te koelen. Op langere tijdsschalen geldt dat Gen III+-SMR's (theoretisch) kunnen zakken tot 50% van hun elektrisch vermogen, met een op- of afschaalsnelheid van zo'n 1-5% van het totale bereik per minuut (ruwweg 10 MWe per minuut). Een dergelijke flexibiliteit gaat wel gepaard met efficiëntieverliezen, aangezien de reactor en stoomturbines zo niet op hun optimale vermogen draaien. Bovendien stijgen de onderhoudskosten door snellere slijtage bij dagelijks op- en afregelen. De praktische toepasbaarheid moet nog worden aangetoond.

Gen IV-SMR's worden doorgaans ontwikkeld met meer faciliteiten om flexibiliteit te bieden. Die flexibiliteit komt niet door het variëren van het reactorvermogen, maar via warmteopslag tanks als buffer. De reactor draait volcontinu door, terwijl de gegenereerde warmte wordt opgevangen bijvoorbeeld in gesmolten zout. Als de vraag naar elektriciteit stijgt dan kan extra warmte worden via de turbines worden benut om extra stroom te leveren. Op deze manier is een groter bereik aan vermogens gedurende langere periodes mogelijk. Dergelijke oplossingen zijn technologisch nog niet uitontwikkeld en zullen nog enige jaren vergen en vraagt aanzienlijke investeringen in warmteopslag. We refereren voor de systeeminpassing van SMRs naar een recente TNO-studie (TNO, NRG Pallas, 2025).

5.4 Leveringszekerheid van een SMR

SMR's bieden in potentie een hoge beschikbaarheid en betrouwbaarheid. Reactoren worden typisch ontworpen op een beschikbaarheid van zo'n 90-95 procent en kunnen dus 8.000 uur of meer vollast per jaar leveren. Naast onderhoud moeten SMR's ook na reguliere intervallen sluiten voor een brandstofwissel. Voor Gen III-SMR's zal dit iedere 1,5 tot 2 jaar plaatsvinden. Brandstofwissels nemen 2-3 weken in beslag en worden gepland tijdens regulier onderhoud, zodat de beschikbaarheid niet verminderd. Gen IV-SMR's hebben langere brandstofcycli, tussen de vier en tien jaar. Het vervangen van de brandstof kost dan ongeveer twee maanden.

5.5 Brandstofcyclus en logistiek Gen III+ en Gen IV SMR

Tabel 5-2 geeft een overzicht van de brandstofkarakteristieken en afvalbeheerstrategieën van diverse ontwerpen SMR's, gerangschikt naar generatie en omvang. Hierbij zijn kernparameters samengevat zoals

brandstof-type, verrijkingsgraad, duur van de splijtstofcyclus en het aantal cycli (dat de brandstof kan worden gebruikt), in combinatie met de bijbehorende aanpak voor afvalbeheer.

Deze vergelijking laat de diversiteit aan SMR-technologieën zien, variërend van conventionele watergekoelde ontwerpen op laag-verrijkt uranium (LEU) tot geavanceerde Generatie IV-reactoren die gebruikmaken van hoogverrijkt laag-verrijkt uranium (HALEU), gemengde oxiden (MOX) of gesmolten zoutsystemen. Deze verschillen hebben belangrijke implicaties voor de brandstofketens, de operationele logistiek en het beheer van hoogradioactief afval op de lange termijn.

Tabel 5-2: Overzicht brandstofkenmerken en afvalstrategieën van geselecteerde SMR-ontwerpen

SMR	Reactor	Brandstof-type	Verrijkingsgraad	Duur splijtstofcyclus	Aantal cycli	Afvalbeheer
SMR Gen III+	Rolls-Royce RR-SMR	UO ₂ pellets	<5%	18–24 maanden	3	Verbruikte splijtstof eerst in bassins, daarna in droge containers; laag- en middelradioactief afval geconditioneerd voor verwijdering (vergelijkbaar met grote DWR).
	GE Hitachi BWRX-300	UO ₂ pellets	<5%	12 maanden (vraagvolgend) – 24 maanden (baseload)	3	Opslag vergelijkbaar met BWR's: eerst in bassins, daarna in droge containers; beperkt afval uit harsen en filters.
	NuScale VOYGR (4NPM)	UO ₂ pellets	<5%	24 maanden, per module	3	Opslag eerst in bassins, daarna droge containers; vloeibare afvalstromen beheerd conform NRC-normen.
	Holtec SMR-300	UO ₂ pellets	<5%	Geoptimaliseerde brandstofwisselstrategie	3	Opslag ter plaatse in bassins (18 maanden), daarna in lekdichte containers; toepassing van afvalhiërarchie.
Grote SMR Gen IV	X-Energy Xe-100	TRISO-korrels	HALEU (≤19.75 %)	Continue pebble-circulatie, inzetbaar tot 60 jaar (ca. 200.000 korrels)	1	Droge opslag van TRISO-korrels; intrinsieke insluiting door brandstofontwerp.
	Terrestrial IMSR400	Gesmolten zout met opgelost LEU	<20%	Kernvervanging om de 7 jaar (afgesloten kern)	1	Conditionering van brandstofzout voor verwijdering; recycling mogelijk in de toekomst.
	TerraPower Natrium	Metallische brandstof (U-Zr)	HALEU (≤19.75 %)	Batchwissels	3	Natrium gekoelde interim-opslag; potentiële recycling van LWR en eigen splijtstof.
	Newcleo LFR-AS-200	MOX (U-Pu mengsel)	Recycled Pu	Batchwissels	3	Verbranding van actiniden; recycling van splijtstof, resterend afval gestabiliseerd voor geologische berging.
Middelgrote SMR Gen IV	Kairos KP-FHR	TRISO-korrels	HALEU (≤19.75 %)	Online of batch	6	Droge opslag van TRISO-korrels; opties voor diepe isolatie.
	Thorizon One	Gesmolten chloridezout (thorium + SNF-mix)	Variabel	Cartridgegebaseerd, meerjarige cycli	1	Sterk gereduceerd langlevend afval; cartridges geconditioneerd voor verwijdering.

De vergelijking maakt duidelijk dat er aanzienlijke verschillen bestaan tussen SMR Gen III+ en Gen IV-ontwerpen. Gen III+ sluiten grotendeels aan bij de bestaande technologie van grote lichtwaterreactoren, met bekende brandstofketens (uranium mijnbouw, verrijking onder 5%, UO_2 -pellets) en vertrouwde afvalroutes via natte en droge opslag richting geologische eindberging. Daarmee zijn deze ontwerpen relatief snel inpasbaar in het huidige nucleaire stelsel.

Generatie IV-reactoren introduceren daarentegen nieuwe technologieën en daarmee uitdagingen. Voor de brandstofvoorziening zijn opschaling en certificering nodig van onder meer TRISO-productie, HALEU-verrijking en de verwerking van gesmolten zouten. Ook op het gebied van afvalbeheer brengen deze ontwerpen innovaties, zoals recycling, gesloten cycli en de verbranding van actiniden. Daarmee kan op termijn het volume en de radiotoxiciteit van het afval worden teruggebracht, al blijft eindberging noodzakelijk voor het resterende hoogradioactieve afval.

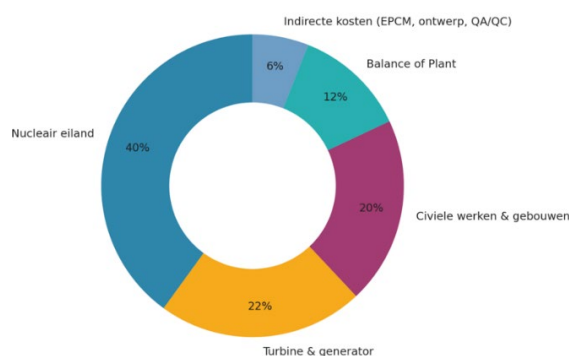
Tot slot geldt dat voor conventionele, nucleaire brandstoffen internationale standaarden voor transport en opslag al bestaan, terwijl voor nieuwe brandstofvormen zoals TRISO-korrels of gesmolten zout nog aanvullende normen en vergunningstrajecten nodig zullen zijn. Dit benadrukt dat GenIII+-technologieën op kortere termijn toepasbaar zijn, terwijl Gen IV vooral een perspectief voor de langere termijn biedt en afhankelijk blijft van internationale ketenontwikkeling.

5.6 Investeringskosten SMR's

Het is op dit moment niet mogelijk om een nauwkeurige en gedetailleerde schatting te maken van de kapitaal- en operationele kosten van SMR's. De technologie bevindt zich nog in een vroeg ontwikkelingsstadium en de kosten en ontwikkelrisico's zijn project specifiek. De beschikbare kostenramingen zijn daarom gebaseerd op modellering en projecties, en gaan gepaard met een hoge mate van onzekerheid. Publicaties van leveranciers bevatten vaak optimistische kapitaalkosten (CAPEX) om investeerders en beleidsmakers te overtuigen, maar onderliggende aannames zijn zelden openbaar. Onafhankelijke studies, onder meer over het NuScale-ontwerp tonen aan dat hier aanzienlijke verschillen kunnen optreden tussen belofde en werkelijke kosten (B. Mignacca, 2020) (Institute for Energy Economics and Financial Analysis, 2024).

De huidige internationale literatuur schetst voor de zogenoemde *Nth-of-a-Kind* (NOAK)-SMR's een bandbreedte van circa €3.000 tot €7.000 per kWe aan actuele kapitaal-kosten, waarbij kostenindexering, financieringskosten en bouwrente niet inbegrepen zijn. De Rijksoverheid hanteert in haar marktanalyses een bandbreedte van €3.000–€5.000 per kWe voor NOAK-SMR's (NRG, 2023). Andere studies bevestigen deze ordegrootte, maar wijzen er ook op dat de bovengrens aanzienlijk hoger kan liggen bij geavanceerde technologieën of projecten zonder grootschalige seriebouw (Idaho National Laboratory, 2024), (International Energy Agency, 2025).

Een typische verdeling van de kapitaalskosten van de SMR wordt gegeven in Figuur 5-4. De brede spreiding in geschatte kapitaalkosten wordt veroorzaakt door onder andere: verschillen in technologie (Gen III+ versus Gen IV), schaalgrootte van vermogen, mate van modularisatie en standaardisatie, seriebouw- en leereffecten, locatiekeuze, projectcontext (bestaande - of nieuwe locatie), regelgeving, doorlooptijd, de paraatheid van de toeleveringsketen, en de wijze van aanbesteden (bijvoorbeeld via een turnkey-contract of op materiaal- en urenbasis).



Figuur 5-4: Typische CAPEX-verdeling SMR (NOAK);
bron: INL, IAEA

Veel van deze invloeden dienen zich in de praktijk nog te bewijzen. Dit betekent dat kosteninschattingen sterk contextafhankelijk zijn en alleen in bandbreedtes zinvol kunnen worden gepresenteerd. In Tabel 5-3 worden drie illustratieve scenario's onderscheiden, laag, midden en hoog, die laten zien hoe verschillende projectcondities kunnen leiden tot aanzienlijke verschillen in de uiteindelijke CAPEX.

Tabel 5-3: Laag, Midden en Hoog investeringscondities

Scenario	Laag	Midden	Hoog
Indicatieve CAPEX	€ 3.000-4.000/kWe	€ 4.000-6.000/kWe	€ 6.000-7.000+/kWe
Technologie en schaal	Grote Gen III+-SMR, meerdere units per site	Grote Gen III+-SMR of Gen IV-SMR van type HTGR	Gen IV overig
Modularisatie en standaardisatie	Centrale serieproductie van componenten nucleaire eiland en stoomcircuit	Middelmatig; deel fabriekswerk, deel maatwerk op locatie	Laag, beperkte prefabricage
Seriebouw / leercurve	Gevorderd: vroege NOAK-serie (Aantal 5–15), leereffect 6–10% per reactor	NOAK Aantal 3–8; leereffect zichtbaar, maar onvolledig	Vroege serie of verspreid in de tijd; weinig schaalvoordeel
Constructieduur	3,5–4,5 jaar per unit (overlappende fasen)	4,5–5,5 jaar	5,5–7 jaar
Locatie & scope	Brownfield (bestaande site & elektriciteitsnet), hergebruik infra	Licht greenfield (nieuwe locaties); beperkte hergebruikopties	Greenfield (nieuwe locaties) met complexe condities en elektriciteitsnetaansluiting
Proces voor vergunningen	Gestroomlijnd, voorspelbaar; parallelle beoordeling	Robuust maar met iteraties; sequentieel	Fragmentarisch, onderlinge afhankelijkheden; extra eisen en iteraties
Toeleveringsketen en contractvorm	Gevestigde keten; ervaren contractor, alliantiemodel, risicodeling	Keten grotendeels aanwezig; enkele bottlenecks; vaste prijs voor standaardscope	Embryonale keten voor speciale materialen en brandstof; hogere risicopremie voor bouwen

Deze scenario's maken zichtbaar dat de uiteindelijke projectkosten van SMR's in hoge mate afhankelijk zijn van de projectcontext en de inrichting van het bouw- en vergunningstraject. Beleidsmatig benadrukt dit de noodzaak van duidelijke randvoorwaarden, zoals voorspelbare vergunningprocedures, tijdige opbouw van de toeleveringsketen en keuze voor geschikte contractvormen, om kostenrisico's te beperken. Naast de kapitaalkosten wordt in de literatuur ook vaak de verwezen naar de Levelized Cost of Electricity (LCOE), een maat voor de gemiddelde kostprijs van elektriciteit die een energie-installatie produceert over de hele levensduur. De LCOE bestaat onder andere uit: kapitaalkosten, operationele en onderhoudskosten, brandstofkosten, koolstofkosten en ontmantelingskosten, zie Tabel 5-4. Het is belangrijk om te benadrukken dat de waarde van elektriciteit niet uitsluitend afhangt van de gebruikte technologie, maar in sterke mate wordt beïnvloed door de interactie binnen het bredere energiesysteem. Conclusies over de economische levensvatbaarheid van een technologie kunnen daarom niet uitsluitend worden gebaseerd op LCOE-berekeningen. De LCOE is een nuttige kostenindicator, maar geeft geen inzicht in inkomstenstromen, marktwerking of systeemwaarde.

Tabel 5-4: Verschillende factoren die de LCOE beïnvloeden

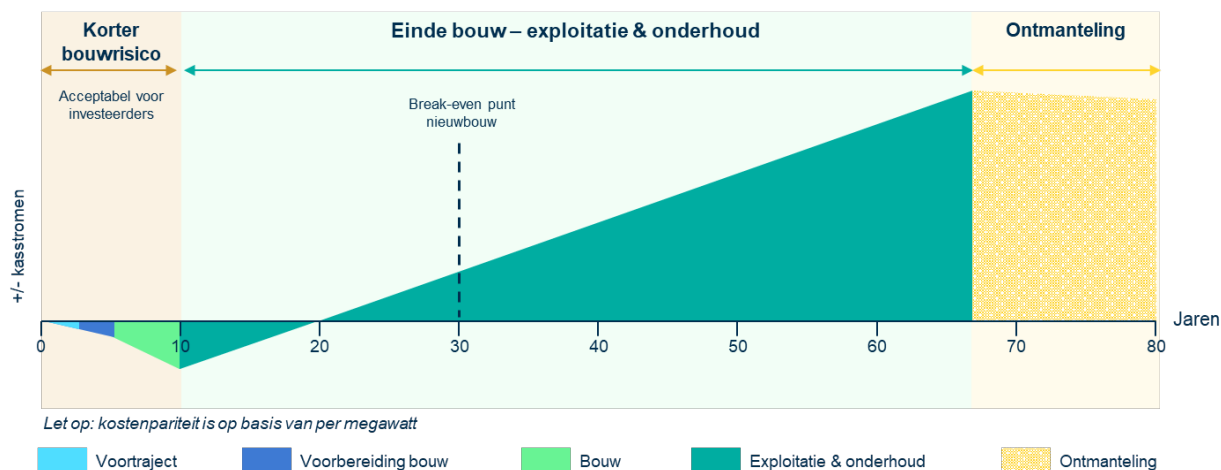
Factoren van invloed op LCOE	Eenheid	SMR Gen III+ / Gen IV		
		Haskoning inschatting*	(TNO, NRG Pallas, 2025)	(IEA, 2025)
Bron				
Investering Laag	[€/kW]	4.000*	7.649	5.900
Investering Hoog	[€/kW]	7.000*	8.271	
Levensduur	[jaren]	45	-	-
WACC	[%]	8%	2,25% - 6%	4% -8%
OPEX vast	[€/kW]	100	163	-
OPEX variabel	[€/MWh]	7	26	
Capaciteitsfactor (vollasturen)	[kWh/jaar]	8.000*	5.532 – 6.854	6.575-7.890
Brandstofkosten	[€/MWh]	8	-	-

Zoals in Tabel 5-4 beschreven staat hebben de verschillende financiële, technische en operationele parameters allemaal direct invloed op de uiteindelijke LCOE. Grote energiecentrales, die worden gebouwd en geëxploiteerd door institutionele investeerders, hebben doorgaans een hogere WACC², (gewogen gemiddelde kapitaalkosten), dan bijvoorbeeld de overheid. Met name vanwege het hogere rendement op eigen vermogen dat door investeerders wordt geëist in verband met lange looptijden en daarmee verhoogd risico. De huidige ramingen plaatsen de **LCOE van SMR's** (Gen III+ en Gen IV) tussen **€60–120/MWh** afhankelijk van technologie en kapitaalkosten. Zowel SMR's als kerncentrales zijn zeer kapitaalintensief, maar hebben over het algemeen lagere brandstofkosten vergeleken met andere baseload fossiele brandstoffen.

Investeringskosten van SMR's zijn sterk afhankelijk van ontwerp, schaal en ervaring. Traditioneel hebben kernenergieprojecten te maken met aanzienlijke kosten- en planningsrisico's (Institute for Energy Economics and Financial Analysis, 2023). Het financieringsrisico van SMR's wordt gekenmerkt door zowel risicoverlagende als risicoverhogende factoren.

Aan de ene kant kunnen project risico's voor SMR's beperkt worden door:

- Kleinere, minder complexe scope: minder beton en staal, compacter nucleair eiland, waardoor er minder kans is op grootschalig herstelwerk; een kleinere kans op vertragingen, herstelwerk en rentekosten tijdens de bouw, zie Figuur 5-6.
- Leercurve: door de verwachte, grotere aantallen identieke reactoren ontstaan leereffecten; de kosten van de tiende NOAK zijn naar verwachting lager dan de eerste NOAK;
- Prefabricage op een centrale locatie: door de gecontroleerde omgeving ontstaan minder kwaliteits- en documentatieproblemen en kan efficiënter gewerkt worden;
- Regelgevend traject vooraf: door informeel vooroverleg of indien een type-lisensering mogelijk wordt (zoals met een General Design Approval in het Verenigd Koninkrijk of USA) kunnen problemen vroegtijdig worden opgelost;
- Verkorte bouwtijd: de onderdelen van eenheden kunnen centraal worden geprefabriceerd terwijl vergunningstrajecten op meerdere locaties lopen; hierdoor kan na vergunningverlening relatief snel (mogelijk in 3 tot 4 jaar tijd) worden gebouwd.



Figuur 5-5: Indicatieve cumulatieve kasstroomontwikkeling van een SMR-energiecentrale, uitgaande van kostenpariteit met een conventionele grootschalige kerncentrale, aanpassing figuur IEA (2025). Vertragingen en tussentijdse aanpassingen kunnen leiden tot grote stijging van zowel de directe kosten alsook de bouwrente. Ruwweg gaat ieder jaar vertraging gepaard met circa 10-15% extra investeringskosten. Dit is een van de belangrijkste redenen voor de recente kostenoverschrijdingen bij de bouw van kerncentrales.

² De WACC, (gewogen gemiddelde kapitaalkosten) is de gemiddelde rentevoet waartegen een project gefinancierd wordt. Het combineert de rente op leningen (schuld), en het rendement dat investeerders eisen op hun eigen vermogen (equity) gewogen naar hun aandeel in de financiering.

Aan de andere kant verhoogt de beperkte technologische volwassenheid van SMR's de

financieringsrisico's: Niet alle risico's kunnen worden weggenomen: technologie-, uitvoerings-, schaal- en marktrisico's blijven aanzienlijk: Zo heeft Nuward recent besloten om het complete concept en ontwerp te herzien, terwijl het NuScale's project (6×77 MWe) in november 2023 werd beëindigd na kostenstijgingen en het uitblijven van afnemers.

- SMR specifieke risico's zijn: Nieuwe brandstoffen: trajecten die vaak meer dan tien jaar duren waarvoor veel testen en vergunningen nodig zijn; bovendien moeten ook nieuwe brandstoffabrieken parallel worden ontwikkeld. In veel gevallen is de brandstofketen de beperkende factor. Dit geldt in sterke mate voor Gen IV-SMR's. Gesmoltenzoutreactoren zijn afhankelijk van de beschikbaarheid van plutonium in de juiste vorm. TerraPower Natrium schoof minimaal twee jaar op door gebrek aan HALEU (Nuclear Engineering International, 2022).
- Testprogramma's en demonstrator-units: omdat SMR's nieuw zijn moet hun technologie nog worden gecertificeerd; de veiligheid nog worden aangetoond; dit vereist vele simulaties en testprogramma's.
- Toeleveringsketen: er zijn tientallen nieuwe SMR-concepten in ontwikkeling; het is niet mogelijk om voor alle concepten een even uitgebreide keten op te zetten als voor de gevestigde grote kerncentrales. Naar verwachting zal een grote consolidatieslag optreden onder OEM's, waardoor voor potentiële leveranciers en projectontwikkelaars onzekerheid bestaat over welke SMR's de 'winnaars' zullen worden.

Vergeleken met de gevestigde technologieën voor de industrie, zoals gasgestookte WKK's of stoomketels zijn SMR's risicovoller: bestaande installaties zijn al decennialang in grote getallen gebouwd door diverse leveranciers en kunnen door algemene technici worden bediend en onderhouden. Ook zijn CAPEX en OPEX goed vast te stellen en is de vergunningverlening relatief eenvoudig. Industriële partijen kunnen kiezen voor ontwikkeling en beheer door de eigen organisatie of voor een energieafname contract via een energiebedrijf. Hoewel modularisatie en kortere bouwtijden project risico's gedeeltelijk kunnen beperken, blijven de CAPEX en OPEX onzeker. De huidige bandbreedte voor de investeringskosten van SMR's zijn nu nog gebaseerd op aannames. Standaardisatie en seriebouw kunnen risico's op termijn verlagen, maar veel obstakels moeten nog worden overwonnen.

Omdat SMR's kapitaalintensief zijn, zijn ze alleen kosteneffectief bij hoge vollasturen. Voor warmteproductie wordt de **LCOH** van Gen IV-reactoren geschat op **€20–30/MWh**. Daarmee zijn SMR's vooral aantrekkelijk bij voorspelbare vergunningen, seriebouw en stabiele afzet voor warmte of stroom. Voor waterstofproductie liggen de kosten rond €3,5/kg of hoger (ULC-Energy, 2024); in gunstige omstandigheden mogelijk zelfs tot €2/kg, mits de SMR ook tijdelijk elektriciteit aan het openbare elektriciteitsnet kan leveren in piekuren en deze inkomsten in de waterstofkostprijs verdisconteerd worden. Deze cijfers zijn echter zeer gevoelig voor diverse variabelen zoals de EU-ETS CO₂-prijzen de kosten van de SMR en de elektrolyser zelf. Net als bij elektriciteit zal de commerciële levensvatbaarheid van door SMR's geproduceerde waterstof afhangen van een volwassen, schaalbare markt (Nucnet, 2025). Ter vergelijking: de huidige kostprijs van grijze waterstof (uit aardgas) bedraagt ongeveer €1,5/kg (EBN, 2025), terwijl groene waterstof (uit hernieuwbare elektriciteit) rond de €10/kg ligt.

In de rapporten (TNO, 2025) en (TNO, NRG Pallas, 2025) worden de gevolgen effecten van kernenergie op het energiesysteem gemodelleerd en de uiteindelijke systeemkosten ingeschat in een situatie met en een situatie zonder kernenergie in verschillende scenario's. De onzekerheidsmarges in de resultaten zijn dusdanig groot ten opzichte van de verschillen in systeemkosten tussen wel of geen kernenergie, dat er geen duidelijk voor- of nadeel toe te schrijven is aan het toevoegen van kernenergie vanuit het perspectief van systeemkosten. De verschillen in systeemkosten van een systeem met of zonder kernenergie hangen

af van de toekomstige elektriciteitsvraag, in de scenario's waarin de elektriciteitsvraag sterk groeit is alle additionele productiecapaciteit gewenst, dus vullen wind op zee en kernenergie elkaar aan in het voorzien van de relatief grote elektriciteitsvraag.

SMR's kennen wereldwijd een grote variatie in ontwerp en toepassingsmogelijkheden. SMR's kunnen verschillende bedrijfsmodi aannemen: volledig elektrisch, volledig thermisch of in warmtekrachtkoppeling (WKK). Gen III+-reactoren kunnen hun vermogen beperkt aanpassen (tot circa 50%), maar dit gaat gepaard met efficiëntieverlies en hogere onderhoudskosten. Gen IV-reactoren kunnen dankzij warmteopslag flexibeler inspelen op de vraag, al bevinden deze systemen zich nog in de ontwikkelingsfase. Gen III+ ontwerpen zijn het verst gevorderd en sluiten aan bij bestaande brandstof- en afvalketens. Ze zijn vooral bedoeld voor de productie van elektriciteit, met een geschatte kostprijs van € 60–120/MWh. Gen IV-reactoren zijn technologisch minder gevorderd, maar bieden door hun hogere temperaturen (400-800°C) perspectief voor proceswarmte en waterstof, met geschatte warmteprijzen van €20–30/MWh. Hun brandstof- en afvalketens (TRISO, HALEU, gesmolten zout) vereisen echter nog opschaling én internationale standaardisering.

De investeringskosten van SMR's lopen uiteen van €3.000–7.000/kWe, afhankelijk van schaal, locatie, standaardisatie, seriebouw en vergunningstraject. Omdat SMR's kapitaalintensief zijn, zijn ze vooral rendabel bij hoge vollasturen en stabiele afzet van elektriciteit, warmte of waterstof.

