



Verkenning SMR-inpassing Provincie **Noord-Brabant**

November 2025

NRG
PALLAS

Nuclear. For Life.

Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	2
MANAGEMENTSAMENVATTING	3
1 INLEIDING	14
1.1 Aanleiding	14
1.2 Wat zijn SMR's?	14
1.3 Realisatie kernreactoren	15
1.3.1 Vergunningsproces	15
1.3.2 Realisatietermijn	17
1.4 Brabants Energiesysteem	18
1.4.1 Brabantse waarden	18
1.4.2 Opgaven voor Brabants Energiesysteem	19
1.4.3 Energievraag en ontwikkeling	20
1.5 Leeswijzer en gevolgde stappen	21
2 KOELING	23
2.1 Koeltechnieken en koelvoorwaarden	23
2.2 Situatie Noord-Brabant	25
2.3 Doorsnede	28
3 ENERGIEVRAAG IN NOORD-BRABANT	29
3.1 Doorsnede	31
4 ENERGIEAANBOD DOOR SMR'S	32
4.1 Doorsnede	32
5 OMGEVINGSFACTOREN	35
5.1 Algemeen, veiligheid en energie-infrastructuur	35
5.2 Doorsnedes	36
6 POTENTIËLE GEBIEDEN SMR-INPASSING	39
6.1 Labeling energie-intensieve gebieden	39
6.2 Potentiële gebieden	40
7 SAMENVATTENDE CONCLUSIE	43
REFERENTIES	45
LIJST MET TABELLEN, FIGUREN EN AFKORTINGEN	47
BIJLAGE A WET- EN REGELGEVING, VERGUNNINGEN	50
BIJLAGE B MARKTANALYSE SMR'S	53
BIJLAGE C LOCATIEVOORWAARDEN	55
BIJLAGE D SMR-ONTWERPEN	58
BIJLAGE E SMR-INPASSINGSGEBIEDEN VERGROOT	62

Managementsamenvatting

Achtergrond

De rol van kernenergie binnen het energiesysteem krijgt steeds meer aandacht. Dit komt vooral door het groeiende besef dat betrouwbare en schone energievoorziening essentieel is voor het realiseren van klimaatdoelen en energiezekerheid. Nucleaire technologische ontwikkelingen worden met grote interesse gevolgd. Het zijn vooral de Small Modular Reactors die internationaal volop in de belangstelling staan omdat ze mogelijk slimme oplossingen bieden voor de uitdagingen van morgen. Op termijn kunnen deze kleine kerncentrales een aanvulling zijn op de grote conventionele kerncentrales om te komen tot een stabiel, CO₂-neutraal en divers energiesysteem.

Een groot aantal verschillende SMR-ontwerpen is momenteel wereldwijd in ontwikkeling maar nog vrijwel nergens gerealiseerd. Wel worden er in verschillende landen flinke stappen gezet, onder andere in Canada, de VS en het VK. Ook binnen de EU zijn er grote ambities rondom SMR's. Zo is binnen de Europese Unie de *European Industrial Alliance on SMR's* opgericht, een platform waarin overheden, kennisinstellingen en bedrijven samenwerken om de industriële basis en marktintroductie van SMR's te versnellen.

Voor de provincie Noord-Brabant aanleiding om een ruimtelijk onderzoek uit te laten voeren naar SMR's in Brabant als bouwsteen voor het energieperspectief. **Doel van het ruimtelijk onderzoek is het inzichtelijk maken van de mogelijkheden en voorwaarden voor inpassing van SMR's binnen de provincie Noord-Brabant op basis van feitelijke, objectieve, (milieu-) technische argumenten, inclusief een eerste verkenning waar een bepaald type SMR op Brabants grondgebied een toegevoegde waarde voor het energiesysteem kan leveren.**

Op 17 oktober van dit jaar heeft het demissionaire Kabinet de SMR-strategie gepresenteerd. Deze geeft richting aan de kaders van bevoegd gezag en ruimtelijke inpassing, en beschrijft mogelijkheden van financiering en ondersteuning. Ook is hierin aangegeven dat de overheid het bevoegd gezag op zich wil nemen voor het eerste SMR-project in Nederland, onafhankelijk van de vermogensgrootte van de SMR. Met het ruimtelijk onderzoek voor Brabant en de Innovatiecoalitie Nucleair met o.a. de gesmolten zout technologie, onderzoekt provincie Noord-Brabant het speelveld om actief positie te kunnen bepalen.

Wat zijn SMR's? Wat is hun realisatietermijn?

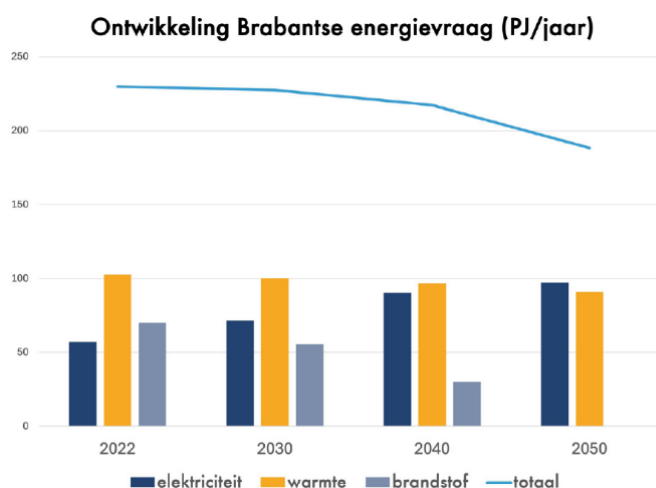
De IAEA hanteert voor de definitie van een SMR een vermogen tot ongeveer 300 MW_e. Vermogens onder 10 MW_e worden veelal aangeduid met microreactoren (of micro-SMR's). In Nederland wordt een grens van 500 MW_e gehanteerd voor SMR's, omdat dit de grens is voor rijksgecoördineerde energieprojecten. Het module concept geeft de mogelijkheid tot relatief eenvoudige vermogensuitbreidingen van een bestaande SMR; het idee is ook dat kosten bespaard worden door grootschalige centrale onderdelenproductie die vervolgens op de bouwlocatie geassembleerd worden.

SMR's worden over het algemeen onderverdeeld in twee categorieën: watergekoelde reactoren (GENERATIE-III) en geavanceerde reactoren (GENERATIE-IV). Naast het verschil in koelmiddel, verschillen deze SMR-categorieën ook vaak in type splijstof en gebruikte reactortechnologie. Met geavanceerde reactoren kunnen doorgaans ook hogere uitgaande temperaturen worden bereikt.

Momenteel zijn in de westerse wereld nog geen SMR's operationeel of gebouwd. Wel zijn SMR's in aanbouw (4 eenheden op Darlington-site, Ontario Canada). Derhalve ontbreken ervaringscijfers over bouw tijden en kosten van een bewezen SMR concept. In Nederland is wel ervaring met realisatietrajecten van andere nucleaire projecten, zoals de PALLAS-reactor in Petten. Een termijn voor volledige realisatie van een bewezen SMR-concept, te beginnen bij initiatief en besluitvorming, wordt geschat op 8-11 jaar. Aan deze schatting zijn de nodige voorwaarden verbonden met betrekking tot financiering, politieke besluiten en voldoende middelen en ervaring vanuit de leverancier.

Energievraag Brabant

Tot 2050 is de verwachting dat de totale energievraag in Noord-Brabant daalt van 230 PJ naar 190 PJ. Hierin blijft de warmtevraag tot 2050 nagenoeg gelijk, ziet de elektriciteitsvraag vrijwel een verdubbeling en vindt er een uitfasering van brandstof plaats. Op dit moment hebben de sectoren gebouwde omgeving (37%), mobiliteit (31%) en industrie (25%) het grootste aandeel in de Brabantse energievraag. De verwachting is dat door een daling in het aandeel van de sector mobiliteit, het aandeel van de andere sectoren naar verhouding toeneemt.



Aanpak

Het doel van dit ruimtelijk onderzoek is het inzichtelijk maken van de mogelijkheden en voorwaarden voor inpassing van SMR's binnen de provincie Noord-Brabant. Dit onderzoek omvat een eerste verkenning waar bepaalde typen SMR's een toegevoegde waarde voor het Brabants energiesysteem kunnen leveren. De volgende ruimtelijke doorsnedes zijn hierin van toepassing:

- I. **Koelpotentieel:** waterbeschikbaarheid om restwarmte vanuit een SMR af te voeren;
- II. **In-te-passen SMR-vermogen:** op basis van de **energievraag** van bedrijventerreinen;
- III. **Beperkingen:** omgevingsfactoren die op voorhand SMR-inpassing uitsluiten (woonkernen en Natura 2000);

- IV. **Toegevoegde waarden:** omgevingsfactoren die SMR-inpassing kansrijker maken (zoals hoogspanningsverbindingen en warmteleidingen).

Gecombineerd geven deze doorsnedes voor heel Noord-Brabant weer **waar potentie is voor SMR-inpassing**. Potentiële gebieden voor SMR-inpassing worden aangegeven door het samennemen van basisdoorsnedes 1, 2 en 3. Gecombineerd met doorsnede 4 geeft het resultaat weer waar de **kansrijkheid** van SMR-inpassing toeneemt door aanwezigheid of geplande toegevoegde waarde.

Resultaten Doorsnedes

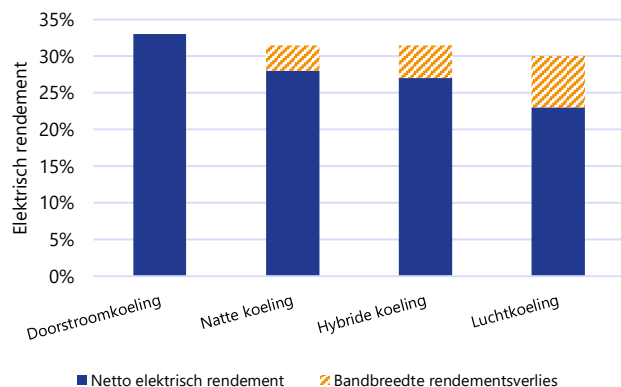
I. Koelpotentieel

Koeltechnieken en elektrisch rendement

Restwarmte die vrijkomt bij energieproductie wordt bijna altijd door water afgevoerd (met name bij grote energiecentrales), maar dit kan ook met lucht of een combinatie van water en lucht (hybride). De volgende koeltechnieken worden doorgaans toegepast voor restwarmte-afvoer bij energiecentrales:

1. *Doorstroomkoeling* (wateropname en afgifte van/aan een rivier)
2. *Natte koeling* (water verdampt en voert zo de warmte af)
3. *Hybride koeling* (lucht en/of waterverdamping)
4. *Droge koeling* (lucht)

De verschillende koeltechnieken kunnen in principe overall toegepast worden. Echter, indien geen doorstroomkoeling wordt toegepast zal het elektrisch rendement verminderen. Hoeveel dit rendement vermindert is zeer afhankelijk van omgevingscondities, procescondities en specifiek koelsysteem. In de naastgelegen figuur is dit indicatief aangegeven.



Waterbeschikbaarheid en koelpotentieel

De provincie Noord-Brabant beschikt over water dat afkomstig is van rivieren. Deze rivieren stromen (deels) door Brabant en deze voeden een uitgebreid kanalenennetwerk alsook (deels) waterlichamen zoals sloten/aftakkingen, meren/plassen. Van de verschillende kanalen/stromen en overige waterlichamen kan op basis van gegevens van Rijkswaterstaat een indicatie (op basis van eenvoudige afschattingen) gegeven worden van de koelcapaciteit t.o.v. doorstroomkoeling met rivierwater. Deze waterlichamen kunnen zo mogelijk een rol spelen bij natte/verdampingskoelers of hybride koelers (water en lucht). De volgende categorieën worden hierbij gehanteerd:

- **Koelpotentieel A: Hoge waterbeschikbaarheid**

Koeling door rivieren en grote wateroppervlaktes waar rivieren in uitmonden

- **Koelpotentieel B: Beperkte waterbeschikbaarheid**

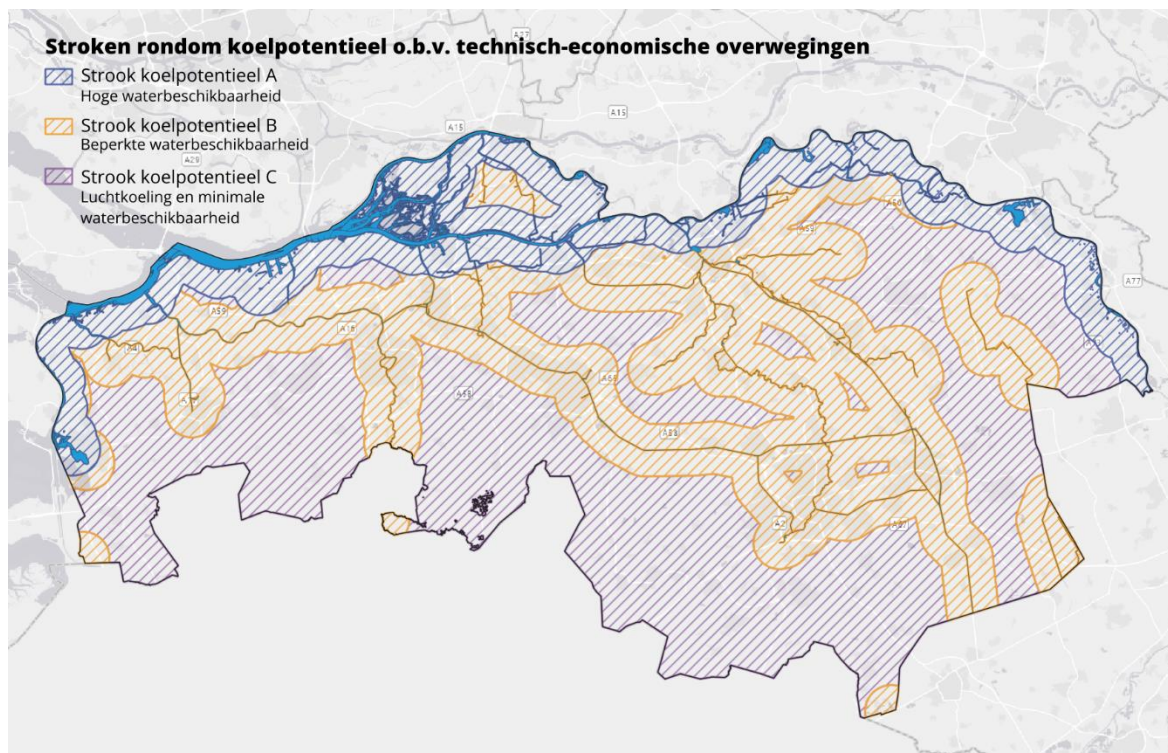
Gereguleerd kanalenennetwerk, met over het algemeen laag debiet ($< 1 \text{ m}^3/\text{s}$); overige wateren zoals beken/stromen en plassen

- **Koelpotentieel C: Luchtkoeling en minimale waterbeschikbaarheid**

Luchtkoeling en minimale waterhoeveelheden (minder dan koelpotentieel B)

Doorsnede koelpotentieel

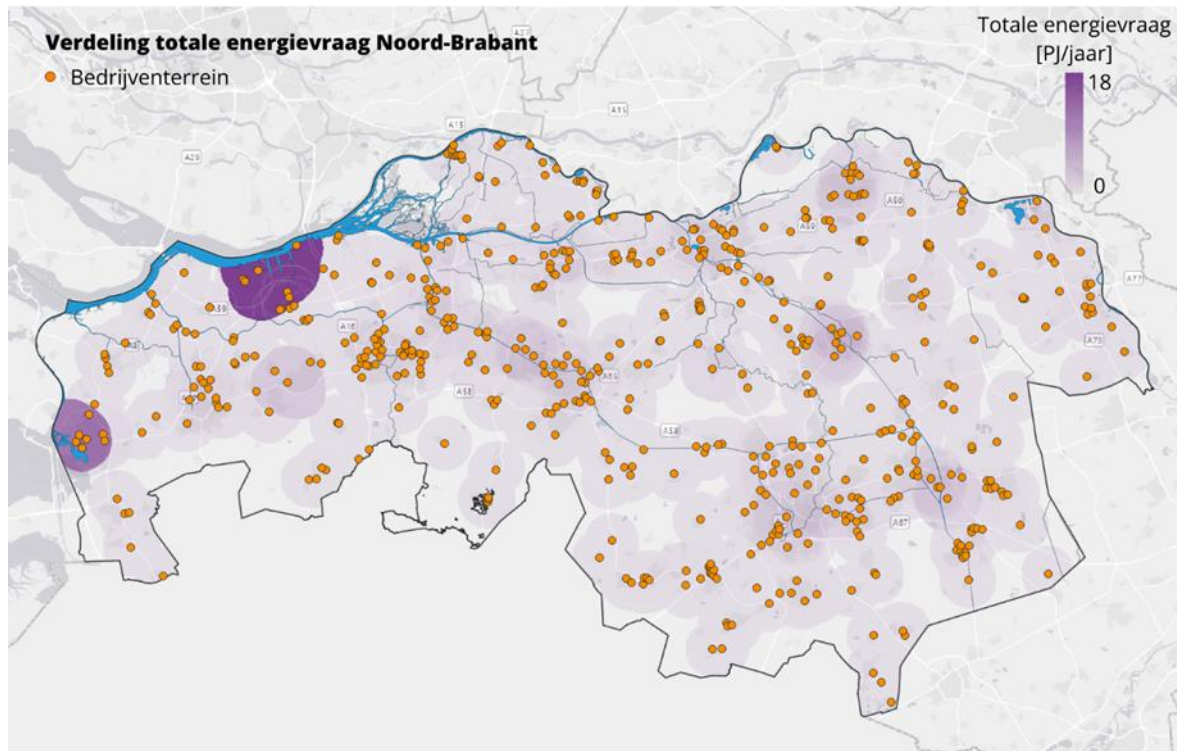
Op basis van deze aannames is een **koelpotentieeldoorsnede** voor Brabant gemaakt. Hiervoor zijn om de rivieren en belangrijkste kanalen/stromen stroken van 3 km aangegeven (deze afstand is gehanteerd op basis van economische overwegingen)¹. De doorsnede laat zien welke gebieden beschikken over welk koelpotentieel. Een goed koelpotentieel (koelpotentieel A) is een indicatie dat hogere SMR-vermogens gekoeld kunnen worden door middel van *doorstroomkoeling/natte koeling* (geen/beperkt rendementsverlies). Een beperkter of minimaal koelpotentieel (koelpotentieel B of C) betekent in deze context dat koeltechnieken met rendementsverliezen ingezet kunnen worden. In onderstaande figuur is de koelpotentieeldoorsnede weergegeven.



¹ Opgemerkt dient te worden dat alle gebieden die niet koelpotentieel A of B zijn, per definitie koelpotentieel C toegekend krijgen. Dit zijn dus niet zozeer stroken, maar de restgebieden in Noord-Brabant.

II. In-te-passen SMR-vermogen

Voor het bepalen van de doorsnede van de totale energievraag zijn elektriciteits- en warmtevraag van bedrijventerreinen geclusterd en bij elkaar opgeteld, weergegeven in onderstaand figuur.

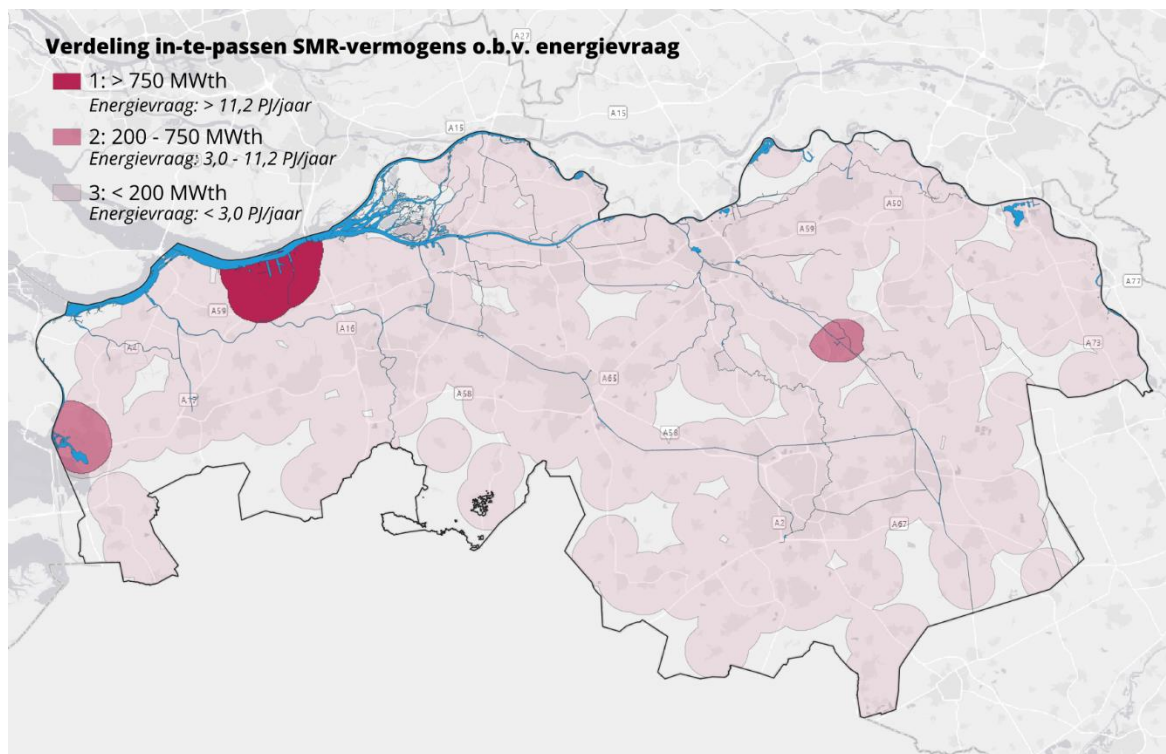


De totale energievraag wordt gebruikt om het in-te-passen SMR-vermogen te bepalen. Het SMR-vermogen is hierbij onderverdeeld in de volgende categorieën²:

- Vermogenscategorie 1 – $> 750 \text{ MW}_{\text{th}}$
- Vermogenscategorie 2 – $200 - 750 \text{ MW}_{\text{th}}$
- Vermogenscategorie 3 – $< 200 \text{ MW}_{\text{th}}$

In onderstaande figuur is de doorsnede geven van deze **in-te-passen SMR-vermogens**.

² Dit is op basis van het **thermische vermogen** van SMR's, niet elektrisch, omdat warmte de primaire energievorm is van een SMR. Doorgaans geldt een elektrisch rendement van ~33% voor SMR's bij volledige omzetting van warmte naar elektriciteit (gemiddeld hoger bij geavanceerde reactortypes). Dit betekent dat het elektrisch vermogen gemiddeld drie keer lager ligt dan het thermische vermogen.



III. Omgevingsfactoren: beperkingen

Voor het bepalen van een geschikte locatie zijn uiteenlopende omgevingsfactoren aan te wijzen. Algemene aspecten betreffen bijvoorbeeld:

- Grondspecificaties
- Warmteafvoer
- Afstand installatie tot waterinlaat
- Infrastructuur (bereikbaarheid)
- Omgeving en bestemmingen
- Regionale en nationale visies en strategieën

Aspecten ten aanzien van de veiligheid zijn:

Natuurinvloeden

- Aardbeving
- Overstroming
- Harde wind
- Natuurbranden

Menselijke activiteiten

- Activiteiten die risico's voor het functioneren van de installatie met zich meebrengen (bijvoorbeeld vliegbewegingen, explosiegevaarlijke industrie, militaire oefenterreinen)

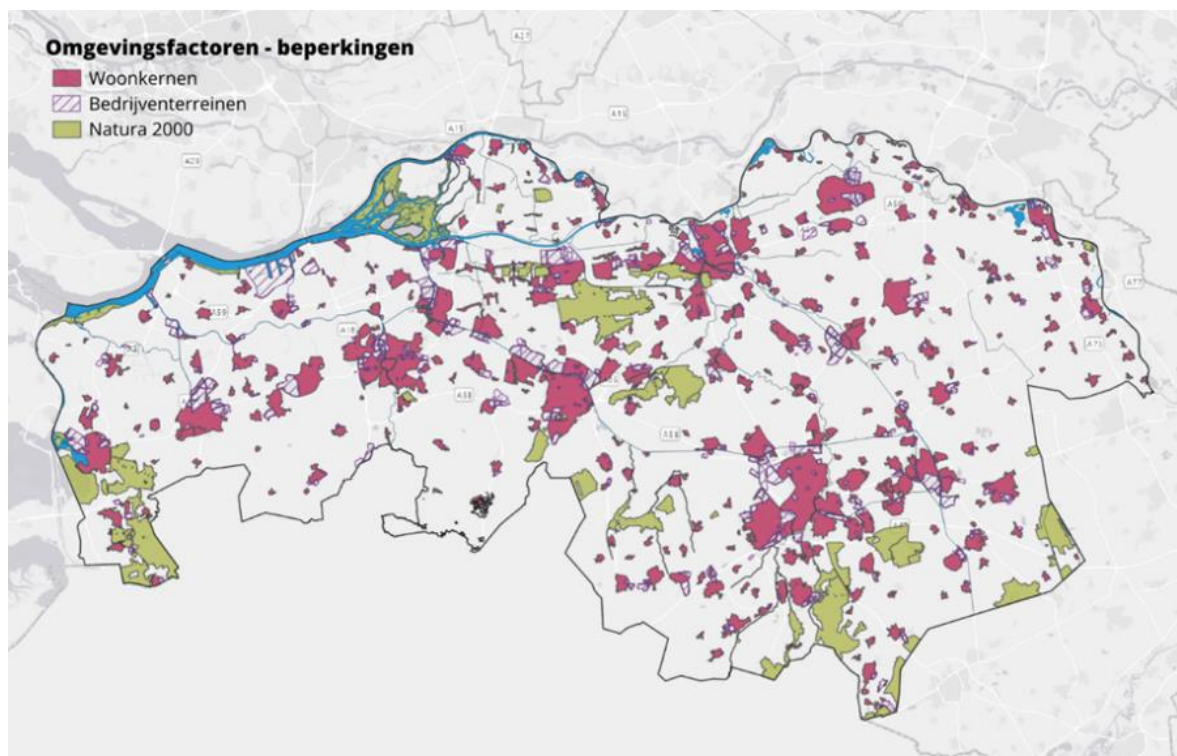
Omgevingsaspecten m.b.t. bedrijfsvoering

- Energie- en calamiteiten infrastructuur
- Warmteafvoer naar de omgeving bij ongevallen
- Preparatiezone t.b.v. calamiteiten

In deze verkenning zijn enkele *beperkende* omgevingsfactoren concreet meegenomen. Bij deze factoren kan op voorhand gesteld worden dat SMR-plaatsing nabij of op deze locaties zeer onwaarschijnlijk is. De volgende gebieden worden op voorhand uitgesloten.

- Woonkernen
- Natura 2000

In onderstaande figuur is de **beperkingsdoorsnede** weergegeven. Bedrijventerreinen zijn hierin gearceerd opgenomen om een duidelijk onderscheid te maken tussen bevolkingskernen – woonkernen en bedrijventerreinen samen – en woonkernen. Bedrijventerreinen worden *niet* op voorhand uitgesloten voor SMR-plaatsing.



IV. Omgevingsfactoren: toegevoegde waarden

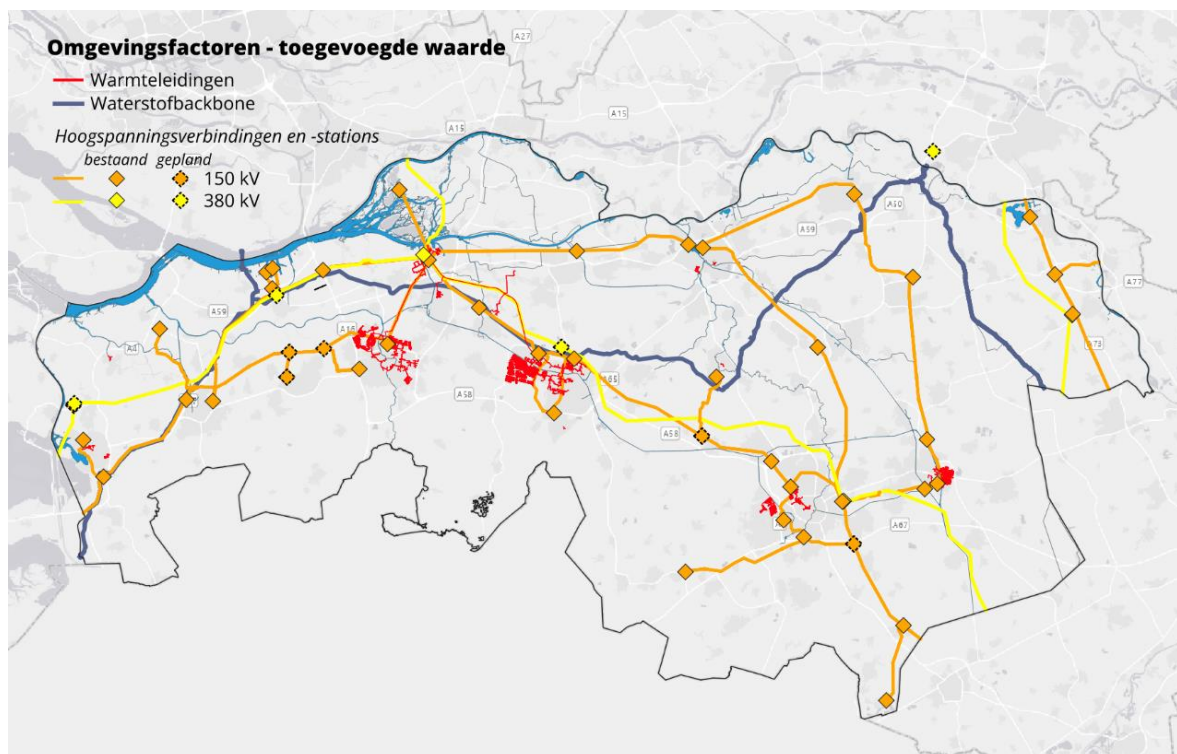
Voor ruimtelijke inpassing van SMR's kan aanwezige energie-infrastructuur van grote toegevoegde waarde zijn. Het betreft dan bijvoorbeeld het elektriciteitsnetwerk, warmtenetten en de waterstofbackbone.

In onderstaande figuur is **toegevoegde-waarde doorsnede** weergegeven. Deze doorsnede kan worden gebruikt om een eerste beeld te geven van de *kansrijkheid* van gebieden; plaatsing op korte afstand van aanwezige of geplande (energie-)infrastructuur kan gunstig zijn.

In deze doorsnede is meegenomen:

- Warmtenetten
- Hoogspanningsverbindingen (150 en 380 kV)
- Hoogspanningsstations (150 en 380 kV)
- Waterstofbackbone

Alle onderdelen hiervan zijn in de toekomst onderhevig aan verandering, voornamelijk in de vorm van uitbreiding. De geplande hoogspanningsstations zijn in onderstaande doorsnede meegenomen.



Potentiële en kansrijke gebieden SMR-inpassing

De toekenning van SMR-capaciteit aan bepaalde gebieden gebeurt op basis van de verschillende doorsnedes. Aangezien het een eerste verkenning van SMR-inpassing betreft is een heel specifieke inpassing van SMR's (precieze locatie, welk SMR-ontwerp etc.) niet mogelijk. Tegelijkertijd moet voorkomen worden om een te generieke inpassingsduiding te geven, zoals een directe koppeling met alleen een bepaalde manier van koelen. Om een voor deze fase toereikende resolutie te geven is koelpotentieel (uitgedrukt in A: hoog, B: beperkt, en C: lucht/minimaal) gekoppeld aan SMR-vermogen (uitgedrukt in 1: hoog, 2: middel-, en 3: laagvermogen). Aangezien het SMR-vermogen³ is berekend vanuit de energievraag van een gebied (aanneame: 50% van de geproduceerde warmte van een SMR wordt als bruikbare energie ingezet in het energiesysteem), is energievraag in deze koppeling verwerkt. In onderstaande tabel zijn de labels van deze koppeling weergegeven.

Label	Koelpotentieel	SMR-vermogen
A1	A: Hoge waterbeschikbaarheid	1: > 750 MW_{th} (> 250 MW _e)
A2		2: 200 – 750 MW_{th} (67 – 250 MW _e)
A3		3: < 200 MW_{th} (< 67 MW _e)
	<i>Relevante koelconcepten*: DK, NK, HK, LK (uitzonderlijk)</i>	
B1	B: Beperkte waterbeschikbaarheid	1: > 750 MW_{th} (> 250 MW _e)
B2		2: 200 – 750 MW_{th} (67 – 250 MW _e)
B3		3: < 200 MW_{th} (< 67 MW _e)
	<i>Relevante koelconcepten: NK, HK, LK</i>	
C1	C: Luchtkoeling / Minimale waterbeschikbaarheid	1: > 750 MW_{th} (> 250 MW _e)
C2		2: 200 – 750 MW_{th} (67 – 250 MW _e)
C3		3: < 200 MW_{th} (< 67 MW _e)
	<i>Relevante koelconcepten: NK (minimaal), HK (minimaal), LK</i>	

* DK = doorstroomkoeling, NK = natte koeling, HK = hybride koeling, LK = luchtkoeling

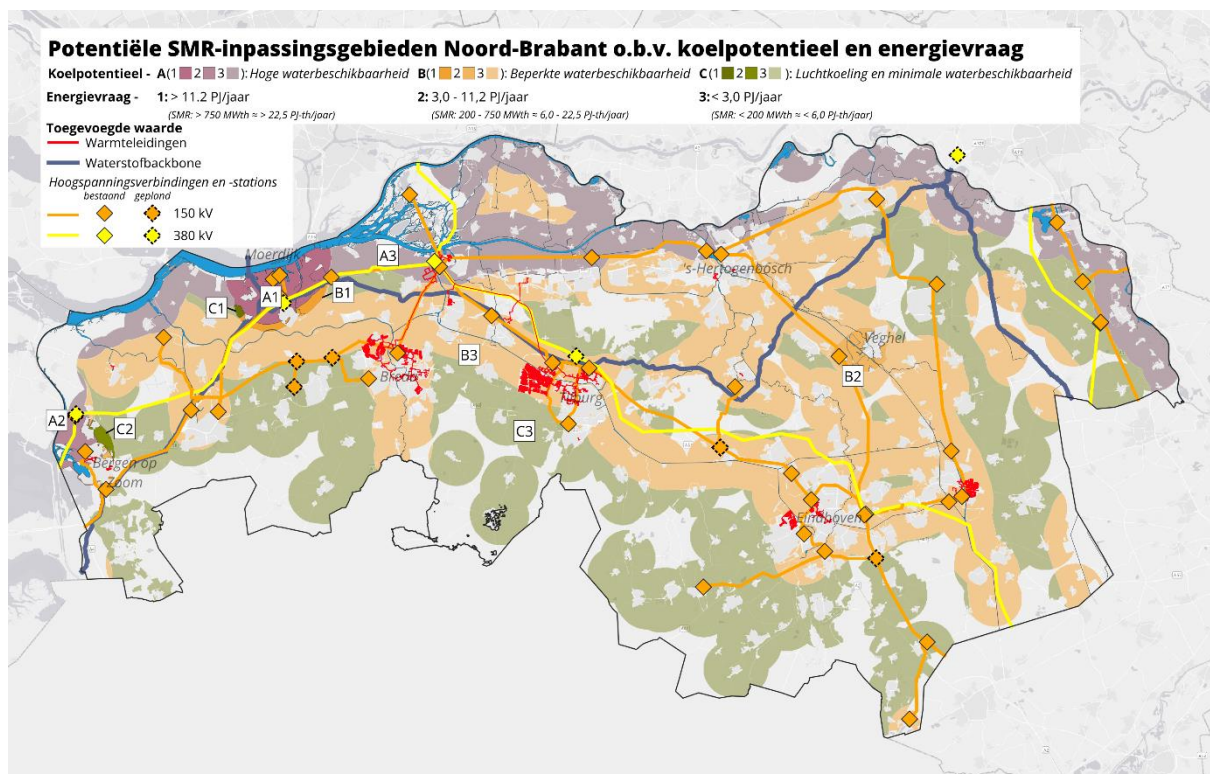
Op basis van deze koppeling krijgt elk gebied binnen Noord-Brabant – tenzij deze uitgesloten wordt door de beperkende omgevingsfactoren – één van deze negen labels. Bijvoorbeeld:

- Indien het betreffende gebied een hoog koelpotentieel (A) én hoge energievraag en dus hoog benodigd SMR-vermogen kent (1), dan wordt het label A1 aan dit gebied gekoppeld.

³ Een SMR van 750 MW_{th} produceert jaarlijks ~24 PJ thermische energie en kan dit omzetten in ~8 PJ elektrische energie. Voor de verschillende energievormen (warmte, elektriciteit) dient aldus rekening gehouden te worden met energetisch rendementen (~33% bij elektriciteitsproductie door LW-SMR's)

- Is voor een geselecteerd gebied het koelpotentieel minimaal (C) én de energievraag en dus het benodigd SMR-vermogen laag (3), dan wordt aan dit gebied het label C3 gekoppeld.

In onderstaande figuur zijn de potentiële SMR-inpassingsgebieden van Noord-Brabant weergegeven, met een verkennende stap richting het evalueren van de *kansrijkheid* van deze potentiële gebieden. Hierin zijn de vier afzonderlijke doorsnedes – koelpotentieel, energievraag, beperkende omgevingsfactoren en toegevoegde waarden – opgenomen.



Conclusie en aanbevelingen

Dit onderzoek kent de volgende bevindingen:

- Binnen de provincie Noord-Brabant bevindt het meeste koelpotentieel zich aan de grote rivieren in het noorden. Gereguleerde kanalen en kleinere rivieren verspreid door de provincie bieden significant minder koelpotentieel. Overige koelpotentie is toegekend aan luchtkoeling, al dan niet in combinatie met overige aanwezige waterlichamen.
- Technisch gezien vormt een beperkt koelpotentieel geen obstakel om restwarmte te kunnen afvoeren. Het gebruik van andere koeltechnieken dan doorstroomkoeling gaat echter gepaard met rendementsverlies. Vanuit technisch-economisch perspectief zijn algemene uitgangspunten:
 - Grote SMR's bij voorkeur langs de grote rivieren;
 - Kleinere SMR's zijn overal inpasbaar, met waar mogelijk gebruik van water voor koeling.

- Restwarmte-inzet (voor bijvoorbeeld warmtenetten) kan de koelbehoefte van een SMR verminderen (en kan daarmee economisch interessanter worden).
- Bijna alle bedrijventerreinen in Noord-Brabant, individueel of geclusterd, kunnen voorzien worden van energie met laagvermogende SMR's ($< 200 \text{ MW}_{\text{th}}$). Specifieke energieclusters die een hogere energievraag hebben zijn de terreinen bij Theodorus haven en Veghel ($200 - 750 \text{ MW}_{\text{th}}$), en het industrieterrein bij Moerdijk ($> 750 \text{ MW}_{\text{th}}$).

Concluderend is SMR-inpassing op Brabants grondgebied – op basis van technische eigenschappen van een SMR – in veel gebieden mogelijk, waarbij koeling en energievraag als belangrijkste uitgangspunten zijn genomen. Het evalueren van kansrijkheid van SMR-inpassing in potentiële gebieden kan mogelijk het uitgangspunt zijn van een volgende fase waarin beleidsmatige en economische aspecten aan de orde kunnen komen, zoals ruimtelijke opgaves en business cases, op basis van de in deze studie aangereikte technisch-economische aspecten. Daarnaast zal gekeken moeten worden welke ontwikkelingen op nationaal niveau plaatsvinden die mogelijk van invloed zijn op de keuzes van Brabant.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De rol van kernenergie binnen het energiesysteem krijgt steeds meer aandacht. Dit komt vooral door het groeiende besef dat betrouwbare en schone energievoorziening essentieel is voor het realiseren van klimaatdoelen en energiezekerheid. Nucleaire technologische ontwikkelingen worden met grote interesse gevolgd. Het zijn vooral de Small Modular Reactors die internationaal volop in de belangstelling staan omdat ze mogelijk slimme oplossingen bieden voor de uitdagingen van morgen. Op termijn kunnen deze kleine kerncentrales een aanvulling zijn op de grote conventionele kerncentrales om te komen tot een stabiel, CO₂-neutraal en divers energiesysteem.

Een groot aantal verschillende SMR-ontwerpen is momenteel wereldwijd in ontwikkeling maar nog vrijwel nergens gerealiseerd. Wel worden er in verschillende landen flinke stappen gezet, onder andere in Canada, de VS en het VK. Ook binnen de EU zijn er grote ambities rondom SMR's. Zo is binnen de Europese Unie de *European Industrial Alliance on SMR's* opgericht, een platform waarin overheden, kennisinstellingen en bedrijven samenwerken om de industriële basis en marktintroductie van SMR's te versnellen.

Voor de provincie Noord-Brabant aanleiding om een ruimtelijk onderzoek uit te laten voeren naar SMR's in Brabant als bouwsteen voor het energieperspectief. **Doel van het ruimtelijk onderzoek is het inzichtelijk maken van de mogelijkheden en voorwaarden voor inpassing van SMR's binnen de provincie Noord-Brabant op basis van feitelijke, objectieve, (milieu-) technische argumenten, inclusief een eerste verkenning waar een bepaald type SMR op Brabants grondgebied een toegevoegde waarde voor het energiesysteem kan leveren.**

Op 17 oktober van dit jaar heeft het demissionaire Kabinet de SMR-strategie gepresenteerd [1]. Deze geeft richting aan de kaders van bevoegd gezag en ruimtelijke inpassing, en beschrijft mogelijkheden van financiering en ondersteuning. Ook is hierin aangegeven dat de overheid het bevoegd gezag op zich wil nemen voor het eerste SMR-project in Nederland, onafhankelijk van de vermogensgrootte van de SMR. Met het ruimtelijk onderzoek voor Brabant en de Innovatiecoalitie Nucleair met o.a. de gesmolten zout technologie, onderzoekt provincie Noord-Brabant het speelveld om actief positie te kunnen bepalen.

1.2 Wat zijn SMR's?

Het Internationaal Atoom Energie Agentschap van de Verenigde Naties (IAEA) definieert een SMR op basis van het elektrisch vermogen: voor SMR's geldt volgens de IAEA een vermogen tot ongeveer 300 MW_e. Vermogens onder circa 10 MW_e worden aangeduid met microreactoren (of micro-SMR's). In Nederland wordt een grens van

500 MWe gehanteerd voor SMR's, omdat dit de grens is voor rijksgecoördineerde energieprojecten. Deze grens wordt ook in dit rapport gehanteerd.

De term modulair duidt op een aantal ontwerpaspecten. Zo kan een SMR samengesteld worden op basis van modules die in een fabriek in serie geproduceerd worden. Het uitgangspunt is dat deze methodiek tot lagere bouwkosten kan leiden. Daarnaast wordt de term modulair ook gebruikt om een multi-module installatie aan te duiden, waarbij meerdere kleine reactoren worden aangestuurd vanuit een enkele regelzaal. Historisch gezien gold tot voor kort het advies *the bigger the better*, wat in de praktijk inhield dat de voorkeur werd gegeven aan grote kerncentrales met een hoog (elektrisch) vermogen. Hierbij profiteert men van *economy of scale* (schaalgrootte) wat resulteert in lage kosten voor de elektriciteitsproductie (zeker voor het geval dat alleen *base load* wordt toegepast). Dit gaat echter wel gepaard met een relatief grote investering. Met de inzet op kleinschaligheid kunnen deze hoge kapitaalkosten worden verlaagd: *less is more*. Hierbij probeert men *economy of numbers* (aantallen) te laten opwegen tegen *economy of scale*. Daarnaast bieden SMR's ook meer (ontwerp)mogelijkheden om specifiek en/of flexibel (o.a. load following) ingezet te worden voor verschillende toepassingen (elektriciteitsproductie, proceswarmte-integratie, warmtenetten, waterstofproductie, ontziltingsprocessen, etc.).

SMR's kunnen worden onderverdeeld, op basis van koelmiddel, splijtstof en gebruikte reactortechnologie, in twee categorieën:

1. Watergekoelde modulaire reactoren (GENERATIE-III)

- a. Tot dusver alleen lichtwaterontwerpen ('gewoon water')
- b. Op basis van gebruikte (splijtstof) technologie in grote (licht)waterreactoren (drukwater- en kokendwaterreactoren)

2. Geavanceerde modulaire reactoren (GENERATIE-IV)

- a. Koeling met vloeibare metalen, gassen en gesmolten zouten
- b. Voornamelijk nieuw te ontwikkelen (splijtstof) technologie (zoals hoge temperatuur gasgekoelde reactoren, lage druk gesmoltenzoutreactoren)

Meer informatie over SMR's is bijvoorbeeld te vinden in [2] .