Hoewel seriebouw en modularisatie op termijn kosten-voordelen kunnen bieden, blijven de onzekerheden over doorlooptijden groot. De meerwaarde van SMR's hangt direct samen met de ontwikkeling van de industriële energievraag op lange termijn. Ze kunnen op termijn bijdragen aan het behoud van energie-intensieve industrie in Nederland, mits wordt gezorgd voor voorspelbare vergunningprocedures, seriebouw en duidelijke verdienmodellen voor warmte- en elektriciteitslevering.

6 Algemene overwegingen inpassing SMR

In dit hoofdstuk worden de algemene condities voor inpassing behandeld: benodigde ruimte, koelwatervoorziening, en de verwachte tijdlijnen voor beschikbaarheid van SMR's in Nederland en de veiligheid én vergunningsaspecten. Het institutionele kader wordt geschetst: de rol van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), relevante Europese en nationale kaders, en de randvoorwaarden voor nucleaire veiligheid en afvalbeheer. Ook wordt ingegaan op de mogelijke noodzaak voor aanvullende toetsingskaders.

Het doel van deze analyse is om op hoofdlijnen inzicht te geven in de vergunning- en veiligheidstechnische aspecten van SMR's, type Gen III+ en Gen IV. Daarbij worden de belangrijkste aandachtspunten belicht die een rol spelen bij de ruimtelijke en beleidsmatige inpassing van SMR's binnen deze categorieën, gebaseerd op de drie fundamentele veiligheidsfuncties: beheersing van de reactiviteit (kettingreactie van kernsplijting), koeling (ook na afschakeling van de reactor) en insluiting (om te voorkomen dat radioactieve stoffen vrijkomen).

Het is belangrijk om te benadrukken dat dit geen diepgaande studie of vergelijking is van de veiligheidskenmerken van specifieke leveranciers of technologieën. Om de geschiktheid van een locatie (site) te bepalen zullen de "siting" en "siting characterisation" procedures gevolgd moeten worden op basis van huidige IAEA- en industrierichtlijnen, zoals SSG-35 van de IAEA (IAEA, 2015).

Alle relevante thema's worden tekstueel toegelicht. Voor een aantal thema's wordt, waar relevant, ook een visuele weergave gemaakt met behulp van QGIS-kaarten. Het doel is om inzicht te krijgen in hoe verschillende ruimtelijke factoren ertoe bijdragen dat een locatie wel of niet geschikt is voor de plaatsing van een SMR. Hieronder volgt een overzicht van de elementen die worden meegenomen in de analyse.

Tabel 6-1: Thema's die worden meegenomen bij de analyse ruimtelijke inpassing

Thema	Toelichting
Aangewezen gronden en bestaande functies	- Bij dit thema wordt gekeken naar welke functies de gronden hebben die aangewezen zijn om te onderzoeken voor de DOW-casus - Het kan hierbij bijvoorbeeld gaan om gronden met een bedrijfsfunctie die momenteel niet benut worden of om landbouwareaal. - Uitgelegd wordt wat het verschil is tussen kunnen aansluiten bij bestaande functies zoals deze zijn vastgelegd in het omgevingsplan of niet. - Voor de clustercasus wordt toegelicht welke gronden beschikbaar zijn in het industriecluster die nader onderzocht worden. - Doel is om inzichtelijk te krijgen welke gronden beschikbaar zijn voor de verdere ruimtelijke analyse. Voor de DOW-casus wordt ook gekeken naar in welke mate aan huidige functies kan worden voldaan.
Leefomgeving	- Bij dit thema wordt gekeken naar hoe omgegaan moet worden met gevoelige objecten zoals woningen, zorg- en onderwijsinstellingen in de omgeving. - Er zijn geen vaste afstanden in de wet opgenomen over de afstand die gehouden moet worden van een gevoelig object tot een kerncentrale of nucleaire instelling. - Factoren waar, naast veiligheid, rekening mee moeten worden gehouden zijn geluidshinder en aanzicht. - Er zijn nog geen gegevens bekend over welke afstand (gemiddeld) aangehouden moet worden om aan veiligheid- en geluidsnormen te kunnen voldoen bij een SMR. Omdat er na de herziening van de Omgevingswet geen richtlijnen zijn voor veiligheidsafstanden bij kerncentrales, zoals uitgelegd in 6.5, wordt er in

	deze studie ter indicatie gebruik gemaakt van een 500 meter zone waarbij nadere beoordeling nodig is. Hiermee wordt zichtbaar gemaakt welke ruimte er daardoor vrijkomt en voor plaatsing van een SMR in de casussen. Voor andere aspecten, zoals geluid (500 meter), geur (10 meter) en stof (10 meter), gelden wel richtafstanden. De verwachting is echter dat het ook mogelijk zal zijn een SMR op een afstand korter dan 500 meter van gevoelige objecten te realiseren. Voor die situaties ontbreekt op dit moment echter nog een duidelijke richtlijn. Doel is om inzichtelijk te maken in welke mate voor deze casussen de fysieke inpassingsruimte voor SMR's beperkt wordt door gevoelige objecten.
Veiligheid	- Dit wordt apart behandeld als thema maar is wel van belang voor de ruimtelijke inpassing. - Doel is om inzichtelijk te maken in welke mate voor deze casussen de fysieke inpassingsruimte voor SMR's beperkt wordt door veiligheidsredenen.
Ecologie	- Natura 2000-gebieden en Natuurnetwerk Nederland (NNN) gebieden worden in deze studie uitgesloten als geschikte locaties voor een SMR. - Doel is om inzichtelijk te maken in welke mate voor deze casussen de fysieke inpassingsruimte voor SMR's beperkt wordt door beschermde natuurgebieden.
Hoogwaterbescherming	- De SMR-locatie moet voldoende bestemd zijn tegen overstromingsrisico's. - Overstromingsgevoelige gebieden worden in kaart gebracht op basis van bestaande risicokaarten, als onderdeel van de toetsing op robuustheid en veiligheid van potentiële SMR-locaties. - Indien locaties op voorhand niet geschikt zijn, kan het ophogen van een locatie een mitigerende maatregel zijn. - Doel is om te laten zien hoe hoogwaterbeschermingseisen het aantal geschikte gronden bij deze casussen beperkt.
Koelsysteem	- De koelbehoefte worden toegelicht en de benodigde infrastructuur voor een dergelijke installatie. - Doel is om inzichtelijk te maken waar je in verband met koeling rekening mee moet houden bij de ruimtelijke inpassing.
Elektrische netaansluiting	- De ligging van het hoogspanningselektriciteitsnet in het energiecluster wordt opgenomen in de analyse. - Daarnaast wordt gebruik gemaakt van de netcongestiekaart om inzicht te verkrijgen in netcapaciteit en mogelijke knelpunten. - Doel is om mogelijke locaties voor netaansluiting en knelpunten inzichtelijk te krijgen voor de cluster casus.
Potentiële klanten	- De ligging van top-10 mogelijke klanten ten aanzien van elektriciteit, warmte en waterstof binnen cluster in beeld brengen. - Beschrijven in welke mate de onderlinge afstand tot SMR relevant is voor levering van elektriciteit, warmte en waterstof. - Doel is inzichtelijk krijgen waar mogelijke grote klanten gelokaliseerd zijn en binnen welke afstand je een SMR zou willen inpassen voor verschillende producten (elektriciteit, warmte en waterstof).

De ruimtelijke verdeling van waterstofvraag en -aanbod is in deze studie niet afzonderlijk uitgewerkt, omdat deze al functioneel wordt meegenomen in de energetische inpassing en de meerwaarde voor de verdere ruimtelijke analyse beperkt is. Eveneens is de analyse van een gedeelde stoominfrastructuur buiten beschouwing gelaten, vanwege de grote afstanden tussen de energieafnemers in het cluster en daarmee de beperkte beleidsrelevantie van een zeer grootschalig stoomnetwerk binnen de huidige scope.

Voor de Dow-casus wordt uitgegaan van het bestaande stoomnet op de DOW productielocatie dat op dit moment gevoed wordt vanuit de Elsta centrale (PBL, 2022).

6.1 Koelsystemen

Koeling wordt benut voor het veilig en efficiënt functioneren van SMR's. Kleinere SMR's hebben soms geen externe koeling nodig omdat ze gebruik maken van koelsystemen natuurlijke convectorie en circulatie, via de lucht. Grote en middelgrote SMR's hebben wel externe koeling nodig. Slechts ongeveer 30-40% van de thermische energie die een SMR opwekt wordt omgezet in elektriciteit. De resterende energie moet voor een groot deel actief worden gekoeld. Indien een SMR echter geheel wordt ingezet voor het leveren van warmte is er 60 tot 70% minder koelvraag.

Er zijn verschillende systemen beschikbaar voor de koeling van een SMR. Hieronder worden de belangrijkste genoemd en kort gekenschetst. Soms kunnen systemen worden gecombineerd in verband met operationele flexibiliteit en bedrijfszekerheid.

Tabel 6-2 Koeltechnieken en aspecten

	Doorstroomkoeling met oppervlaktewater	Koeltoren (lucht en verdamping)	Koelmodules (lucht en verdamping)
			
Karakteristiek voor een SMR > 250 MWe Generatie III+ of IV	Vraagt veel water: mogelijke interactie met andere koelsystemen. Veel ruimte nodig voor in- en uitlaatsystemen, koelwaterleidingen.	Verbruikt geen of weinig water. Vraagt veel ruimte. Iets lager elektrisch rendement.	Verbruikt geen of weinig water. Vraagt minder ruimte. Iets lager elektrisch rendement.
Toepasbaarheid	Voorkeursoptie bij grote kerncentrales, maar soms beperkt door gebrek aan koelwater of onwenselijke milieu-impact	Soms beperkt door ruimtegebrek. Kan worden ervaren als horizonvervuilend.	Standaard bij veel SMR-leveranciers vanwege locatie onafhankelijkheid.

Ter illustratie kerncentrale Borssele gebruikt 71.200 m³ oppervlaktewater per uur (Commissie vor de milieueffectrapportage, 2024). Small Modular Reactors van 200 MWe hebben circa 36.000 m³/uur nodig (NRG Pallas, 2024).

Gebruik (en lozing) van koelwater kan een impact hebben op de waterkwaliteit en het mariene leven in oppervlaktewateren door chemische en thermische emissies. Door klimaatverandering stijgt de zeespiegel en wordt neerslag minder voorspelbaar, met als gevolg drogere zomers en nattere winters. Deze extremere weersomstandigheden kunnen het functioneren van installaties die oppervlaktewater

⁵ RWE Eemshaven koelwater uitlaat
⁶ RWE koeltoren Swentibold centrale
⁷ EPNLcondensor Rijnmond 2 centrale

behoeven, beïnvloeden.⁹ Hogere watertemperaturen vormen een belemmering om oppervlaktewater te gebruiken voor koeling, omdat het koelwater dan minder effectief is en het risico op overschrijding van de maximaal toegestane lozingstemperatuur toeneemt.¹⁰ Dit kan ertoe leiden dat er minder water mag worden onttrokken of dat installaties tijdelijk hun productie moeten beperken. Daarnaast neemt, als gevolg van klimaatverandering, de kans op droogte en een afname van de beschikbaarheid van grond- en oppervlaktewater toe. Dit heeft negatieve gevolgen voor zowel de waterkwaliteit als de waterkwantiteit. Tijdens perioden van droogte en lage rivierafvoer kunnen de concentraties van (chemische) stoffen in het koelwater te hoog oplopen, waardoor er minder koelwater mag worden gebruikt. In de Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn op Europees niveau normen vastgesteld om de waterkwaliteit en kwantiteit te waarborgen. In Nederland is de KRW uitgewerkt in de (Omgevingstwet, 2025) en het (Besluit kwaliteit leefomgeving, 2025).

Beperkingen in het gebruik van koelwater hebben voor sommige koelsystemen directe gevolgen voor de opwekkingscapaciteit en daarmee voor de exploitatie van een SMR. Dergelijke situaties kunnen zich sneller voordoen bij installaties die afhankelijk zijn van binnenlandse rivieren. In het beleid voor de nieuw te bouwen kerncentrales wordt gestreefd naar locaties waar ruime koelmogelijkheden aan oppervlaktewater aanwezig zijn, om het gebruik van koeltorens en de bijbehorende ruimtelijke impact zoveel mogelijk te vermijden. Echter is niet te voorkomen dat installaties die koelwater behoeven een impact zullen hebben op de waterhuishouding en waterkwaliteit. Bij het ruimtelijk inpassen van een SMR is het dus van belang om te kijken naar de mogelijkheden en lokale omstandigheden om koelwater te onttrekken en lozen.

Kader 6-1 Impact van koelwater op waterkwaliteit

Impact op waterkwaliteit uitgelegd

Koelwater kan een impact hebben op de waterkwaliteit (onder meer de chemische en ecologische toestand van water). Er zijn een drietal emissies die zich kunnen voordoen en die een impact hebben op de waterkwaliteit:

- Thermische emissies: na gebruik wordt het koelwater, dat door het koelproces is opgewarmd, weer terug in het oppervlaktewater gebracht. Hierdoor kan de temperatuur van het ontvangende water stijgen. Om negatieve gevolgen voor het watermilieu te voorkomen, zijn er strikte regels voor de maximale temperatuurstijging van het geloosde water. In warme periodes, wanneer het oppervlaktewater al relatief warm is, kan dit ertoe leiden dat een installatie tijdelijk de productie moeten verminderen of stilleggen om overschrijding van de temperatuurgrenzen te voorkomen. Dit beleid is bedoeld om te waarborgen dat de thermische belasting van het watermilieu beperkt blijft.
- Chemische emissies: het koelwater kan kleine hoeveelheden chemicaliën bevatten, bijvoorbeeld als gevolg van het gebruik van anti-corrosiemiddelen of reinigingsmiddelen in het koelsysteem. Deze stoffen mogen alleen in zeer beperkte concentraties in het oppervlaktewater terechtkomen en worden gereguleerd via vergunningen en monitoring.
- Radioactieve emissies: het koelwater bij een SMR komt nooit direct in contact met de reactor of de splijtstof. Er zijn gescheiden circuits, waardoor het koelwater niet radioactief wordt besmet. Desondanks wordt het koelwater continu gemonitord op mogelijke radioactieve stoffen. De lozing van radioactieve stoffen via koelwater is bij normale bedrijfsvoering zeer gering en blijft ruim binnen de wettelijke normen. De belangrijkste radioactieve stoffen die via water kunnen worden geloosd zijn tritium (³H) en enkele andere radionucliden. Dit kan gebeuren door lekkage of diffusie in het primair koelingscircuit. Deze concentratie zijn extreem klein. De monitoring van radioactieve deeltjes in het secundair koelingscircuit is vooral aanwezig om lekken in het primair circuit tijdig op te sporen.

⁹ Zie ook tekst hierover in paragraaf 9.5 van *MER bedrijfsduurverlenging Borssele*.

¹⁰ Dit speelt vooral voor locaties die gebruiken maken van koelwater uit rivieren en meren, maar het kan ook bij locaties aan zee voorkomen.

6.2 Tijdlijn voor introductie van SMR's in Nederland

Er is veel positieve belangstelling voor SMR's maar tegelijk bestaan er vaak (te) hooggespannen verwachtingen over de snelheid van hun introductie in Nederland. Bij de casussen moet daarom rekening gehouden worden met een realistisch tijdpad. Kortgezegd: vóór 2035 zal waarschijnlijk – afgezien van een mogelijke demonstratie-type (First-of-a-Kind) – geen commercieel draaiende SMR (Nth-of-a-Kind) op productieschaal in Nederland operationeel worden. Vanaf 2035 kunnen de eerste grote Gen III+-SMR's worden verwacht en richting 2040 de SMR's van Gen IV.

Het jaar waarin de eerste commerciële SMR's operationeel worden in Nederland hangt af van veel factoren en is moeilijk in te schatten. Om te beginnen moet de leverancier de technologie van de SMR voldoende ontwikkelen om ergens ter wereld een demonstratie-reactor te kunnen realiseren. De eerste operationele SMR's kunnen rond 2030 worden verwacht in de VS, Canada of het VK. Vervolgens zal het naar verwachting minimaal vijf jaar duren voordat een commerciële versie van het betreffende type SMR operationeel kan worden in Nederland. Die tussenliggende periode heeft de leverancier onder meer nodig om de reactor na de allereerste opstart te optimaliseren, de organisatie en financiering verder op te bouwen, en de externe toeleveringsketen en eigen projectorganisatieketen verder uit te bouwen.

Parallel daaraan moet een Nederlandse initiatiefnemer tijdig actie ondernemen. De totale doorlooptijd van de bouw van een SMR is tien jaar of meer. Als een initiatief rond 2026 van start gaat, en rond 2027-2028 een order weet te plaatsen bij een OEM met een geplande FOAK in 2030, dan kan de allereerste SMR vanaf 2035 in Nederland gereed zijn. Dat is een ambitieuze tijdlijn waarin alle stappen zonder tijdverlies moeten worden doorlopen. De initiatiefnemer moet over de locatie, projectorganisatie en financiering beschikken om tijdig een vergunning te kunnen aanvragen die rond 2031-2032 vergeven moet zijn, zodat na vier jaar bouwen en opstarten de reactor in of vlak na 2035 kan starten. Deze snelle doorlooptijd vereist bovendien dat de opdrachtgever het risico neemt om een SMR te bestellen nog voordat de FOAK in gebruik is. Organisaties die een dergelijk risico kunnen dragen zijn nationale overheden (zoals bijvoorbeeld in Polen, Tsjechië en het VK gebeurd), grote (staats)elektriciteitsbedrijven (bijvoorbeeld Vattenfall, OSGE), of grote bedrijven (zoals Microsoft, Google, DOW).

In veel gevallen, en dat geldt voor de meeste private bedrijven, zal een opdrachtgever bij voorkeur wachten op een bewezen operationele FOAK met 1-2 jaar staat van dienst. In dat geval zal de order worden geplaatst na 2032 en duurt het tenminste tot circa 2040 voordat vergunning, bouw en de opstartfase zijn afgerond.

In de Gen III+ gebaseerde figuur hieronder zijn de verschillende stappen in een indicatieve tijdlijn geplaatst (opmerking: dit is een versimpelde weergave; verschillende fasen kunnen elkaar deels overlappen).

In theorie zijn er twee situaties waarin de periode tussen de FOAK en NOAK in Nederland korter is dan vijf jaar. Sommige OEM's claimen dat ze na de FOAK meteen verder gaan met een orderboek in verschillende landen waaronder mogelijk Nederland, waardoor de tussenperiode van vijf jaar aanzienlijk wordt gereduceerd. Een andere mogelijkheid is dat een OEM zelf het initiatief neemt om een SMR in Nederland te realiseren, waardoor aanbesteding niet nodig is en vergunning, overdracht van design authority, bouw en opleiding van de operator-organisatie kunnen worden gestroomlijnd. Echter beide gevallen zijn in verband met de grote technische en projectmatige risico's onzeker, en met een minimale doorlooptijd voor de vergunningen van 4-5 jaar, en een minimale bouwtijd van 3-5 jaar zal realisatie slechts met een uiterste optimalisatie kunnen plaatsvinden vóór 2035.

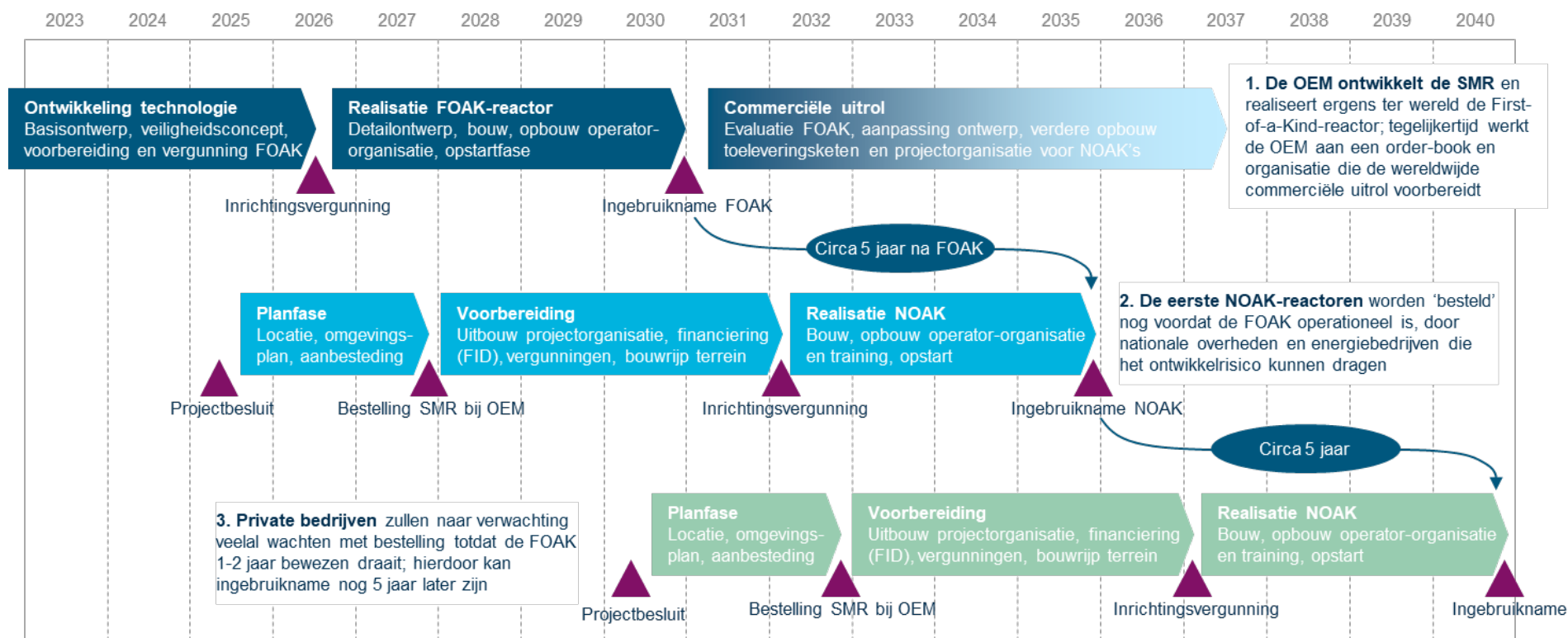


Voor een Gen IV-SMR zal de technologie-ontwikkelperiode tenminste tot 2030 doorlopen hetgeen betekent dat deze op zijn vroegst 5 jaar later operationeel kan zijn vergeleken met een Gen III-SMR.

Deze tijdlijnen zijn relevant met name voor de eerste fase in Casus 2, de vervanging van de Elsta-centrale. Als deze eind jaren dertig uit gebruik wordt genomen en wordt vervangen door een SMR, dan zal Dow een SMR-type moeten selecteren dat in de periode 2035-2040 gerealiseerd kan worden. Volgens de huidige inzichten is de keuze dan beperkt tot grote Gen III-SMR's. Uiteraard zal ook na die periode energie nodig zijn en zijn andere typen SMR's die later beschikbaar komen relevant voor de energievoorziening van Dow en de Schelde-Deltaregio.

Projectgerelateerd

Indicatief scenario voor de introductie van de eerste Gen III-SMR's



Figuur 6-1: Indicatieve tijdlijn ontwikkeling realisatie commerciële Gen III(+)-SMR in Nederland. Een commerciële Gen IV-SMR zal circa 5 jaar extra vergen.

In deze rapportage beschouwen we drie soorten SMR's, Gen III, Gen III+ en Gen IV. De Gen III SMRs zouden tussen 2035 en 2040 operationeel kunnen zijn. Gen IV SMR's zouden vanaf 2040 operationeel kunnen zijn.

6.3 Vergunningsaspecten conventioneel en nucleair

In principe spelen er vier trajecten een rol bij het realiseren van een SMR. Dit betreft:

- Het ruimtelijk spoor om toestemming te verkrijgen binnen het omgevingsplan
- Het aanvragen van een omgevingsvergunning voor bouwactiviteiten voor het realiseren van de SMR en benodigde infrastructuur;
- Het aanvragen van een vergunning in het kader van de Kernenergiewet (Kew) voor het inbedrijf stellen en houden van de SMR;
- Het aanvragen van een omgevingsvergunning voor een wateractiviteit (in verband met koeling).

Ruimtelijk Spoor

Als eerste de ruimtelijke procedure onder de omgevingswet (Ow). De verwachting is dat als onderdeel van deze procedure een plan-MER zal moeten worden opgesteld. Deze MER geeft bij grootschalige projecten de mogelijkheid milieueffecten te identificeren.

Bouwvergunningen

Vervolgens valt onder de Omgevingswet de bouwvergunning. Dit gaat over de realisatie van de bouwwerken en infrastructuur. Het project realiseren als onderdeel van een bestaande inrichting kan dit traject mogelijk soepeler laten verlopen, omdat er voor milieutechnische aspecten al een robuust kader aanwezig is.

Vergunning Kernenergiewet

Daarnaast is een aparte vergunning onder de kernenergiewet vereist. Deze vergunning regelt de nucleaire en conventionele milieuaspecten voor de operatie van de SMR. Hierdoor is een omgevingsvergunning voor de milieubelastende activiteit (hoofd-MBA) niet noodzakelijk. Mogelijk dat wel enkele andere MBA's onder de omgevingswet moeten worden aangevraagd. Dat zijn kleinere toestemmingen die vaak in de voorbereidende fase worden aangevraagd. Een belangrijke toestemming waar rekening mee moet worden gehouden is de natuurvergunning (stikstofdepositie) in de bouwfase. Daarbij aangenomen dat de emissies van stikstofverbindingen in de operationele fase minimaal zijn.

Zowel voor een SMR als zelfstandige inrichting of voor een SMR als onderdeel van een bestaande (Seveso¹¹)-inrichting (achter de meter) zal een Kew-vergunning moeten worden aangevraagd. De SMR zal ook binnen een bestaand bedrijf gezien worden als aparte Kew-inrichting (nucleaire installatie).

De verschillen tussen de vergunningsaspecten voor en achter de meter zijn beperkt. De belangrijkste verschillen zijn de volgende:

- Realisatie binnen een bestaand bedrijf:
 - De vergunninghouder is dezelfde rechtspersoon.
 - Mogelijk kan gebruik gemaakt worden van bestaande faciliteiten zoals kantoren en infrastructurele voorzieningen
 - Voor een bestaand bedrijf geldt al een milieukader, bijvoorbeeld voor beschikbare geluidruimte en inpassing binnen de veiligheidscontour
 - Voor een bestaand bedrijf geldt al een industriële bestemming.

Wel zal het zo zijn dat de SMR zelf (nucleair eiland, kritieke infrastructuur en beveiliging een apart onderdeel op het bedrijfsterrein zal vormen (onder de Kew-vergunning)

¹¹ Seveso-inrichtingen zijn bedrijven waar met grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen wordt gewerkt. Voor deze bedrijven gelden extra veiligheidsregels op basis van Europese wetgeving (Seveso-richtlijn).

- Realisatie buiten een bestaand bedrijf (zelfstandige inrichting)
 - Nieuwe of bestaande rechtspersoon nodig als vergunninghouder (en eigenaar SMR).
 - Inpassing binnen ruimtelijke milieukaders moet mogelijk zijn of deze kaders moeten aangepast worden.
 - Ruimteclaim op het industrieterrein gaat ten koste van andere ontwikkelingen.

Afhankelijk van het type en uitvoering kan een SMR elektriciteit opwekken, warmte of beide. De omzetters van deze energie, zoals stoomketels, turbines, transformatoren, warmtewisselaars etc. kunnen gezien worden als activiteiten onder de Omgevingswet. Deze scheiding van wettelijk regime zal waarschijnlijk makkelijker zijn voor realisatie binnen een bestaand bedrijf. Aannemelijk is dat bij een nieuw solitair complex deze onderdelen sneller als deel van de nucleaire installatie (Kew-inrichting) gezien zullen worden.

Als onderdeel van de Kew-procedure dient een project-MER opgesteld te worden. Mogelijk dat dit MER gecombineerd kan worden met de plan-MER uit het ruimtelijke spoor.

De technologische generatie van de SMR beïnvloedt de vergunningverlening. Gen IV-reactoren brengen meer onzekerheden met zich mee, vooral rond het SAR (Safety Assessment Report). Vertrouwen van ANVS in de technologie speelt hier een rol. Aan de andere kant kunnen Gen IV-reactoren weer als intrinsiek veiliger worden gezien, wat mogelijk de procedure voor vergunning bespoedigt. Onduidelijk is nog hoe deze effecten zich gaan verhouden in de SMR-vergunningverlening.

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft in 2023 een Evaluatie van het stelsel Kernenergiwet laten uitvoeren. Hierin komt naar voren dat het huidige stelsel toereikend is voor de komende ontwikkelingen op het gebied van kernenergie en dus ook voor SMR's. De evaluatie geeft wel enkele verbeterpunten aan, maar de verwachting is niet dat de komende jaren een ingrijpende wijziging in de procedure te verwachten is die leidt tot vereenvoudiging of versnelling ten aanzien van SMR's. Het stelsel van de omgevingswet is van kracht sinds 1 januari 2024 en ook hier zijn de komende jaren geen belangrijke wetwijzigingen te verwachten die van invloed zijn op de vergunningprocedures.

In 2023 heeft de ANVS een nieuwe handreiking Veilig Ontwerp en het veilig Bedrijven van Kernreactoren (Handreiking VBOK, 2023) gepubliceerd met een beperkt aantal tekstuele aanpassingen ten opzichte van de versie uit 2015. Hierna wordt ingegaan op de rol van de handleiding bij vergunningverlening.

Handreiking VBOK, 2023

De VBOK bevat de meest recente veiligheidsrandvoorwaarden voor het ontwerp en bedrijfsvoering van kernreactoren en geeft inzicht in de stand der techniek en wetenschap anno 2023. De handreiking is tevens een referentiekader voor bestaande kernreactoren wat betreft de meest recente ontwikkelingen op het gebied van nucleaire veiligheid.

De handreiking bestaat uit een Nederlandstalige inleiding op het gebruik van de VBOK en hiernaast de Dutch Safety Requirements (DSR), wat de kern van de handreiking vormt. De DSR (Engelstalig) is beoordeeld door de IAEA.

De handreiking VBOK is geen Besluit met algemene strekking of Ministeriele regeling en heeft dus niet de status van (materiele) wet. De handreiking sluit wel aan bij de weigeringsgrond van de Kernenergiwet (Kew) in artikel 15b tweede lid.

Onverminderd het eerste lid kan een vergunning voor het oprichten van een inrichting als bedoeld in artikel 15, onder b, worden geweigerd, indien de in de aanvraag beschreven techniek voor het vrijmaken van kernenergie, het vervaardigen, bewerken of verwerken van splijtstoffen dan wel het opslaan van splijtstoffen

in de inrichting naar het oordeel van de Autoriteit bij het in werking brengen van de inrichting zal zijn verouderd.

Dat wil zeggen dat de handreiking VOBK inzicht geeft in de meest recente veiligheidsrandvoorwaarden die aansluiten bij die inzichten van de IAEA en WENRA. En dus voorwaardelijk zijn voor het verlenen van een vergunning op grond van artikel 15 van de Kew.

De handreiking VOBK, versie 2015, is opgesteld naar aanleiding van de initiatieven in Petten voor de bouw van een nieuwe reactor en de modernisering van de reactor in Delft. De handreiking beschrijft de bestaande nucleaire installaties in Nederland.

De reikwijdte van de handleiding betreft lichtwater gekoelde kernreactoren en geeft randvoorwaarden voor vermogensreactoren. Voor onderzoeksreactoren kunnen de randvoorwaarden gradueel toegepast worden ('grading'). De handreiking noemt geen SMR's als mogelijk toekomstige ontwikkeling, maar aangenomen mag worden dat de graduele aanpak ook voor SMR's toepasbaar is.

De ANVS ziet de handreiking als referentiekader voor de stand der techniek en wetenschap voor nucleaire veiligheid bij het aanvragen van een vergunning.

Graduele aanpak

Annex 6 van de DSR beschrijft de graduele aanpak die van bijzonder belang kan zijn voor SMR's, al is deze geschreven voor onderzoeksreactoren. Deze verschillen namelijk van ontwerp en gebruik. In vergelijking met vermogensreactoren zijn de risico's voor de omgeving over het algemeen kleiner. Dit kan ook van toepassing zijn op SMR's. Met de graduele aanpak is het mogelijk af te wijken van de randvoorwaarden en die toe te spitsen op de specifieke reactor.

Annex 6 beschrijft als toepassingsgebied onderzoeksreactoren of welke andere reactor en daaraan verbonden experimentele onderdelen. Hoewel niet letterlijk genoemd sluit dit SMR's niet uit van een graduele aanpak.

Eind 2025 wordt een nieuwe update van de handreiking VOBK uitgebracht. Er wordt meer rechtstreeks aangesloten (verwezen wordt naar/zal onderdeel uitmaken van) bij bestaande internationale richtlijnen. De huidige VOBK is in lijn met deze richtlijnen, maar kent een eigen tekst, die vaak tot onzekerheden leidt in vergelijking met internationale richtlijnen.

Watervergunning

Het innemen en lozen van oppervlaktewater ten behoeve van koeling, maar ook het lozen van afvalwater op het oppervlaktewater wordt gezien als wateractiviteit onder de omgevingswet, waarvoor vergunning vereist is. Belangrijke topics hierin zijn:

- Visintrek en beschikbaarheid van zoetwater
- Lozing van warm water en de invloed hiervan op het aquatische milieu.
- Samenstelling van het te lozen (afval)water
- De Europese Kaderrichtlijn Water

Samengevat

Het 'License to operate' traject van een SMR kent 4 hoofdsporen:

- Ruimtelijk spoor
- Bouwen
- Kew-vergunning
- Watervergunning

Het realiseren van een SMR binnen een bestaande inrichting kan enkele voordelen hebben ten aanzien van complexiteit en doorlooptijd, maar dit is een beperkt verschil.

Naast de genoemde hoofdsporen zullen nog een aantal kleinere vergunningen en toestemmingen nodig zijn.

Op dit moment is het niet de verwachting dat het vergunningstraject voor SMR sneller zal zijn dan voor een conventionele kerncentrale. Een belangrijke toestemming is de natuurvergunning voor de bouwfase.

6.4 Veiligheidstechnische aspecten

Inde onderstaande tabel worden de veiligheidsaspecten voor de Gen III(+)-SMR's en de Gen IV-SMR's vergeleken.

Tabel 6-3: Veiligheidsaspecten Gen III+ en Gen IV

Veiligheidsaspecten	Groot Gen III+ 250-500 MW	Groot Gen IV 250-500 MW
Inherente en passieve veiligheid (beheersing reactiviteit en koeling)	Bij Gen III+-SMR's gaat het om lichtwaterreactoren met kleine kern, vergeleken met de klassieke grotere drukwaterreactoren (PWR's) of kokendwaterreactoren (BWR's). De kleinere reactorkern maakt dat de gepostuleerde consequenties van een mogelijk incident kleiner zijn dan bij grotere reactoren.	Gen IV heeft een grotere diversiteit aan reactor technologieën vergeleken met GenIII+. Het risico op catastrofale ongelukken is kleiner bij de generatie IV-reactoren door een verbeterd inherent veiligheidsontwerp. Sommige opereren bij lagere drukken, andere werken met gesmolten zouten als koelmedium en/of de reactiviteit neemt af bij toenemende temperaturen. Weer andere gebruiken kleine brandstofdeeltjes met goede temperatuurbestendigheid. Sommige leveranciers claimen dat het ontwerp een "walk-away safe" type reactor is. ¹² (Met walk away safe wordt bedoeld dat bij een volledig verlies van elektriciteit, de reactor veilig blijft zonder operator interventie.)
Afvoer van restwarmte	Ten opzichte van de klassieke grote lichtwaterreactoren hebben de generatie III+-SMR's verbeterde veiligheidsfuncties. Daarnaast hebben SMR's door hun kleinere omvang en lagere vermogensdichtheid een grotere oppervlakte-volumeverhouding. Hierdoor kunnen ze gebruikmaken van natuurlijke circulatie, zwaartekracht en convector om restwarmte uit de kern af te voeren.	Het principe is dat passieve veiligheidssystemen de restwarmte afvoeren. Dit kan bijvoorbeeld bij gesmoltenzoutreactor-concepten zijn dat het gesmolten zout afgevoerd wordt naar een ruimte en daar afkoelt, doordat door natuurlijke circulatie er genoeg koeling optreedt, en dat dit door natuurlijke, natuurkundige effecten automatisch optreedt waardoor oververhitting van de reactor niet kan optreden.
Robuustheid tegen externe, industriële gevaren	Zoals eerder aangegeven hebben Gen III+-LWR's verbeterde veiligheidsfuncties ten opzichte van klassieke grote lichtwater of kokendwaterreactoren. Echter om voldoende koeling te kunnen garanderen is het voor technologieën soms nodig om een koelwaterflow te garanderen met backup-dieselgenerators. Deze zullen	Doordat Gen IV-reactoren een passieve strategie toepassen om restwarmte af te voeren hebben ze een hogere robuustheid tegen externe gevaren dan generatie III+. De reactor zal zich afhankelijk van de technologie en op basis van natuurkundige principes naar een veilige staat brengen.

¹² Hoewel ontwikkelaars beweren dat hun technologieën in theorie veilig zijn, mede omdat ze aan alle wet- en regelgeving moeten voldoen, wordt verwacht dat na een ernstig ongeval aanvullende monitoring enz. nodig zal zijn. Voor sommige reactor concepten in de generatie IV groep bestaan er nog steeds zorgen over de veiligheid na een ongeval. Vloeibaar natrium bijvoorbeeld is zeer reactief met lucht en water, wat bij een lek tot brand of explosie kan leiden. Hoewel moderne ontwerpen meerdere barrières en systemen bevatten om dit te voorkomen, kan een groot lek nog steeds een aanzienlijk veiligheidsrisico vormen. Het ongeval in 1995 bij de snelle kweekreactor Monju in Japan, waar een natriumlek tot brand leidde, dient als illustratie voor deze risico's.

	beschermd moeten worden tegen externe industriële gevaren.	
Conventionele gevaren	Deze gevaren spelen ook bij klassieke grote reactoren, maar vanwege de kleinere schaal is het makkelijker om te koelen wanneer nodig. SMR's hebben een veel kleinere hoeveelheid radioactief materiaal dan conventionele kerncentrales, waardoor de mogelijke gevolgen van een ongeval aanzienlijk worden beperkt. Door het lagere thermische vermogen kan de warmte gemakkelijker passief worden afgevoerd.	Deze SMR's brengen risico's met zich mee wat betreft de koelvloeistof die in de reactoren wordt gebruikt. Zo zijn bijvoorbeeld de gesmolten zouten in molten salt reactors corrosief, een soortgelijk probleem doet zich voor bij loodgekoelde reactoren, terwijl bij natriumgekoelde snelle reactoren het risico bestaat dat een lek, brand of een explosie kan veroorzaken. Deze andere risico's moeten worden ondervangen in het ontwerp.
Preparatiezones (Emergency Planning Zones)	De zones verschillen op dit moment niet voor de verschillende SMR types. Preparatiezone: zone waarbinnen bepaalde noodmaatregelen moeten zijn voorbereid; bijvoorbeeld een logistiek plan voor evacuatie, mogelijkheid voor schuilen of voor de verspreiding van jodiumtabletten. Deze preparatiezone staat dus los van de veiligheidssafstand voor de ruimtelijke inpassing. Voor beide SMR-concepten wordt er door de leveranciers naar gestreefd om de preparatiezones gelijk te maken aan de grens van de nucleaire inrichting. Voor de concepten van generatie III+ wordt op basis van de beschikbare gegevens momenteel echter een uitsluitingszone van ongeveer 500 meter buiten de omheining voorzien. Dit is kleiner dan wat momenteel vereist is voor grote kerncentrales. Voor de Gen IV is nog onduidelijk of ze een kleinere zone dan een Gen III+-SMR zouden hebben vanwege de vroege fase waarin de techniekontwikkeling zich bevindt en houden we dus dezelfde zone aan.	

Het risico op catastrofale ongelukken (kernsmelt) is kleiner bij de Gen IV-reactoren door een verbeterd inherent veiligheidsontwerp waardoor ze robuuster zijn. Of dit ook een kleinere preparatiezone oplevert is voorlopig nog onduidelijk.

6.5 SMR-veiligheidsaspecten van locatiekeuze en karakterisatie

Uit ervaringen met conventionele kerncentrales blijkt dat het sitingproces (locatiekeuze) circa 18 maanden in beslag neemt. Vervolgens duurt de sitekarakteristiekstudie ook nog 22 tot 24 maanden, waardoor het complete proces ongeveer 3,5 jaar kan duren. Deze studie geeft een aantal handvatten waar rekening mee gehouden moet worden voor de keuze van een locatie. Als een initiatiefnemer op een bestaande industriële locatie, dus achter de meter, een SMR-project ontwikkelt kan dit het proces wat versnellen.

IAEA geeft in 'SSG-35, Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations', screening afstanden als richtlijn om een initiële selectie van locaties te kunnen scoren voor de bouw van conventionele reactoren. Voor de Schelde-Deltaregio is met name relevant dat een afstand van 5 km tot voorzieningen voor de opslag of behandeling van brandbare, giftige, bijtende of explosieve stoffen of een afstand van 8 km tot bronnen van gevaarlijke (giftige) wolken of een afstand van 8 km tot militaire installaties waar munitie wordt opgeslagen wordt aangehouden. Als een site niet voldoet aan een of meer van deze screening afstanden kan deze alsnog geschikt bevonden worden. Dit is op voorwaarde dat er verdere ontwerpmaatregelen beschikbaar zijn. Zoals bijvoorbeeld technische oplossingen, maatregelen voor fysieke bescherming van de site of procedurele oplossingen. Voor SMR's zijn in Nederland nog geen specifieke richtlijnen opgesteld dus deze moeten dus voldoen aan dezelfde eisen als de klassieke grote

kerncentrales. Wel zijn er ontwikkelingen op dit gebied in de Verenigde Staten mede gebaseerd op een verbeterd veiligheidsontwerp van SMR's.¹³

Het ministerie van Klimaat en Groene Groei heeft besloten in haar SMR strategie dat het besluit voor de ruimtelijke inpassing van SMR's door de provincie wordt genomen.

Daar zijn op dit moment geen ruimtelijke kaders voor. Het is mogelijk dat bevoegd gezag gebruik maakt van de VNG-handreiking activiteiten en milieuzonering. In de versie 2024 ligt de nadruk op omgaan met geluid en geur. Hierbij wordt geen veiligheidsafstand gegeven tot gevoelige objecten. In de 2009 editie werd een veiligheidsafstand van 1500 meter gegeven voor kerncentrales (met koeltorens, zonder koeltorens wordt niet gegeven). Deze afstand is in de editie 2024 geschrapt. Om deze reden zal bevoegd gezag zelf criteria op moeten stellen. Hierbij kan het zijn dat toch 1500 meter wordt aangehouden als veiligheidsafstand, of dat de veiligheidsafstand te laag wordt inschat. Beide situaties zijn onwenselijk.

Ons advies is daarom om te werken naar een handreiking met richtafstanden door hier onderzoek naar uit te voeren. Om het proces van ruimtelijke inpassing te bespoedigen en inzichtelijk te maken is het wenselijk om een handreiking voor SMR's met richtafstanden op te stellen waar bevoegd gezag gebruik van kan maken. Om de toepassing van SMR's te faciliteren kunnen hierbij criteria opgesteld worden waarbij rekening wordt gehouden met de veiligheidsaspecten passend bij capaciteit en de verschillende technieken die worden toegepast. Dit geeft houvast voor bevoegd gezag en geeft meer inzicht in mogelijke locaties voor SMR's.

Er zijn dus drie verschillende richtlijnen voor afstanden waar rekening mee moet worden gehouden. Deze verschillende richtlijnen worden in onderstaande tabel toegelicht. Deze staan los van elkaar en zullen apart beoordeeld moeten worden.

Tabel 6-4: Verschillende richtlijnen waar rekening mee gehouden moet worden

Nucleaire richtlijnen	Omgevingswet
Screening afstanden volgens SSG-35 Dit zijn richtafstanden gegeven door IAEA welke gebruikt worden om te screenen welke locatie geschikt kan zijn om een nucleaire installatie te bouwen. Deze afstanden zijn niet per definitie uitsluitingscriteria.	Richtafstand vanuit de ruimtelijke reservering. Dit is de afstand die gehouden moet worden van gevoelige objecten zoals woningen, zorg- en onderwijsinstellingen. In de VNG-Handreiking Activiteiten en milieuzonering worden richtafstanden gegeven voor alleen geur en geluid. Richtafstanden voor veiligheid, luchtemissies etc. kunnen ook relevant zijn.
Preparatiezone (EPZ) De preparatiezone is een zone waarbinnen bepaalde noodmaatregelen moeten zijn voorbereid. Bijvoorbeeld een evacuatieplan of de verspreiding van jodiumtabletten.	

¹³ De U.S. NRC heeft erkend dat de kleinere omvang, passieve veiligheidsvoorzieningen en lagere kans op radioactieve lozingen van SMR's kleinere uitsluitingszones en zones met een lage bevolkingsdichtheid mogelijk maken. De voorschriften van de NRC staan aanvragers toe aan te tonen dat de inherente veiligheidsvoorzieningen en gevolgen van ongevallen van hun reactor een flexibeler benadering van de locatiekeuze mogelijk maken, in plaats van zich te houden aan de rigide, vooraf vastgestelde afstanden die voor grote lichtwaterreactoren worden gehanteerd. Wat betreft de voorbereiding op noodsituaties heeft de U.S. NRC ook een nieuw alternatief, prestatiegericht kader voor noodvoorbereiding voor SMR's opgesteld. Deze aanpak stelt vergunninghouders in staat om de omvang van hun noodplanningszone (EPZ) te bepalen op basis van een gedetailleerde geveanalyse en de mogelijke gevolgen van een ernstig ongeval, die voor SMR's aanzienlijk kleiner kunnen zijn dan de standaard EPZ van 10 mijl voor traditionele centrales. Dit staat in contrast met de oudere, meer prescriptieve eisen voor grote reactoren.

Verder dient er bij siteselectie rekening gehouden te worden met de beschikbaarheid van oppervlaktewater (als koelwater) in de omgeving en de afstand tot het inname- en uitvalpunt. Ook de temperatuurvariatie van het oppervlaktewater is belangrijk om gedurende het jaar voldoende koelcapaciteit beschikbaar te hebben. Ook kan het, afhankelijk van de technologie, nodig zijn om nood-dieselgeneratoren toe te passen om actieve koeling te kunnen waarborgen bij stroomuitval of andere natuurlijke fenomenen. Dit is voor generatie IV-reactoren niet altijd nodig doordat intrinsieke veiligheden de reactie laten stoppen of voldoende koeling door natuurlijke convectie kunnen garanderen.

Om de echte toepasbaarheid van een site te bepalen zullen aan de hand van een site karakterisatie-studie onder andere de volgende site condities meegenomen moeten worden:

- Het dragend vermogen van de grond: geologische informatie moet meegenomen worden
- Gevaren uit de omgeving zoals Seveso-installaties of het potentieel voor externe gevaren zoals vliegtuigongelukken moeten worden geïnterpreteerd en vertaald naar ontwerpisen van de nucleaire inrichting.

Het sitingproces van conventionele kerncentrales is omvangrijk en kan zo'n 3,5 jaar duren. Specifieke richtlijnen voor SMR's ontbreken in Nederland, waardoor pas na een gedetailleerde sitekarakterisatie kan worden vastgesteld of een locatie geschikt is. Dit maakt een grondige voorbereiding en een zorgvuldig afwegingsproces cruciaal. Om ruimtelijke inpassing te bespoedigen wordt geadviseerd om richtafstanden voor SMR's op te stellen.

7 Casus 1 – SMR voor de meter, in het cluster

7.1 Energetische inpassing

In casus 1 wordt onderzocht hoe een SMR energetisch kan worden ingepast voor een cluster van industriële gebruikers binnen het Schelde-Delta cluster. Om een volledige afweging te maken kijken we net als in sectie 8.1.2 naar alternatieven voor zowel elektriciteits- als warmtelevering, inclusief hun CO₂-voetafdruk.

Voor elektriciteitslevering geldt het openbare net als referentie, waarbij wordt uitgegaan van de EU-doelstelling van 90% CO₂-reductie ten opzichte van 1990. Dit resulteert in een verwachte CO₂-voetafdruk van 0,085 kg CO₂ per kWh elektriciteit.

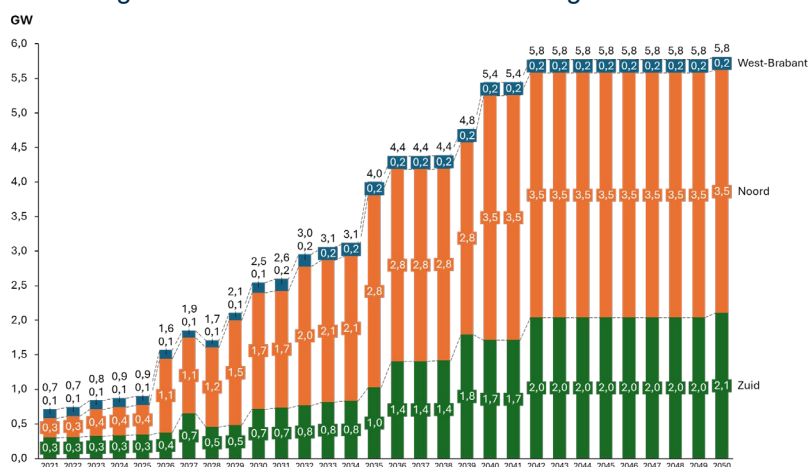
Voor industriële warmtelevering, is aardgasverbranding het meest logische alternatief, met een emissiefactor van 0,203 kg CO₂ per kWh thermische energie. Indien gekozen wordt voor andere oplossingen, zoals een e-boiler waarbij elektriciteit direct wordt omgezet in warmte, geldt dezelfde emissiefactor als voor het openbare elektriciteitsnet. Deze cijfers voor CO₂ uitstoot worden later gebruikt per gebied om te kijken hoeveel er potentieel te besparen valt indien de energetische vraag wordt ingevuld door de SMR.

Voor de grote elektrische vraag vanuit de industrie heeft de SMR als voordeel dat deze vrijwel continue kan leveren en indien achter de meter geplaatst een substantiële kostenbesparing oplevert in verband met vermeden op elektrische nettarieven.

Een SMR heeft warmte technisch als voordeel dat directe warmtelevering, ten opzichte van elektrische opwek (met wind en zon) en elektrische ketels, zowel energetische als E-netwerk technisch efficiënter is. Gezien bovenstaande in combinatie met de hoge energetische capaciteit van de geplande SMR - technologieën is het vinden van voldoende grote afnemers van elektriciteit en/of warmte een cruciale factor in de efficiënte inzet van een SMR in het lokale en regionale energiesysteem.

7.1.1 Elektriciteit

De elektriciteitsvraag in het Schelde-Delta cluster zal naar verwachting flink stijgen van 0.7 GW in 2021 tot 5,8 GW richting 2050. Een prognose van hoe de deze elektriciteitsvraag is verdeeld over het Noordelijke, Zuidelijke, en West-Brabant gebied in het cluster is hieronder weergegeven.



Figuur 7-1 Elektriciteitsvraag per gebied tot 2050

Hierin is te zien dat de vermogensvraag grotendeels is verdeeld over het Noord-Schelde gebied (~3,5 GWe) en het Zuid-Schelde gebied (~2 GWe) en een klein aandeel voor West-Brabant (0,2 GWe).