1.3 Realisatie kernreactoren

1.3.1 Vergunningsproces

In Bijlage A wordt ingegaan op wet- en regelgeving en vergunningen. Samenvattend kan worden gezegd dat er twee vergunningen vanuit de kernenergiwet nodig zijn (voor bouw en bedrijfsvoering), daarnaast zijn ook andere vergunning nodig (zoals een omgevingsvergunning). In Bijlage B wordt een samenvatting gegeven van

een uitgevoerde marktanalyse in 2023 [3] voor de marktintroductie van SMR's in Nederland. Belangrijke conclusies t.a.v. de duur van het nucleaire vergunningsproces betreffen:

Techniek: lichtwatertechnologie of geavanceerd

Beoordeling van het ontwerp kan relatief snel gebeuren (vergelijkbaar met ontwerpen van grote kerncentrales) als gebruikte technieken en materialen bekend zijn. Er is veel kennis, ervaring, logistiek en productiecapaciteit van lichtwatertechnologie beschikbaar aangezien wereldwijd de huidige grote kernreactoren voornamelijk lichtwaterreactoren zijn. Minder kennis is echter beschikbaar in het geval lichtwatertechnologie in complexere vorm is verwerkt, zoals multi-module units (meerdere reactoren die een unit vormen). Voor geavanceerde reactoren geldt dat vooralsnog minder kennis en ervaring beschikbaar is vergeleken met lichtwaterreactoren.

Ervaring met het ontwerp elders in de wereld

Een snellere beoordeling kan plaatsvinden als elders in Europa/Wereld door competente autoriteiten (NRC-VS, ONR-VK) of organisaties (EUR-Europa) ontwerpbeoordelingen (certificeringen) hebben plaatsgevonden. Voor ontwerpen die elders reeds gebouwd worden kunnen praktijk ervaringen gebruikt worden voor implementatie in Nederland. (Ontwerpbeoordelingen hebben bijvoorbeeld plaatsgevonden voor SMR's van NuScale, Rolls-Royce, GE-Hitachi, Kairos Power, zie ook [4])

Beoogd gebruik

Wordt de SMR geïntegreerd in een systeem of betreft het een *stand alone* die alleen op afstand elektriciteit en/of warmte levert. In het geval van systeemintegratie (in een industrieel proces bijvoorbeeld) zal de SMR meer op maat gemaakt moeten worden, dit kost vooralsnog meer tijd als hier geen of beperkte ervaring mee is; vooral het type SMR speelt hierin een grote rol (LWR of AMR). De leverancier/ontwerper zal in dit geval de ANVS (zie Bijlage A) moeten overtuigen dat voldaan wordt aan de gestelde veiligheidseisen die van toepassing zijn voor lichtwaterreactoren. De ANVS werkt in dit geval met het principe *comply or explain*, wat wil zeggen dat aangetoond moet worden dat het ontwerp voldoet aan de veiligheidsdoelstellingen die gesteld zijn aan lichtwaterreactoren. Met betrekking tot:

- *Comply*: het aantonen dat het ontwerp aan de gestelde veiligheidseisen voldoet op basis van de in Nederland geldende wet- en regelgeving voor lichtwaterreactoren (en daarmee voldoet aan de Nederlandse veiligheidsdoelstellingen)
- *Explain*: het aantonen (demonstreren op basis van gevalideerde methodieken en codes) dat het ontwerp aan dezelfde veiligheidsdoelstellingen voldoet zoals die gelden voor lichtwaterreactoren in Nederland.

Leverancier/ontwerper

Grootte van de organisatie (in kapitaal en menskracht) en de ervaring met nucleaire bouwwerken. De leverancier heeft een actieve rol in het vergunningstraject en zal de ANVS sneller kunnen overtuigen als invullingen van vereisten aangetoond kunnen worden op basis van eerdere ervaringen alsmede de voorzieningen waarover een (grote) organisatie beschikt.

1.3.2 Realisatietermijn

Momenteel zijn in de westerse wereld nog geen SMR's operationeel of gebouwd. Wel zijn SMR's in aanbouw (4 eenheden op Darlington-site, Ontario Canada). Derhalve ontbreken ervaringscijfers over bouwzeiten en kosten van een *First of a Kind* (FOAK) en een *Nth of a Kind* (NOAK) eenheden. Wel zijn schattingen door de leveranciers verstrekt. In Nederland ontbreekt ook de ervaring op andere realisatie onderdelen van SMR's. Uiteraard bestaat er wel ervaring met realisatietrajecten van andere nucleaire projecten.

Onderstaand wordt op basis van ervaringen in de nucleaire industrie en realisatietrajecten in Nederland een inschatting gedaan van de realisatietermijn voor een SMR.

De realisatie van een SMR doorloopt meerdere fases tussen de besluitvorming en de daadwerkelijke bedrijfsvoering van de installatie. Deze fases betreffen (zie ook [4]):

1. Besluitvorming/initiatief
2. Locatiekeuze (inclusief MER vereisten)
3. Aanbesteding (programma van eisen initiatiefnemer)
4. Inpassingen gebruikerseisen en locatie in ontwerp
5. Oprichtingsvergunning (en lokale/omgevingsvergunningen)
6. Bouw
7. Inbedrijfstelling (testen, verlening operationele vergunning)
8. Commerciële bedrijfsvoering

Deze fases worden niet achtereenvolgens doorlopen, met name in de eerste 5 fases lopen diverse processen parallel. Ten aanzien van fases 1- 4 kan gezegd worden dat deze enkele jaren kunnen duren. Bij een optimale parallele uitvoering, waarbij de keuze van techniek en leverancier vooraf grotendeels vastligt, kan na 1,5 jaar fase 5 beginnen, in een meer sequentieel verloop wordt fase 5 na circa 3 jaar verwacht. Voor de oprichtingsvergunning (fase 5, inclusief opstellen en beoordelen van vergunningsdocumentatie en review door ANVS, 3 jaar) en bouw (fase 6, 3-4 jaar) kan een periode van 6-7 jaar worden aangenomen. Hierbij geldt dat de betreffende SMR ontworpen is op basis van bewezen/volwassen technologie en de leverancier beschikt over voldoende capaciteit, kennis, ervaring, financiële middelen en toeleveringsketen. De gehanteerde geschatte bouwzeit van meervoudig geproduceerde SMR's (NOAK), is opgegeven door de leverancier. Fase 7, het inbedrijfstellen van de SMR, duurt ongeveer 0,5-1 jaar (deze fase kan ook deels parallel aan fase 6 plaatsvinden).

Opgemerkt kan worden dat ervan uitgegaan wordt dat bij de start van fase 1 er voldoende zicht is op betrouwbare financiering en dat de nodige politieke besluitvorming heeft plaatsgevonden.

Opgeteld komt de realisatietijd in het meest gunstige scenario uit op 8 jaar op basis van veelvuldig en optimaal uitgevoerde parallele processen en een minimale bouwzeit. De realisatietijd komt uit op ongeveer 11 jaar indien

de verschillende fases in meerdere mate achter elkaar worden uitgevoerd en een iets langere bouwtijd wordt aangenomen.

Samenvattend: de termijn voor volledige realisatie wordt geschat op 8-11 jaar op basis van de vermelde voorwaarden. Ervaringscijfers ontbreken.

1.4 Brabants Energiesysteem

De provincie Noord-Brabant werkt aan de ontwikkeling van het Brabants energiesysteem. De ontwikkelrichting wordt en zal bepaald worden door de producten *Bouwstenennotitie* [5, 6] en *Brabantse energieperspectief* (verwachte oplevering begin 2026).

In deze studie zal gebruikt gemaakt worden van de gegevens uit de *Bouwstenennotitie* om koppeling met SMR kenmerken zoals vermogensgrootte (en daarmee koelbenodigdheden en landoppervlak bijvoorbeeld), aanlevertemperatuur (levering van hoge -of lage temperatuurwarmte) en technologie (gerelateerd aan onder meer realisatieduur en toeleveringsketen) te kunnen maken. Naast energiegetallen en trends zijn ook gedefinieerde waarden en opgaven (uitdagingen) van belang om richting te kunnen geven aan energiescenario's waarin SMR's vertegenwoordigd kunnen zijn.

Van de waarden, opgaven en energiegetallen volgt een korte beschrijving/opsomming.

1.4.1 Brabantse waarden

Waarden geven de kaders en ontwikkelprincipes voor het Brabantse energiesysteem aan, als basis voor het maken van keuzes. Deze waarden zijn tot stand gekomen door samenwerking van de Provincie Brabant met de stakeholders. Deze waarden zijn:

Betrouwbaar

- De samenleving mag ervan uitgaan dat energie beschikbaar is en het systeem werkt.
- De beschikbaarheid van en toegang tot de energie zijn voorspelbaar.
- Het toekomstig energiesysteem is ook betrouwbaar bij conflicten en crises, en daarmee onafhankelijk van geopolitieke spanningen.

Betaalbaar

- Zo laag mogelijke maatschappelijke kosten voor het energiesysteem en de samenleving. Deze kostenminimalisatie moet in verhouding tot de economische impact en toekomstige opbrengsten worden beschouwd.
- Het toekomstig energiesysteem is voor iedereen financieel toegankelijk.
- Een eerlijke verdeling van lasten en lusten.

Omgevingsbewust

- Het toekomstige energiesysteem minimaliseert schadelijke effecten voor de gezondheid.
- Het toekomstig energiesysteem draagt waar mogelijk bij aan een schoner en gezonder ecosysteem en het verminderen van lucht- en watervervuiling.
- Het toekomstige energiesysteem minimaliseert haar impact op de natuur, het landschap, de leefomgeving van mens en dieren en het milieu.
- Het toekomstige energiesysteem wordt ontwikkeld voor de toekomstige generaties.
- Het toekomstige provinciale energiesysteem maakt, waar mogelijk, gebruik van de regionale energievisies.

Gestreefd wordt naar een optimale balans tussen de drie Brabantse waarden waarbij nadrukkelijk aandacht is voor de ondergrens per waarde.

1.4.2 Opgaven voor Brabants Energiesysteem

Aangezien de Brabantse energievraag aanzienlijk groter is dan het aanbod aan duurzame energiebronnen, zal het een grote opgave zijn om de doelstellingen van de energietransitie te realiseren. De provincie en haar stakeholders staan daarom voor de volgende gedefinieerde opgaven:

1. Beperken van de energievraag.
2. Bewust inzetten van duurzame energiedragers.
3. Vergroten van het energieaanbod.
4. Ruimtelijk bij elkaar brengen van energievraag en -aanbod.
5. In de tijd bij elkaar brengen van energievraag en -aanbod.
6. Fossiele brandstoffen bewust uitfasen (zo wordt onnodige energieschaarste voorkomen, doordat de uitfasering knelt met de ontwikkeling van nieuwe duurzame bronnen en infrastructuur)

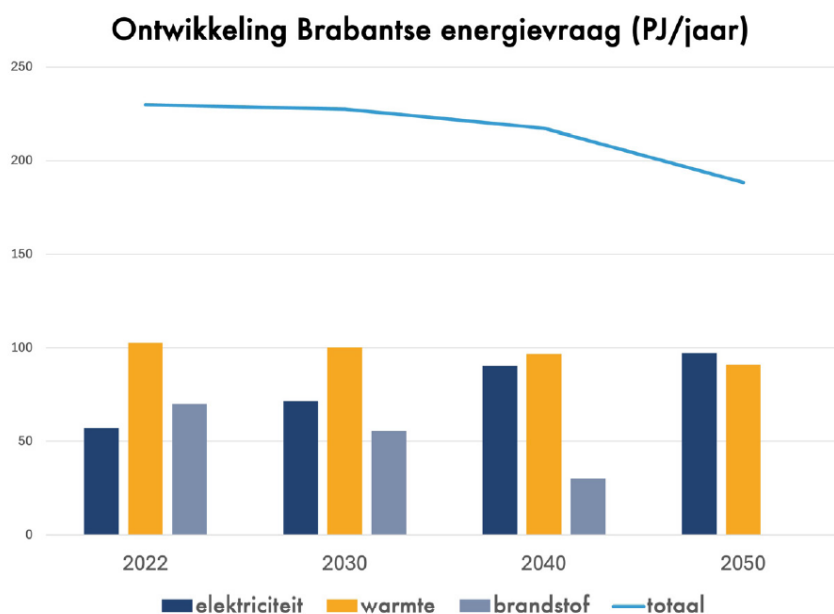
Ten aanzien van de inzet van energiedragers voor niet-elektrische energievraag is de volgende voorkeur bepaald:

Tabel 1-1 Voorkeur van inzet van dragers voor niet-elektrische energievraag per sector [5]

Gebouwde omgeving Warmte voor ruimteverwarming en tapwater	Industrie lage temperatuur Lage temperatuur productieprocessen	Industrie hoge temperatuur Hoge temperatuur productieprocessen	Mobiliteit Verduurzamen voertuigbrandstoffen	Landbouw Warmte glastuinbouw
Voorkeursvolgorde voor inzet van dragers				
1. Collectieve warmtesystemen 2. Elektrificatie 3. Groen gas waar geen alternatieven beschikbaar zijn (zoals monumentale panden) 4. Géén gebruik van waterstof	1. Collectieve warmtesystemen 2. Elektrificatie 3. Groen gas 4. Bij voorkeur géén gebruik van waterstof	1. Waterstof 2. Groen gas 3. Elektrificatie	1. Elektrificatie voor alle modaliteiten 2. Biobrandstoffen als transitie voor wegvervoer en scheepvaart, en lange termijn luchtvaart 3. Mogelijk waterstof voor zwaar wegtransport, voor scheepvaart en luchtvaart	1. Collectieve warmtesystemen 2. Elektrificatie 3. Groen gas 4. Géén gebruik van waterstof

1.4.3 Energievraag en ontwikkeling

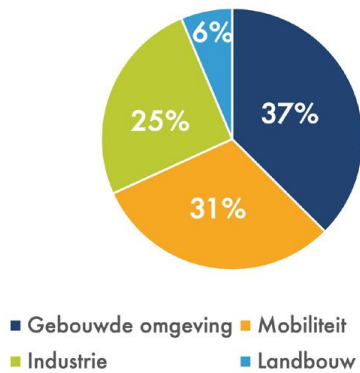
Tot 2050 is de verwachting dat de totale energievraag in Noord-Brabant daalt van 230 PJ naar 190 PJ. Hierin blijft de warmtevraag tot 2050 nagenoeg gelijk, ziet de elektriciteitsvraag vrijwel een verdubbeling en vindt er een uitfasering van brandstof plaats. Zie ook Figuur 1-1 uit de *Bouwstenennotitie* [5].



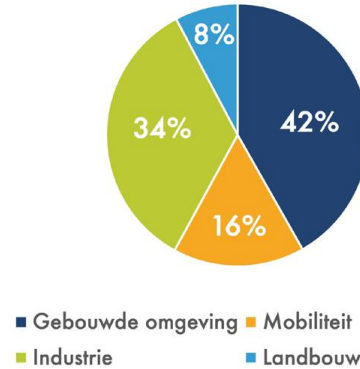
Figuur 1-1 Verwachte ontwikkeling Brabantse energievraag [5].

Op dit moment hebben de sectoren gebouwde omgeving (37%), mobiliteit (31%) en industrie (25%) het grootste aandeel in de Brabantse energievraag. Zie ook Figuur 1-2. De vraag vanuit landbouw is met 6% van het huidige totaal relatief beperkt. De verwachting is dat tot 2050 het aandeel van de energievraag van mobiliteit aanzienlijk daalt, hoofdzakelijk door efficiëntiewinst door elektrificatie. Hierdoor neemt het relatieve aandeel van de gebouwde omgeving, industrie en landbouw in de Brabantse energievraag licht toe, maar blijven onderlinge verhoudingen tussen deze drie sectoren relatief constant.

Huidige aandeel energievraag per sector

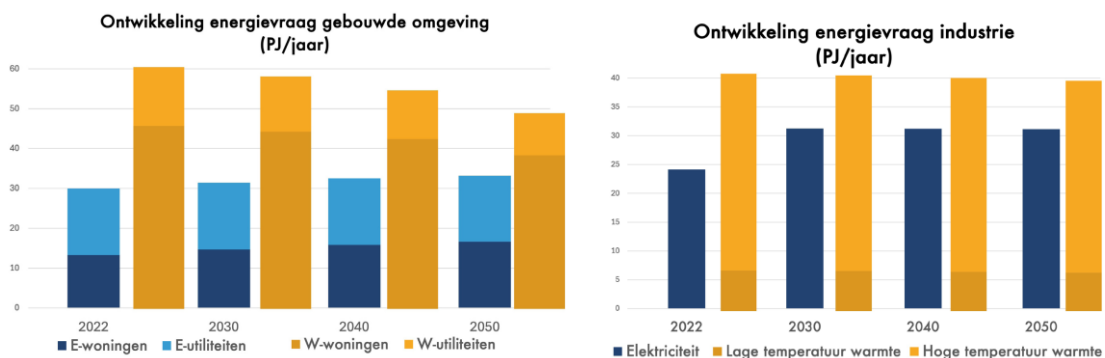


Verwachte aandeel energievraag per sector in 2050



Figuur 1-2 Verhouding in energievraag tussen verschillende sectoren nu en in 2050 [5].

Voor de inpassing van SMR's is met name de energievraag uit de gebouwde omgeving en de industrie relevant. Deze sectoren hebben doorgaans de grootste energievraag, vragen om energievormen die goed aansluiten bij de output van een SMR, en bevinden zich veelal in geconcentreerde gebieden (voor eventuele standalone inpassing). Voor specifiek deze twee sectoren staat de verwachte ontwikkeling in energievraag gegeven in Figuur 1-3. Hieruit blijkt dat de warmtevraag naar verwachting grotendeels constant blijft in de industrie en licht zal dalen in de gebouwde omgeving, terwijl de elektriciteitsvraag in beide sectoren verwacht wordt toe te nemen tot 2050. Hoewel de energievraag gedeeltelijk ingevuld kan worden ingevuld met een mix van andere CO₂-arme energiebronnen, biedt deze transitie ruimte voor SMR-inpassing binnen het toekomstige Brabantse energiesysteem.



Figuur 1-3 Ontwikkeling energievraag voor de sectoren 'gebouwde omgeving' en 'industrie' tot 2050 [5].

1.5 Leeswijzer en gevolgde stappen

Dit rapport geeft een eerste invulling op en duiding van bovengenoemde vraag, zodat het in de huidige fase een verkennend karakter heeft. In het rapport is voornamelijk gebruik gemaakt van bestaande informatie (regelgeving, NRG rapporten, websites) en van de expertise die binnen de organisatie en haar netwerk beschikbaar is. Op een aantal punten zijn numerieke afschattingen uitgevoerd.

Het rapport behandelt, na dit inleidende hoofdstuk, de volgende onderdelen:

- Koeling (Hoofdstuk 2)
- Energievraag (Hoofdstuk 3)
- Energieproductiecapaciteit SMR's (Hoofdstuk 4)
- Omgevingsfactoren (Hoofdstuk 5)
- Potentiële gebieden SMR-inpassing (Hoofdstuk 6)
- Conclusie (Hoofdstuk 7)

Deze onderdelen vormen de stappen die uiteindelijk moeten leiden tot de beantwoording van de onderzoeksvraag. De stappen worden hieronder kort beschreven.

Het afvoeren van restwarmte vormt een belangrijk onderdeel in de bedrijfsvoering van SMR's. Hiervoor moeten voldoende mogelijkheden zijn en dit betreft bijna altijd de beschikking over voldoende water op beperkte afstand van de centrale. Lucht kan echter ook gebruikt worden, al dan niet in combinatie met water. Naast het medium (water of lucht) waarin restwarmte wordt afgevoerd, is de methode van koeling belangrijk voor het te behalen energetisch rendement.

Op basis van beschikbaar gestelde informatie van Brabantse energievraag wordt in kaart gebracht waar deze energievraag, en in welke energievorm, geografisch verdeeld is. Deze energievraag wordt geaggregeerd tot gebieden met een verhoogde energievraag.

De energieproductiecapaciteit van SMR's wordt besproken alsook enkele relevante kenmerken. In dit rapport worden drie vermogenscategorieën onderscheiden, deze worden aan de geaggregeerde gebieden gekoppeld met een verhoogde energievraag.

Bij omgevingsfactoren spelen zowel toegevoegde waarden als beperkingen een rol. Toegevoegde waarden liggen in de nabijheid van bijvoorbeeld een elektriciteitsnet, beperkingen vloeien voort uit gebieden die onder strikte ruimtelijke bescherming vallen (zoals Natura 2000).

Op basis van deze stappen worden potentiële gebieden voor SMR-inpassing geïdentificeerd. Dit zijn de locaties waar koelpotentieel, omgevingsfactoren en energievraag samenkomen en gekoppeld worden aan een van toepassing zijnde SMR-categorie.

Op basis van de verstrekte energiegegevens kunnen nog enkele nuanceringen worden ingebracht. Het betreft bijvoorbeeld de koppeling van een type energie (thermisch, hoge temperatuur, elektrisch) aan een SMR type dat daar het meest geschikt voor is.

De belangrijkste bevindingen worden in de conclusies gepresenteerd.

2 Koeling

2.1 Koeltechnieken en koelvoorwaarden

Elke SMR, hoe klein ook, moet gekoeld worden om de zogenaamde restwarmte die ontstaat bij de energieproductie, af te voeren. De hoeveelheid restwarmte wordt bepaald door het rendement van de energieproductie. Als de energie alleen elektriciteitsproductie betreft ligt het rendement op circa 33%. In dat geval verdwijnt 67% van de energie dus via restwarmte-afvoer, vermogen voor eigenbedrijfsvoering en overige warmteverliezen (naar de lucht bijvoorbeeld). Als de energie ingezet wordt in de vorm van elektriciteit én warmte (warmtekrachtkoppeling) of alleen als warmte, dan is het totale rendement veel hoger en hoeft ook minder restwarmte te worden afgevoerd.

Restwarmte wordt bijna altijd door water afgevoerd (m.n. bij grote energiecentrales), maar dit kan ook met lucht of een combinatie van water en lucht (hybride). De volgende koeltechnieken worden toegepast voor restwarmte-afvoer bij energiecentrales:

1. Doorstroomsysteem

Wateropname en afgifte uit een rivier of stagnant (nagenoeg stilstaand) water.

2. Natte koeling

Wateropname uit rivier of stagnant water. Het water verdampt en voert zo de warmte af.