Tegelijkertijd toont de prognose voor het aanbod dat er in 2050 mogelijk meer dan twee keer zoveel elektriciteit beschikbaar zal zijn dan er gevraagd wordt:



Figuur 7-2 Vergelijking elektriciteitsaanbod en vraag per gebied in 2025 en 2050

De belangrijkste bronnen van dit aanbod zijn:

- Wind op Zee: gepland vermogen van 7,4 GWe
- Kernenergie: gepland vermogen van 3,7 GWe

De belangrijkste bronnen voor de vraag zijn de prognoses over de elektrificatie van het industriegebied, daarbij zijn in de prognoses de volgende factoren belangrijk:

- Directe elektriciteitsvraag van industriële processen: 0,42 GWe in 2025, 1.75 GWe in 2050
 - Onder andere elektrificatie
- Elektrolyse capaciteit: 0 GWe in 2025, 2.50 GWe in 2050

Deze plannen zijn echter nog niet definitief. De bouw van twee nieuwe, grote kerncentrales wordt onderzocht, maar de locatiekeuze (Eemshaven, Maasvlakte II, Terneuzen of het Sloegebied) wordt pas na de zomer van 2026 vastgesteld (Rijksoverheid, 2025). Indien deze centrales daadwerkelijk in het Sloegebied of Terneuzen worden gerealiseerd, is er in deze regio's meer dan voldoende aanbod van elektriciteit om de lokale vraag te bedienen.

In de prognoses voor de elektriciteitsvraag is de extra elektriciteitsvraag die komt door het elektrificeren van de verwarming nog niet meegenomen. Een SMR met een vermogen van 300 MWe en 8.760 vollasturen per jaar zou jaarlijks ongeveer 225 kiloton CO₂-uitstoot kunnen vermijden, uitgaande van een emissiefactor van 0,085 kg CO₂/kWh.



Figuur 7-3. Potentiële locatie voor de bouw van 2 kerncentrales in het Sloegebied

Als deze kerncentrales geplaatst worden in het Sloegebied of Terneuzen is er voor deze gebieden genoeg aanbod van elektriciteit. Op het gebied van warmte zou je afhankelijk van de werkelijke vraagontwikkeling een SMR kunnen neerzetten. Hier moet dan eerst de afweging gemaakt worden of je dan niet eerder warmteterugwinning uit de nieuwe kerncentrales wilt realiseren. Hetzelfde geldt voor Terneuzen in het Westerschelde-Zuid gebied.

Ook wordt er gekeken naar het Programma Verbindingen Aanlanding Wind Op Zee (VAWOZ) waar wordt gekeken de windenergie van toekomstige windenergiegebieden in de Noordzee aan land gebracht kunnen worden (Rijksoverheid, 2025). Hiervoor zijn ook Borssele en Terneuzen gekozen als potentiële locaties. Als er wordt gekozen om de aanlanding van elektriciteit volledig in het Sloegebied, of Terneuzen te laten plaatsvinden, dan zal een groot deel van de elektriciteitsvoorziening over de hoogspanningsverbinding komen die tussen het Sloegebied en Terneuzen ligt. Er ligt sinds kort een tweetal 150 kV kabels tussen deze 2 gebieden (TenneT, 2025), en deze zal Tennet uitbreiden op termijn met 4 verbindingen van 380 kV (RVO, 2025). Daarnaast heeft Tennet een 380kV verbinding tussen Borssele en Riland aangelegd om daarmee Zeeuws-Vlaanderen aan te sluiten op het landelijke 380kV net (TenneT, 2025). Hierdoor zal uiteindelijk 9 GW aan elektriciteit tussen deze 2 gebieden getransporteerd kunnen worden, dus zal netcongestie geen limiterende factor zijn op het elektriciteitsaanbod per regio als deze plannen doorgaan.

In de kernenergiewet staat dat de huidige kerncentrale in Borssele moet sluiten in 2033. De kernenergiewet moet nog aangepast worden als deze langer opgehouden moet worden (Rijksoverheid, 2025). Het enige operationele offshore windpark is Windpark Borssele (1,4 GWe), de prognose is op dit moment dat er nog 6 GWe aan wind op zee bijgebouwd gaat worden die aangesloten worden via het hoogspanningsnet Zeeuws-Vlaanderen. Deze plannen zijn echter nog niet definitief. Recent in een kamerbrief informeerde minister Hermans de tweede kamer over verslechterde marktomstandigheden en gebrek aan biedingen voor de offshore wind kabels IJmuiden Ver Gamma-A en Gamma-B (2x1 GWe). Waardoor deze tenders zijn gefaseerd en uitgesteld (Ministerie Klimaat Groene Groei, 2025).

Indien de plannen voor wind op zee en 2 kernenergiecentrales doorgang vinden, zal het plaatsen van een Small Modular Reactor (SMR) voor elektriciteitsproductie in het Westerscheldegebied geen meerwaarde hebben. Mochten deze projecten echter niet volledig gerealiseerd worden, dan kan een SMR alsnog een rol spelen in het versterken van de leveringszekerheid voor het industrieel cluster in de regio.

Gezien de verwachte overcapaciteit aan elektriciteitsproductie vanaf nu tot in 2050 is het plaatsen van een SMR voor elektriciteitsproductie in het Westerscheldegebied niet doelmatig. Alleen bij uitstel of afstel van geplande projecten of een onverwacht grote vraagstijging kan een SMR elektrisch van meerwaarde zijn voor de regio.

7.1.2 Leveringstemperaturen van SMR's

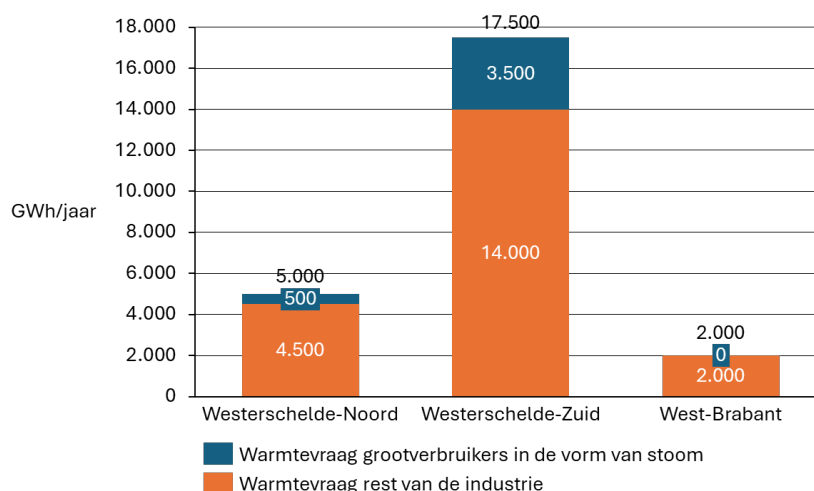
De maximale temperatuur die een Small Modular Reactor (SMR) kan leveren, is sterk afhankelijk van het type en de generatie van de reactor. Dit is een belangrijke factor bij de inzet van SMR's voor industriële processen, omdat veel zware industrieën (extreem) hoge temperaturen (400 tot 700°C) vereisen.

- Gen III+-SMR's hebben een beperkt thermisch vermogen. Hoewel deze reactoren ook kunnen worden ingezet voor warmtekrachtkoppeling (WKK) of de productie van waterstof via elektrolyse, is hun typische leveringstemperatuur (directe stoomlevering) beperkt tot 200-300°C¹⁴. Indien ingezet voor elektriciteitslevering kunnen ze (via de condensor van de stoomturbine) 80-120°C leveren.
- Gen IV-SMR's kunnen een thermisch vermogen leveren van 700-850 MWth en zijn bij uitstek geschikt voor het leveren van proceswarmte op hoge temperatuur (400-600°C) en kunnen daarnaast elektriciteit en waterstof produceren.

Voor industriële processen in het Westerschelde industriegebied die temperaturen tot boven de 600°C nodig hebben, zoals stoomkraken of bepaalde vormen van waterstofproductie, zijn zelfs de meest geavanceerde SMR's mogelijk niet toereikend. De keuze voor een bepaald type SMR hangt dus sterk af van de specifieke warmtevraag en het gewenste temperatuurniveau binnen het industriële cluster.

7.1.3 Warmte

In sectie 3.3 wordt de aardgasvraag van het industriegebied omgerekend naar een warmtevraag, waarvan in deze studie wordt uitgegaan dat deze hetzelfde zal blijven over de jaren. In Figuur 7-4 is deze warmtevraag opgesplitst per regio.



Figuur 7-4. Warmtevraag opgesplitst per gebied

¹⁴ Alleen de NuScale-reactor vormt hierop een uitzondering, met een maximale temperatuur van 500°C, waardoor deze in theorie ook geschikt is voor bepaalde vormen van proceswarmte.

Deze verdeling is indicatief en gebaseerd op typische verhoudingen binnen energie-intensieve industrieën, maar kan voor nu een leidraad zijn om te kijken hoe een SMR in dit cluster zou kunnen passen. Hiermee kunnen we ook een schatting maken van een potentiële CO₂ besparing als we het vergelijken met uitstoot van het verbranden van aardgas (0,203 kg CO₂ per kWh thermische energie (CO₂ emissiefactoren, 2025)).

Gebied	Westerschelde-Noord	Westerschelde-Zuid	West-Brabant
CO ₂ uitstoot aardgas [kton/jaar]	1.000	3.600	400

De waarden in de bovenstaande grafiek staan in GWh per jaar. Als we uitgaan van 8.760 bedrijfsuren per jaar voor een SMR die geplaatst zou kunnen worden, dan komen we uit op een indicatief thermisch installatievermogen om de warmtevraag te dekken.

Gebied	Westerschelde-Noord	Westerschelde-Zuid	West-Brabant
Warmtevraag [MWth]	550	2.000	250

De SMR's kunnen voor verschillende doeleinden geïnstalleerd worden. Als de SMR wordt ingezet om alleen elektriciteit op te wekken dan zullen de *Large SMR Gen III+* en de *Large SMR Gen IV* ongeveer dezelfde output hebben. Uit de tabel hierboven blijkt wel dat er in Westerschelde-Zuid gebied veel warmtevraag is. Over het algemeen hebben de Gen IV SMR's een hogere thermische output en hogere stoomtemperatuur. Deze zouden daarom meer geschikt zijn voor toepassing in dit gebied.

SMR verwarming versus Elektrische verwarming

Wat voor aanbod er komt voor de verwarming is nog niet bekend. Een SMR levert warmte die direct kan worden gebruikt om water hoog genoeg op te waarden voor een warmtenet, zonder al te veel energieverliezen (als de afstanden niet te groot zijn). Hierbij kan de SMR vergeleken worden met een consistente warmtebron. Daarentegen vereist elektrisch verwarmen (bijvoorbeeld via warmtepompen of elektrische boilers) veel elektriciteit. Dit is minder efficiënt, vooral als de stroom niet duurzaam of goedkoop is, en het vraagt veel piekvermogen op het elektriciteitsnet. Vooral bij hogere temperaturen (~100 °C) neemt de efficiëntie van elektrisch verwarmen met warmtepompen sterk af, denk dan aan een *coëfficiënt of performance* die richting 1 gaat. Dat betekent dat er boven op de elektrische vraag nog maximaal 2,8 GWe voor verwarming zou komen.

Kortom: SMR's leveren stabiele, directe, relatief goedkope hoog temperatuur warmte (met minder conversieverlies), terwijl elektrisch verwarmen duurder en energie-intensiever is.

SMR's hebben als voordeel dat ze vrijwel continue energie kan leveren en achter de meter een substantiële nettatarief besparing oplevert. Een SMR kan energetisch en net technisch efficiënter warmte leveren dan wind en zon met elektrische ketels. Gezien de hoge energetische capaciteit van de geplande SMR-technologieën is het vinden van voldoende grote afnemers cruciaal. Waar SMR's voor elektriciteitsproductie weinig meerwaarde hebben, bieden ze wel potentie voor industriële warmtelevering (met name op hogere temperaturen), vooral in het Westerschelde-Zuidgebied. Een nadere afweging is nodig tussen SMR-inpassing en warmteterugwinning uit toekomstige grote kerncentrales.

7.1.4 Westerschelde-Noord

Hieronder een overzicht van de elektriciteitsvraag voor het Noord-Schelde industriegebied over de jaren heen:

Jaartal	2025	2030	2040	2050
Elektriciteitsvraag [MWe]	430	1.680	3.530	3.520

Noord-Schelde heeft een grote productiecapaciteit (Sloecentrale, kerncentrale Borssele, windpark Borssele) en exporteert elektriciteit. De elektrische netaansluiting is robuust, maar congestie dreigt bij verdere groei. Daarnaast wordt er nog een besluit genomen of het Sloegebied een passende locatie is voor de bouw van 2 grootschalige kerncentrales en waar de elektriciteit uit de nieuwe windenergiegebieden op de Noordzee moet aanlanden in het VAWOZ-programma (Rijksoverheid, 2025).

Een SMR in Westerschelde-Noord voor elektriciteitsdoeleinden is niet relevant behalve als:

- De 2 nieuwe kerncentrales niet gebouwd worden in het Sloegebied of in Terneuzen (aangezien de elektrische verbinding in de toekomst toereikend is tussen Westerschelde Noord en Zuid)
- De plannen voor wind op zee zodanig veranderen dat er weinig tot geen extra elektrisch vermogen in het Sloegebied wordt aangeland.
- Het aanbod vanuit het openbare elektriciteitsnet onvoldoende is voor de toekomstige vraag in het gebied.

De warmtevraag is ongeveer 550 MWth en er wordt aangenomen dat die tot 2050 ongeveer hetzelfde zal blijven. De prognose in de tijd ziet er als volgt uit:

Jaartal	2025	2030	2040	2050
Aardgasvraag [kton]	860	540	36	0
Warmtevraag [MWth]	550	550	550	550

- Grote Gen III+ SMR's zijn met name geschikt voor baseload elektriciteitsproductie en minder voor warmteproductie. De temperatuurrange tot 200-300°C is onvoldoende passend voor industrieën die hoge temperaturen nodig hebben voor hun processen. De verwachte elektriciteitsvraag is relatief hoog. Alleen als de toekomstige plannen voor nieuwe productiecapaciteit niet doorgaan kan een SMR een meerwaarde hebben.
- Grote Gen IV SMR's zijn geschikter om proceswarmte te leveren. Met een thermisch vermogen van 700 tot 850 MWth zijn ze voor dit gebied over gedimensioneerd. Middelgrote Gen IV SMR's hebben een kleiner thermisch vermogen, tussen de 250 en 450 MWth, en zijn daarmee geschikter.

Cluster Zeeland Refinery

Een SMR functioneert technisch en economisch het best wanneer deze continu warmte en/of elektriciteit kan leveren. Frequent schakelen, veelvuldig deellast bedrijf of het tijdelijk uitschakelen van de reactor leidt tot verhoogde slijtage en lagere beschikbaarheid, wat de economische haalbaarheid onder druk zet. Het is daarom van belang om een configuratie te realiseren waarin de SMR zijn energie zo consistent mogelijk kan afzetten. Op- en afregelen van de reactor om bijvoorbeeld bij de wind- en zonproductie aan te sluiten is geen haalbare optie.

In de omgeving van Zeeland Refinery in Nieuwdorp, bevinden zich meerdere energie-intensieve bedrijven die potentieel continu gebruik kunnen maken van de energie afkomstig van één of meerdere SMR's. Een belangrijkste speler in het cluster is Zeeland Refinery, die heeft behoefte aan zeer hoge procestemperaturen, waarvoor zal een Gen IV eerder geschikt zijn dan een Gen III. Deze industrieën liggen allemaal relatief dicht bij elkaar, wat de potentie vergroot voor warmtenetwerken of directe koppeling aan meerdere afnemers.

Daarnaast biedt het gebied kansen voor elektriciteitsproductie met conversie naar waterstof. Door de elektriciteit van de SMR via een elektrolyser om te zetten in waterstof, kan deze energie indirect worden getransporteerd via het bestaande of geplande H₂-netwerk. Zeeland Refinery heeft al plannen voor een elektrolyser op basis van groene stroom, wat aansluit bij deze strategie (NPVI, 2023).

7.1.5 Westerschelde-Zuid

Hieronder de elektriciteits- en warmtevraag voor het Westerschelde-Zuid gebied. Ook hier nemen we aan dat de warmtevraag constant zal blijven tot 2050.

Jaartal	2025	2030	2040	2050
Elektriciteitsvraag [MWe]	340	720	1.710	2.100

Jaartal	2025	2030	2040	2050
Aardgasvraag [kton]	1.700	1.700	780	120
Warmtevraag [MWth]	2000	2000	2000	2000

Zuid-Schelde kent een sterke industriële concentratie (Dow, Yara) en een relatief beperkte elektrische netcapaciteit en is daardoor gevoeliger voor netcongestie. Lokale opwek is dus cruciaal voor de industrie in deze regio. Net als in Noord-Schelde wordt gekeken naar de plaatsing van 2 kerncentrales bij Terneuzen, en naar de aanlanding van wind op zee. Voor dit gebied telt dus dezelfde opsomming als bij Westerschelde-Noord.

Het wordt niet geadviseerd om een SMR neer te zetten in Westerschelde-Zuid voor elektriciteitsdoeleinden, behalve als:

- De 2 nieuwe kerncentrales niet in het Terneuzen of in het Sloegebied gebouwd worden, aangezien de elektrische verbinding tussen deze gebieden in de toekomst toereikend is.
- De plannen voor wind op zee zodanig veranderen dat er weinig tot geen extra elektrisch vermogen in het gebied wordt aangeland.
- Het aanbod vanuit het openbare elektriciteitsnet de vraag in het gebied onvoldoende is voor de toekomstige vraag in het gebied.

Gezien de ruimtebehoefte van 10 (operatie) tot 30ha (bouwphase) per SMR zal er een afweging gemaakt moeten worden tussen de energetische voordelen en de ruimtelijke impact. Aangezien er slechts 100–300 ha beschikbaar is voor nieuwe industriële activiteiten, zou dit betekenen dat een aanzienlijk deel van de ruimte uitsluitend aan energieopwekking wordt besteed hetgeen mogelijk interfereert met nieuwe industriële activiteiten in het gebied.

- Grote Gen III+-SMR's: leveren tot 470 MWe plus 150 MWth bij 80–120°C als ze voor elektriciteitsdoeleinden worden geïnstalleerd. Sommige van deze reactoren kunnen flexibel inspelen op de vraag door hun elektrische vermogen tussen 50 en 100% te variëren, met een op- of afregelsnelheid van 1 tot 5% per minuut. Ze kunnen een deel van de elektriciteitsvraag dekken

maar zijn niet geschikt voor de hoge temperatuur warmte ($>400^{\circ}\text{C}$) die nodig is voor de lokale productieprocessen.

- Grote Gen IV SMR's leveren tot 400 MWe plus 90 MWth bij $80\text{--}120^{\circ}\text{C}$ als ze voor elektriciteitsdoeleinden worden geïnstalleerd. Indien ze warmte leveren ($400\text{--}600^{\circ}\text{C}$) hebben ze een vermogen van 700 tot 850 MWth. Aangezien de warmtevraag in dit gebied een stuk hoger ligt zou een SMR toepasselijk zijn. Eveneens zal een Middelgrote GenIV SMR toepasselijk zijn, als een iets smaller warmte of elektriciteitsvermogen wenselijk is. Mogelijk zouden er meerder medium SMR's gecombineerd kunnen worden.

Cluster Dow + Yara

Zoals hierboven benoemd werkt een SMR het beste als deze continu zijn energie kan leveren. In Westerschelde-Zuid bevinden zich energie-intensieve bedrijven zoals Dow en Yara, die potentieel continu gebruik kunnen maken van de energie afkomstig van één of meerdere SMR's. Hoewel een SMR vooral toegevoegde waarde heeft wanneer deze warmte levert, vormt de beperkte transporteerbaarheid van warmte over lange afstanden een uitdaging. Dow en Yara liggen geografisch ver uit elkaar, wat directe warmtelevering aan beide partijen bemoeilijkt. Uit een onderzoek voor de Botlek stoompijplijn blijkt dat over een afstand van 6 kilometer tussen producent en afnemer een thermisch energieverlies is tussen de 2-4% met een CAPEX van ongeveer 50 miljoen. De afstand is nu minimaal 2 keer zo groot, moet door water, en de vermogens die zijn hoger. Hierdoor zal het thermisch energieverlies en CAPEX hoger zitten.

Een alternatief is om de SMR primair voor elektriciteitsproductie in te zetten. Tussen Dow en Yara ligt een bestaande waterstofleiding, die momenteel gebruikt wordt voor het transport van bijproduct-waterstof uit het kraakproces. Door de elektriciteit van de SMR via een elektrolyser om te zetten in waterstof, kan deze energie indirect worden getransporteerd via het bestaande H_2 -netwerk (DN400, max. 66 bar). Dit biedt als voordeel dat de geproduceerde waterstof direct kan worden geïntegreerd in het bredere waterstofsysteem van de regio.

De leiding tussen Dow en Yara transporteert momenteel ongeveer 4 kiloton waterstof per jaar (Gasunie, 2018), maar heeft een grotere capaciteit. Yara produceert jaarlijks 1,8 tot 1,9 miljoen ton ammoniak (Yara, 2025). De productie van ammoniak bij Yara gaat volgens het Haber-Boschproces waarbij er voor 1 mol ammoniak ongeveer 1.5 mol waterstof nodig is. Dat betekent dat de waterstofvraag vanuit Yara op ongeveer ~ 300 kiloton waterstof per jaar ligt – dus vele malen hoger dan de capaciteit van de pijpleiding. Dat betekent dat geproduceerde waterstof bij Dow plus eventuele waterstofproductie van een SMR vrijwel altijd gebruikt kan worden bij Yara, ervan uitgaande dat het bestaande productieproces bij Yara blijft doorlopen. De H_2 -leiding is bedoeld om het bijproduct waterstof van Dow naar Yara te transporteren. Gezien de potentie van een SMR om veel meer waterstof te produceren, is het inzetten van een SMR puur voor waterstofproductie via deze route weinig zinvol.

7.1.6 West-Brabant

West-Brabant heeft een wat lagere industriële dichtheid vergeleken met de andere gebieden en daardoor ook een wat lagere energievraag.

Jaartal	2025	2030	2040	2050
Elektriciteitsvraag [MWe]	130	150	190	190

Jaartal	2025	2030	2040	2050
Aardgasvraag [kton]	180	80	50	30
Warmtevraag [MWth]	250	250	250	250

De meeste SMR types zijn over gedimensioneerd voor dit gebied. Een middelgrote GenIV SMR zou de warmtevraag kunnen dekken. Eventueel kan een large GenIV SMR in WKK-modus worden ingezet voor gecombineerde elektriciteits- en warmteproductie.

Tussenconclusie:

- **Westerschelde-Noord:** Een grote Gen IV-SMR kan vanwege zijn hoge temperatuur meerwaarde hebben voor de industriële warmtevoorziening.
- **Westerschelde-Zuid:** Een grote GenIII+ kan meerwaarde hebben voor de elektriciteitslevering. Aanvullend kunnen één of meerdere Gen IV-SMR's meerwaarde hebben voor de industriële warmtevoorziening.
- **West-Brabant:** De meeste SMR types zijn over gedimensioneerd voor dit gebied. Een grote Gen IV SMR kan meerwaarde indien ingezet in WKK-modus voor elektriciteits- en warmtevoorziening.

Warmteleverende SMR's worden bij voorkeur geplaatst op een locatie vlak bij de grote warmteafnemers zoals Dow of Yara.

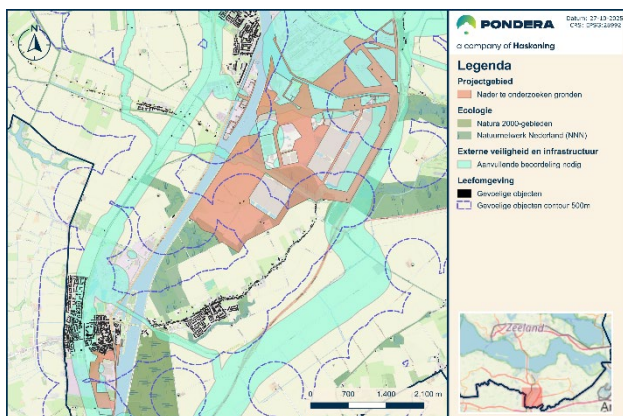
7.2 Ruimtelijke inpassing

In deze paragraaf wordt onderzocht hoe een SMR ruimtelijk zou kunnen worden ingepast in het cluster. De potentiële gronden zoals beschreven in Hoofdstuk 4.1 worden over vijf ruimtelijke thema's geanalyseerd: leefomgeving, veiligheid, ecologie, hoogwaterbescherming en koelwaterbehoefte. Deze thema's geven inzicht in de mogelijkheden en beperkingen voor de ruimtelijke inpassing van een SMR op deze specifieke locatie(s). De figuren die betrekking hebben op Dow Terneuzen zijn, afgezien van de koelwaterbehoefte en elektrische netaansluiting opgenomen in Hoofdstuk 8.2 en worden hier niet herhaald om overlap te voorkomen.

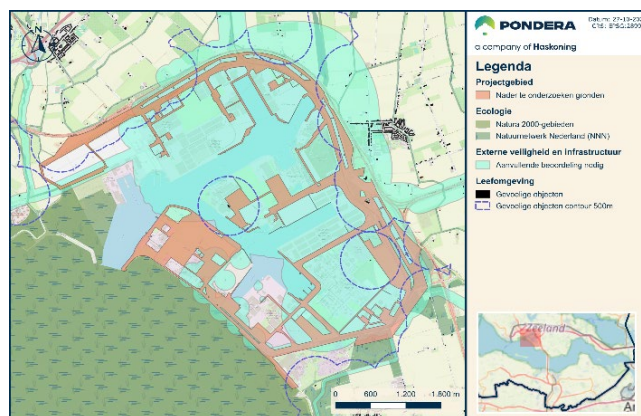
7.2.1 Leefomgeving

Bij de beoordeling van de ruimtelijke inpassing van een SMR is het van belang om de impact op de leefomgeving zorgvuldig te analyseren. Er wordt gekeken naar mogelijke terreinen die op tenminste 500 meter afstand liggen van gevoelige objecten (woningen, onderwijs- en zorginstellingen). Hierbij is nadere beoordeling nodig of een SMR ruimtelijk ingepast kan worden. Dit maakt inzichtelijk welke locaties in aanmerking komen om een inpassingsstudie uit te voeren.

Voor de locaties Sas van Gent en Axelse Vlakte, Figuur 7-5 is er ruimte beschikbaar wanneer er gebruik wordt gemaakt van een 500 meter zone waarbij nadere beoordeling nodig is. Dit houdt in dat in het Sloegebied (Figuur 7-6), de Mosselbanken, de Axelse vlakte en Sas van Gent voldoende ruimte beschikbaar is om een inpassingsstudie voor een SMR uit te voeren.



Figuur 7-5: Sas van Gent (linksonderin) en Axelse vlakte (rechttervlak) met contouren rondom gevoelige objecten van 500 en 1500 meter



Figuur 7-6: Sloegebied met contouren rondom gevoelige objecten van 500 en 1.500 meter

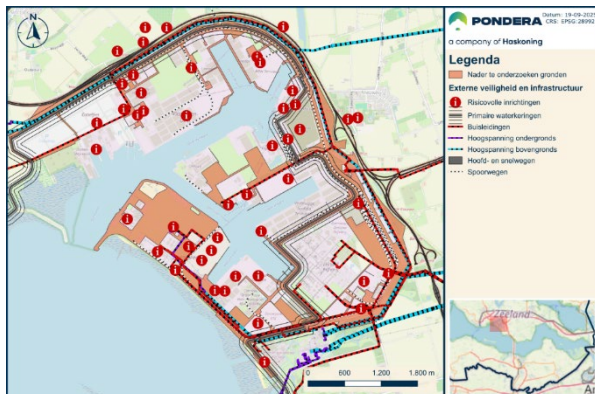
Gebieden rondom Dow (Mosselbanken), het Sloegebied Sas van Gent en de Axelse vlakte hebben potentieel voldoende ruimte om een SMR (3-15 ha) kwijt te kunnen. Wanneer een afstand van 500 meter zou worden toegepast, waarbij nadere beoordeling nodig is. Bij de terreinen rond Sas van Gent blijft er bij 500 meter afstand weinig ruimte over, daarmee zijn deze terreinen vanuit het oogpunt van leefomgeving minder geschikt voor SMR inpassing.

7.2.2 Veiligheid

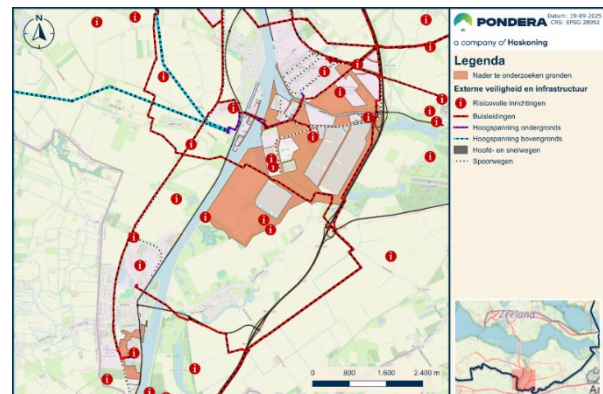
In Hoofdstuk 6.4 is toegelicht met welke veiligheidsaspecten rekening dient te worden gehouden bij het realiseren van een SMR. Het beoordelen van locaties op geschiktheid in het kader van externe veiligheid ligt buiten de scope van deze studie.

In Figuur 7-7 en Figuur 7-8 zijn objecten afgebeeld die in het kader van veiligheid relevant kunnen zijn. Het betreffen risicovolle inrichtingen (zoals Seveso inrichtingen of windturbines), buisleidingen, hoogspanningsleidingen, primaire waterkeringen, spoorlijnen en wegen. De bijbehorende risicocontouren zijn in en opgenomen.

Beoordeling van de haalbaarheid is in alle gevallen een nadere analyse van de externe veiligheid noodzakelijk. Hierbij kunnen effecten van deze inrichtingen en objecten als input dienen voor het ontwerp van de SMR-inrichting. Uit de kaarten blijkt dat een groot deel van de locaties Sas van Gent binnen bestaande risicocontouren valt, waardoor daar onvoldoende ruimte resteert voor de realisatie van een SMR. In de Axelse Vlakte (met name het zuidelijk deel) en in het Sloegebied (rondom de Sloecentrale) zijn wel gronden beschikbaar die buiten deze contouren liggen.



Figuur 7-7: Externe veiligheid rondom het Sloegebied



Figuur 7-8: Externe veiligheid rondom Sas van Gent

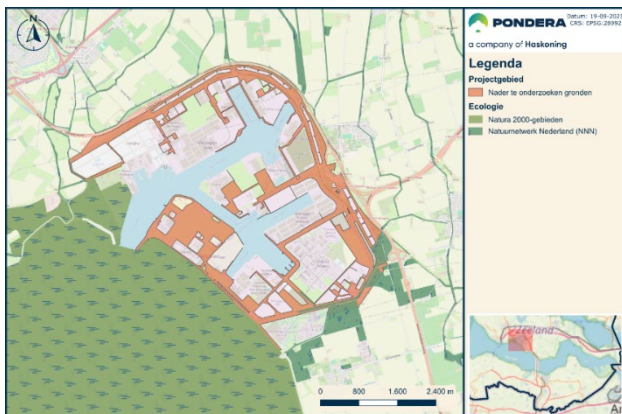
Op Externe veiligheid:

- **Sas van Gent: vrijwel geheel binnen bestaande risicocontouren; onvoldoende ruimte voor een SMR.**
- **Axelse Vlakte (zuidzijde): deels buiten risicocontouren, potentiële ruimte aanwezig.**
- **Sloegebied (rondom Sloecentrale): voldoende gronden buiten risicocontouren; relatief gunstig voor SMR-inpassing.**

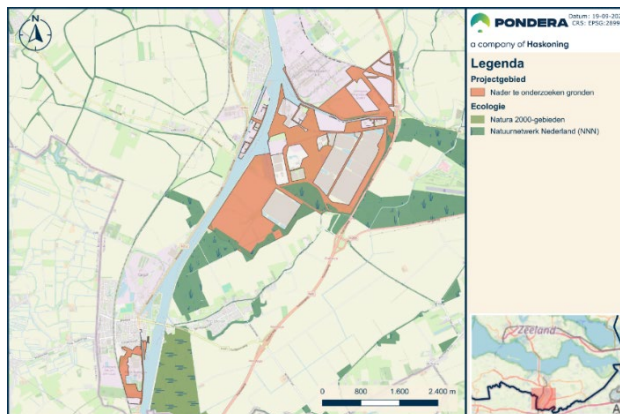
7.2.3 Ecologie

In deze studie wordt binnen het thema ecologie gekeken naar de ligging van de locatie ten opzichte van beschermde natuurgebieden, zoals Natura 2000 en NNN-gebieden. In **Error! Reference source not found.** de locaties weergegeven in relatie tot deze natuurgebieden. Opvallend is dat vrijwel de volledige Westerschelde is aangemerkt als Natura 2000-gebied. Daarnaast liggen binnen de Axelse vlakte een aantal NNN-gebieden (NatuurNetwerk Nederland) die overlappen met vrije gronden (Rijksoverheid, 2025). Tijdens de aanlegfase van het project kunnen negatieve effecten optreden door stikstof die vrijkomt. Bij locaties die dichtbij Natura 2000-gebieden liggen is de kans daarmee wat groter dat de geldende drempelwaarden worden overschreden. Om te kunnen beoordelen welke locatie vanuit ecologisch oogpunt meer geschikt is, is nader onderzoek nodig waarbij gekeken wordt naar de huidige status van de natuur in de nabijheid van de SMR. Bij een overschrijding van stikstofdepositiewaarden is het noodzakelijk om een Passende Beoordeling uit te voeren en een Omgevingsvergunning aan te vragen voor een Natura 2000-activiteit.

Indien een SMR gerealiseerd wordt in NNN-gebied is er ook een direct negatief effect door het verlies van beschermde natuurgronden. Gezien deze ligging is de verwachting dat tijdens de aanlegfase van het project negatieve effecten zullen optreden, met name door stikstofdepositie die de geldende drempelwaarden zal overschrijden. In dat geval is het noodzakelijk om een Passende Beoordeling uit te voeren en een omgevingsvergunning aan te vragen voor een Natura 2000-activiteit.



Figuur 7-9: Beschermde gebieden rondom het Sloegebied



Figuur 7-10: Beschermde gebieden rondom Sas van Gent en de Axelse Vlakte

Verdieping in overige ecologische effecten

De SMR wordt geplaatst op een bestaande industriële locatie. Buiten de stikstofemissies die kunnen optreden tijdens de aanlegfase, kan vooral het onttrekken en lozen van koelwater een potentieel negatief ecologisch effect hebben. Bij de inname van koelwater bestaat het risico dat organismen beschadigd raken of gedood worden door inzuiging. Het lozen van warm water kan leiden tot veranderingen op populatieniveau bij lokale soorten en verstoringen in de interacties binnen het ecosysteem, vooral bij soorten die macrofauna en/of vis als hoofdvoedsel hebben. Het temperatuurverschil door het lozen van verwarmd koelwater veroorzaakt lokaal veranderingen in abiotische factoren, zoals de watertemperatuur. Sommige soorten zijn tolerant of geven zelfs de voorkeur aan deze veranderde omstandigheden, terwijl andere soorten deze gebieden vermijden. Dit kan leiden tot lokale veranderingen in dichtheden, biomassa en soortensamenstelling.

Afhankelijk van de locatie van inname en lozing van koelwater kunnen periodiek baggerwerkzaamheden noodzakelijk zijn om de capaciteit van de inlaat- en lozingspunten te behouden. Dergelijke werkzaamheden kunnen lokaal leiden tot verstoring van aanwezige soorten door bodemroering, vertroebeling en geluid. In het koelwater kunnen ook resten van chemische stoffen (zoals chloor en broom) voorkomen die worden gebruikt om corrosie en aangroei van organismen in het koelwatersysteem tegen te gaan. Het gaat hierbij nadrukkelijk niet om radioactieve stoffen. Deze stoffen kunnen lokaal negatieve effecten veroorzaken op individuen en populaties, wat mogelijk leidt tot verminderde reproductie- en overlevingskansen.¹⁵

Alle onderzochte locaties liggen in of nabij beschermde natuurgebieden (Natura 2000 en NNN). De volledige Westerschelde is Natura 2000-gebied en in de Axelse Vlakte overlappen enkele vrije gronden met NNN-gebieden. Tijdens de aanlegfase is stikstofdepositie een belangrijk knelpunt: overschrijding van drempelwaarden ligt voor de hand, waardoor een Passende Beoordeling en een omgevingsvergunning voor een Natura 2000-activiteit vereist zijn. Realisatie binnen een NNN-gebied leidt bovendien tot direct verlies van beschermde natuurgronden. Nader ecologisch onderzoek per locatie is noodzakelijk om de feitelijke geschiktheid te bepalen.

¹⁵ Zie ook het ecologisch onderzoek wat gedaan is voor het MER van kerncentrale Borssele.

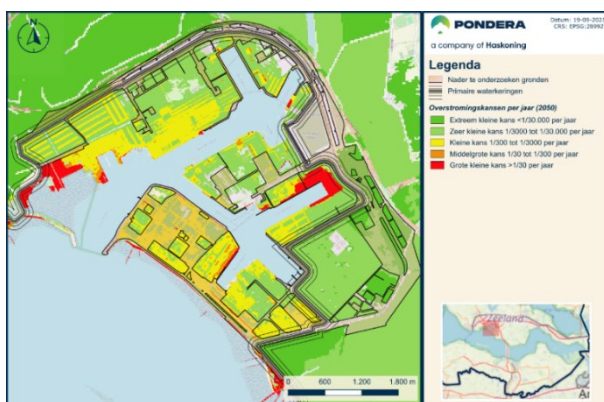
7.2.4 Hoogwaterbescherming

De te onderzoeken gronden in het industriecluster liggen aan of in nabijheid van water. Bij de ruimtelijke beoordeling van de inpassing van een SMR is het belangrijk om te toetsen of het plangebied voldoende beschermd is tegen overstromingsrisico's, zowel onder huidige als toekomstige klimaatomstandigheden. Voor deze beoordeling zijn, op basis van data van Rijkswaterstaat, een aantal figuren gemaakt. Daarbij is gekeken naar:

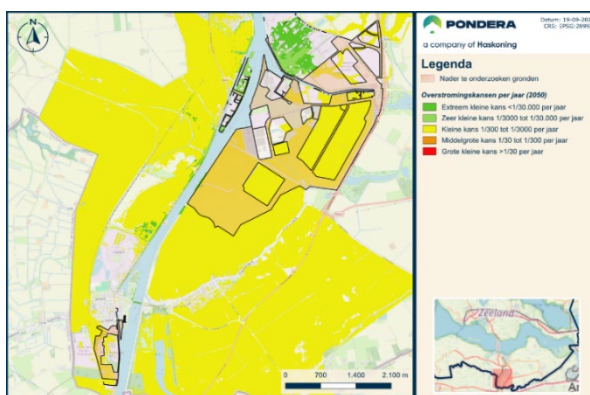
- De overstromingskansen in 2050
- De maximale waterdiepte bij overstroming;
- De ligging ten opzichte van primaire waterkeringen.

Uit deze analyse blijkt dat:

- De locaties in het Sloegebied die groot genoeg zijn voor een SMR hebben een overstromingskans van 1 op 3.000 tot 1 op 30.000 per jaar of 1 op 300 tot 1 op 3.000 per jaar, wat duidt op een zeer kleine tot kleine kans op een overstroming. Deze gronden hebben een maximale waterdiepte van voornamelijk 0 tot 1 meter en voor delen tot 1.5 meter.
- De locaties die groot genoeg zijn in de Axelse vlakte hebben een overstromingskans van 1 op 300 tot 1 op 3.000 per jaar, wat duidt op een kleine kans op een overstroming. Deze gronden hebben een maximale waterdiepte van voornamelijk 0 tot 1.5 meter en voor delen tot 2 meter.
- De locaties die groot genoeg zijn bij Sas van Gent hebben een overstromingskans van 1 op 300 tot 1 op 3.000 per jaar, wat duidt op een kleine kans op een overstroming. Deze gronden hebben een maximale waterdiepte van voornamelijk 0 tot 0.5 meter.



Figuur 7-11: Overstromingskansen in 2050 het Sloegebied



Figuur 7-12: Overstromingskansen in 2050 Sas van Gent en Axelse Vlakte

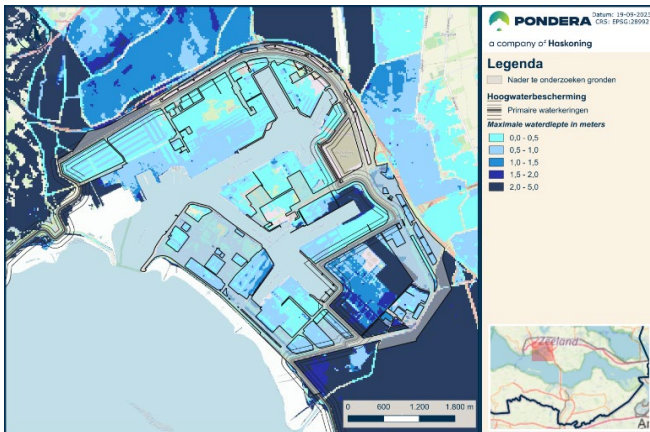
De aanwezigheid van dijken en waterstaatkundige voorzieningen biedt een solide basisbescherming. Toch kunnen aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn, afhankelijk van:

- De exacte positionering van de SMR-installatie op het terrein;
- De eisen en richtlijnen van het betrokken waterschap;
- De noodzaak om veiligheidssystemen en kritieke infrastructuur van SMR's te beschermen tegen waterinfiltratie op grond van wetgeving of (internationale) richtlijnen
- Het ontwerp van de SMR zelf.

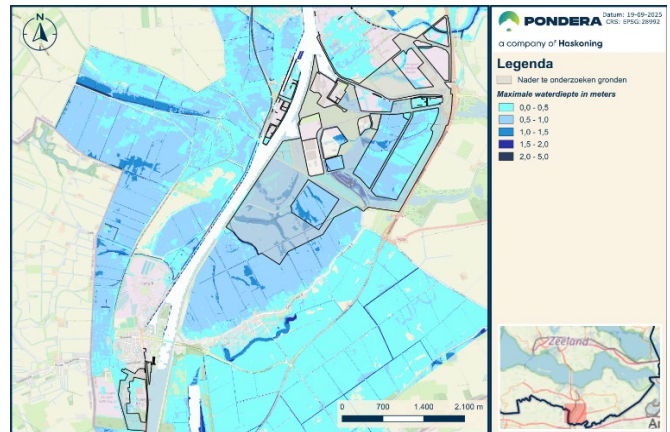
Dit wordt te meer nodig geacht bij mogelijke locaties bij de Axelse vlakte en het Sloegebied door de combinatie van de overstromingskansen en maximale waterdiepte op deze locaties. Mogelijke aanvullende maatregelen zijn onder andere:

- Verhoogde fundering van de installatie;
- Waterkerende bouwtechnieken;

- Aanpassing van toegangswegen om bereikbaarheid bij hoogwater te garanderen;
- Integratie van de installatie in het bredere regionale waterveiligheidsbeleid.



Figuur 7-13: Maximale waterdiepte bij overstroming Sloegebied



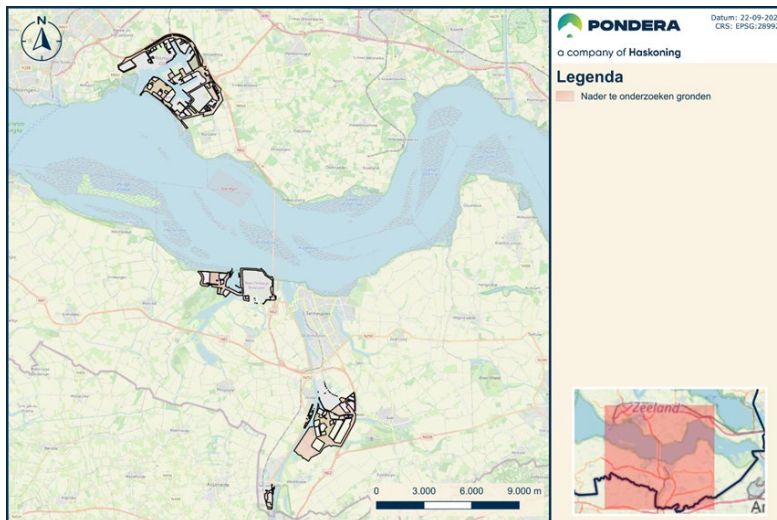
Figuur 7-14: Maximale waterdiepte bij overstroming Sas van Gent en Axelse vlakte

Het Sloegebied kent de laagste overstromingskansen (1:3.000 tot 1:30.000 per jaar), terwijl Axelse Vlakte en Sas van Gent minder gunstig scoren (1:300 tot 1:3.000 per jaar). Aanvullende maatregelen zoals verhoogde funderingen, waterkerende bouwtechnieken en integratie in het regionale waterveiligheidsbeleid zullen nodig zijn, met name in de Axelse Vlakte.

7.2.5 Koelwaterbehoefte

Voor de inpassing van SMR's is de beschikbaarheid en afvoer van koelwater een belangrijke randvoorwaarde, met name voor de GenIII+ SMRs. Koelen met oppervlaktewater is doorgaans goedkoper, energetisch efficiënter en vraagt minder ruimte op de locatie zelf dan koelen met koeltorens of koelmodules. Daartegenover staat dat het realiseren van koelwaterleidingen voor een SMR technisch en ruimtelijk ingrijpend is: leidingen hebben een diameter van 1–1,5 meter (aan- en afvoer), worden ondergronds aangelegd en vergen een strook van circa 10 meter breed. Kruisingen met wegen, spoor, woningen of primaire waterkeringen zijn zeer complex en kostbaar. Dit beperkt de haalbare locaties voor SMR's met oppervlaktewaterkoeling aanzienlijk.

In deze analyse is geen rekening gehouden met reeds bestaande koelwaterlozingen van de industrie, die lokaal de beschikbaarheid van koelwater kunnen beperken. Voor het kanaal Gent–Terneuzen geldt dat de doorstroming onvoldoende is om de benodigde hoeveelheden koelwater te verwerken. Daarom wordt uitgegaan van de **Westerschelde** als primaire bron, zie Figuur 7-15.



Figuur 7-15: Overzichtskartaal gebieden en de afstanden tot de Westerschelde

- Sloegebied: direct aan de Westerschelde gelegen. Rondom de Sloecentrale, het IJmuiden Ver Alpha-converterstation en de Vopak-terminal zijn locaties beschikbaar zonder grote kruisingen. Elders moet een primaire waterkering worden gekruist. Of dit acceptabel is, zal in overleg met Rijkswaterstaat moeten worden bepaald; stabiliteit van de kering mag niet of slechts minimaal worden aangetast.
- Locatie rondom Dow Terneuzen: eveneens aan de Westerschelde. Ook hier moet een primaire waterkering worden gekruist. De uitvoerbaarheid is afhankelijk van afspraken met Rijkswaterstaat.
- Axelse Vlakte: Afstand 6–11 km van de rivier. Leidingen zouden spoorwegen, snelwegen, diverse wegen en bebouwing moeten kruisen. Dit maakt oppervlaktewaterkoeling zeer lastig; inzet van koeltorens is hier de meest realistische optie. Hiervoor is op enkele locaties ruimte beschikbaar, maar ruimtelijke inpassing hangt samen met de afstand tot gevoelige objecten en bestaande risicovolle inrichtingen.
- Sas van Gent: 14–15 km van de rivier. Leidingen zouden meerdere infrastructuur- en risicovolle objecten moeten kruisen (woningen, leidingen, snelweg, hoogspanning, waterkering). Oppervlaktewaterkoeling is hier praktisch onhaalbaar. Koeltorens zijn de enige optie, maar de beschikbare ruimte in het cluster is beperkt en maakt realisatie onzeker.

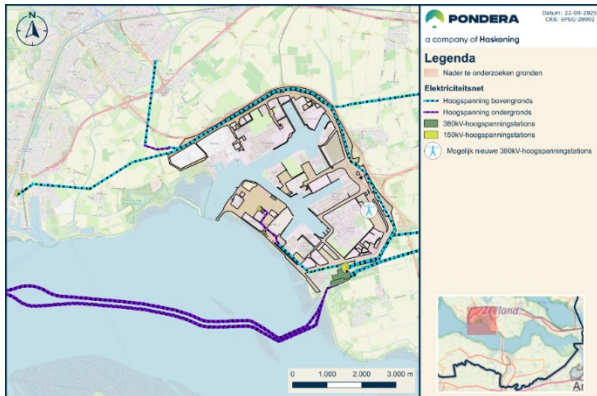
Oppervlaktewaterkoeling is het meest efficiënt, maar alleen realistisch voor het Sloegebied en Dow, mits kruisingen met primaire waterkeringen veilig uitvoerbaar zijn. In de Axelse Vlakte en Sas van Gent zijn koeltorens of koelmodules de enige optie, met ruimtelijke en milieutechnische beperkingen.

7.2.6 Elektrische netaansluiting

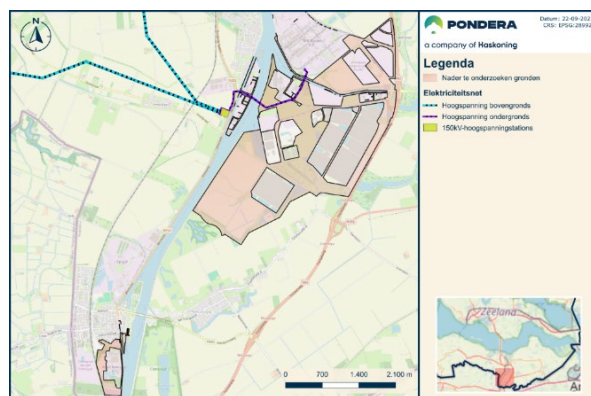
Het Nederlandse elektriciteitsnet staat onder zware druk; vrijwel overal is sprake van volle capaciteit voor afname en teruglevering van elektriciteit¹⁶. TenneT werkt de komende jaren aan diverse uitbreidingsprojecten om de transportcapaciteit te vergroten. Binnen het Schelde-Delta cluster zijn verschillende 150 kV- en 380 kV-stations aanwezig (zie Figuur 7-16, Figuur 7-17 en Figuur 7-18). Om definitief vast te stellen of er daadwerkelijk voldoende ruimte is voor een aansluiting van een SMR, is nader overleg met Tennet noodzakelijk.

¹⁶ zie capaciteitskaart Partners in Energie: <https://data.partnersinenergie.nl/capaciteitskaart/totaal/afname>

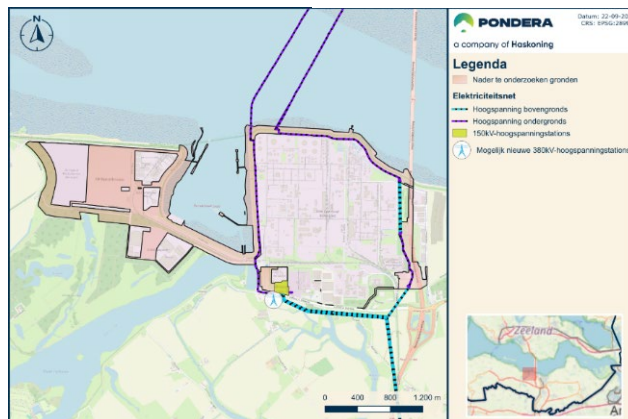
Voor de nog te realiseren stations in het Sloegebied en nabij Dow Terneuzen lijkt op termijn capaciteit beschikbaar te komen voor teruglevering. Een deel daarvan is echter reeds gereserveerd voor de aanlanding van windparken op zee. In vergelijking hiermee zijn de mogelijkheden in de Axelse Vlakte beperkt tot één bestaand hoogspanningsstation, en ligt Sas van Gent op grotere afstand van het hoogspanningsnet.