3. Hybride koeling

Wateropname uit rivier of stagnant water. Luchtaanzuiging. Afgifte warmte aan lucht en/of door waterverdamping (afhankelijk van de weersomstandigheden)

4. Droge koeling

Koeling met lucht (beperkingen in te koelen vermogen door afhankelijkheid van luchtvochtigheid en luchttemperatuur)

Doorstroom- en natte koeltechnieken worden beiden ingezet voor het afvoeren van grote hoeveelheden restwarmte. Een doorstroomsysteem onttrekt veel water aan het waterlichaam en wisselt warmte uit via een warmtewisselaar. Het water wordt teruggevoerd naar het waterlichaam dat hiermee lokaal opwarmt. De andere systemen onttrekken, via zogenaamde koelmodules (aparte koelgebouwen, meestal in de range 10-30 meter hoog) vergeleken met doorstroomsystemen, veel minder water en voeren bijna alle warmte af via verdamping. Een klein gedeelte van het onttrokken water wordt weer teruggevoerd als spuiroom naar het waterlichaam.

Koelwaterlozing

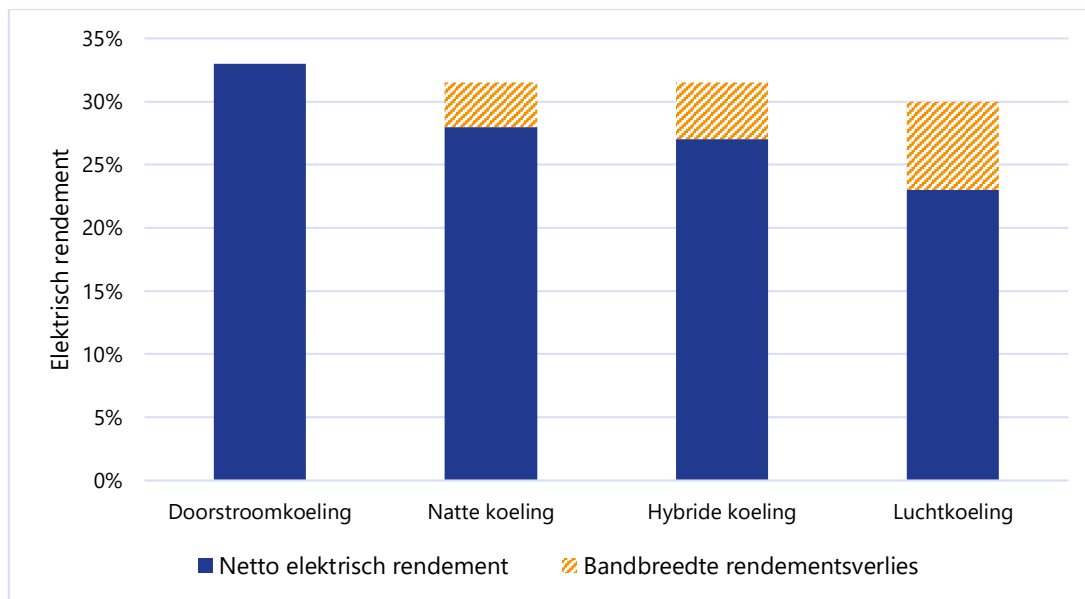
De regelgeving omtrent het lozen van koelwater bij industriële toepassingen wordt hoofdzakelijk beschreven in de omgevingswet. Bij de beoordeling van de impact van de activiteit koeling kan onderscheid worden gemaakt tussen enerzijds de mogelijke effecten die kunnen optreden ten gevolge van het lozen van koelwater en anderzijds de effecten die kunnen optreden ten gevolge van het onttrekken van koelwater. Beide aspecten worden meegenomen in de NBW-beoordelingssystematiek voor warmtelozingen (Nationale Beoordelingssystematiek Warmtelozingen, zie ook het rapport SMR-inpassing Gelderland [7]). Grofweg kan 10% van het gehanteerde doorstroomdebiet (zoals 98-percentiel waarden) van een waterlichaam (rivier, kanaal) gehanteerd worden als maximaal onttrekkingsdebiet voor doorstroomkoeling, voor natte koeling is dit percentage meestal minder (zie [7]). Voor grootte van onttrekking uit stagnante ('stilstaand') waterlichamen (zee, meer, vijver) zijn moeilijker vuistregels te geven.

De verschillende koeltechnieken kunnen in principe overal toegepast worden. Echter, indien geen doorstroomkoeling wordt toegepast zal het elektrisch rendement verminderen. Hoeveel dit rendement⁴ vermindert is zeer afhankelijk van omgevingscondities, procescondities en koelontwerp. In onderstaande Tabel 2-1 wordt dit toegelicht en in Figuur 2-1 gevisualiseerd.

Tabel 2-1 Rendement verschillende koelconcepten, zie ook [8, 9]

Koelconcept	Elektrisch Rendementsverlies	Wat bepaalt het verlies?	Meest gebruikt bij...
Doorstroom koeling	0%-pt (referentie)	Laagste condensor-T, laag pompverbruik	Grote centrales bij zee, rivieren, meren
Natte koeling	1,5–5%-pt	Hogere condensor-T, ventilatoren, pompen	Elektriciteits- en kerncentrales, waar lozing in water beperkt is
Hybride koeling	1,5–6%-pt	Wisselende bedrijfsmode: ventilatoren, pompen;	Locaties waar watergebruik én zichtpluimen beperkt moeten worden
Luchtkoeling	3,0–10%-pt	Hoge condensor-T in zomer, grote ventilatoren	Droge regio's, of waar koelwater niet beschikbaar/vergund is

⁴Een belangrijke parameter betreft hierbij de condensor temperatuur: hoe lager deze temperatuur, hoe meer drukverschil t.o.v. de turbinedruk mogelijk is, hoe hoger het rendement van de aangedreven generator en daarmee elektriciteitsopwekking



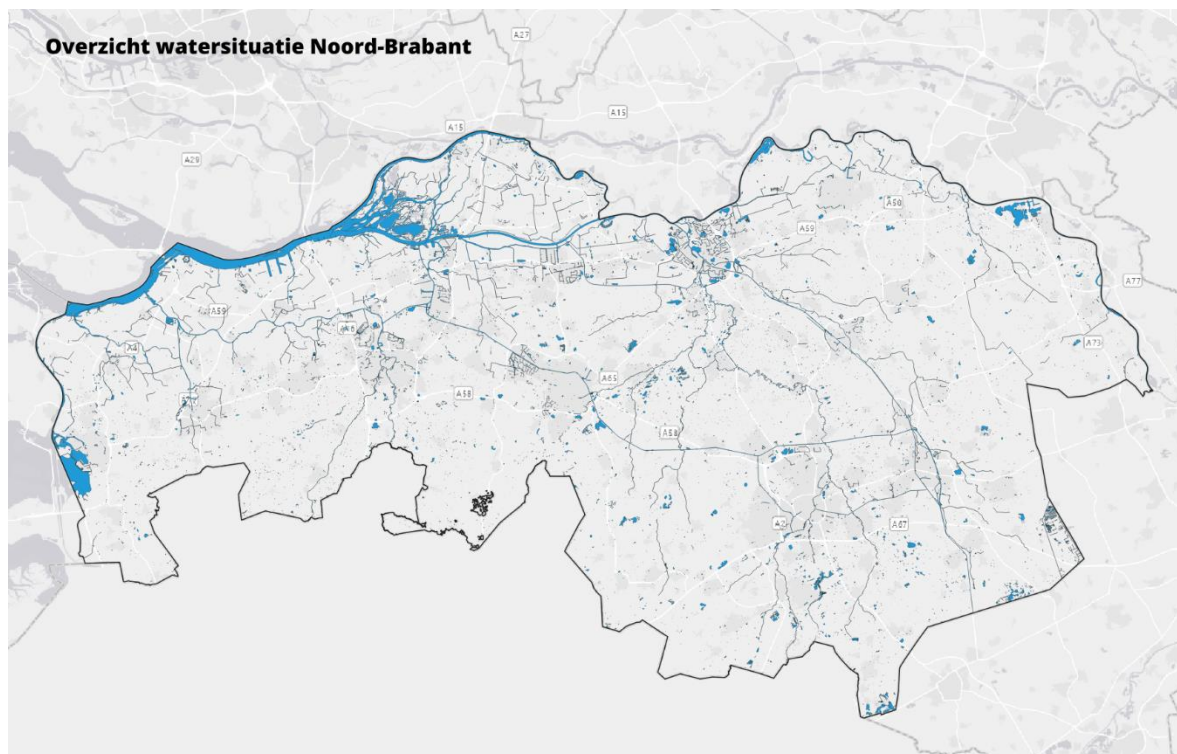
Figuur 2-1 Visualisatie rendementsverlies verschillende koelconcepten.

2.2 Situatie Noord-Brabant

De provincie Noord-Brabant beschikt over water dat afkomstig is van rivieren. Deze rivieren stromen (deels) door Brabant en deze voeden een uitgebreid kanalenennetwerk alsook (deels) waterlichamen zoals sloten/aftakkingen, meren/plassen. Om te beoordelen of een waterlichaam geschikt is om een specifieke SMR te koelen zal de warmtelozing per situatie beoordeeld moeten worden. Deze beoordeling vindt plaats op basis van de NBW-beoordelingssystematiek en kan met vuistregels in eerste instantie afgeschat worden (zie kader).

In Figuur 2-2 is de watersituatie van Brabant weergegeven. Aan de oost- noord- en westrand stromen (samenkomende) rivieren; binnen Brabant zijn de diverse beheerde kanaalvertakkingen zichtbaar alsook de overige wateren.

Om een goede afchatting te maken zijn voldoende gegevens nodig van de diverse waterlichamen, dit betreft met name het doorstroomdebiet en de temperatuur (m.b.t. stabiliteit, seizoeninvloed). Van de rivieren aan de randen van Brabant is bekend (zie [7]) dat deze over voldoende capaciteit beschikken om een grote energiecentrale (>500 MWe) te kunnen koelen, al dan niet met verdampingskoeling of doorstroomkoeling (m.b.t. [7]: het betreft hier alleen een conservatieve afchatting van het koelpotentieel van waterlichamen o.b.v. de NBW-beoordelingssystematiek, andere aspecten zoals bestaande warmte-afvoer activiteiten of klimaatverandering zijn niet meegenomen bij de beoordeling van het koelpotentieel). Van de verschillende kanalen/stromen die Brabant doorstromen kan op basis van gegevens (waterkaart RWS: waterpeil, actueel en beperkt historisch debiet) en eenvoudige volume afchattingen gezegd worden dat de koelcapaciteit zeer beperkt is m.b.t. doorstroomkoeling, maar dat deze zo mogelijk een rol kunnen spelen bij natte/verdampingskoelers of hybride koelers (water en lucht).



Figuur 2-2 Overzicht watersituatie Noord-Brabant

Zodoende is gekozen om het koelpotentieel van Brabant op te delen in drie groepen:

Koelpotentieel A: Hoge waterbeschikbaarheid

- *Omschrijving:* Koeling door rivieren en grote wateroppervlaktes waar rivieren in uitmonden
- *Betreft:* o.a. Maas, Boven-Merwede, Hollands Diep, Schelde-Rijnkanaal
- *Capaciteit en koeltechniek:* vanuit het oogpunt van te behalen rendement is het mogelijk dat elk SMR-vermogen, dus tot 500 MW_e (1500 MW_{th}), met koelmodules gebruik makend van natte koeling gekoeld kan worden. Ook zijn er voldoende mogelijkheden voor doorstroomkoeling (afhankelijk riviergrootte).

Koelpotentieel B: Beperkte waterbeschikbaarheid

- *Omschrijving:* Gereguleerd (met name op waterpeil) kanalenennetwerk, met over het algemeen laag debiet ($< 1 \text{ m}^3/\text{s}$); overige wateren (beken/stromen, plassen)
- *Betreft:* o.a. Zuid-Willemsvaart, Wilhelminakanaal, Beatrixkanaal, deel van de Dommel
- *Capaciteit en koeltechniek:* waarschijnlijk zijn vermogens tot 250 MW_e (750 MW_{th}) realistisch te koelen vanuit het oogpunt van te behalen rendement; koelmodules gebruikmakend van natte koeling, maar meer waarschijnlijk is het gebruik van hybride koeling (water en lucht).

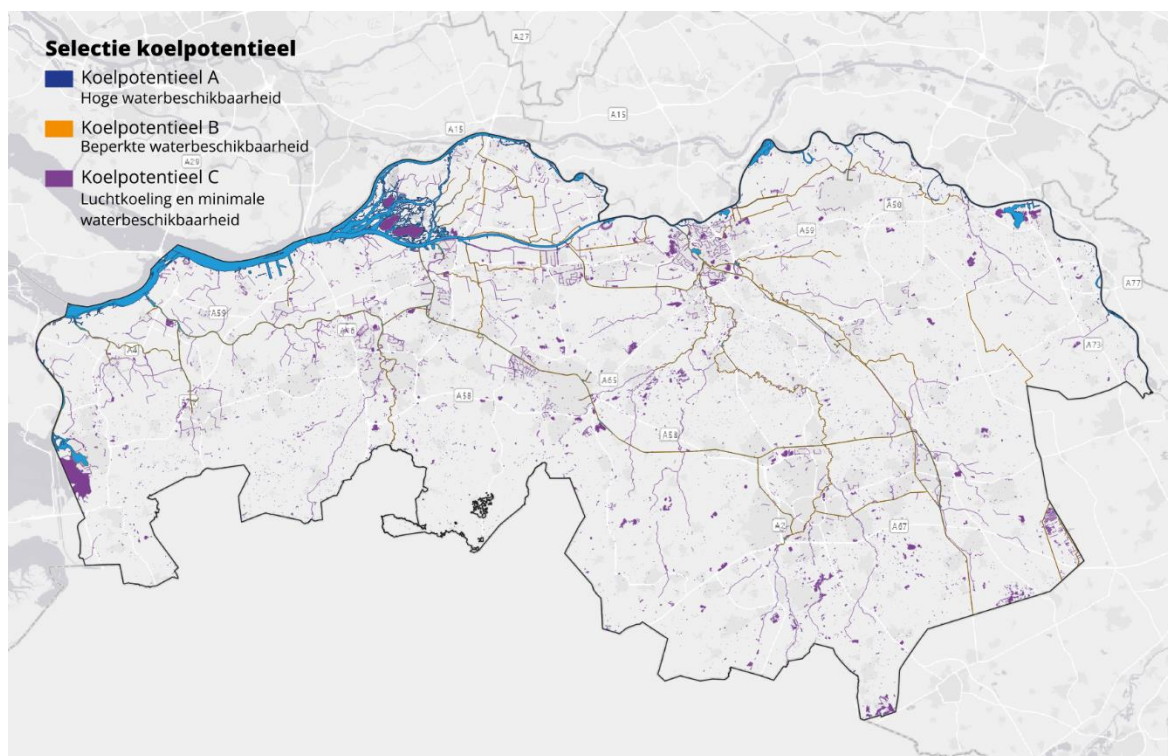
Opmerking: Een economische analyse bepaalt de uiteindelijk te gebruiken koeltechniek en het te koelen vermogen.

Koelpotentieel C: Luchtkoeling en minimale waterbeschikbaarheid

- *Omschrijving:* Luchtkoeling en minimale waterhoeveelheden (minder dan koelpotentieel B)
- *Betreft:* wateraftakkingen, plassen, sloten, beken, (grijs)waterleiding. Opgemerkt kan worden dat het onwaarschijnlijk is dat wateren uit Natura 2000 gebieden geschikt bevonden/aangemerkt worden voor koelactiviteiten. Voor de volledigheid worden deze wateren weergegeven.
- *Capaciteit en koeltechniek:* waarschijnlijk zijn vermogens tot 67 MW_e (200 MW_{th}) realistisch te koelen vanuit het oogpunt van te behalen rendement; koelmodules gebruikmakend van hybridekoeling (water en lucht) of alleen luchtkoeling.

Opmerking: Een economische analyse bepaalt de uiteindelijk te gebruiken koeltechniek en het te koelen vermogen.

In Figuur 2-3 is de algemene watersituatie in Noord-Brabant van Figuur 2-2 onderverdeeld in de selecties van koelpotentieel. Voor deze selectie is gebruik gemaakt van gegevens binnen de “Basiskaart Aquatisch” en het bijbehorende document van Planbureau voor de Leefomgeving [10, 11]⁵.



Figuur 2-3 Selectie koelpotentieel vanuit beschikbare waterlopen.

⁵ De selectie binnen de “Basiskaart Aquatisch” is als volgt gehanteerd per koelpotentieel:

- Koelpotentieel A: *HFD_TYPE* van waterlichaam geclassificeerd als *Grote rivieren* of *Grote wateren*;
- Koelpotentieel B: *HFD_TYPE* van waterlichaam geclassificeerd als *Kanalen* of *OWM_TYPE* zijnde *R06* of *R07* binnen de KRW-typologie (zie [11]), die buiten koelpotentieel A vallen;
- Koelpotentieel C: alle waterlichamen die niet in koelpotentieel A en B zijn opgenomen.

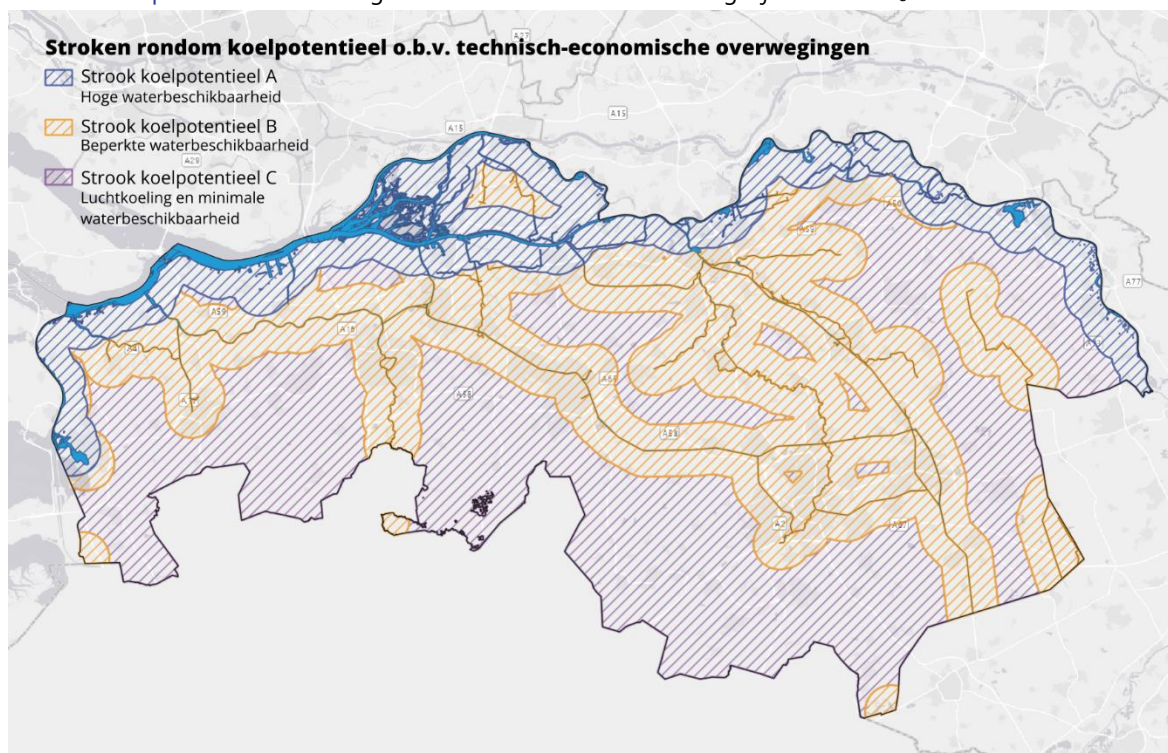
2.3 Doorsnede

Op basis van bovenstaande is een koelpotentieeldoorsnede voor Brabant gemaakt. Het betreft de hiervoor beschreven koelpotentieën A, B en C. Hiervoor zijn om de rivieren en belangrijkste kanalen/stromen stroken van 3 km aangegeven (deze afstand is gehanteerd op basis van economische overwegingen, zie [7]). Binnen deze 3 km zou op basis van een algehele technisch-economische overweging een SMR geplaatst kunnen worden. Koel-economisch is plaatsing op zo klein mogelijke afstand van het waterlichaam veruit het meest rendabel. Echter kunnen andere economische redenen (grootte-en type van de energievraag bijvoorbeeld) aanleiding geven om verder van het waterlichaam verwijderd te zijn. Ten aanzien van koelpotentieel C, hiervoor zijn geen stroken van 3 km gehanteerd aangezien het ook luchtkoeling betreft. Op basis van **alleen koelpotentieel** zouden luchtgekoelde SMR's dus overal geplaatst kunnen worden.

Doorsnede I – Koelpotentieel (Figuur 2-4)

Gebruik: bepaald welke gebieden beschikken over welk koelpotentieel; beter koelpotentieel betekent dat hogere SMR-vermogens efficiënt gekoeld (referentie: doorstroomkoeling) kunnen worden, wat bepalend kan zijn voor SMR-inpassing.

- Koelpotentieel A – efficiënte koeling tot 500 MW_e (alle SMR's)
- Koelpotentieel B – koeling met verminderde efficiëntie mogelijk tot 250 MW_e
- Koelpotentieel C – koeling met verminderde efficiëntie mogelijk tot 67 MW_e



Figuur 2-4 Doorsnede koelpotentieel o.b.v. technisch-economische overwegingen. De stroken zijn voor koelpotentieel A en B beide 3 kilometer breed per zijde. Alles wat niet onder koelpotentieel A en B valt, is per definitie koelpotentieel C.

3 Energievraag in Noord-Brabant

Binnen de zes opgaven uit het *Bouwstenennotitie* [5] is één opgave in het bijzonder relevant voor potentiële SMR-inpassing:

“Opgave 4: Ruimtelijk bij elkaar brengen van energievraag- en aanbod”

SMR's dicht bij de energievraag brengen heeft als voordeel dat een constante levering van elektriciteit aan een locatie gerealiseerd kan worden, zonder afhankelijkheid van omvangrijke externe infrastructuur. Daarnaast kan bij een nabije plaatsing ook direct warmte worden geleverd aan een locatie. Dit kan de noodzaak tot volledige elektrificatie verminderen voor processen die nu op warmte draaien en zo het elektriciteitsnet gedeeltelijk ontlasten.

Echter, individuele locaties zoals bedrijventerreinen hebben over het algemeen een relatief kleine energievraag, afgezien van een klein aantal grote industrieterreinen, waar aan voldaan kan worden met een relatief kleine SMR (veelal in de micro-range). SMR's profiteren over het algemeen – net zoals conventionele kerncentrales – van het *economy of scale* (schaalgrootte) principe, vooral in de beginfase: hoe hoger het vermogen, hoe lager de prijs per vermogens eenheid. Hoewel SMR-inpassing op individuele locaties dus technisch zeker mogelijk is, wordt er binnen deze studie gekeken naar *clusters* van energievraag om technisch-economisch tot een gunstigere SMR-inpassing te komen.