Figuur 7-16: Infrastructuur rondom het Sloegebied



Figuur 7-17: Infrastructuur rondom Sas van Gent en de Axelse Vlakte



Figuur 7-17: Infrastructuur rondom de Mosselbanken / Dow Terneuzen

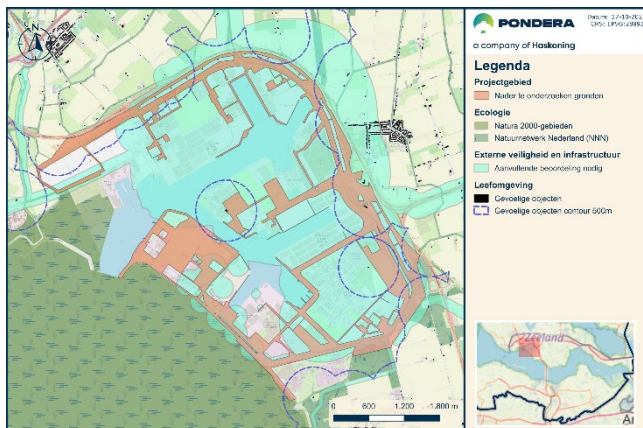
Op basis van deze kaarten kun je stellen dat er meer mogelijkheden zijn voor een netaansluiting in het Sloegebied en bij het Dow terrein in Terneuzen. Sas van Gent ligt verder van een mogelijke locatie voor netaansluiting af en bij de Axelse vlakte zijn de opties beperkt tot één hoogspanningsstation.

7.2.7 Tussenconclusie: beschikbare ruimte voor SMR in cluster

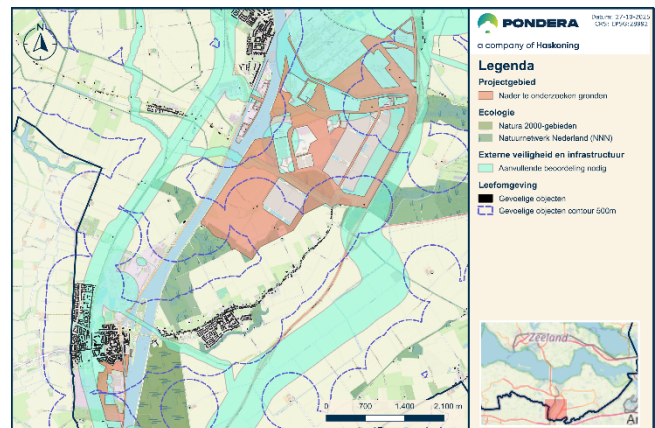
Uit de analyse blijkt dat de mogelijkheden voor SMR-inpassing in het cluster beperkt zijn, maar met mitigerende maatregelen mogelijk, zie Tabel 7-1 en Figuur 7-19 en Figuur 7-20.

Tabel 7-1: Ruimtelijke inpassing SMR's in het Schelde-Delta cluster

Thema	Uitleg	Locatie
Leefomgeving en Externe veiligheid	Bij een richtafstand van 500 m tot gevoelige objecten, gecombineerd met risicocontouren en NNN-gebieden, blijven weinig locaties over.	Alleen het gebied bij de Sloecentrale en een deel van de midden-Axelse vlakte. Mosselbanken vallen af door overlappende risicocontouren
Ecologie	Nabijheid van Natura 2000- en NNN-gebieden maakt stikstofdepositie en verlies van natuurgronden onvermijdelijk; vergunningen en Passende Beoordeling noodzakelijk.	Alle locaties
Koelwater	Oppervlaktewaterkoeling is alleen goed realiseerbaar direct aan de Westerschelde. Andere locaties vereisen koeltorens of modulaire koeling, met extra ruimtebeslag en beperkingen.	Sloegebied en Dow, Axelse Vlakte en Sas van Gent zijn afhankelijk van koeltorens of modules, met extra ruimtebeslag en milieubeperkingen.
Hoogwaterbescherming	Overstromingskansen en waterdiepte bepalen aanvullende eisen (fundering, waterkerende bouw).	De Sloelocaties scoren relatief gunstig, Axelse Vlakte en Sas van Gent minder
Netaansluiting	Afhankelijk van nabijheid en capaciteit van 380 kV-infrastructuur.	Het Sloegebied en Dow hebben duidelijk betere perspectieven vanwege bestaande en geplande 380 kV-infrastructuur; de Axelse Vlakte kent beperktere aansluitmogelijkheden.



Figuur 7-19: Ecologie, risicocontouren en leefomgeving 500 meter bij Sloegebied



Figuur 7-20: Ecologie, risicocontouren en leefomgeving 500 meter bij Sas van Gent en Axelse vlakte

Na integrale toetsing blijven in het Schelde-Delta cluster twee kansrijke locaties over: het Sloegebied (rondom de Sloecentrale) en het Dow-terrein bij Terneuzen. Beide liggen direct aan de Westerschelde, hebben toegang tot geplande 380 kV-netinfrastructuur en potentieel voldoende koelwater.

Voor Dow geldt dat kruisingen met primaire waterkeringen zorgvuldig moeten worden beoordeeld, terwijl het Sloegebied relatief gunstiger scoort op hoogwaterbescherming. Zowel de Axelse Vlakte als Sas van Gent is aangewezen op koeltorens of modules en kent grotere ecologische beperkingen. Beide hebben ook een grotere afstand tot potentiële netaansluitingen.

SMR-inpassing in de Schelde-Delta is slechts op beperkte schaal mogelijk, met het Sloegebied en Dow Terneuzen als voorkeurslocaties. De Axelse Vlakte kan slechts onder strikte voorwaarden worden overwogen; Sas van Gent lijkt ongeschikt.

8 Casus 2 – SMR achter de meter bij Dow

Dow Terneuzen is de grootste productielocatie van Dow buiten de Verenigde Staten en vormt met zijn 16 fabrieken de op één na grootste Dow-site wereldwijd. De site produceert meer dan 800 verschillende producten, waaronder plastics en chemicaliën die worden toegepast in alledaagse producten zoals elektronica, verpakkingen, auto-onderdelen en bouwmaterialen. Bij de kern van het productieproces zijn er vier relevante elementen te onderscheiden:

- Grondstof: de ingaande stroom bestaande uit nafta en LPG, een mengsel van verschillende koolwaterstoffen uit aardolie.
- Krakers: procesinstallaties waar de ingaande stroom op hoge temperatuur (850 °C) wordt omgezet in verschillende stromen waaronder ethyleen, propyleen, methaan en waterstof die de kraker vervolgens verlaten.
- Product: de uiteindelijke producten, die na een scheidingsproces uit de uitgaande stroom van de krakers wordt gewonnen.
- Afgas: na de producten te hebben gewonnen, blijft er afgas over. Dit restproduct, voornamelijk bestaande uit methaan, heeft een hoge calorische waarde en wordt daarom gebruikt bij de verhitting van de kraakinstallatie.

De grondstof- en productstroom zijn minder relevant in de beschrijving van het energiesysteem en zijn daarom buiten beschouwing van de energetische inpassing gelaten.

Dow Terneuzen heeft voor deze site een grote energievraag, hoofdzakelijk bestaande uit elektriciteit en stoom die op dit moment door directe verbranding van het afgas wordt voorzien. In de huidige situatie wordt de elektriciteit- en stoomvraag voorzien door de Elsta energiecentrale (warmtekrachtkoppeling) op de site en in het beheer van Dow.

8.1 Energetische inpassing

De inzet van een SMR als energiebron voor een chemisch bedrijf kan bijdragen aan de verduurzaming en leveringszekerheid van warmte en elektriciteit. Dit hoofdstuk beoordeelt of een SMR kansrijk kan worden geïntegreerd binnen het energiesysteem van Dow Terneuzen, waarbij rekening wordt gehouden met het verduurzamingsplan en het toekomstige energiesysteem van Dow.

8.1.1 Huidig en toekomstig energiesysteem van Dow

Deze paragraaf biedt een overzicht van de huidige situatie en de toekomstige situatie van het energiesysteem van Dow. Dit dient als uitgangspunt om te beoordelen hoe kansrijk een SMR te integreren is in het energiesysteem van Dow en waar potentiële knelpunten zitten. Onderstaande is gebaseerd op het Path2Zero programma van Dow (Dow Terneuzen, 2023).

In de hierop volgende paragrafen worden achtereenvolgens de volgende situaties uiteengezet:

- De huidige situatie;
- Fase 1: de waterstofroute en tevens bij de vervanging van de Elsta-centrale voor een SMR;
- Fase 2: waarin één kraker is vervangen voor een elektrische kraker (e-kraker)

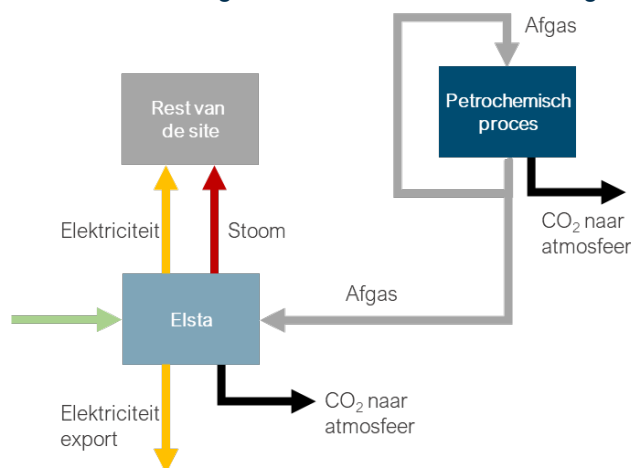
Huidige situatie: conventioneel kraken, opwerken van producten, het scheiden van afgassen en nuttig inzet van afgassen

In Figuur 8-1 is een versimpeld processchema weergegeven van de huidige energie- en productiestromen binnen de site van Dow Terneuzen. Het diagram begint bij de kraker, die het geproduceerde afgas gebruikt als brandstof om de kraakreactie te voorzien van de benodigde hoge temperatuur warmte.

Daarnaast wordt een deel van het afgas, na scheiding naar de Elsta centrale geleid waar de benodigde stoom en elektriciteit voor de rest van de site wordt geproduceerd. De stoom wordt op de site voornamelijk gebruikt voor de aandrijving van zware apparatuur zoals compressoren, en wordt in twee stromen naar de site gestuurd: 90 bar en een deel op 35 bar (PBL, 2022), beide stromen op een temperatuur van 300 °C of hoger. De productie is een continubedrijf dus er is altijd elektriciteit en stoom nodig. Onverwachte uitval van een van deze stromen levert substantiële economische schade op.

Huidige energieproducent op site: Elsta-centrale

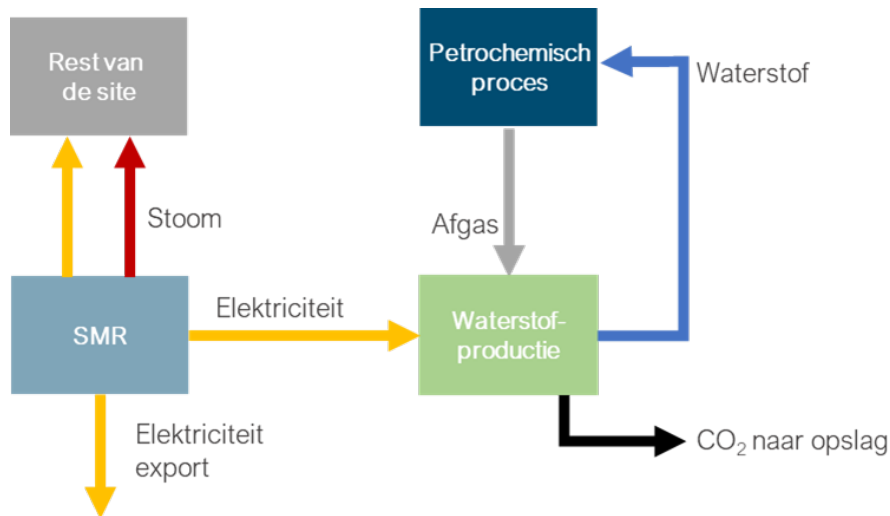
De Elsta-centrale in Terneuzen is een warmtekrachtkoppelingsinstallatie die sinds 1998 zowel elektriciteit als stoom levert aan de productielocatie van Dow Terneuzen en sinds 2018 volledig eigendom is van Dow. De centrale speelt een cruciale rol in de energievoorziening van Dow door continu warmte en stroom te leveren aan de fabrieken, en draagt daarnaast bij aan het landelijke elektriciteitsnet. De centrale bestaat uit drie gasturbines die met hoogcalorisch aardgas elk 123 MWe (opgesteld vermogen) kunnen opwekken plus maximaal 850 ton/uur stoom (90 bar), en in de praktijk levert de Elsta 450 ton/uur stoom (90 bar) (Dow Chemical Company, 2018). De stoomturbine levert maximaal 90 MWe en wordt tevens gebruikt voor de regeling van de stoomdruk naar de productie-eenheden. De Elsta-centrale zal naar verwachting in de tweede helft van het volgende decennium einde levensduur zijn en ofwel moeten worden vervangen, ofwel levensduur verlengend onderhoud moeten ondergaan.



Figuur 8-1: Versimpeld processchema van het huidige energiesysteem van Dow

Fase 1 – de waterstofroute

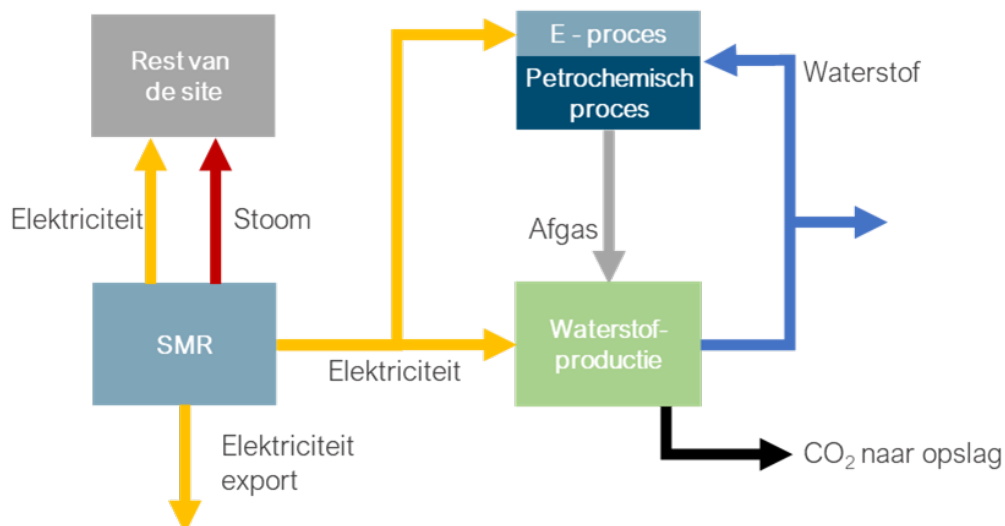
Naast het vervangen van de Elsta-centrale, heeft Dow andere strategieën o.a. het verduurzamen van het productieproces, hetgeen in de komende decennia in fases zal worden gerealiseerd (Dow Terneuzen, 2023). In eerste decarbonisatie fase, zal het afgas naar de waterstof productie geleid worden, in plaats van verbranding in de krakders. De waterstofproductielocatie zal een reformer zijn, een installatie die met behulp van stoom en pure zuurstof methaan uit het afgas omzet in waterstof en CO₂. De CO₂ wordt afgevangen met een afvanginstallatie en opgeslagen onder de zeebodem. Dit proces heet ook wel *Carbon Capture and Storage (CCS)*. De waterstof wordt vervolgens teruggevoerd naar de kraker om te voorzien in de benodigde hoge temperatuur warmte. Daardoor wordt de CO₂ uitstoot van de productielocatie flink verlaagd.



Figuur 8-2: Versimpeld processchema van het energiesysteem rond 2035-2040, waarin de waterstofroute is geïmplementeerd en de Elsta-centrale is vervangen door een SMR.

Fase 2– E-kraker route

In de tweede verduurzamingsstap wordt een deel van het kraakproces plus een aantal stoom-aangedreven apparaten geëlektrificeerd. In dit E-kraker scenario wordt één van de drie kraakfornuizen vervangen door een elektrische variant. De elektriciteitsvraag neemt hierdoor drastisch toe. Er wordt eenzelfde hoeveelheid afgassen geproduceerd en daarmee ook eenzelfde hoeveelheid waterstof in de waterstofproductielocatie. De waterstofproductie is immers inherent verbonden aan het kraakproces. De geproduceerde waterstof is meer dan de twee resterende, conventionele kraakfornuizen verbruiken. Daarom zal de E-kraker-route resulteren in een substantieel waterstofoverschot, dat geëxporteerd zal worden naar derden.



Figuur 8-3: Versimpeld processchema* van de situatie rond 2050, waarin de waterstofroute is geïmplementeerd.

*de Elsta-centrale is vervangen door een SMR, en één kraker is vervangen door een E-kraker. In dit scenario is er een substantieel waterstofoverschot, dat geëxporteerd zal worden naar derden of intern gebruikt kan worden voor chemische processen.

De exacte getallen behorend bij de energievraag van Dow Terneuzen zijn vertrouwelijk en daarom als aparte bijlage meegenomen in A1.

8.1.2 Inpassing SMR's

De beoordeling van hoe kansrijk een SMR als energieproducent is voor een industriële afnemer zoals Dow beslaat verscheidene aspecten. De relevante criteria voor de energetische inpassing zijn beschreven in Tabel 8-1. Na de beschrijving volgt een beoordeling van de beschikbare technieken op deze criteria.

Tabel 8-1: Criteria Energetische inpassing SMR

Criteria voor een succesvolle energetische inpassing van een SMR	
Elektriciteitsvraag	De elektrische output van de SMR moet in omvang en betrouwbaarheid kunnen voldoen aan de eisen van de chemische processen, uiteraard kan dit worden opgelost door meerdere SMR's te plaatsen. In het geval van Dow zou je in fase 1 één GEN II+ SMR en in Fase 2 nog eens twee tot drie SMR's bij kunnen plaatsen.
Warmtevraag	De thermische output van de SMR moet passen bij de temperatuur- en drukvereisten van de chemische processen. In het geval van Dow gaat het om zo om een kleiner thermisch vermogen dat een Gen III+-SMR en om temperaturen van boven de 300 °C en daarmee buiten het bereik van een Gen III+-SMR. De warmtevraag kan wel worden voorzien door één Gen IV-SMR in fase 1 en de thermische capaciteit hoeft niet te worden uitgebreid in fase 2.
Productieprofiel en procesintegratie	De SMR moet voor zowel elektriciteit als warmtevraag van de site het gewenste afnameprofiel kunnen matchen. In het geval van Dow is dit een continue (baseload) elektriciteits- en stoomvraag. Daarnaast moet de SMR technisch en operationeel kunnen worden geïntegreerd in bestaande infrastructuur en processtromen.
Technologie beschikbaarheid	De gewenste SMR moet binnen het gewenste tijdpad commercieel beschikbaar zijn.
Stoom- en elektriciteitsinfrastructuur	De site moet beschikken over, of kunnen voorzien in geschikte infrastructuur om de elektriciteit en (hoge temperatuur) stoom naar de rest van de site te kunnen transporteren. Dit betekent dat er een hogedruk stoomleiding van circa 2,5 km moet worden aangelegd tot aan de huidige stoomaansluiting van de Dow fabrieken op de Elsta centrale.

Daarnaast zijn er nog andere relevante criteria bij de energetische inpassing van een SMR, zie Tabel 8-2.

Tabel 8-2: Andere aspecten energetische inpassing

Andere relevante aspecten bij de energetische inpassing van een SMR	
Koelcapaciteit	Er moet voldoende koelwater of alternatieve koelsystemen beschikbaar zijn voor veilige warmteafvoer. Aangezien een SMR een significante hoeveelheid warmte produceert, ook in geval van volledige inzet als elektriciteitsproducent, zal er een significante koelcapaciteit beschikbaar moeten zijn.
Fundering en civiele voorzieningen	De ondergrond van de beoogde locatie moet geschikt zijn voor het plaatsen van het reactorgebouw en het turbinegebouw.
Site beschikbaarheid	De site moet gedurende de levensduur van de SMR geschikt blijven voor veilige toegang tot inspectie, refueling (nucleaire brandstofvervanging) en groot onderhoud zonder impact op de productieprocessen.

Fase 1 – de waterstofroute

In paragraaf 5.3 Modus operandi van SMR's staan de verschillende modus operandi, en de bijbehorende, algemene overwegingen van Gen III+ en Gen IV-reactoren opgesomd. In het geval van Dow kunnen Gen III+-SMR's **niet** in de warmtevraag voldoen, omdat de geleverde temperaturen niet hoog genoeg zijn. Gen III+ kan wel worden ingezet om in de elektriciteitsvraag te voorzien. De warmtevraag van Dow's site zal

dan op een andere manier worden ingevuld, bijvoorbeeld door gasketels of e-boilers. Het alternatief is het importeren van elektriciteit van het openbare net waarmee ruimte voor warmtelevering ontstaat. Één grote SMR volstaat voor de levering van 300 MWe aan elektriciteit. Afhankelijk van de SMR-capaciteit kan ook de warmte hiermee worden geleverd.

Voor Gen IV geldt dat een SMR thermisch, elektrisch en in co-generatiemodus kan worden ingezet om in de warmte- en/of elektriciteitsvraag te voorzien. De onzekerheid in tijdige beschikbaarheid van Gen IV SMR's bepaalt of dit een realistisch alternatief voor fase 1 of fase 2 biedt. Daarnaast is voor de warmtelevering van Dow ook de realisatie van een aanzienlijke stoomleiding nodig. Uitgaande van de Mosselbanken, zal deze stoomleiding naar de hoofdproductielocatie van Dow ongeveer 2,5 km zijn. Uitgaande van een temperatuur van boven de 300°C en 90 bar stoom en enkele honderden MW thermisch vermogen, levert dat een stoomleiding van zo'n 50 cm diameter en een verlies van orde grootte 0,7% en 7 °C op. Naast het energieverlies, vormt deze stoomleiding een veiligheidsrisico en zal dit project t.g.v. benodigde expansielussen ook een flink ruimtebeslag hebben. Bovendien een project met aanzienlijke bijkomende kosten, gezien het grote volume, hoge temperatuur en hoge druk van de stoom.

Om een complete afweging te maken, worden ook alternatieven voor elektriciteitslevering en warmtelevering en hun bijbehorende CO₂-voetafdruk bepaald. In het geval van elektriciteitslevering, nemen we elektriciteit van het openbare net als alternatief, geldt een EU-doelstelling van 90% CO₂ reductie in 2040 ten opzichte van 1990 als uitgangspunt (European Commission, 2025) wat resulteert in een CO₂-voetafdruk van 0,085 kg CO₂ /kWh (elektrische energie). Een ander alternatief zou kunnen zijn om de levensduur van de Elsta-centrale te verlengen. Zonder een nageschakelde CO₂-afvanginstallatie zou dit ongeveer neerkomen op 0,38 kg CO₂ /kWh elektriciteit, of mét een nageschakelde CO₂-afvanginstallatie (met een typisch afvang rendement van 95%) van 0,019 kg CO₂ /kWh elektriciteit, gebaseerd op emissiefactoren van gascentrales (CBS, 2023). Voor een SMR is voor deze studie uitgegaan van nul CO₂-emissies, aangezien we alleen directe emissies beschouwen en niet de emissies gedurende de bouw.

Voor industriële warmtelevering is de verbranding van aardgas het meest logische alternatief en geldt een emissiefactor van 0,203 kg CO₂/kWh (warmte) (NEa, 2025). Mocht er voor een elektrische ketel gekozen worden, waarin elke eenheid elektrische energie wordt omgezet in een gelijke hoeveelheid thermische energie, dan geldt dezelfde emissiefactor als voor het openbare elektriciteitsnet. Mocht de warmte worden geleverd worden vanuit aardgas met een nageschakelde CO₂-afvanginstallatie (met een typisch afvang rendement van 95%) dan is de emissiefactor 0,01 kg CO₂ /kWh warmte, niet rekening houdend met additioneel elektriciteitsverbruik van de CO₂-afvanginstallatie. In de geschatte CO₂-reductie in onderstaande tabel is een warmteleverantie zonder nageschakelde CO₂-afvanginstallatie aangehouden.

Tabel 8-3: geschatte CO₂ reductie van een SMR ten opzichte van de alternatieven. * Waarbij het sterk de vraag is of de Elsta-centrale in de toekomst dezelfde emissiefactoren als de huidige emissiefactoren voor gascentrales aan kan houden.

CO ₂ reductie ten opzichte van de alternatieven			
	Openbare net 2040	Elsta centrale, Huidig*	Gascentrale met CO ₂ afvanginstallatie
	[ktonCO ₂ /jr]	[ktonCO ₂ /jr]	[ktonCO ₂ /jr]
100 MW elektriciteit, 8000 uur per jaar	68	304	15
100 MW warmte, 8000 uur per jaar	68 (uitgaande van een E-boiler)	162	8

Er dient te worden opgemerkt dat voor industriële warmte, in de vorm van stoom, beperkte alternatieven mogelijk zijn, stoom o.b.v. verbranding van gas vormt momenteel het meest reële alternatief, aangezien een E-boiler als nadeel heeft dat het één (energetische) eenheid elektriciteit omzet in één eenheid warmte, dat een veel lagere waarde kent en dit dus relatief kostbare warmte is. Daarom biedt de inzet van een SMR voor warmte aan de industrie een mogelijk alternatief voor koolstofvrije warmte. De opties voor fase 1 zijn samengevat in *Tabel 8-4*.

Tabel 8-4: Verschillende mogelijkheden voor de vervanging van de Elsta centrale door een SMR in fase 1 - de waterstofroute

Levering door SMR	Warmte	Elektriciteit	CO ₂ reductie	Opmerking
	[MWth]	[MWe]	[ktonCO ₂ /jr]	
Gen III+ – elektrische inzet	0	>300	>200	Warmtelevering door verbranding van aardgas en/of afgas zonder CO ₂ afvang, derhalve alleen CO ₂ reductie t.o.v. elektriciteit vanuit het net.
Gen IV – thermische inzet	>200	0	>320	Uitgaande van elektriciteitslevering vanuit het openbare net met bijbehorende emissiefactor, derhalve alleen CO ₂ reductie t.o.v. warmte door verbranding van aardgas.
Gen IV – elektrische inzet	0	>300	>200	Warmtelevering door verbranding van aardgas en/of afgas zonder CO ₂ afvang, derhalve alleen CO ₂ reductie t.o.v. elektriciteit vanuit het net.