In Figuur 3-1 en Figuur 3-2 worden verdelingen gegeven van respectievelijk de *huidige* elektriciteitsvraag en warmtevraag van bedrijventerreinen binnen Noord-Brabant⁶. Deze verdeling is gebaseerd op de energievraag van individuele bedrijventerreinen (gele punten in de figuren) om twee redenen:

1. De *huidige* energievraag van de bedrijventerreinen is concreet bekend⁷, uit data van CBS [12] aangevuld door de provincie zelf.
2. Bedrijventerreinen zijn vaak energie-*hotspots* en daardoor op dit moment vaak CO₂-intensief. Dit maakt ze voor de provincie aantrekkelijke kandidaten voor verduurzaming, zoals beschreven in aanpak Grote Oogst [13].

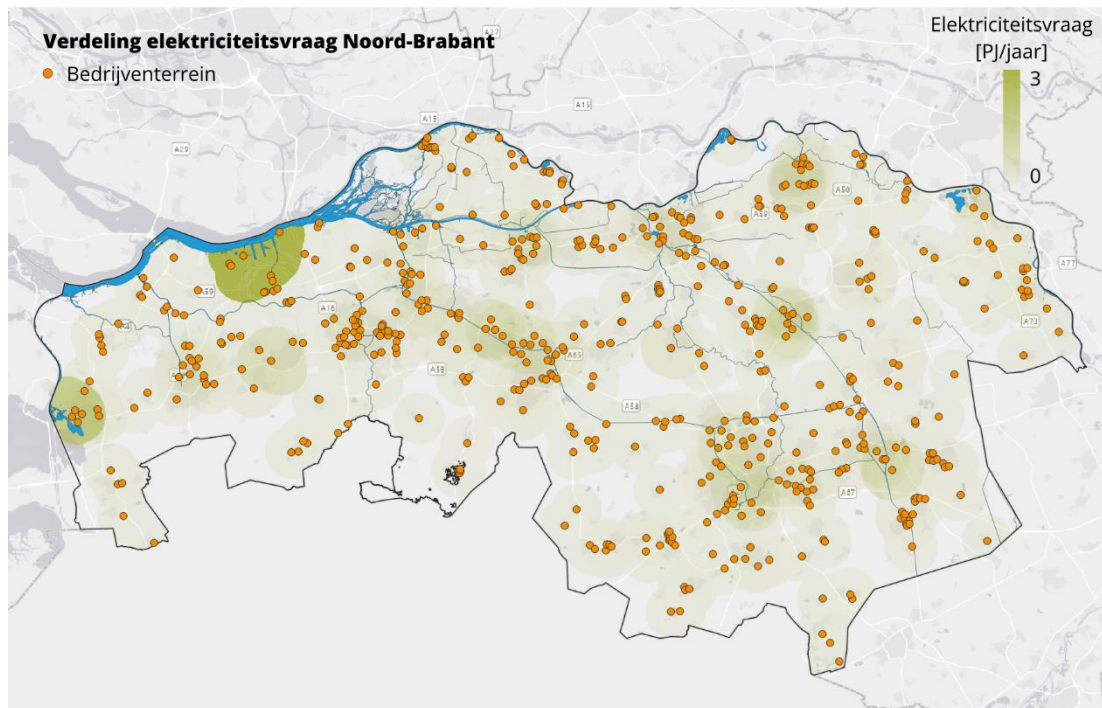
Eventuele verdere koppeling aan bijvoorbeeld energievraag vanuit stedelijke gebieden kan voordelig zijn voor SMR-inpassing (omgevingsfactor: toegevoegde waarde), maar is in deze verkenning niet bepalend.

Concreet zijn de energieverdelingen in de figuren hieronder opgesteld door een gebied met een straal van 3 km rondom een bedrijventerrein te nemen, en voor overlappende gebieden de energievraag te sommeren. De 3 km heeft hier een soortgelijke onderbouwing als bij koeling (zie hoofdstuk 2) in de zin dat binnen deze afstand

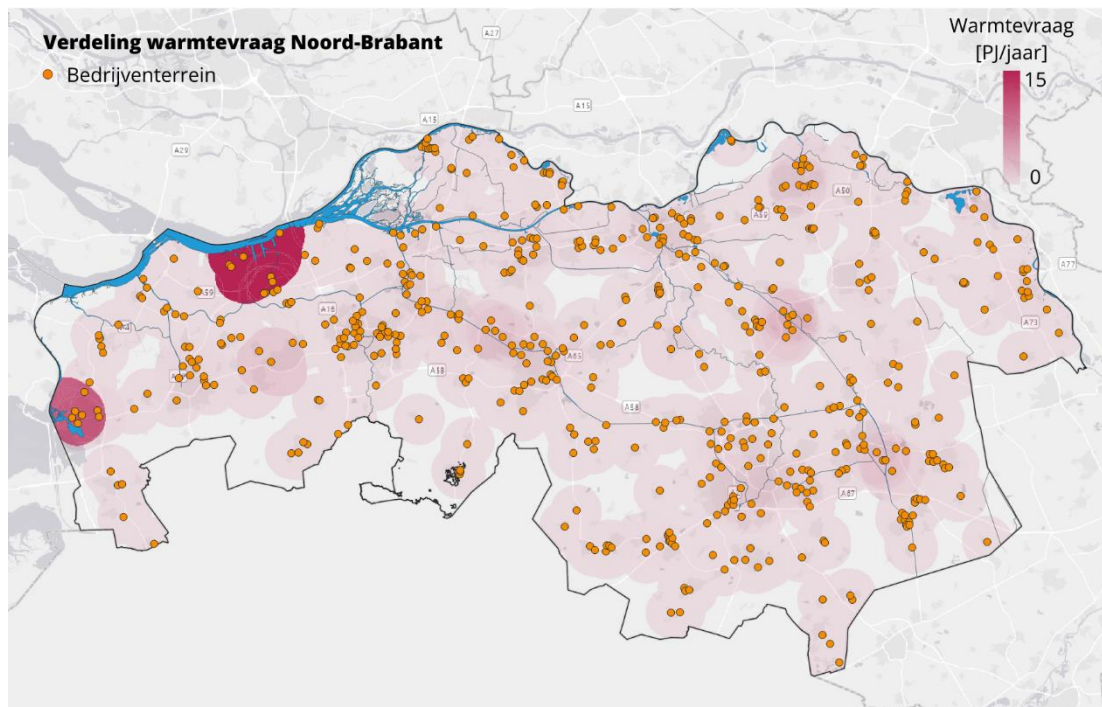
⁶ De energievraag van bedrijventerreinen zal door energiebesparing, eventuele uitbreiding en elektrificatie in de toekomst veranderen. Met deze eventuele verandering wordt rekening gehouden in Hoofdstuk 5.

⁷ Voor warmtevraag is alleen het gasverbruik per locatie bekend, welke is omgezet naar energievraag. Voor warmtelevering is de benodigde aanleveringstemperatuur een additionele belangrijke factor, maar wordt voor de verkenningfase niet meegenomen.

leidinginfrastructuur en warmtevervoer rendabel zou kunnen zijn. Voor elektriciteitslevering is deze afstand in principe minder strict, afhankelijk van de toepassing ('achter' of 'voor' de meter inzet).



Figuur 3-1 Verdeling elektriciteitsvraag van bedrijventerreinen binnen Noord-Brabant



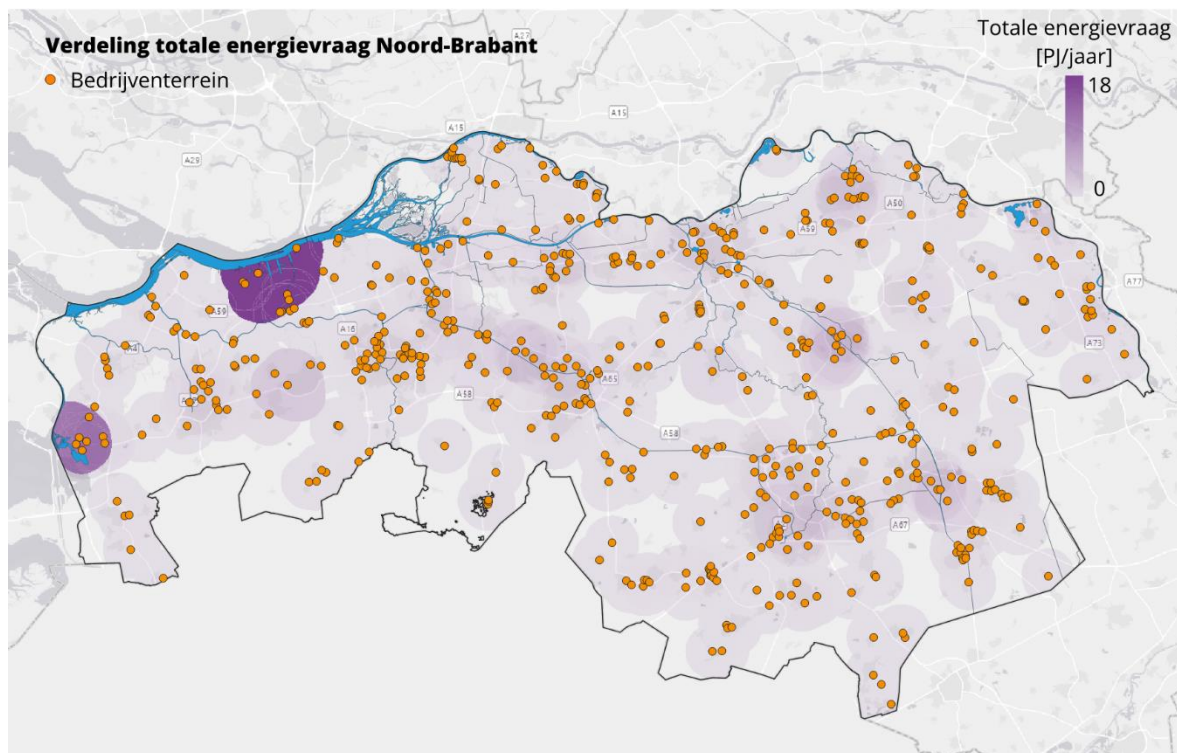
Figuur 3-2 Verdeling warmtevraag van bedrijventerreinen binnen Noord-Brabant

3.1 Doorsnede

Voor een doorsnede om te gebruiken voor potentiële SMR-inpassingsgebieden, worden elektriciteits- en warmtevraag opgeteld: bovenstaande figuren worden gecombineerd tot één overzicht voor totale energievraag.

Doorsnede verdeling totale energievraag (Figuur 3-3)

Gebruik: totale energievraag wordt omgerekend naar in-te-passen SMR-vermogen; samen met de doorsnede van koelpotentie geeft dit een concreet inzicht in potentiële SMR-inpassingsgebieden.



Figuur 3-3 Verdeling totale energievraag van bedrijventerreinen Noord-Brabant

Effect clustergrootte energievraag

Voor de gesommeerde energievraag zijn ook andere stralen dan de genomen 3 kilometer onderzocht. Samenvattend verandert de genomen straal voornamelijk de grootte van de clusters met een hoge energievraag, en ontstaan er bij grotere stralen een aantal clusters met hogere gecombineerde energievraag, al blijft deze energievraag gering ten opzichte van de al bestaande hotspots. Vooral in combinatie met de andere doorsnedes uit dit rapport, is een straal van 3 kilometer een goede mix tussen duidelijke energieclusters en technisch-economische haalbaarheid. Het is hierbij belangrijk om te noemen dat deze 3 kilometer geen absoluut limiet vormt voor SMR-plaatsing, maar vooral (hoge) potentie van plaatsing laat zien.

4 Energieaanbod door SMR's

De verdeling van totale energievraag in Figuur 3-3 maakt inzichtelijk waar in Noord-Brabant de meeste energievraag is vanuit bedrijventerreinen. De vertaalslag naar welk SMR-vermogen daarbij mogelijk ingepast kan worden, wordt in dit hoofdstuk beschreven.

Voor de bepaling welk SMR-vermogen potentieel bij welke energievraag ingepast kan worden, zijn er twee belangrijke factoren om in acht te nemen:

- **Factor energiebenutting:** of een SMR voor warmte- of elektriciteitslevering wordt ingezet, is sterk bepalend voor het benodigde SMR-vermogen op een locatie. Hierin zijn twee opties:
 - Volledige warmtelevering: praktisch het volledige thermische vermogen van de SMR wordt benut. De factor energiebenutting is **1**.
 - Volledige elektriciteitslevering: het thermische vermogen van de SMR wordt omgezet in elektrisch vermogen, waarbij 33% van het thermische vermogen daadwerkelijk benut wordt. De factor energiebenutting is **0.33**.

Voor de situatie in Noord-Brabant hebben praktisch alle bedrijventerreinen zowel warmte als elektriciteit nodig. Daarnaast is de precieze verdeling van energievraag in de toekomst onderhevig aan veranderingen door energiebesparing, uitbreiding en elektrificatie. Daarom wordt bij de gecombineerde energievraag uit Figuur 3-3 een gemiddelde factor energiebenutting van **0.5** aangenomen. Dit betekent dat er wordt aangenomen dat het energieaanbod vanuit de SMR (en dus het vermogen) gemiddeld 2 keer zo hoog ligt vergeleken met de energievraag.

- **Capaciteitsfactor:** een SMR kan het grootste gedeelte van de tijd constant energie leveren, maar is niet 100% van de tijd beschikbaar door bijvoorbeeld periodes van onderhoud. De verwachting voor de gemiddelde SMR is dat de beschikbaarheidsfactor – ook wel capaciteitsfactor – in een jaar rond de 95% ligt. Dit betekent dat het SMR-vermogen iets verhoogd moet zijn om met deze capaciteitsfactor aan de jaarlijkse energievraag te voldoen.

Met deze twee factoren kan de doorsnede gecombineerde energievraag uit Figuur 3-3 omgezet worden naar potentieel in-te-passen SMR-vermogen.

4.1 Doorsnede

De resulterende SMR-vermogens worden onderverdeeld in drie categorieën (met dezelfde vermogensindeling als in de Gelderland-studie [7]). Bijbehorende energievraag wordt ook gegeven voor directe koppeling met *Doorsnede verdeling totale energievraag (Figuur 3-3)*:

- **Vermogenscategorie 1:** SMR-vermogens vanaf 750 MW_{th} (250 MW_e bij volledige omzetting naar elektriciteit); omvat de grootste SMR's in ontwikkeling.
 - **Totale energievraag:** vanaf 11,2 PJ/jaar

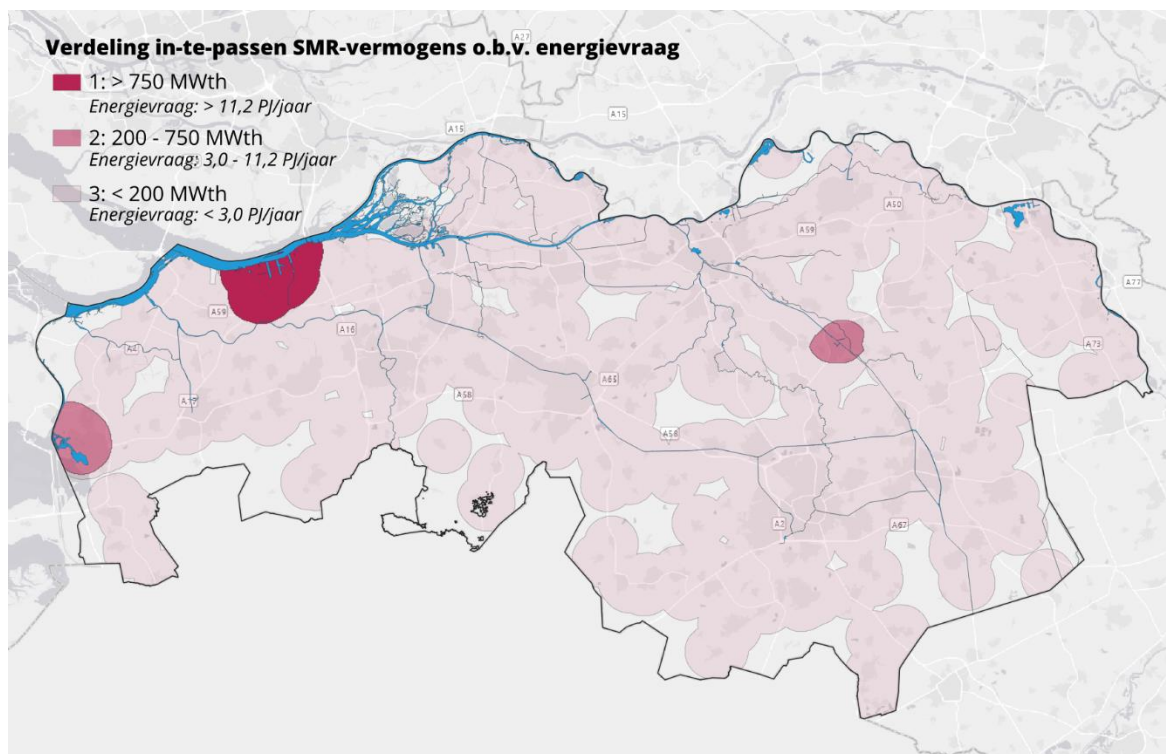
- **Vermogenscategorie 2:** SMR-vermogens tussen 200 en 750 MW_{th} (tussen 67 en 250 MW_e bij volledige omzetting naar elektriciteit); middelgrote SMR's.
 - *Totale energievraag tussen 3,0 en 11,2 PJ/jaar*
- **Vermogenscategorie 3:** SMR-vermogens lager dan 200 MW_{th} (67 MW_e bij volledige omzetting naar elektriciteit); micro tot kleine SMR's.
 - *Totale energievraag: lager dan 3,0 PJ/jaar*

Deze onderverdeling maakt het mogelijk globaal te zien waar de potentie voor SMR-inpassing het grootst is, zonder gebieden te koppelen aan een specifiek vermogen. Specifiek vermogen is namelijk in deze fase te onzeker door de onzekerheid in de ontwikkeling van exacte energievraag per bedrijventerrein, mogelijke gevoeligheid van clustering van bedrijventerreinen (nu met een straal van 3 km) en factoren die meegenomen zijn voor de omrekening naar SMR-vermogen. In Bijlage D wordt een overzicht gegeven van SMR-ontwerpen, onderverdeeld met deze categorisatie, van zowel het lichtwater als geavanceerde type.

Doorsnede II – In-te-passen SMR-vermogens (Figuur 4-1)

Gebruik: wordt gecombineerd met koelpotentieel om tot concrete SMR-inpassingsgebieden te komen o.b.v. koeling en in-te-passen SMR-vermogen.

- **Vermogenscategorie 1** – > 750 MW_{th}
- **Vermogenscategorie 2** – 200 – 750 MW_{th}
- **Vermogenscategorie 3** – < 200 MW_{th}



Figuur 4-1 Verdeling in-te-passen SMR-vermogens o.b.v. gecombineerde energievraag.

Ruimtelijke inpassing SMR's

De ruimte (aantal ha) die een SMR locatie inneemt hangt samen met de grootte van het vermogen en de gebruikte technologie, maar ook van zaken zoals infrastructuur, beveiligingszones en servicegebouwen. Een lineaire schaling van ruimte-inname met grootte van het SMR-vermogen is grofweg van toepassing, maar er kunnen significante verschillen zijn door gebruik van compacte technologie en efficiënt inpassen van meerdere reactormodules in een SMR-unit (een unit kan uit meerdere reactormodules bestaan). Daarnaast moet rekening gehouden worden met de benodigde ruimte tijdens de bouwfase. In onderstaande tabel zijn schattingen gegeven van het benodigde oppervlak voor het omheinde terrein van een SMR locatie (de scheiding door hekken en beveiligingsvoorzieningen met de omgeving), het totaal benodigde oppervlak in de bouwfase en de ordegrrootte van energieproductie die een dergelijke SMR locatie zou kunnen leveren. De schattingen zijn gebaseerd op informatie die verstrekt zijn door leveranciers (zoals vermeld in o.a. [16]) en op basis van eenvoudige vuistregels.

Tabel 4-1 Schatting ruimtegebruik en jaarproductie voor SMR vermogenscategorieën. Het aangegeven vermogen is per SMR-unit. Een SMR-unit kan bestaan uit meerdere reactoren (reactormodules).

Vermogensklasse (SMR-unit)	Geschat omheind terrein [ha]	Geschat bouwopp. [ha]	Ordegrrootte Jaarproductie Warmte & Elektriciteit* [PJ]
≤ 60 MW _{th} (20 MW _e)	0,5 – 1 ha	1 – 2 ha	≤ 1,9 PJ(W); ≤ 0,6 PJ(E)
< 200 MW _{th} (67 MW _e)	0,5 – 3 ha	1 – 6 ha	< 6,3 PJ(W); < 2,1 PJ(E)
200 – 750 MW _{th} (67 – 250 MW _e)	2,5 – 15 ha	5 – 30 ha	6,3 – 23,7 PJ(W); 2,1- 7,9 PJ(E)
750 – 1500 MW _{th} (250 – 500 MW _e)	5 – 20 ha	10 – 40 ha	23,7 – 47,3 PJ(W)**; 7,9 – 15,8 PJ(E)

* Gebaseerd op 33% rendement. Het rendement kan oplopen bij GEN-IV reactortechnologie (hogere temperatuurprocessen)

** Te vergelijken met de in 2050 verwachte totale energievraag van **190 PJ** voor heel Noord-Brabant, zie sectie 1.4.3 [5]. **Let op:** deze energievraag is een combinatie van warmte en elektriciteit; de hoeveelheid geleverde elektriciteit door een SMR is ~33% de hoeveelheid geleverde warmte bij volledige omzetting van warmte naar elektriciteit.

5 Omgevingsfactoren

Voor de plaatsing van een nucleaire installatie gelden voorwaarden voortkomend uit wet- en regelgeving, realisatie en bedrijfsvoering, alsook economische factoren. In dit hoofdstuk wordt beknopt aandacht besteed aan omgevingsfactoren die relevant zijn voor een geschikte SMR-locatie. Op basis hiervan zijn omgevingsfactoren relevant voor deze verkenning in doorsnedes verwerkt.

5.1 Algemeen, veiligheid en energie-infrastructuur

Een aantal aspecten worden in deze sectie kort aangestipt. Een uitgebreidere omschrijving m.b.t. locatievoorwaarden wordt gegeven in Bijlage C.