Fase 2 - E- kraker route

In fase 2 blijft de warmtevraag gelijk aan die in de fase 1. Wel is significant meer elektriciteit nodig. Dit kan worden gerealiseerd door één of twee grote SMR's bij te plaatsen, afhankelijk van de het gekozen model. Mogelijk kunnen deze van hetzelfde type zijn op dezelfde locatie als de SMR van fase 1. Meerdere SMR's geeft bovendien meer flexibiliteit en redundantie in geval van onderhoud van één ervan. Al naar gelang de mogelijkheid zich voordoet in het cluster buiten Dow kan elektriciteit worden geleverd aan het openbare net. Gebaseerd op het huidige TRL-niveau van elektrische krakers, wordt fase 2 naar verwachting pas ná 2040 gerealiseerd en mogelijk pas tegen 2050 operationeel. Hierdoor vormt een Gen IV reactor die in de warmtevraag voorziet een realistischer alternatief dan voor fase 1. Dow kan dus in fase 2 overwegen om een Gen IV SMR te plaatsen om CO₂-vrij in zijn warmte te voorzien, mocht dat in fase 1 nog niet zijn gelukt. Ook biedt dit gelegenheid om meerdere SMR's te gebruiken en optimaal af te stellen op de elektriciteitsvraag en warmtevraag van Dow.

Aangezien er aan de warmtevraag van Dow niets verandert in fase 2, blijft de mogelijke CO₂-reductie voor de thermische inzet van Gen IV gelijk aan de vermelde waarde in bovenstaande tabel Voor Gen IV-thermische inzet. De aanvullende elektriciteitsvraag van Fase 2 resulteert in een kleinere CO₂-reductie per eenheid energie, aangezien na 2040 het elektriciteitsnetwerk naar verwachting verder verduurzaamd is. Uitgaande van een emissiefactor van 0,085 kg CO₂ /kWh in 2040, resulteert dit in een CO₂-reductie van meer dan 250 kton CO₂/jaar in 2040. Als deze fase later gerealiseerd worden dan 2040, zal de CO₂-reductie lager uitvallen., uitgaande van de doelstelling om in 2050 een CO₂-neutraal elektriciteitsnetwerk te hebben (European Commission, 2025).

De continue elektriciteits- en warmtevraag van Dow sluit goed aan bij de inzet van SMR's. Voor elektriciteitsproductie zijn er geen belemmeringen: één grote SMR kan fase 1 dekken, in fase 2 zijn meerdere units nodig (afhankelijk van grootte, benodigde redundantie en warmteuitkoppeling). De doorslaggevende factoren zijn projectrisico's, ruimtelijke inpassing en energiekosten.

Voor warmte geldt dat Gen III+ door de lage temperatuur geen optie is. Gen IV-reactoren kunnen wél op het gewenste niveau leveren maar komen pas vanaf fase 2 (na 2037) in beeld.

Warmtelevering kan met één grote of middelgrote SMR, maar vergt een grootschalige stoomleiding (Ø 50 cm, 2,5 km, 90 bar) tot aan de huidige Elsta locatie, met bijbehorende verliezen (~0,7%) en veiligheids- en ruimtevaagstukken.

Totdat SMR's beschikbaar zijn, zal Dow de elektriciteitsvraag in fase 1 anders moeten invullen, bijvoorbeeld door levensduurverlenging van de Elsta-centrale.

8.2 Ruimtelijke inpassing

In deze paragraaf wordt onderzocht hoe een SMR ruimtelijk zou kunnen worden ingepast nabij het Dow-terrein. Deze zal dan direct gekoppeld worden aan de Dow site (achter de meter). Allereerst wordt gekeken naar de eigenschappen van de grond die in deze casus wordt onderzocht, en in hoeverre de plaatsing van een SMR aansluit bij de bestaande functie van deze locatie.

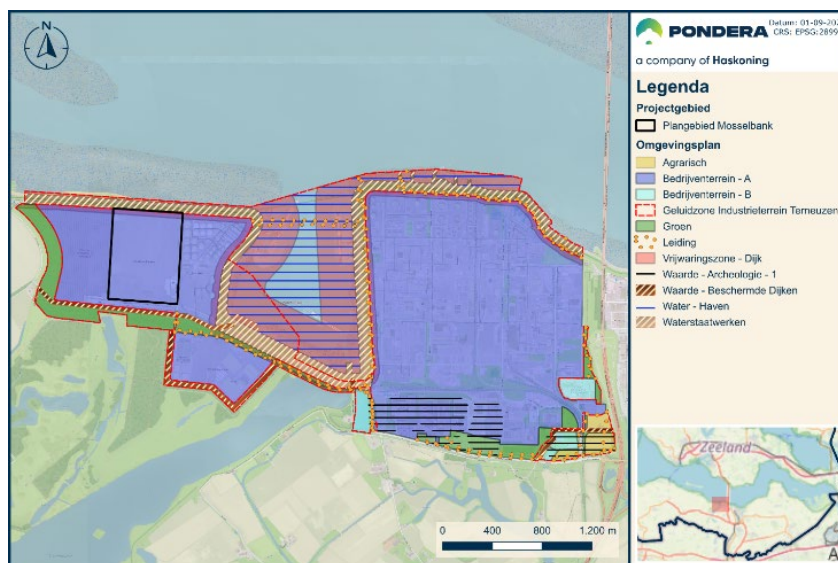
Vervolgens worden vijf ruimtelijke thema's geanalyseerd: leefomgeving, veiligheid, ecologie, hoogwaterbescherming en koelwaterbehoefte. Deze thema's geven inzicht in de mogelijkheden en beperkingen voor de ruimtelijke inpassing van een SMR op deze specifieke locatie.

8.2.1 Aangewezen gronden en bestaande functies

Zoals eerder beschreven in Hoofdstuk 4.1 *Potentiële percelen binnen het cluster* liggen er in de omgeving van het Dow-terrein meerdere percelen die in principe ruimte kunnen bieden voor een SMR. Voor deze analyse is aangesloten bij de *Nationale Prognose Ruimtebehoefte Industrieclusters* (Stec groep, Haskoning, PosadMaxwan, Generation Energy, April 2025), wat inzicht geeft in de beschikbare en toekomstig uitgifbare industriële gronden.

Daarnaast zijn er in de directe nabijheid van Dow – bijvoorbeeld ten zuidwesten van het terrein – andere gronden aanwezig die zowel ruimtelijk als energetisch geschikt zouden kunnen zijn. Deze terreinen hebben echter een momenteel andere bestemming en vallen daarom buiten de scope van deze studie.

Zoals we bij de energetische inpassing van een SMR al is vastgesteld, is niet alleen voldoende ruimte bepalend, maar ook de directe koppeling met de industriële vraag naar elektriciteit en hogetemperatuurstoom. Locaties op grotere afstand van de Dow-site, zoals bijvoorbeeld de Paulinapolder zijn hierdoor minder kansrijk geacht. De aanleg van een stoomleiding van circa 50 cm diameter bij 90 bar en 450 °C vraagt immers een brede leidingstrook, brengt aanzienlijke veiligheidsrisico's met zich mee en leidt tot hoge kosten en energieverliezen bij langere tracés. In Figuur 8-4 is het perceel van Dow weergegeven met de percelen die na de energetische inpassing als meest geschikt naar voren komen. Deze laten zien dat aangrenzende gronden, zoals de Mosselbank een realistische optie vormt voor SMR-inpassing.



Figuur 8-4: Dow Terrein en omliggende ruimtelijke functies. Het plangebied Mosselbank ligt niet op maar naast het Dow Industrie park en biedt mogelijk voldoende hectare voor het plaatsen van een SMR.

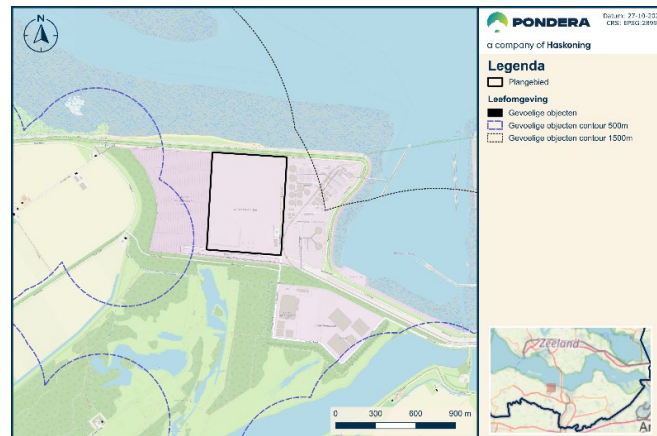
De Mosselbanken heeft de functie “bedrijventerrein – A bedrijf van categorie 5.3” (zie Figuur 8-4). (Beheersverordening Dow, Mosselbanken en Logistiek Park, 2022). De SMR zou kunnen worden gerealiseerd binnen de bestaande grenzen van het industrieterrein maar valt zelf niet onder de categorie bedrijventerrein – A bedrijf van categorie 5.3.

Normaliter geldt dat, wanneer een installatie aantoonbaar een functioneel onderdeel is van de bedrijfsvoering (bijvoorbeeld energievoorziening voor productie, koeling, verlichting), er binnen een bedrijfsbestemming juridisch ruimte is om deze te realiseren, zeker wanneer dit aansluit bij de duurzaamheidsdoelen van het bedrijventerrein. De bouw van een SMR om het energiegebruik van een bedrijf te verduurzamen, wijkt echter wezenlijk af van bijvoorbeeld de aanleg van een nabij zonnenveld. Het gaat om een grootschalig project met specifieke veiligheids- en milieurisico's, waardoor het moet worden beschouwd als een activiteit die niet past binnen het huidige omgevingsplan.

Het bevoegd gezag zal om deze reden aanvullende regels en/of maatwerkvoorschriften willen vastleggen over het gebruik van de SMR. Bovendien kan worden verwacht dat de milieueffecten moeten worden onderzocht in een (plan-)MER. Formeel gezien kan ruimtelijke inpassing via verschillende juridische routes plaats kunnen vinden: doormiddel van een BOPA (buitenplanse omgevingsplanactiviteit), een wijziging van het omgevingsplan of een projectbesluit. In het geval van een projectbesluit is veelal sprake van een ander bevoegd gezag. Namelijk de provincie Zeeland of het Rijk.

8.2.2 Leefomgeving

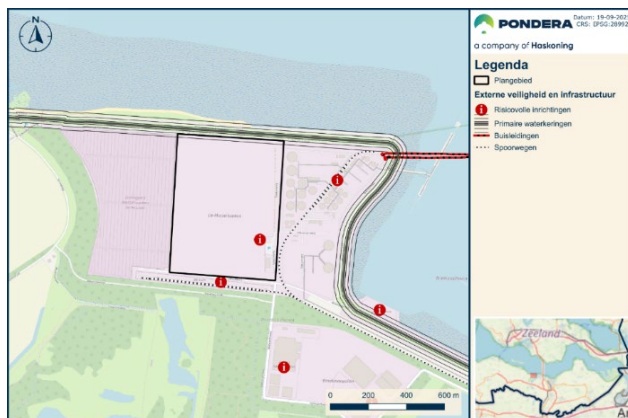
Bij de beoordeling van de ruimtelijke inpassing van een SMR op de Mosselbanken is de impact op de leefomgeving beperkt. Binnen twee kilometer liggen circa 30 woningen, waarvan de dichtstbijzijnde op 950 meter afstand. Gezien de compactheid en lage geluidsproductie van SMR's, voornamelijk afkomstig van ondersteunende installaties, wordt verwacht dat de geluidsbelasting ruim binnen de normen blijft; een richtafstand van 500 meter is hiervoor afdoende. Ook de visuele effecten zijn minimaal door de bestaande industriële bebouwing en groenstroken rondom het terrein. Bij toepassing van een 500 meter zone, waarbij nadere beoordeling nodig is voldoet de locatie, zie Figuur 8-5.



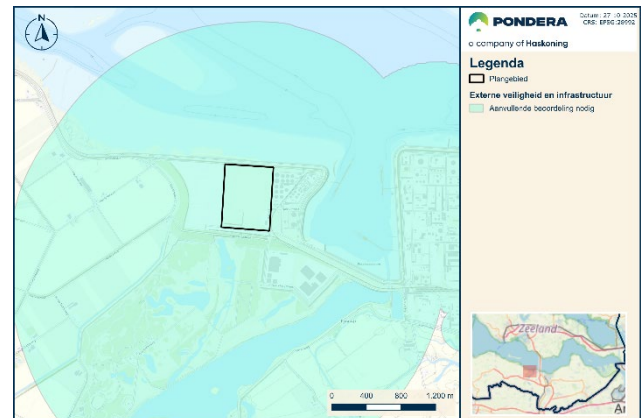
Figuur 8-5: Gevoelige objecten op 500 en 1000 meter vanaf locatie de Mosselbanken

8.2.3 Veiligheid

In Figuur 8-6 en Figuur 8-7 zijn objecten in de nabijheid van de Mosselbanken afgebeeld die in het kader van veiligheid relevant kunnen zijn. Het betreffen een aantal Seveso inrichtingen en spoorlijnen voor het vervoer van gevaarlijke stoffen. Het is relevant om te kijken naar de risicocontouren die van deze objecten uitgaan, dit is afbeeld in Figuur 8-7. Zoals te zien is op de kaart valt een groot deel van de locatie Mosselbanken binnen de risicocontouren van bestaande risicovolle inrichtingen. Voor het bepalen van de haalbaarheid van het realiseren van een SMR op deze locatie zal dus de externe veiligheid nader onderzocht moeten worden. Hierbij kunnen effecten van deze inrichtingen en objecten als input dienen voor het ontwerp van de SMR-inrichting.



Figuur 8-6: Externe veiligheid en infrastructuur rondom locatie de Mosselbanken



Figuur 8-7: Nadere beoordeling nodig rondom de Mosselbanken: bestaande risicocontouren

De locatie Mosselbanken ligt direct naast een opslag van brandbare stoffen en valt daardoor grotendeels binnen bestaande risicocontouren. Dit vormt op voorhand geen absolute belemmering, maar betekent wel dat een grondige beoordeling van de externe veiligheid noodzakelijk is (of een verplaatsing van al aanwezige functies). Omdat er in Nederland nog weinig ervaring is met de ruimtelijke inpassing van SMR's, zal een nader onderzoek moeten uitwijzen welke veiligheidsafstanden en randvoorwaarden passend zijn voor een verantwoorde realisatie.

8.2.4 Ecologie

In 7.2.3 is een toelichting gegeven op de mogelijke ecologische effecten van een SMR. Voor deze casus wordt binnen het thema ecologie gekeken naar de ligging van de vrije gronden ten opzichte van beschermde natuurgebieden, zoals Natura 2000 en NNN-gebieden. Opvallend is dat vrijwel de volledige Westerschelde is aangemerkt als Natura 2000-gebied. Daarnaast bevindt zich ten zuiden van de beoogde locatie een NNN-gebied. Hierdoor ligt het plangebied in directe nabijheid van beschermde natuur.

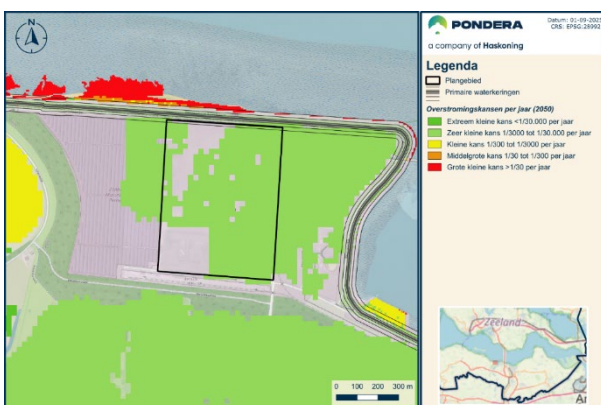
Gezien deze ligging (Figuur 8-8) is de verwachting dat tijdens de aanlegfase van het project negatieve effecten zullen optreden, met name door stikstofdepositie die de geldende drempelwaarden zal overschrijden. In dat geval is het noodzakelijk om een Passende Beoordeling uit te voeren en een omgevingsvergunning aan te vragen voor een Natura 2000-activiteit.



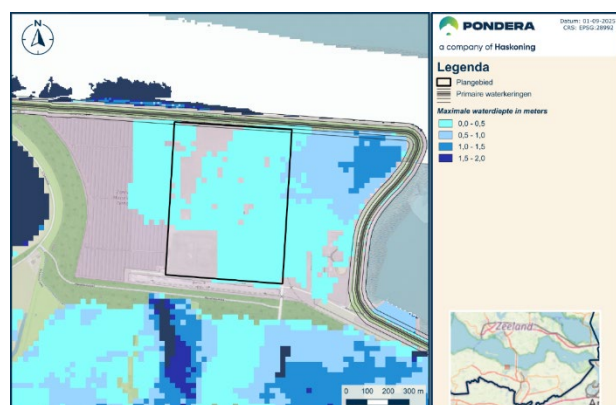
Figuur 8-6: Beschermde gebieden rondom locatie de Mosselbanken

8.2.5 Hoogwaterbescherming

Het terrein de Mosselbanken ligt in een gebied dat wordt beschermd door primaire waterkeringen, gezien de ligging nabij de Westerschelde (Figuur 8-9). Bij de ruimtelijke beoordeling van de inpassing van een SMR is het essentieel om te toetsen of het plangebied voldoende beschermd is tegen overstromingsrisico's, zowel onder huidige als toekomstige klimaatomstandigheden. Het terrein heeft een relatief lage overstromingskans (1:3.000–1:30.000 per jaar) met beperkte waterdieptes (<0,5–1 m). De bestaande dijken bieden een solide basisbescherming. Afhankelijk van locatie en ontwerp kunnen aanvullende maatregelen nodig zijn, zoals verhoogde fundering, waterkerende bouw en aangepaste toegangswegen (Figuur 8-10).



Figuur 8-7: Overstromingskans locatie de Mosselbanken

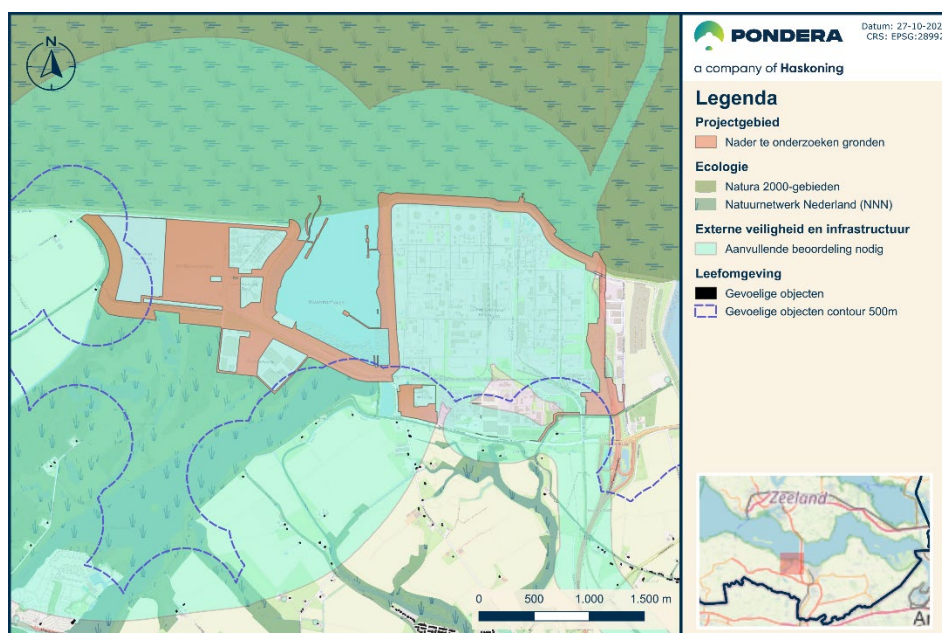


Figuur 8-8: Maximale waterdiepte in meters, locatie de Mosselbanken

8.2.6 Tussenconclusie

In Figuur 8-11 geeft in één oogopslag de belangrijkste ruimtelijke randvoorwaarden rond de Mosselbank weer:

- Ecologie: de omliggende Natura 2000- en NNN-gebieden zijn in groen en paars aangegeven, wat de nabijheid van beschermde natuur illustreert.
- Externe veiligheid: de oranje risicocontouren tonen de invloedssferen van bestaande risicovolle inrichtingen en infrastructuur.
- Leefomgeving: de donker- en lichtpaarse cirkels geven de ligging van gevoelige objecten (zoals woningen) en hun contouren (500 m).
- Elektriciteitsnet: bestaande stations en leidingen zijn gemarkeerd als potentiële aansluitpunten



Figuur 8-9: Ecologie, risicocontouren en leefomgeving 500 meter bij de Mosselbanken

De Mosselbanken komt naar voren als een mogelijk kansrijke locatie voor de inpassing van een SMR, mede vanwege de directe ligging naast Dow en de beschikbaarheid van voldoende ruimte. Vanuit de leefomgeving zijn er geen belemmeringen bij hantering van een richtafstand van 500 meter waarbij nadere beoordeling nodig is. Externe veiligheid vraagt om nader onderzoek, aangezien het terrein grenst aan de EVOS-opslag en deels binnen bestaande risicocontouren valt. Ecologisch gezien ligt de locatie nabij Natura 2000- en NNN-gebieden, waardoor stikstofeffecten en natuurtoetsen onvermijdelijk zijn. Op het punt van hoogwaterbescherming is het risico beperkt en biedt de aanwezigheid van dijken een solide basis, al kunnen aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn. De locatie ligt aan de Westerschelde, waardoor koeling gebruikmakend van oppervlaktewater mogelijk is. Wel zou hier een primaire waterkering moeten worden gekruist. De uitvoerbaarheid is afhankelijk van afspraken met Rijkswaterstaat

9 Vergelijking van casussen op basis van multi-criteria-analyse

In Tabel 9-1 is het totaaloverzicht van de multi-criteria analyse (MCA) weergegeven. In deze analyse is aangenomen dat windenergie op zee wordt aangeland in Zeeland, dat er twee nieuwe kerncentrales worden gerealiseerd en dat er daarom in 2035 ruim voldoende elektriciteitsaanbod is om aan de regionale vraag te voldoen. De analyse is gebaseerd op de integrale beoordeling van de energetische, ruimtelijke en economische inpassing van SMR's in de Schelde-Deltaregio. Voor elk criterium zijn de belangrijkste aannames en randvoorwaarden uit het rapport samengevat. De beoordeling is uitgevoerd voor twee configuraties:

- **Casus 1 – Publiek (voor de meter):** een SMR die elektriciteit en eventueel warmte levert aan meerdere industriële gebruikers in het cluster. De elektriciteit wordt ingevoerd op het publieke net; voor warmte zou een nieuw stoomnet nodig zijn.
- **Casus 2 – Privaat (achter de meter):** een SMR op het terrein van Dow Terneuzen die de Elsta-centrale vervangt en direct voorziet in Dow's interne elektriciteits- en stoomvraag, met mogelijk optionele koppeling aan waterstofproductie via de ATR.

De elektriciteits- en systeemwaarde zijn bepaald in de context van een **structureel elektriciteitsoverschot in het cluster** (tot > 10 GWe aanbod bij 5–6 GWe vraag in 2050). Daardoor biedt een SMR 'voor de meter' weinig meerwaarde voor het net, terwijl een SMR 'achter de meter' wél aansluit op de continue energievraag van Dow Terneuzen én mogelijk congestie vermijdt. De analyse laat zien dat casus 2 (privaat, Dow achter de meter) op de meeste criteria gunstiger scoort dan casus 1 (publiek, clusterbreed). De belangrijkste reden hiervoor is een directe koppeling met de continue vraag van Dow Terneuzen: het bedrijf heeft een significante, permanente vraag naar zowel elektriciteit als stoom op hoge temperatuur. Daardoor kan een SMR in deze configuratie volledig worden benut, wat de energetische efficiëntie en economische haalbaarheid aanzienlijk verbetert.

Casus 1 blijft beleidsmatig relevant vanuit de noodzaak voor een robuust elektriciteitssysteem bij vertraging van nieuwe wind-op-zee projecten of grootschalige kerncentrales.¹⁷ Hoewel deze casus onder de huidige aannames economisch minder kansrijk is, kan deze juist van toegevoegde waarde zijn in regio's waar de aanlanding van wind op zee of de realisatie van grootschalige opwek capaciteit lastiger is. In dergelijke binnenlandse gebieden kunnen SMR's een belangrijke rol spelen bij het versterken van de regionale leveringszekerheid van elektriciteit. Zonder aanvullende infrastructuur (zoals een clusterbreed stoomnet of netverzwaring) en aanvullende verdienmodellen (warmte of waterstof) heeft een SMR voor de meter beperkte systeemwaarde in een regio met structureel elektriciteitsoverschot.

Tabel 9-1: Overzicht Multi-criteria Analyse

Criteria	Casus 1 – Publiek (clusterbreed voor de meter)	Casus 2 – Privaat (Dow, achter de meter)
SMR-type	Gen III+ (250–500 MWe) beschikbaar vanaf ~2035; geschikt voor elektriciteitsproductie (baseload), beperkt inzetbaar voor warmtelevering. Gen IV (na 2040) kansrijk voor proceswarmte en H ₂ productie (400–600 °C, 250–850 MWth).	Gen III+ geschikt voor elektriciteit, maar proceswarmte van Dow vereist Gen IV. Door de kleinere schaal van Gen IV-reactoren sluit de levering beter aan op Dow's warmtevraag en bedrijfsprofiel.
Elektriciteitsvraag	Dow, Yara en Zeeland Refinery kunnen lokale afnemers zijn, maar door het structurele elektriciteitsoverschot in het cluster heeft een SMR voor alleen stroomproductie beperkte toegevoegde waarde, extra stroom voor de meter, vergroot de exportdruk.	Directe dekking van Dow's continue elektriciteitsvraag achter de meter mogelijk: 1 SMR (fase 1), 2 SMR's (fase 2). De kleinere Gen IV-eenheden kunnen beter worden afgestemd op Dow's belastingprofiel.