Algemeen

Algemene aspecten hebben betrekking op realisatie/bedrijfsvoering en bestemmingen. Uit onder meer de volgende punten komen vereisten en voorwaarden voort:

- Grondspecificaties
- Warmteafvoer
- Afstand installatie tot waterinlaat
- Infrastructuur (bereikbaarheid)
- Omgeving en Bestemmingen
- Regionale en nationale visies en strategieën

Veiligheid

Een locatie moet als veilig worden beoordeeld zoals vereist in de nucleaire wet- en regelgeving. Dit betreft eisen die voortvloeien uit onder meer onderstaande punten:

Natuurinvloeden

- Aardbeving
- Overstroming
- Harde wind
- Natuurbranden

Menselijke activiteiten

- Activiteiten die risico's voor het functioneren van de installatie met zich meebrengen (bijvoorbeeld vliegbewegingen, explosiegevaarlijke industrie, militaire oefenterreinen)

Omgevingsaspecten m.b.t. bedrijfsvoering

- Energie- en calamiteiten infrastructuur

- Warmteafvoer naar de omgeving bij ongevallen
- Preparatiezone

Opgemerkt kan worden dat vooral voor de kleinere SMR's waarschijnlijk geen of beperktere maatregelen buiten het terrein (en binnen de gestelde preparatiezone, zie Bijlage C) van toepassing zijn voor veronderstelde ernstige ongevalssituaties van de betreffende SMR. Dit biedt mogelijkheden om SMR's ook nabij woonkernen en/of industrieterreinen te plaatsen, echter voor elke situatie zal bepaald (berekend) moeten worden of voldaan wordt aan het individuele risico of groepsrisico. Het groepsrisico dicteert de te hanteren afstanden tot de bevolkte gebieden op basis van bevolkingsdichtheden van die gebieden.

Energie-infrastructuur

Voor ruimtelijke inpassing van SMR's kan aanwezige energie-infrastructuur van grote toegevoegde waarde zijn. Het betreft dan met name de volgende onderdelen:

1. *Elektriciteitsnetwerk*

Een SMR kan stabiele baseload-elektriciteit leveren. Aansluiting op het elektriciteitsnet (hoogspanningsstations, transportcapaciteit, koppeling met regionale netwerken) voorkomt afnamecongestieproblemen en maakt het mogelijk om de geproduceerde stroom direct te integreren in het landelijke energiesysteem. Invoedingscongestieproblemen (te veel aanbod) worden echter niet opgelost.

2. *Waterstof backbone*

SMR's kunnen continu elektriciteit en/of warmte leveren, wat gunstig is voor elektrolyse (waterstofproductie). Een locatie nabij de waterstof-backbone maakt het efficiënt om geproduceerde waterstof direct te transporteren naar industrieclusters of opslagplaatsen, zonder dat er dure nieuwe pijpleidingen of opslagfaciliteiten nodig zijn.

3. *Energieproductielocaties (Zon-/windparken)*

Wind en zon zijn variabel en weersafhankelijk. Een SMR kan daar complementair aan opereren door stroom en warmte te leveren wanneer zon/wind tekortschiet. Inpassing vlakbij bestaande of geplande energieproductielocaties biedt synergie: gedeelde infrastructuur (netcapaciteit, waterstofkoppeling, conversie-installaties) en balans tussen hernieuwbare variabele productie en nucleaire regelbare productie.

5.2 Doorsneden

Een aantal omgevingsfactoren kunnen in deze fase van SMR-inpassing al concreet meegenomen worden. Zo zijn er op een aantal locaties omgevingsfactoren waarbij op voorhand gesteld kan worden dat SMR-plaatsing zeer onwaarschijnlijk is – *beperkingen* – alsook factoren die SMR-inpassing kunnen bevorderen, oftewel van

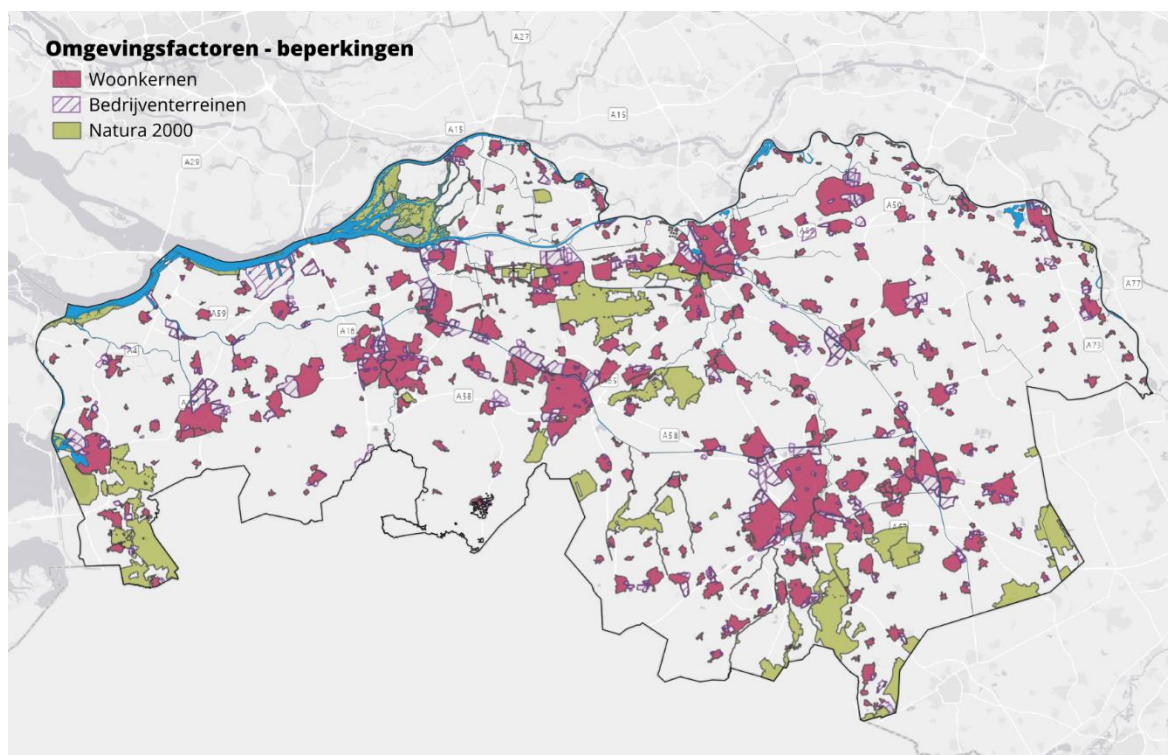
toegevoegde waarde zijn voor de locatie. Van zowel de beperkingen als de toegevoegde waardes worden hieronder doorsnedes gegeven en toegelicht wat meegenomen wordt.

Doorsnede III – Omgevingsfactoren: beperkingen (Figuur 5-1)

Gebruik: geen SMR-inpassing binnen de beperkende omgevingsfactoren. Deze gebieden worden op voorhand uitgesloten.

- Woonkernen
- Natura 2000

Bedrijventerreinen zijn hierin gearceerd opgenomen om een duidelijk onderscheid te maken tussen bevolkingskernen – woonkernen en bedrijventerreinen samen – en woonkernen. Bedrijventerreinen worden *niet* op voorhand uitgesloten voor SMR-plaatsing.



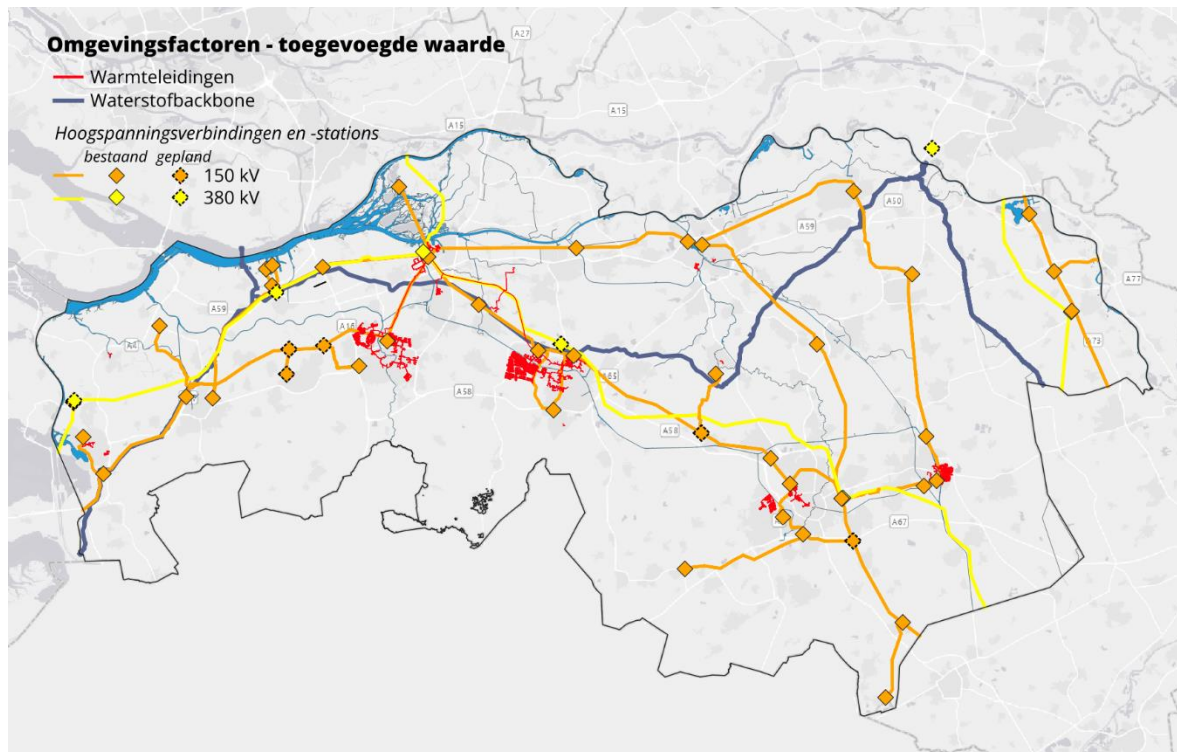
Figuur 5-1 Omgevingsfactoren die beperkend zijn voor potentiële SMR-plaatsing.

Doorsnede IV – Omgevingsfactoren: toegevoegde waarde

Gebruik: niet direct bepalend bij bepaling potentiële gebieden, maar wordt gebruikt om een eerste beeld te geven van de kansrijkheid van gebieden; plaatsing op korte afstand van (energie-)infrastructuur kan gunstig zijn.

- Warmtenetten
- Hoogspanningsverbindingen (150 en 380 kV)
- Hoogspanningsstations (150 en 380 kV)

Alle onderdelen hiervan zijn in de toekomst onderhevig aan verandering, voornamelijk in de vorm van uitbreiding. De geplande hoogspanningsstations zijn in onderstaande doorsnede meegenomen. Geplande warmtenetten en hoogspanningsverbindingen zijn in dit rapport niet meegenomen.



Figuur 5-2 Omgevingsfactoren die van toegevoegde waarde zijn voor potentiële SMR-plaatsing. Één gepland 380 kV hoogspanningsstation valt buiten de grenzen van de provincie, maar is meegenomen voor mogelijke relevantie.

6 Potentiële gebieden SMR-inpassing

In de voorgaande hoofdstukken zijn relevante doorsnedes gemaakt m.b.t. koeling, beperkingen, energievraag en energie-aanbod. In dit hoofdstuk worden deze doorsnedes samengenomen en toegelicht.

6.1 Labeling energie-intensieve gebieden

De toekenning van SMR-capaciteit aan bepaalde gebieden gebeurt op basis van behandelde doorsnedes. Aangezien het een eerste verkenning van SMR-inpassing betreft is een heel specifieke inpassing van SMR's (precieze locatie, welk SMR-ontwerp etc.) niet mogelijk. Tegelijkertijd moet voorkomen worden om een te generieke inpassingsduiding te geven, zoals een directe koppeling met alleen een bepaalde manier van koelen. Om een voor deze fase toereikende resolutie te geven is koelpotentieel (uitgedrukt in A: hoog, B: beperkt, en C: lucht/minimaal, zie sectie 2.1) gekoppeld aan SMR-vermogen (uitgedrukt in 1: hoog, 2: middel-, en 3: laagvermogen, zie hoofdstuk 4). Aangezien het SMR-vermogen⁸ met een aantal aannames is berekend vanuit de energievraag van een gebied, is energievraag in deze koppeling verwerkt (zie hoofdstuk 3). In onderstaande tabel zijn de labels van deze koppeling weergegeven.

Tabel 6-1 Labelomschrijving t.b.v. SMR-inpassing

Label	Koelpotentieel	SMR-vermogen
A1	A: Hoge waterbeschikbaarheid	1: > 750 MW_{th} (> 250 MW _e)
A2		2: 200 – 750 MW_{th} (67 – 250 MW _e)
A3		3: < 200 MW_{th} (< 67 MW _e)
	<i>Relevante koelconcepten*: DK, NK, HK, LK (uitzonderlijk)</i>	
B1	B: Beperkte waterbeschikbaarheid	1: > 750 MW_{th} (> 250 MW _e)
B2		2: 200 – 750 MW_{th} (67 – 250 MW _e)
B3		3: < 200 MW_{th} (< 67 MW _e)
	<i>Relevante koelconcepten: NK, HK, LK</i>	
C1	C: Luchtkoeling / Minimale waterbeschikbaarheid	1: > 750 MW_{th} (> 250 MW _e)
C2		2: 200 – 750 MW_{th} (67 – 250 MW _e)
C3		3: < 200 MW_{th} (< 67 MW _e)
	<i>Relevante koelconcepten: NK (minimaal), HK (minimaal), LK</i>	

* DK = doorstroomkoeling, NK = natte koeling, HK = hybride koeling, LK = luchtkoeling

⁸ Een SMR van 750 MW_{th} produceert jaarlijks ~24 PJ thermische energie en kan dit omzetten in ~8 PJ elektrische energie. Voor de verschillende energievormen (warmte, elektriciteit) dient aldus rekening gehouden te worden met energetisch rendementen (~33% bij elektriciteitsproductie door LW-SMR's)

Op basis van deze koppeling krijgt elk gebied binnen Noord-Brabant – tenzij deze uitgesloten wordt door de beperkende factoren – één van deze negen labels. Bijvoorbeeld:

- Indien het betreffende gebied een hoog koelpotentieel (A) en hoge energievraag en dus hoog benodigd SMR-vermogen kent (1), dan wordt het label A1 aan dit gebied gekoppeld.
- Is voor een geselecteerd gebied het koelpotentieel minimaal (C) en de energievraag en dus het benodigd SMR-vermogen laag (3), dan wordt aan dit gebied het label C3 gekoppeld⁹.

Tenslotte moet opgemerkt worden dat bovenstaande kwalitatieve labels met betrekking tot koelpotentieel gebaseerd zijn op gegevens van restwarmte-afvoer van (nucleaire) energiecentrales bij volledige elektriciteitsproductie. Dit kan gezien worden als een conservatieve benadering aangezien de hoeveelheid restwarmte zal verminderen als de geproduceerde energie door SMR's vollediger benut wordt. Volledigere benutting, en dus minder restwarmte-afvoer, betreft bijvoorbeeld het toepassen van:

- Warmte-krachtkoppeling;
- Warmtenetten (met bijvoorbeeld restwarmte);
- Uitsluitend levering van proceswarmte;
- Hoger elektrisch rendement door GEN-IV SMR's (in verband met hogere procestemperaturen)

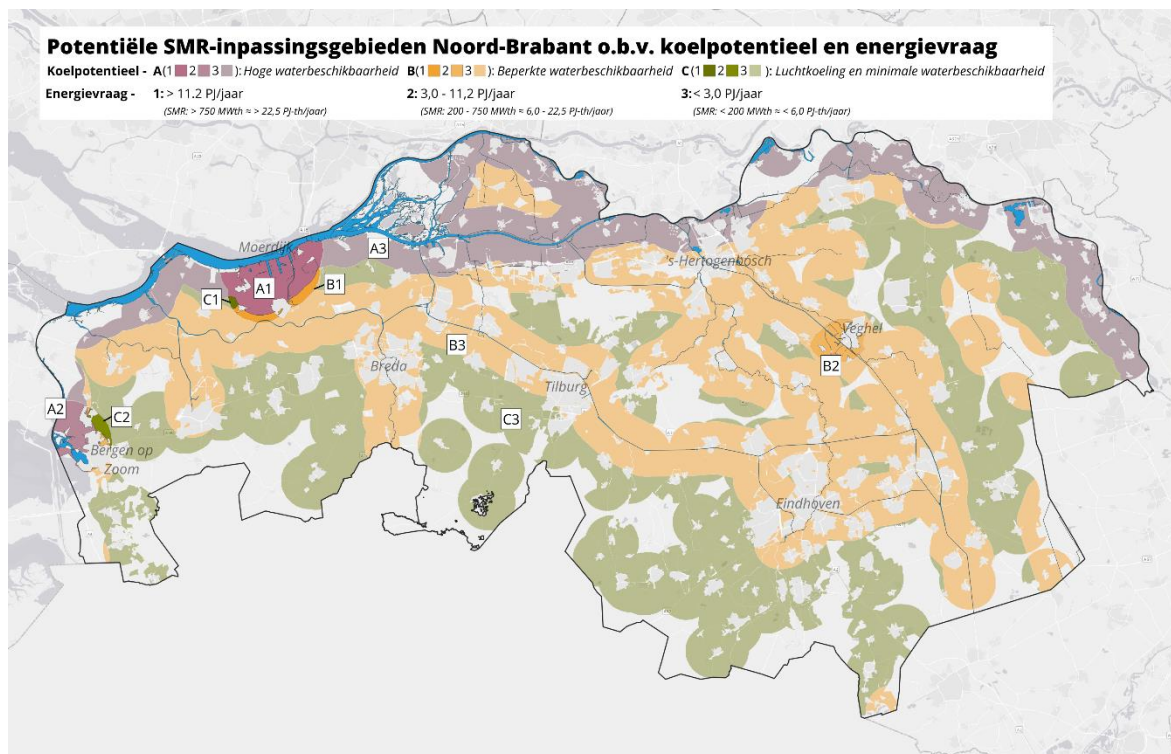
6.2 Potentiële gebieden

Met de labels A1 t/m C3 kunnen de doorsneden uit voorgaande hoofdstukken gecombineerd worden om een inzicht te bieden in potentiële SMR-inpassingsgebieden. Concreet wordt dit gedaan met behulp van de volgende doorsneden:

1. **Doorsnede I – Koelpotentieel** (Figuur 2-4): basisdoorsnede met waterbeschikbaarheid (A t/m C); waar kan technisch-economisch gekoeld worden rondom een type waterlichaam.
2. **Doorsnede II – In-te-passen SMR-vermogen** (Figuur 4-1): basisdoorsnede met in-te-passen SMR-vermogen (1 t/m 3) vanuit de gecombineerde energievraag van bedrijventerreinen; gecombineerd met doorsnede koelpotentieel komen er gebieden uit met de labels A1 t/m C3.
3. **Doorsnede III – Omgevingsfactoren: beperkingen** (Figuur 5-1): doorsnede met beperkende omgevingsfactoren waarmee op voorhand gebieden uitgesloten kunnen worden voor SMR-inpassing; deze gebieden worden uit de gecombineerde doorsneden I + II gehaald.

Het resultaat van deze combinatie is weergegeven in Figuur 6-1.

⁹ In het bijzonder betreft C1 een gebied waar hoge energievraag is, inpassingsmogelijkheden zijn maar echter minimale koelpotentie aanwezig is. Technisch gezien is SMR-inpassing in dit gebied mogelijk; economisch gezien is dat in principe (zeer) ongunstig maar dit hangt vooral samen met de toegevoegde economische waarde die energie-inbreng in het betreffende gebied heeft. Dergelijk economische (voor)waarden (zoals een maximale LCOE) zullen uit een andere studie moeten voortkomen en daarom worden gebieden met het label C1 in deze studie voor de volledigheid wel meegenomen.

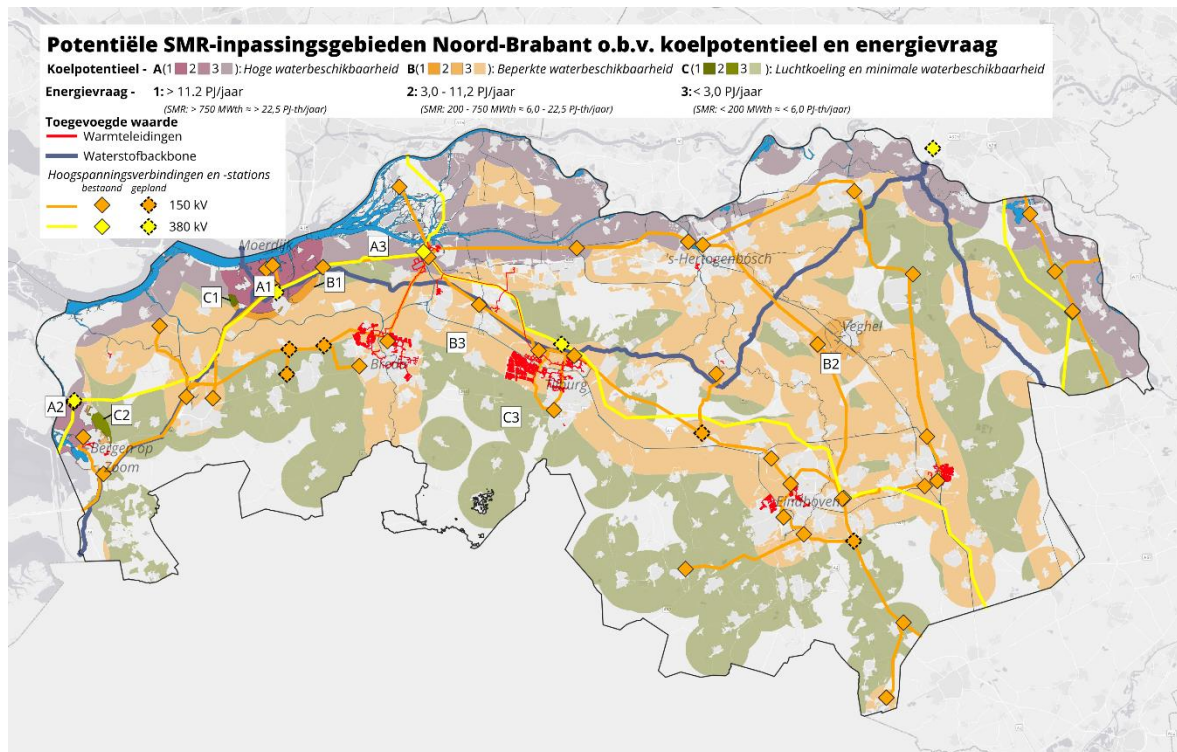


Figuur 6-1 Potentiële SMR-inpassingsgebieden op basis van koelpotentieel, energievraag en beperkende omgevingsfactoren.

Bovenstaande figuur laat op basis van de primaire selectiecriteria – koelpotentieel, energievraag en beperkende omgevingsfactoren – potentiële SMR-inpassingsgebieden zien. Om additioneel inzicht te bieden welke gebieden geschikt (of kansrijker) zijn voor SMR-inpassing, kan de volgende doorsnede met bovenstaande figuur gecombineerd worden:

- **Doorsnede IV – Omgevingsfactoren: toegevoegde waarde** (Figuur 5-2): doorsnede met aanwezige hoogspanningsinfrastructuur en mogelijkheden voor restwarmte-inzet. Dit is geen bepalende factor zoals de doorsnedes hiervoor, maar kan technisch-economische voordelen bieden in SMR-inpassing.

Het resultaat van deze combinatie, waarbij doorsnede IV bovenop Figuur 6-1 is gelegd, is weergegeven in Figuur 6-2. Zowel Figuur 6-1 als Figuur 6-2 zijn vergroot in Bijlage E te vinden.



Figuur 6-2 Potentiële SMR-inpassingsgebieden op basis van koelpotentieel, energievraag en beperkende omgevingsfactoren. Over deze inpassingsgebieden zijn gebieden getoond die van toegevoegde waarde kunnen zijn voor SMR-inpassing (mogelijke verhoging kansrijkheid)

Nog op te merken valt dat ook nog andere typen omgevingsfactoren een belangrijke rol spelen. Dit betreft dan met name beleidsmatige aspecten zoals ruimtelijke opgaves; dit dient in een vervolgfase nader onderzocht te worden (een voorbeeld hiervan is gegeven in onderstaand tekstkader).

Energie-Infrastructuur Moerdijk

In het BO-Leefomgeving (BOL) 2023 hebben Rijk en regio erkend dat het van belang is dat in de Powerport regio Moerdijk ruimte wordt gevonden voor energie-infraprojecten t.b.v. de klimaat- en energietransitie. Daarbij is een balans en samenhang tussen grootschalige industrieontwikkeling en structurele leefbaarheidsinterventies een voorwaarde voor een kansrijke uitwerking van de nationale en provinciale ambities op het gebied van klimaat-, energie- en grondstoffentransitie. In het BO-Leefomgeving (BOL) 2025 hebben Rijk en regio besloten dat een strategische uitbreiding onafwendbaar is en hiervoor is indicatief onderbouwd 700 hectare aan ruimte nodig. In deze ruimte zitten de energie-infrastructuur projecten uit het PEH en het PoM 380 kV station, daarnaast is ruimte nodig voor verduurzaming van de bestaande industrie en de kabels en leidingen en de waterbergopgave. Het plaatsen van een kerncentrale in het gebied behoort derhalve niet tot de scope van de opgave en zou een additionele ruimtevraag opleveren, die niet in de indicatief onderbouwde 700 hectare aan ruimtevraag zit. En valt daarmee buiten de scope van het BOL besluit van juni 2025.

7 Samenvattende conclusie

Het doel van dit ruimtelijk onderzoek is het inzichtelijk maken van de mogelijkheden en voorwaarden voor inpassing van SMR's binnen de provincie Noord-Brabant. Dit onderzoek omvat een eerste verkenning waar bepaalde typen SMR's een toegevoegde waarde voor het Brabants energiesysteem kunnen leveren. Drie doorsnedes zijn hierin bepalend:

- I. **Koelpotentieel:** waterbeschikbaarheid om restwarmte vanuit een SMR af te voeren;
- II. **In-te-passen SMR-vermogen:** potentieel in-te-passen SMR-vermogen op basis van de gecombineerde energievraag van bedrijventerreinen;
- III. **Beperkende omgevingsfactoren:** omgevingsfactoren die in deze fase op voorhand uitgesloten kunnen worden voor SMR-inpassing (woonkernen en Natura 2000).

Gecombineerd geven deze doorsnedes voor heel Noord-Brabant weer waar *potentie* is voor SMR-inpassing. Gebieden onderscheiden zich op basis van koelpotentieel en in-te-passen SMR-vermogen (d.w.z. het SMR-vermogen dat aansluit bij de energievraag van dat gebied). Een vierde doorsnede laat zien welke aanwezigheid van geplande infrastructuur van toegevoegde waarde kunnen zijn voor SMR-inpassing:

- IV. **Toegevoegde waarden:** omgevingsfactoren die technisch-economische voordelen kunnen bieden voor SMR-inpassing (zoals hoogspanningsverbindingen en warmteleidingen).

Deze doorsnede is geen bepalende factor binnen dit ruimtelijk onderzoek zoals de eerste drie doorsnedes, maar is een verkennende stap richting het evalueren van de *kansrijkheid* van SMR-inpassing.

Dit onderzoek kent de volgende bevindingen:

- Binnen de provincie Noord-Brabant bevindt het meeste koelpotentieel zich aan de grote rivieren in het noorden. Gereguleerde kanalen en kleinere rivieren verspreid door de provincie bieden significant minder koelpotentieel. Overige koelpotentie is toegekend aan luchtkoeling, al dan niet in combinatie met overige aanwezige waterlichamen.
- Technisch gezien vormt een beperkt koelpotentieel geen obstakel om restwarmte te kunnen afvoeren. Het gebruik van andere koeltechnieken dan doorstroomkoeling gaat echter gepaard met rendementsverlies. Vanuit technisch-economisch perspectief zijn algemene uitgangspunten:
 - Grote SMR's bij voorkeur langs de grote rivieren;
 - Kleinere SMR's zijn overal inpasbaar, met waar mogelijk gebruik van water voor koeling.
 - Restwarmte-inzet (voor bijvoorbeeld warmtenetten) kan de koelbehoefte van een SMR verminderen (en kan daarmee economisch interessanter worden).
- Bijna alle bedrijventerreinen in Noord-Brabant, individueel of geclusterd, kunnen voorzien worden van energie met laagvermogende SMR's ($< 200 \text{ MW}_{\text{th}}$). Specifieke energieclusters die een hogere

energievraag hebben zijn de terreinen bij Theodorus haven en Veghel (200 – 750 MW_{th}), en het industrieterrein bij Moerdijk (> 750 MW_{th}).

Concluderend is SMR-inpassing op Brabants grondgebied – op basis van technische eigenschappen van een SMR – in veel gebieden mogelijk, waarbij koeling en energievraag als belangrijkste uitgangspunten zijn genomen. Het evalueren van kansrijkheid van SMR-inpassing in potentiële gebieden kan mogelijk het uitgangspunt zijn van een volgende fase waarin beleidsmatige en economische aspecten aan de orde kunnen komen, zoals ruimtelijke opgaves en business cases, op basis van de in deze studie aangereikte technisch-economische aspecten. Daarnaast zal gekeken moeten worden welke ontwikkelingen op nationaal niveau plaatsvinden die mogelijk van invloed zijn op de keuzes van Brabant.

Referenties

- [1] Rijksoverheid, „Strategie voor kleine modulaire kernreactoren in Nederland,” 17 oktober 2025. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2025/10/17/100257283-smr-strategie>. [Geopend 4 november 2025].
- [2] „NRG, „Small Modular Reactors (SMR's),” mei 2023. [Online]. Available: <https://www.nrg.eu/onderzoek/onderzoek-naar-kernenergie/small-modular-reactors>.”.
- [3] NRG, „Small Modular Reactors 2023 - Marktanalyse,” 1 mei 2023. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/05/01/small-modular-reactors-2023---marktanalyse>.
- [4] OECD NEA, „The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Third Edition,” 11 september 2025. [Online]. Available: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_108326/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-third-edition. [Geopend 22 oktober 2025].
- [5] Provincie Noord-Brabant, „Bouwstenen voor het Brabants energieperspectief, Provincie Noord-Brabant,” 2024. [Online]. Available: <https://www.brabant.nl/onderwerpen/energie/elektriciteit/energiesysteem-toekomst/#hda6c5234-6676-010c-dd1c-5bd9dce57340>.
- [6] Provincie Noord-Brabant, „Bijlage bij Bouwstenen voor het Brabants energieperspectief, Provincie Noord-Brabant,” 2024. [Online]. Available: <https://www.brabant.nl/onderwerpen/energie/elektriciteit/energiesysteem-toekomst/#hda6c5234-6676-010c-dd1c-5bd9dce57340>.
- [7] NRG PALLAS, „Verkenning SMR-inpassing provincie Gelderland,” 2025. [Online]. Available: <https://www.gelderland.nl/themas/duurzaamheid/energietransitie/energie-opwek/kernenergie>.
- [8] European Commission, „IPPC - Reference Document on the Application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems,” december 2001. [Online]. Available: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/industrial-cooling-systems>. [Geopend 18 december 2024].
- [9] „Cooling Power Plants,” World Nuclear Organisation, 2020. [Online]. Available: https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants?utm_source=chatgpt.com. [Geopend 29 8 2025].

- [10] PBL, „Basiskaart Aquatisch: de Watertypenkaart 2013,” 16 10 2024. [Online]. Available: <https://data.overheid.nl/dataset/13653-basiskaart-aquatisch--de-watertypenkaart-2013>. [Geopend 03 06 2025].
- [11] PBL, „Basiskaart Aquatisch: de Watertypenkaart,” Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), 2010.
- [12] CBS, „Aardgas en elektriciteit bedrijventerreinen Noord-Brabant, 2021-2022,” 28 06 2024. [Online]. Available: <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2024/26/aardgas-en-elektriciteit-bedrijventerreinen-noord-brabant-2021-2022>. [Geopend 11 09 2025].
- [13] Provincie Noord-Brabant, „Grote Oogst (Bedrijventerreinen),” 2025. [Online]. Available: <https://www.brabant.nl/groteoogst/>. [Geopend 11 09 2025].
- [14] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW), „Wegwijzer Nationaal beleid nucleaire veiligheid en stralingsbescherming 2022,” 31 juli 2022. [Online]. Available: <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/07/31/wegwijzer-nationaal-beleid-nucleaire-veiligheid-en-stralingsbescherming-2022>. [Geopend 18 december 2024].
- [15] ANVS, „Kerncentrale bouwen: hoe gaat dat in zijn werk,” [Online]. Available: <https://www.autoriteitnvs.nl/voorlichting/nieuwe-kerncentrale>. [Geopend 18 december 2024].
- [16] IAEA, „Small Modular Reactors Catalogue 2024”.
- [17] ANVS, Handreiking VOBK, www.autoriteitnvs.nl/documenten/richtlijn/2023/04/05/handreiking-vobk, 5 april 2023.

Lijst met tabellen, figuren en afkortingen

Lijst van tabellen

TABEL 1-1 VOORKEUR VAN INZET VAN DRAGERS VOOR NIET-ELEKTRISCHE ENERGIEVRAAG PER SECTOR [4].....	19
TABEL 2-1 RENDEMENT VERSCHILLENDE KOELCONCEPTEN, ZIE OOK [7, 8]	24
TABEL 6-1 LABELOMSCHRIJVING T.B.V. SMR-INPASSING.....	39
TABEL 0-1 OVERZICHT VAN SMR-ONTWERPEN MET BASISEIGENSCHAPPEN BINNEN SMR-CATEGORIE 3.....	59
TABEL 0-2 OVERZICHT VAN SMR-ONTWERPEN MET BASISEIGENSCHAPPEN BINNEN SMR-CATEGORIE 2.....	60
TABEL 0-3 OVERZICHT VAN SMR-ONTWERPEN MET BASISEIGENSCHAPPEN BINNEN SMR-CATEGORIE 1.....	61

Lijst van figuren

FIGUUR 1-1 VERWACHTTE ONTWIKKELING BRABANTSE ENERGIEVRAAG [4].....	20
FIGUUR 1-2 VERHOUDING IN ENERGIEVRAAG TUSSEN VERSCHILLENDE SECTOREN NU EN IN 2050 [4].	21
FIGUUR 1-3 ONTWIKKELING ENERGIEVRAAG VOOR DE SECTOREN 'GEBOUWDE OMGEVING' EN 'INDUSTRIE' TOT 2050 [4].	21
FIGUUR 2-1 VISUALISATIE RENDEMENTSVERLIES VERSCHILLENDE KOELCONCEPTEN.	25
FIGUUR 2-2 OVERZICHT WATERSITUATIE NOORD-BRABANT.....	26
FIGUUR 2-3 SELECTIE KOELPOTENTIEEL VANUIT BESCHIKBARE WATERLOPEN.	27
FIGUUR 2-4 DOORSNEDE KOELPOTENTIEEL O.B.V. TECHNISCH-ECONOMISCHE OVERWEGINGEN. DE STROKEN ZIJN VOOR KOELPOTENTIEEL A EN B BEIDE 3 KILOMETER BREED PER ZIJDE. ALLES WAT NIET ONDER KOELPOTENTIEEL A EN B VALT, IS PER DEFINITIE KOELPOTENTIEEL C.	28
FIGUUR 3-1 VERDELING ELEKTRICITEITSVRAAG VAN BEDRIJVENTERREINEN BINNEN NOORD-BRABANT.....	30
FIGUUR 3-2 VERDELING WARMTEVRAAG VAN BEDRIJVENTERREINEN BINNEN NOORD-BRABANT	30
FIGUUR 3-3 VERDELING TOTALE ENERGIEVRAAG VAN BEDRIJVENTERREINEN NOORD-BRABANT.....	31
FIGUUR 4-1 VERDELING IN-TE-PASSEN SMR-VERMOGENS O.B.V. GECOMBINEERDE ENERGIEVRAAG.....	33
FIGUUR 5-1 OMGEVINGSFACTOREN DIE BEPERKEND ZIJN VOOR POTENTIËLE SMR-PLAATSING.....	37
FIGUUR 5-2 OMGEVINGSFACTOREN DIE VAN TOEGEVOEGDE WAARDE ZIJN VOOR POTENTIËLE SMR-PLAATSING. ÉÉN GEPLAND 380 KV HOOGSPANNINGSSTATION VALT BUITEN DE GRENZEN VAN DE PROVINCIE, MAAR IS MEEGENOMEN VOOR MOGELIJKE RELEVANTIE.....	38
FIGUUR 6-1 POTENTIËLE SMR-INPASSINGSGEBIEDEN OP BASIS VAN KOELPOTENTIEEL, ENERGIEVRAAG EN BEPERKENDE OMGEVINGSFACTOREN.....	41
FIGUUR 6-2 POTENTIËLE SMR-INPASSINGSGEBIEDEN OP BASIS VAN KOELPOTENTIEEL, ENERGIEVRAAG EN BEPERKENDE OMGEVINGSFACTOREN. OVER DEZE INPASSINGSGEBIEDEN ZIJN GEBIEDEN GETOOND DIE VAN TOEGEVOEGDE WAARDE KUNNEN ZIJN VOOR SMR-INPASSING.	42
FIGUUR 0-1 OPBOUW WETTELIJK KADER [13].	50

FIGUUR 0-1 [FIGUUR 6-1 VERGROOT] POTENTIËLE SMR-INPASSINGSGEBIEDEN OP BASIS VAN KOELPOTENTIEEL, ENERGIEVRAAG EN BEPERKENDE OMGEVINGSFACTOREN.....	62
FIGUUR 0-2 [FIGUUR 6-2 VERGROOT] POTENTIËLE SMR-INPASSINGSGEBIEDEN OP BASIS VAN KOELPOTENTIEEL, ENERGIEVRAAG EN BEPERKENDE OMGEVINGSFACTOREN. OVER DEZE INPASSINGSGEBIEDEN ZIJN GEBIEDEN GETOOND DIE VAN TOEGEVOEGDE WAARDE KUNNEN ZIJN VOOR SMR-INPASSING.	63

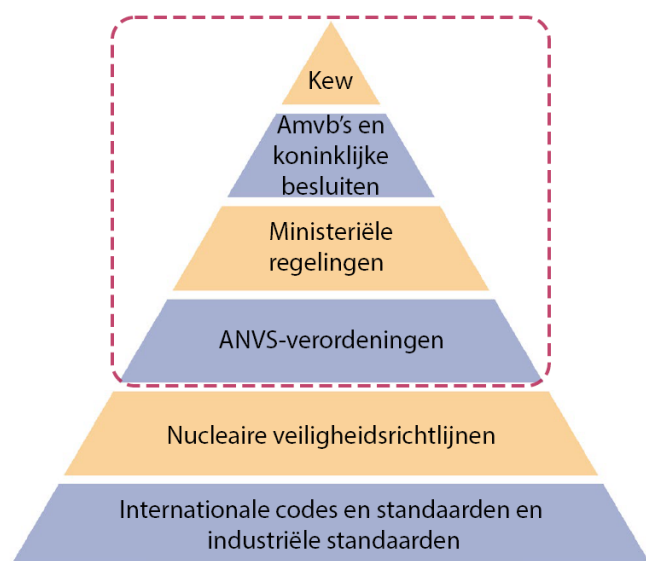
Lijst van afkortingen en begrippen

AMR	<i>Advanced Modular Reactor</i>
ANVS	Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming
FOAK	<i>First of a kind</i>
GEN-III	Generatie 3; ook wel de huidige type kernreactoren op basis van lichtwater
GEN-IV	Generatie 4; ook wel de geavanceerde reactortypes, vaak op basis van een ander koelmiddel dan lichtwater
Koeltechnieken	De verschillende technieken waarop de restwarmte van een kerncentrale afgevoerd kan worden:
<ul style="list-style-type: none"> • DK • NK • HK • LK 	<ul style="list-style-type: none"> • Doorstroomkoeling • Natte koeling • Hybride koeling • Luchtkoeling
LLWR	<i>Large Light Water Reactor</i> ; ook wel conventionele kerncentrale of <i>Nuclear Power Plant</i> (NPP) genoemd
LW-SMR	<i>Light Water Small Modular Reactor</i>
Moderator	Materiaal (in gas, vloeistof, of vaste vorm) dat in staat is neutronen (in hun energetisch spectrum) af te remmen, ten behoeve van kernsplijting
MW _e	Elektrisch vermogen (opgewekt door stoom aangedreven turbine)
MW _{th}	Thermisch vermogen (totaal geproduceerde energie in de vorm van warmte; MW _{th} > MW _e)

Multi-module	Ontwerp waarbij meerdere (kleine) reactoren worden aangestuurd vanuit een enkele regelzaal
NOAK	<i>Nth of a kind</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i> (drukwaterreactor)
Reactormodule	Een kernreactor die onderdeel uitmaakt van een <i>Unit</i> (bestaande uit een of meerdere reactormodules)
SMR	<i>Small Modular Reactor</i>
Splijstof	Materiaal dat in een kernreactor wordt ingezet om warmte te genereren, doormiddel van kernsplijting.
Unit	De energieleverende eenheid. Deze kan bestaan uit een of meerdere reactormodules.
Vermogensreactor	Een kernreactor die ingezet wordt voor het produceren van elektriciteit.

Bijlage A Wet- en regelgeving, vergunningen

De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) ziet er op toe dat de nucleaire veiligheid en stralingsbescherming in Nederland voldoen aan de hoogste (internationale) eisen. De ANVS stelt daarvoor regels op, verleent vergunningen, ziet toe op de naleving daarvan en kan handhavend optreden. De ANVS is een zelfstandig bestuursorgaan (zbo) en valt onder de verantwoordelijkheid van de minister van Infrastructuur en Waterstaat. Het Nederlands Wettelijk Kader ziet er als volgt uit:



Figuur 0-1 Opbouw wettelijk kader [14].

De Kernenergiewet (Kew) is een raamwet en richt zich zodoende op hoofdlijnen. De concrete invulling wordt gegeven door de onderliggende bindende vormen zoals besluiten, regelingen en verordeningen. Deze bindende vormen baseren zich voornamelijk op de onderliggende richtlijnen, codes en standaarden (zoals van de IAEA en WENRA).

Ten aanzien van nucleaire nieuwbouw (waaronder SMR's) in Nederland geldt het volgende [15]:

1. **Waar kan in Nederland een kerncentrale worden gebouwd?**

Overall in Nederland mogen kerncentrales gebouwd worden, als er aan de veiligheidseisen wordt voldaan en het omgevingsplan dat toestaat.

2. **Wie beoordeelt of een plek geschikt is voor de bouw van een kerncentrale?**

Dit gebeurt in de volgende stappen:

Omgevingsplan

Als eerste beoordeelt het bevoegd gezag in het kader van het omgevingsplan de geschiktheid van de beoogde locatie voor een kerncentrale. De gemeente is het bevoegd gezag voor de meeste nucleaire installaties, bijvoorbeeld bij kleine modulaire reactoren. De Rijksoverheid is het bevoegd gezag bij projecten van nationaal belang, zoals bij grote kerncentrales.

Plan milieueffectrapport

Om de gevolgen voor de omgeving in kaart te brengen, maakt de initiatiefnemer een plan-milieueffectrapport (plan-MER). Het bevoegd gezag bepaalt vooraf de gewenste reikwijdte en het detailniveau van dit plan-MER en schrijft daar een notitie over. Ook beoordeelt het bevoegd gezag de uitkomsten ervan.

Veiligheidsdossier

De besluitvorming van de ANVS vindt pas plaats als er een volledig veiligheidsdossier is aangeleverd waarin alle veiligheidsaspecten in detail zijn uitgewerkt. De ANVS kan dus bij de planvorming hier nog geen uitsluitsel over geven maar alleen aandachtspunten meegeven.

3. Wat moet er worden gedaan om een kerncentrale te kunnen bouwen en in bedrijf te nemen?

Er zijn meerdere vergunningen nodig om een kerncentrale te kunnen bouwen en in bedrijf te nemen. Om een kerncentrale te kunnen bouwen is een 'oprichtingsvergunning' op grond van de Kernenergiewet (Kew) nodig. Om de kerncentrale vervolgens in 'bedrijf te nemen' (in werking te brengen) en in bedrijf te houden is een aparte Kew-vergunning nodig.

Naast vergunningen op grond van de Kew zijn er ook andere vergunningen nodig. Te denken valt hierbij aan:

- Een omgevingsvergunning voor het bouwen;
- (Eventueel) een aanpassing van het bestemmingsplan;
- Vergunningen in verband met directe lozingen op het oppervlaktewater;
- Vergunningen (of ontheffingen) ter bescherming van flora en fauna.

4. Aan welke eisen moet een nieuwe kerncentrale voldoen?

De vergunningaanvrager moet in ieder geval het volgende doen vóór een vergunning aangevraagd kan worden bij de ANVS:

- De aanvrager moet een veiligheidsanalyse doen. Hiermee moet de aanvrager aantonen dat de centrale aan de meest recente veiligheidseisen voldoet voor nieuwe kerncentrales.

- Naast deze veiligheidsanalyse moet de aanvrager ook een veiligheidsrapport opstellen. Hierin staat een samenvatting van de veiligheidsanalyse.
- Verder moet de aanvrager een milieueffectrapport (laten) opstellen. In dit rapport wordt in beeld gebracht wat de milieugevolgen van het voorgenomen plan zijn.