¹⁷ Mochten de wind-op-zee-projecten of kerncentrales niet doorgaan, dan kan de relatieve waardering tussen beide casussen in toekomstige heranalyses wezenlijk anders uitvallen.

Systeem	Draagt bij aan leveringszekerheid, maar beperkte systeemwaarde in een regio met elektriciteitsoverschot.	-	Concreet perspectief voor verduurzaming van een grote industriële site met stabiele afzet.	+
Warmte-vraag	Geen clusterbreed stoomnet; het geplande Sloewarmte-net is heetwater (<200 °C). Inpassing van stoom is kostbaar en onzeker.	0	Dow beschikt over een bestaand stoomnet (Elsta-centrale). Randvoorwaarden voor warmtelevering zijn aanwezig.	+
Economische haalbaarheid	CAPEX €3.000–7.000/kWe; LCOE €60–120/MWh (bij 8.000 FLH). Ingeval van net congestie of overvloedige, goedkope hernieuwbare energie kan deze LCOE snel stijgen. Zonder warmtebenutting wordt de businesscase wellicht lastiger. Bij volledige warmtebenutting (Gen IV) ligt de LCOH tussen de €20–30/MWh.	0	LCOE vergelijkbaar, maar hogere full load hours, verbeteren het rendement: Wellicht hogere benutting door continue energievraag. H ₂ productie voor extern gebruik via de reformer kan een extra verdienmodel zijn.	+
Technologische & Governance risico's	Grote onzekerheid door FOAK/NOAK en beperkte ervaring met Gen IV; clusterbrede organisatie en stoomnet vergen complex bestuurlijk model.	0	Zelfstandig eigendom en exploitatie door Dow maakt besluitvorming eenvoudiger. FOAK/NOAK-risico's blijven, maar minder afhankelijk van publieke coördinatie.	+
Ruimtelijke randvoorwaarden	Kansrijk in Sloegebied (voldoende ruimte, koelwater, E-netaansluiting) en nabij Dow (Mosselbanken)	+	Mosselbanken/Dow-terrein meest kansrijk. Maar ligt momenteel binnen veiligheids-contour van een olieopslag, nader onderzoek is nodig.	+
Koelwater	Alleen direct aan de Westerschelde is koeling met oppervlaktewater realistisch (Sloegebied/Dow). Andere locaties aangewezen op koeltorens/koelmodules.	+	Directe ligging aan Westerschelde; koelwater beschikbaar.	+
Hoogwater-bescherming	Sloegebied relatief gunstig (overstromingskans 1:3.000–1:30.000). Axelse Vlakte en Sas van Gent minder gunstig.	+	Dow-terrein idem; extra maatregelen mogelijk (fundering, waterkerende bouw).	+
Ecologie	Alle locaties nabij Natura 2000/NNN: Passende Beoordeling en vergunning vereist.	0	Alle locaties nabij Natura 2000/NNN: Passende Beoordeling en vergunning vereist.	0
Netaansluiting	Sloegebied: beste perspectief door geplande 380 kV; Axelse Vlakte beperkt, Sas van Gent verder weg.	+	Dow-terrein: goed ontsloten, aansluiting op 380 kV in voorbereiding.	+
Totaalbeeld	Beperkte toegevoegde waarde bij elektriciteitsoverschot		Kansrijk voor proceswarmte en continubedrijf	
Grafische scores van:				
Negatief (-)		Neutraal (0)		Positief (+)

10 Conclusies & Aanbevelingen

10.1 Conclusies SMR-inpassing in de Schelde-Delta

Ondanks de naam zijn de te verwachten eerste operationele Small Modular Reactors allerm minst klein. Een typische Gen III+ SMR levert circa rond de 300-470 MWe, vergelijkbaar met een conventionele gasgestookte centrale. Gen IV-ontwerpen hebben een vergelijkbaar elektrisch vermogen (250-500 MWe), maar kunnen daarnaast ook thermische vermogens van 700-850 MWth produceren, wat ze met name interessant maakt voor industriële proceswarmte. Ook qua ruimte zijn de SMR's aanzienlijk: grote Gen III+ en Gen IV-reactoren vragen doorgaans 10-15 hectare voor de installatie zelf en nog eens 20-30 hectare voor het tijdelijk bouwterrein. Daarmee liggen SMR's qua schaal en ruimtelijke impact dicht bij conventionele kern- of gascentrales liggen dan de term “small” doet vermoeden.

Deze studie laat zien dat SMR's in de Schelde-Delta regio in potentie waardevol kunnen zijn, maar niet in de eerste plaats als extra elektriciteitsbron. De regio kent een structureel overschot aan elektriciteit door geplande wind op zee en twee grootschalige kerncentrales. Extra elektriciteit voor de meter zou daarom vooral bijdragen aan een hogere exportdruk, in plaats van de verdere verduurzaming van het cluster. De echte meerwaarde van SMR's ligt bij de koppeling van elektriciteit én warmte op hoge temperatuur (en eventueel waterstofproductie), direct gekoppeld aan grote industriële afnemers.

De publieke casus, waarbij een SMR wordt geplaatst voor de meter en eventueel warmte levert aan meerdere bedrijven in het cluster is beleidsmatig interessant, maar in de praktijk blijkt dit scenario echter beperkt kansrijk ten opzichte van Casus 2 (privaat, achter de meter, hier bij Dow), vooral door het ontbreken van een clusterbreed stoomnet, de realisatie van een dergelijk stoomnet introduceert een groot bijkomend project op zich, met een eigen veiligheidsoverweging, ruimtebeslag en complexe organisatie. SMRs worden bij voorkeur dan ook geplaatst op een locatie vlak bij de grote warmteafnemers zoals Dow of Yara.

Voor de ruimtelijke analyse is zijn alleen de beschikbare en toekomstig uitgeefbare industriële gronden meegenomen in het cluster. Mogelijk zijn er in de Schelde-Delta regio andere gronden aanwezig, die zowel ruimtelijk als energetisch beter geschikt zouden kunnen zijn voor de inpassing van een SMR. Deze terreinen hebben echter momenteel een andere bestemming en vallen daarom buiten de scope van deze studie. Uit de ruimtelijke analyse resteren voor de inpassing van SMR's slechts een beperkt aantal percelen in de Schelde-Delta regio. Na de analyse op vijf thema's: leefomgeving, veiligheid, ecologie, hoogwaterbescherming en infrastructuur blijken alleen het Sloegebied en het Dow-terrein (Mosselbanken) over voldoende ruimte, infrastructuur en opties tot koelwater te beschikken. Voor beide gebieden gelden momenteel beperkingen, door de ligging nabij Natura 2000-gebieden en bestaande veiligheidscontouren. De ruimtelijke inpassing is daarmee een uitdagend.

Alleen waar de output van een SMR direct kan worden ingezet door een industriële grootverbruiker, ontstaat mogelijk een realistische businesscase. De continue elektriciteits- en warmtevraag van Dow (casus 2) sluit goed aan bij de inzet van SMR's. Één grote SMR kan fase 1 elektrisch dekken, in fase 2 zijn meerdere units nodig (afhankelijk van grootte, benodigde redundantie en warmteuitkoppeling). Voor de stoom op hoge temperatuur geldt dat Gen III+ door de lage temperatuur geen optie is. Gen IV-reactoren kunnen wél op het gewenste niveau leveren maar deze komen pas vanaf fase 2 (na 2037) in beeld. Warmtelevering kan met één grote of middelgrote SMR, maar vergt een grootschalige stoomleiding tot aan de huidige Elsta locatie, met bijbehorende energetische verliezen (~0,7%) en veiligheids- en ruimtevraagstukken. En totdat SMR's beschikbaar zijn, zal Dow de elektriciteitsvraag in fase 1 anders moeten invullen, bijvoorbeeld door levensduurverlenging van de Elsta-centrale.

De investeringskosten van SMR's zijn per kWe van dezelfde orde grootte als die van grootschalige kerncentrales (CAPEX €3.000–7.000/kWe; LCOE €60–120/MWh), al kennen grootschalige kerncentrales momenteel een veel grotere risicospreiding (CAPEX €6.000–16.000/kWe; LCOE €136–490/MWh) veroorzaakt door vertragingen die structureel leiden tot forse overschrijdingen. Voor SMR's bestaat de verwachting dat standaardisatie, modularisatie en kortere bouwtijden deze risico's deels kunnen beperken. Al zijn deze veronderstelde voordelen van lagere risico's op korte termijn minder overtuigend, de eerste generatie SMR-projecten kennen juist FOAK-risico's en kunnen daardoor duurder uitvallen dan gedacht. Hoewel SMR's op termijn mogelijk lagere risico's zullen kennen, blijven de onzekerheden over doorlooptijden en kosten momenteel groot. SMR's blijven beleidsmatig kansrijk, maar met aanzienlijke risico's en afhankelijkheden in vergelijking met bestaande energietechnieken zoals WKKs en stoomketels. SMR's zijn vooral gebaat bij voorspelbare vergunningenprocedures, seriebouw en duidelijke verdienmodellen met warmtelevering (eventueel naast elektriciteitslevering).

10.2 Aanbevelingen

De belangrijkste aanbeveling is daarom om de inzet van SMR's primair te richten op de combinatie van elektriciteit, warmte- en mogelijk waterstoftoepassingen. Daarbij verdient het aanbeveling om Casus 2 (Dow) verder te verkennen als mogelijk eerste pilot, en Casus 1 enkel als robuustheidsscenario achter de hand te houden. Voor beide scenario's is echter sterke overheidsregie en risicodeling noodzakelijk.

1. **Kies voor verdere uitwerking daar waar de eerste commerciële SMR het meest kansrijk is:** De inzet voor meerwaarde van SMR's in de Schelde-Delta regio ligt direct gekoppeld aan grote industriële afnemers: met voldoende vraag aan elektriciteit én warmte (en eventueel waterstof). Bij grote industriële afnemers kunnen de stabiele afname en lange contractuur worden gevonden die nodig zijn om een SMR te ontwikkelen en rendabel te exploiteren. Bovendien beschikken industriële clusters vaak over de bestaande infrastructuur, zoals stoom- en warmtenetten en een aansluiting op het hoogspanningsnet.
2. **Creëer een aantrekkelijk investeringsklimaat door publieke en private risicodeling te organiseren:** De ontwikkeling van SMR's vraagt om vroege betrokkenheid en garanties van de overheid, omdat private partijen de financiële en technologische risico's niet zelfstandig kunnen dragen. Er liggen kansen voor Nederland in de nog niet volledig uitgerijpte toeleveringsketens voor SMR's: productiefabrieken, modulaire bouw, gespecialiseerde toeleveranciers en aannemers zijn uiteindelijk essentieel om de seriebouw mogelijk te maken.
3. **Ontwikkel richtafstanden voor SMR's** en veranker deze in een handreiking welke praktische input geeft bij omgevingstrajecten voor provincies. Ontwikkel deze richtafstanden voor ruimtelijke inpassing, passend bij het schaalniveau en omgevingseffecten van dit type installaties. Dit zorgt voor een versneld en transparant, consistent vergunningstraject dat meer overzicht creëert in de mogelijkheden voor inpassing van SMR's.

11 Evaluatie en Lessen

De laatste stap in dit onderzoek is de evaluatie. Eerst kijken we naar de Schelde-Delta als cluster en de Dow-casus in het bijzonder: welke inzichten levert dit op over de haalbaarheid van SMR's in deze context? Vervolgens trekken we de uitkomsten door naar een nationaal perspectief: welke lessen zijn generiek en ook relevant voor andere industriële clusters in Nederland?

Schaal en geschiktheid

De analyse maakt duidelijk dat SMR's, ondanks hun naam, geen kleinschalige technologie zijn. De eerste generatie levert honderden megawatt elektriciteit en warmte en vraagt 10–15 hectare voor de installatie en 20–30 hectare tijdelijk bouwterrein. Kleinere SMR's van enkele tientallen megawatt zijn in theorie eenvoudiger inpasbaar, maar bevinden zich nog in een zeer vroeg ontwikkelingsstadium en spelen voorlopig geen rol in de Nederlandse context.

Potentie en flexibiliteit

SMR's kunnen in potentie een relevante bijdrage leveren aan een solide toekomstbestendig en klimaatneutraal energiesysteem. Gen III+ reactoren kunnen vrijwel continue elektriciteit leveren met (beperkte) mogelijkheden voor vraagvolgende inzet, waarmee zij in staat zijn hun elektriciteitsproductie open af te schalen in lijn met de fluctuerende vraag of de beschikbaarheid van hernieuwbare bronnen. Ook kunnen ze gasgestookte WKK's en stoomketels (tot 300°C) vervangen. Gen IV-reactoren gaan verder en kunnen naast elektriciteit ook hogetemperatuurwarmte (tot 600 °C) produceren voor industriële processen. Beide typen SMR's kunnen worden ingezet in combinatie met elektrolyse op hoge temperatuur en eventueel restwarmte leveren voor stadsverwarming.

Flexibele inzet van SMR's is mogelijk, maar dat is zowel technisch als economisch uitdagend. SMR's hebben lange, zekere inkomstenstromen nodig; deze zijn momenteel niet haalbaar in de huidige flexibele elektriciteitsmarkt.

Energetische inpassing in clusters

Gezien bovenstaande is een SMR met name van meerwaarde in grote industriële clusters met energie-intensieve productiebedrijven. Voor lichte industrie gebieden of meer generiek de bebouwde omgeving hebben de meeste SMR's een te groot energetisch vermogen.

SMR's zijn met name van meerwaarde als deze **achter de meter** worden geplaatst zoals bij Dow. Daarmee worden hoge elektriciteitsnettarieven vermeden en mogelijk ook netcongestie voorkomen. Energetische inpassing is warmte technisch vaak ook eenvoudiger, aangezien dergelijke locaties vaak al een operationeel stoomnet hebben.

Systeem waarde

Wanneer SMR's voornamelijk elektrisch ingezet worden, concurreren ze op termijn mogelijk met bestaande opwekcapaciteit in de regio (gas, wind, zon pv en grootschalige kerncentrales). Omdat ze voor hun businesscase continu moeten draaien, verdringen ze mogelijk andere bronnen en leveren ze na 2035, als het elektriciteitsnet grotendeels CO₂-vrij is, relatief weinig emissiereductie. Daarom is de inzet van Gen IV-SMR's als hogetemperatuurwarmtebron voor de industrie de meest relevante toepassing.

Investeringsuitdagingen

Kernenergie is voor veel industrieën en energiebedrijven een nieuwe technologie die ze zich niet eenvoudig eigen zullen maken. Vanwege de (veiligheids-)technische risico's en de zwaarwegende financieringsopgave is net als voor de grote kerncentrales, niet alleen langdurig, stabiel beleid, maar ook een actieve participatie en vanuit de overheid noodzakelijk om SMR's op meerdere locaties en clusters in te kunnen zetten.

Voor individuele bedrijven zoals Dow zijn er bij de inzet van een SMR, evenals bij andere verduurzamingsinvesteringen, grote uitdagingen te overwinnen: klimaatdoelstellingen beginnen te schuiven, toekomstige levering en prijzen van elektriciteit en warmte zijn onzeker, veel technologieën zijn nog volop in ontwikkeling een veel belangrijke technisch-economische parameters moeten nog in de praktijk worden vastgesteld. Een investering in een SMR vergt lange contracten en een langetermijnvisie, terwijl bedrijven vaak een kortere planningshorizon hanteren.

Timing

Door deze uitdagingen is het niet waarschijnlijk dat bedrijven en overheden willen investeren op basis van een First-of-a-Kind (FOAK)-reactor. Alleen bij Nth-of-a-Kind (NOAK)-reactoren, na seriebouw en ervaring, zullen de kosten dalen en risico's afnemen. Dit creëert een planningsprobleem: bedrijven moeten voor 2040 besluiten nemen om hun klimaatdoelstellingen te halen, terwijl Gen III+-SMR's pas vanaf 2035 en Gen IV pas na 2040 beschikbaar zijn. Daarmee zijn SMR's vooral relevant voor de lange termijn. Veel industriële bedrijven hebben een veel kortere investeringstermijn dan SMR-projecten vereisen. Het is onrealistisch te verwachten dat private partijen nu al bestellingen plaatsen. Daarom is publiek-private samenwerking cruciaal, niet alleen om risico's te delen, maar ook om kennis op te bouwen.

Coördinatie en Governance

Met de huidige plannen voor uitbreiding van het elektriciteitsaanbod in het al exporterende cluster van de Schelde-Deltaregio lijkt de inzet van een SMR die uitsluitend elektriciteit produceert op korte termijn minder toegevoegde waarde te hebben. In andere industriële clusters kan de inzet van SMR's daarentegen wel degelijk een belangrijke rol spelen, mits bedrijven en overheden tijdig samenwerken aan integratie in het energiesysteem. Provincies liggen voor de hand als coördinerende partij. Zij kunnen vergunningen, ruimtelijke inpassing en energiesysteemintegratie verbinden en tegelijk risicodragend optreden, bijvoorbeeld door uiterlijk 2027 een traject te starten om rond 2035 een eerste Gen III+-SMR te realiseren. Daarmee worden risico's verlaagd voor volgende projecten. Ook landelijk is coördinatie nodig, niet alleen rond risicodeling maar ook om de toeleveringsketens en vergunningen te versterken, zodat de maakindustrie en bouwsector kunnen meebewegen.

Kennisontwikkeling

SMR-technologie is internationaal nog volop in ontwikkeling. Voor Nederlandse bedrijven en overheden betekent dit dat kennisopbouw, monitoring van data en beleidsontwikkeling rond risicoverlaging essentieel zijn. Hoewel de internationale focus nu sterk op Gen III+-SMR's ligt, is aandacht voor Gen IV minstens zo belangrijk: alleen deze generatie kan grootschalige hogetemperatuurwarmte leveren, waarvoor nog weinig alternatieven bestaan.

12 Referenties

- B. Mignacca, G. L. (2020). Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Beheersverordening Dow, Mosselbanken en Logistiek Park. (2022). Opgehaald van https://www.planviewer.nl/imro/files/NL.IMRO.0715.BVIDM-VG99/t_NL.IMRO.0715.BVIDM-VG99_1.2.html
- Besluit kwaliteit leefomgeving. (2025). Opgehaald van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0041313/2025-09-20>
- CBS. (2023). *Rendementen en CO2-emissie van elektriciteitsproductie in Nederland*. Opgehaald van <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2024/51/rendementen-en-co2-emissie-van-elektriciteitsproductie-in-nederland-update-2023>
- CO2 emissiefactoren. (2025). Opgehaald van <https://co2emissiefactoren.nl/factoren/2022/27/135/brandstoffen-energieopwekking-gasvormige-brandstoffen-aardgas-g-gas/?unit=kwh>
- Commissie voor de milieueffectrapportage. (2024). *Levensduurverlenging kerncentrale Borssele: Tussentijds toetsingsadvies over het milieueffectrapport*.
- Dow Chemical Company. (2018). *Dow Terneuzen nieuwe eigenaar energiecentrale ELSTA*. Opgehaald van <https://nl.dow.com/nl-nl/news/press-releasesdow-terneuzen-nieuwe-eigenaar-energiecentrale-elsta.html>
- Dow Terneuzen. (2023). *Path2Zero in Terneuzen*. Opgehaald van <https://dowcircles.nl/duurzaamheid/path2zero/path2zero-programma-juni-2025>
- EBN. (2025). *Energie in Cijfers: van bron tot verbruik*.
- European Commission. (2025). *2040 Climate Target*. Opgehaald van https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2040-climate-target_en
- European Commission. (2025). *2050 long-term strategy*. Opgehaald van https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en
- Fraunhofer ISE. (2025). *Study: The Levelized Cost of Electricity - Renewable Energy Technologies*.
- Gasunie. (2018). *Waterstofleiding Gasunie van Dow naar Yara in gebruik genomen*. Opgehaald van <https://www.gasunie.nl/nieuws/waterstofleiding-gasunie-van-dow-naar-yara-in-gebruik-genomen>
- IAEA. (2015). *IAEA Safety Standards: Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations: Specific Safety Guide No. SSG-35*. International Atomic Energy Agency.
- Idaho National Laboratory. (2024). *Techno Economic Analysis of ADVANCE Small Modular Reactor Technology*.
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2023). *European Pressurized Reactors (EPRs): Next-generation Design Suffers From Old Problems*.
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2024). *Small Modular Reactors: Still Too Expensive, Too Slow and Too Risky*. IEEFA.
- International Energy Agency. (2025). *The Path to a New Era for Nuclear Energy*.
- Ministerie Klimaat Groene Groei. (2025). *Kamerbrief over ontwikkelingen tenders windenergie op zee IJmuiden Ver Gamma en Nederwiek I-A*. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2025/05/16/kamerbrief-ontwikkelingen-tenders-windenergie-op-zee-ijmuiden-ver-gamma-en-nederwiek-i-a>
- Ministerie van Klimaat en Groene Groei. (2025). *Strategie voor kleine modulaire kernreactoren in Nederland*. Opgehaald van <https://open.overheid.nl/documenten/49c6a2a3-965a-4d84-8339-6d0010cf611b/file>
- NEa. (2025). *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2 emissiefactoren, versie januari 2025*.
- NPVI. (2023). *Zeeland Refinery bespaart megaton CO2-emissie met waterstof*. Opgehaald van <https://www.verduurzamingindustrie.nl/hulp-bij->

- verduurzaming/maatwerkafspraken/nieuws+maatwerkafspraken/2549580.aspx?t=zeeland-refinery-bespaart-megaton-co2-emissie-met-waterstof
- NRG. (2023). *Small Modular Reactors 2023*. Rijksoverheid.
- NRG Pallas. (2024). *Kennismodule: Small Modular Reactors*. Ministerie van Klimaat en Groene Groei.
- Nuclear Engineering International. (2022). *Terrapower's sodium reactor project delayed by lack of HALEU*. Opgehaald van <https://www.neimagazine.com/news/terrapowers-sodium-reactor-project-delayed-by-lack-of-haleu-10443311/>
- Nuclear Technology Development and Economics. (2020). *Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A practical Guide for Stakeholders*.
- Nucnet. (2025). *Analysis Shows Competitive LCOE Target For Small Modular Reactors*. Opgehaald van <https://www.nucnet.org/news/analysis-shows-competitive-lcoe-target-for-small-modular-reactors-7-3-2025>
- OECD. (2025). *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition*.
- Omgevingstwet. (2025). *Omgevingswet*. Opgehaald van <https://wetten.overheid.nl/BWBR0037885/2025-07-01>
- PBL. (2022). *Decarbonisation options for large volume organic chemicals production, Dow Chemical Terneuzen*.
- Profundo. (2024). *Financing new nuclear: Governments paying the price?*
- Reuters. (2023). *Vogtle's troubles bring US nuclear challenge into focus*. Opgehaald van <https://www.reuters.com/business/energy/vogtles-troubles-bring-us-nuclear-challenge-into-focus-2023-08-24/>
- Rijksoverheid. (2024). *Programma Energiehoofdstructuur*. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.
- Rijksoverheid. (2025). *Borssele voorkeurslocatie voor twee nieuwe kerncentrales*. Opgehaald van <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2022/12/09/borssele-voorkeurslocatie-voor-twee-nieuwe-kerncentrales>
- Rijksoverheid. (2025). *Natuurnetwerk Nederland (EHS)*. Opgehaald van <https://www.atlasleefomgeving.nl/natuurnetwerk-nederland-ehs>
- Rijksoverheid. (2025). *Programma Verbindingen Aanlanding Wind Op Zee (VAWOZ)*.
- Rijksoverheid. (2025). *Volgende stap bouw twee nieuwe kerncentrales: onderzoeksplan locaties bekend en studies in Borssele afgerond*. Opgehaald van <https://www.overkernenergie.nl/actueel/nieuws/2025/05/16/volgende-stap-bouw-nieuwe-kerncentrales-onderzoeksplan-locaties-bekend-en-studies-in-borssele-afgerond>
- RVO. (2025). *380 kV Netuitbreiding Zeeuws-Vlaanderen*. Opgehaald van <https://www.rvo.nl/onderwerpen/bureau-energieprojecten/lopende-projecten/380-kv-z-v>
- Smart Delta Resources. (2024). *Cluster Energie Strategie (CES) 3.0 Schelde-Deltaregio*. Vlissingen: SDR.
- Stec groep, Haskoning, PosadMaxwan, Generation Energy. (April 2025). *Nationale prognose ruimtebehoefte industrieclusters*. Ministerie van Klimaat en Groene Groei.
- TenneT. (2025). *Hoogspanningsverbinding Borssele-Rilland*. Opgehaald van <https://www.tennet.eu/nl/projecten/provincies/zeeland/hoogspanningsverbinding-borssele-rilland>
- TenneT. (2025). *Versterking van het stroomnet Zeeland: verbinding in gebruik genomen*. Opgehaald van <https://www.tennet.eu/nl/projectnieuws/versterking-van-het-stroomnet-zeeland-verbinding-gebruik-genomen>
- TNO. (2025). *Systeemkostenanalyse kernenergie: Impact van nieuwe kerncentrales op de kosten van het energiesysteem*. KGG.
- TNO, NRG Pallas. (2025). *Integration of nuclear energy in the energy system: Scenario analysis for the Dutch energy system*.
- ULC-Energy. (2024). *The cost of hydrogen produced by a SMR combined with high temperature Solid Oxide Electrolyser Cell technology (SOEC)*.

- VRT Nws. (2023). *Met jaren vertraging neemt Finland nieuwe nucleaire reactor in dienst*. Opgehaald van <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2023/04/16/met-jaren-vertraging-neemt-finland-nieuwe-nucleaire-reactor-in-d/>
- Yara . (2025). *Productie-eenheid Sluiskil*. Opgehaald van <https://www.yara.nl/over-yara/yara-in-de-benelux/yara-sluiskil/over-yara-sluiskil/productie-eenheid-sluiskil/#:~:text=De%20locatie%20beschikt%20over%20drie,van%20Yara%20en%20in%20Europa.>