Daarna kan de aanvrager de vergunningaanvraag indienen bij de ANVS. De vergunningaanvraag moet voldoen aan alle eisen op grond van wet- en regelgeving. In de aanvraag moet ook staan welke technische veiligheidswaarborgen er komen. Het gaat dan om veiligheid van de techniek van kernenergie maar ook de veiligheid van het vervaardigen, bewerken of verwerken van splijtstoffen en het opslaan van splijtstoffen in het gebouw.

Bijlage B Marktanalyse SMR's

In het coalitieakkoord van het kabinet Rutte-IV werd een stevige ambitie wat betreft de energietransitie aangekondigd met een belangrijke rol voor kernenergie. Vanuit de overheid werden in dit kader nucleair-technologische ontwikkelingen met grote interesse gevolgd, zo ook de opkomst van SMR's. In opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) heeft NRG|PALLAS hiertoe een marktanalyse uitgevoerd [3]. Het doel hiervan was om een overzicht te krijgen van de algemene status van een selectie van 13 SMR's. Het overzicht uit deze marktanalyse kan dienen als basis voor zowel beleidsmakers als industrie om inschattingen te maken voor eventuele mogelijkheden in Nederland.

In de marktanalyse zijn de beschouwde SMR's op basis van hun inzet ingedeeld in vier groepen¹⁰:

1. **Lichtwater SMR's**: dit zijn SMR's waarbij het koelmiddel gewoon water is. De gebruikte techniek is conventioneel en bekend uit bestaande kerncentrales. Opgenomen in de selectie zijn de types NuScale, Rolls-Royce SMR, BWRX-300 en NUWARD.
2. **Micro-range SMR's**: dit zijn SMR's met een klein elektrisch vermogen (tot 20 MWe). Geselecteerd zijn Last Energy en eVinci.
3. **Gesmoltenzout SMR's**: de SMR's in deze groep maken gebruik van gesmolten zout als koelmiddel. Opgenomen zijn Thorizon, Kairos Power FHR en IMSR.
4. **Diverse geavanceerde SMR's**: in deze groep zijn de SMR's metaalgekoeld of gasgekoeld. Opgenomen zijn Westinghouse LFR, Natrium, HTR-PM en Xe-100.

De selectie is gemaakt op basis van SMR's die reeds binnen hun categorie relatief ver ontwikkeld zijn (zie [4, 16]) of waarvan op basis van *engineering judgement* is aangenomen dat ze in de Nederlandse context interessant kunnen zijn. De selectie dient niet als 'compleet' of 'definitief' gezien te worden.

Samenvattende conclusie Marktanalyse

Vergunningverlening als belangrijk deelaspect voor planning

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

Veel SMR-ontwerpen hebben passieve veiligheidskenmerken en sommigen zijn inherent veilig. Dit kan het vergunningsproces voor dit soort nieuwe concepten – maar ook voor bekende - vergemakkelijken, als er al elders in de wereld uitgebreid is gekeken naar de veiligheidsaspecten van een ontwerp en een Bevoegd Gezag

¹⁰ Na de SMR Marktanalyse zijn de vier groepen beperkt tot twee – lichtwater en geavanceerd – voor compleetheit en communiceerbaarheid.

of certificerende instantie dit al transparant heeft beoordeeld – en het Nederlandse Bevoegd Gezag heeft kunnen ‘meekijken’.

Beoordeling marktintroductie van SMR's in Nederland

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

- Voor **lichtwater SMR's**, gebaseerd op een NOAK SMR (Nth of a Kind), is een minimale doorlooptijd van circa 7 jaar voor vergunning en bouw realistisch (*zie ook onderstaand kader*).
- Voor **micro-range SMR's**, rekening houdend met nog geen ervaring van het Bevoegd Gezag, maar gelet op hun kleinere omvang, is de inschatting dat de vergunningverlening waarschijnlijk langer is (de verwachting is echter niet veel langer) en bouwtijd korter dan die voor LWR SMR's.
- Voor **geavanceerde SMR's** zal de doorlooptijd waarschijnlijk langer zijn dan lichtwater SMR's gezien het stadium waarin deze concepten zich bevinden en de daarmee samenhangende onzekerheid.

Bijlage C Locatievoorwaarden

Een locatie is geschikt als tegemoetgekomen kan worden aan de wettelijke eisen gesteld aan veiligheid en omgeving. Daarnaast zijn economische randvoorwaarden van toepassing.

Veiligheid

De locatie moet als veilig worden beoordeeld zoals vereist in de nucleaire wet- en regelgeving. Dit betreft de volgende punten:

Natuurinvloeden

- **Aardbeving**

Seismische activiteit kan het gevolg zijn van menselijke activiteiten of een natuurlijke oorzaak hebben. Natuurlijke aardbevingen van grote omvang komen in Nederland (nagenoeg) niet voor. Wel is in sommige gebieden meer/hogere seismische activiteit, zoals in Zuid-Limburg. Gaswinning is een voorbeeld van menselijke activiteit die zogenaamde geïnduceerde aardbevingen kunnen veroorzaken. Voor een kerncentrale zal de respons van de nucleaire installatie op een vastgestelde opgelegde aardbeving (vanuit bouwvoorschriften en nucleaire regelgeving) bepaald moeten worden.

- **Overstroming**

Overstroming van de installatie of installatiedelen kan gevolgen hebben voor de werking van veiligheidssystemen. Een voorbeeld hiervan is stroomuitval. Van een locatie moet bepaald worden in welke mate en met welke frequentie overstroming plaatsvindt. De frequentie (hoe vaak per 10.000 jaar bijvoorbeeld) en de mate van overstroming (waterhoogte op het terrein van de installatie) moet dusdanig zijn dat de gevolgen voor de installatie binnen de wettelijke limieten vallen.

- **Harde wind**

De locatie moet getoetst worden op het voorkomen van exceptionele harde wind in de diverse verschijningsvormen (zoals stormen en wervelvinden). Ook hier zal bepaald moeten worden in welke mate en met welke frequentie dit voorkomt. Eventuele gevolgen van harde wind zullen ook hier binnen de wettelijke limieten moeten vallen.

- **Natuurbranden**

De combinatie van natuurbrand en andere factoren (zoals windrichting en overslag) moeten beoordeeld worden op risico's voor het functioneren van de installatie.

Menselijke activiteiten

Activiteiten die risico's voor het functioneren van de installatie met zich meebrengen moeten bepaald en beoordeeld worden. Deze activiteiten betreffen bijvoorbeeld vliegbewegingen, nabijgelegen (explosiegevaarlijke) industrie en militaire oefenterreinen.

- **Infrastructuur**

Een infrastructuur die tenminste toereikend is voor de eisen die gesteld zijn aan de bereikbaarheid voor hulpdiensten en het kunnen leveren/in werking stellen van veiligheidsvoorzieningen.

- **Warmteafvoer naar de omgeving bij ongevallen**

De restwarmte dient te allen tijde afgevoerd te kunnen worden naar de omgeving, ook bij onvoorzienbare ongevallen. Het betreft de mogelijkheden om warmte naar de 'ultimate heat sink' (grote waterhoeveelheid) te kunnen afvoeren. Er zijn reactorconcepten die alle restwarmte naar de buitenlucht kunnen afvoeren.

- **Preparatiezone**

Om de inrichting is een speciale zone voorzien. Dit betreft de preparatiezone. Deze zone moet gebruikt kunnen worden in ongevalssituaties voor hulpdiensten en geplande voorzieningen. De grootte van de zone is afhankelijk van het type en grootte van de SMR; voor sommige kleine SMR's wordt een dergelijke zone waarschijnlijk niet nodig geacht. Bij normale bedrijfsvoering zijn geen gebruiksrestricties van toepassing voor deze zone (hoort dus niet bij de inrichting). De zone is maximaal 5 km volgens de ontwerpeisen in de VOBK [17], die met name voor grote kerncentrales is geschreven. Binnen deze zone moeten mitigerende maatregelen voor aanwezigen (omwonenden) kunnen worden toegepast (zoals schuilen, evacuatie tot 3 km).

Algemene eisen

- **Grondspecificaties**

De locatie dient geschikt te zijn voor langdurige grondbelasting alsook te voldoen aan de respons op een, vanuit de regelgeving, opgelegde seismische activiteit.

- **Warmteafvoer**

De restwarmte moet afgevoerd kunnen worden, afhankelijk van de SMR grootte en koeltechniek meestal door middel van een betrouwbaar en voldoende groot waterlichaam. Dit kan een stroming zijn (rivier, kanaal) of stagnant (stilstaand) water (zoals een meer). Zoals besproken is luchtkoeling technisch ook mogelijk.

- **Afstand installatie tot waterinlaat**

Afhankelijk van het vermogen zal het wateraanbod op een afstand van de installatie moeten liggen dat economisch haalbaar is. Bij grote onttrekkingsdebieten (grote koelwaterinlaatstroom) in combinatie met lange aanvoerleidingen kan aanzienlijk meer pompvermogen nodig zijn. Dit leidt tot een rendementsvermindering van de energiecentrale. Verder kan de aanleg van een lang leiding tracé kostbaar

zijn. Conventionele kerncentrales, zoals de kerncentrale Borssele, liggen vaak direct aan het water maar kan de afstand alsnog honderden meters bedragen (de koel-inlaatleiding van kerncentrale Borssele meet circa 500 meter bij een debiet van rond 17m³/s). Voor de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten bedraagt de lengte van de inlaatleiding circa 2 km bij een debiet van rond 0,9 m³/s.

- **Infrastructuur**

Een goede infrastructuur is vereist onder andere met betrekking tot aansluitingen op afnemers, het elektriciteitsnetwerk, bereikbaarheid leveranciers, splijtstof aan-en afvoer etc.

- **Omgeving en Bestemmingen**

De installatie moet ingepast kunnen worden in de omgeving. Dit betekent geen of beperkte hinder voor beschermde diersoorten en vegetatie. Daarnaast mag de locatie ook geen noemenswaardige hinder ondervinden van de natuur. De installatie en gevolgen van de bedrijfsvoering moet passen binnen de bestemmingsplannen. De bestemmingsplannen moeten zo nodig aangepast kunnen worden.

- **Regionale en nationale visies en strategieën**

Inpassing in regionale en nationale visies en strategieën. Voor de verschillende energiedragers (elektriciteit, warmte, duurzame gassen) en opwekmethoden (zon/wind, organisch materiaal, fossiel, nucleair maar ook via flexibele E via batterijen/andere E-opslag) zijn uitgangspunten en randvoorwaarden opgesteld die er toe moeten leiden dat aan de energietransitie doelstellingen wordt voldaan. De locatie en het type SMR moeten hier aan tegemoetkomen.

Bijlage D SMR-ontwerpen




Hieronder wordt in drie tabellen een overzicht gegeven van SMR-ontwerpen binnen de gegeven SMR-vermogenscategorieën uit hoofdstuk 4:

SMR-categorie 1	SMR-categorie 2	SMR-categorie 3
750 – 1500 MW _{th}	200 – 750 MW _{th}	≤ 200 MW _{th}
250 – 500 MW _e	67 – 250 MW _e	≤ 67 MW _e

De tabellen worden gegeven in oplopend thermisch vermogen, dus met SMR-categorie 1 in Tabel 0-1, categorie 2 in Tabel 0-2 en categorie 3 in Tabel 0-3. In de tabellen is eenzelfde ordening in oplopend thermisch vermogen aangehouden.

Deze tabellen zijn origineel opgesteld in de Gelderland-studie [7]. De selectie aan SMR-ontwerpen en de gegeven basiseigenschappen komen voornamelijk uit de SMR-dashboard van de OECD NEA [4], met eventueel informatie aangevuld via websites van *vendors*. Bij de ontwerpen is een onderscheid gemaakt tussen ontwerpen gebaseerd op **lichtwatertechnologie** en niet-lichtwatertechnologieën onder de naam **geavanceerd**. Dit onderscheid is gemaakt omdat de verwachting is dat over het algemeen SMR-ontwerpen o.b.v. lichtwatertechnologie sneller voor Nederland marktrijp zijn t.o.v. geavanceerde technologie.









Voor alle SMR-ontwerpen wordt de leverancier, het thermisch en elektrisch vermogen, en de aanleveringstemperatuur gegeven. Bij de aanleveringstemperatuur wordt een indicatie gegeven binnen welke temperatuurscategorie dit valt (zie hieronder). Informatie over het elektrisch vermogen voor geavanceerde ontwerpen is vaak niet direct beschikbaar, voornamelijk omdat de beoogde inzet voor die SMR's als directe warmtelevering wordt gezien. In deze gevallen is het elektrisch vermogen berekend door conservatief een omzettefficiëntie van 33% aan te nemen van thermisch naar elektrisch vermogen.

LT	MT	HT
		
≤ 350 °C	350 – 700 °C	≥ 700 °C









Tabel 0-1 Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen SMR-categorie 3.

ONTWERP	LEVERANCIER	EIGENSCHAPPEN			BIJZONDERHEDEN
		MW _{th}	MW _e	T [°C]	
JIMMY SMR	JIMMY ENERGY	10	3	 550	
EVINCI MICROREACTOR	WESTINGHOUSE	15	5	 750	
AURORA POWERHOUSE	OKLO	40	13	 500	
MMR	ULTRA SAFE NUCLEAR	45	15	 660	Multi-module: batterij-idee waarbij eenheden 'in-serie' geplaatst worden. Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met <i>single reactor units</i> .
LDR-50	STEADY ENERGY	50	-	 125	Gericht op stadverwarming : geen elektrisch vermogen.
FLEX	MOLTENFLEX	60	20	 700	
PWR-20	LAST ENERGY	60	22	 300	
CAREM25	CNEA	100	25	 326	
COPENHAGEN ATOMICS	COPENHAGEN ATOMICS	100	33	 560	
HTMR-100	STRATEK GLOBAL	100	33	 750	
SEALER	BLYKALLA	140	46	 550	

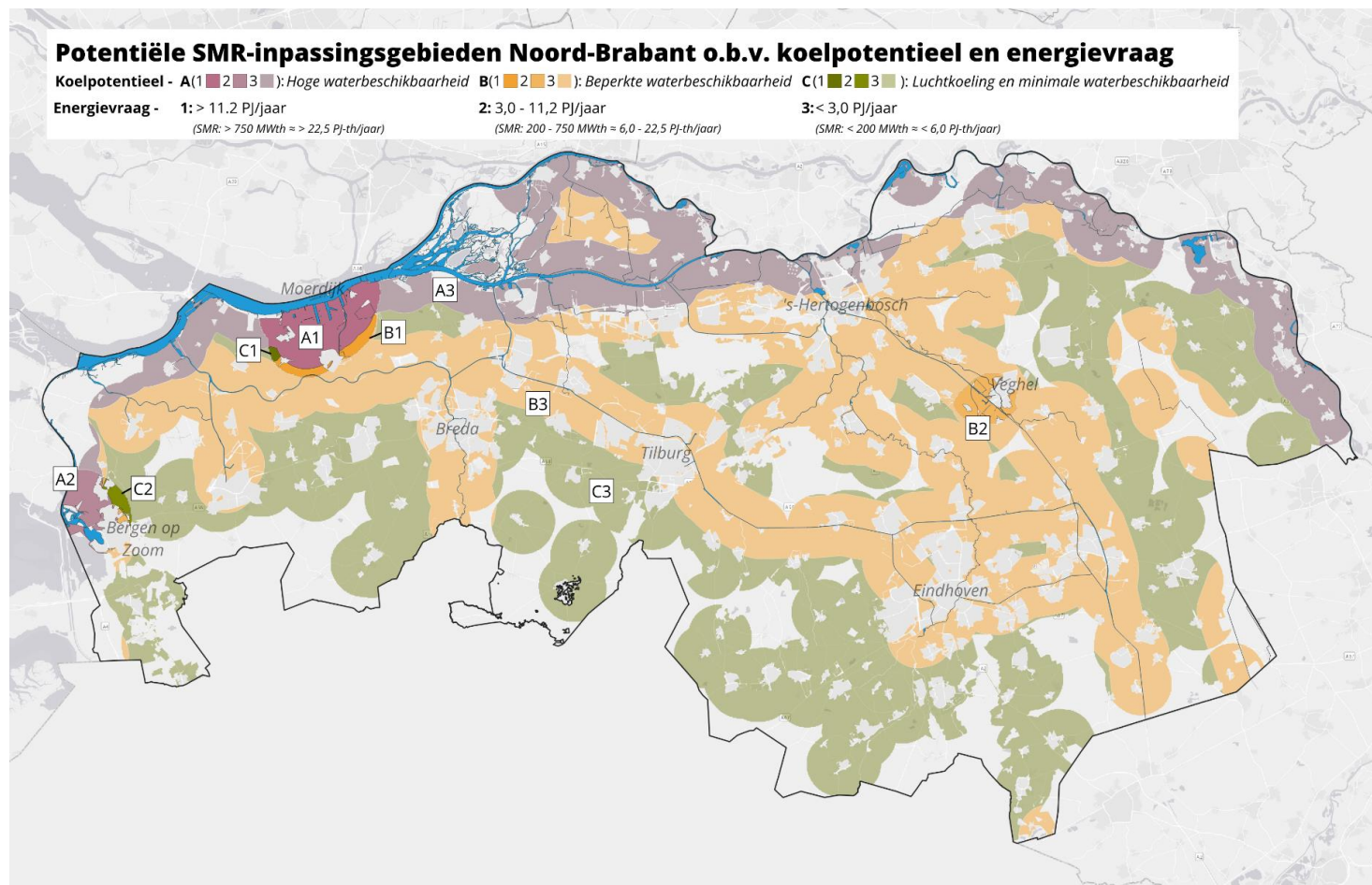
Tabel 0-2 Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen SMR-categorie 2.

ONTWERP	LEVERANCIER	EIGENSCHAPPEN			BIJZONDERHEDEN
		MW _{th}	MW _e	T [°C]	
XE-100	X-ENERGY	200	66	 750	
THORIZON	THORIZON	250	83	 550	
CMSR	SEABORG TECHNOLOGIES	250	83	 670	Geleverd vanaf een boot (<i>power barge</i>): Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met SMR's op land.
ARC-100	ARC CLEAN TECHNOLOGY	286	94	 510	
KAIROS POWER FHR	KAIROS POWER	320	106	 650	
SMART	KAERI	365	100	 322	
LFR AS-200	NEWCLEO	480	158	 530	
I-SMR	I-SMR DEV. AGENCY	540	170	 310	
LFTR	FLIBE ENERGY	600	198	 650	Multi-module: leverbaar in 4 modules. Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met <i>single reactor units</i> .
SC-HTGR	FRAMATOME	625	206	 750	
SSR-W	MOLTEX ENERGY	750	248	 590	

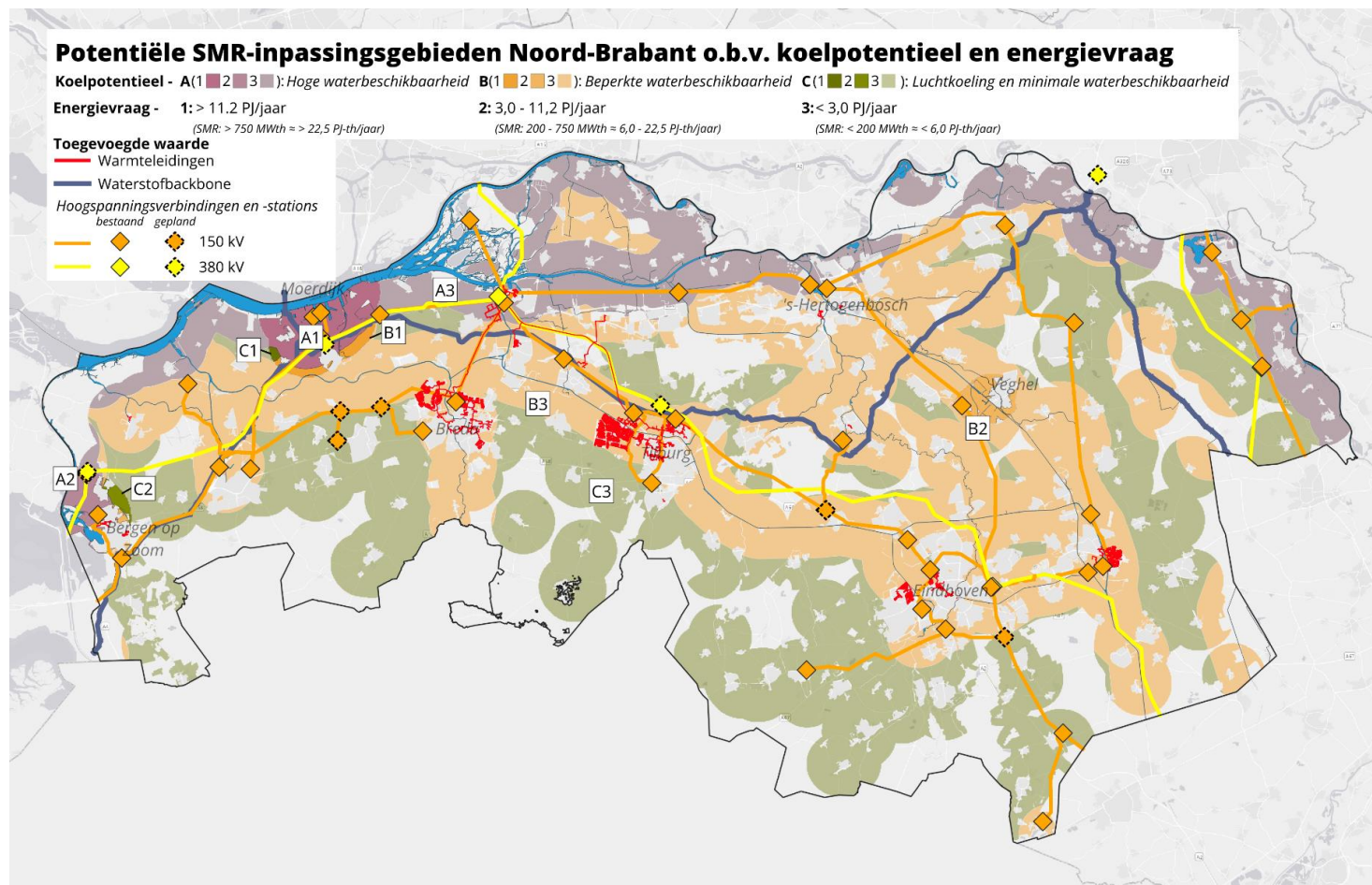
Tabel 0-3 Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen SMR-categorie 1.

ONTWERP	LEVERANCIER	EIGENSCHAPPEN			BIJZONDERHEDEN
		MW _{th}	MW _e	T [°C]	
NATRIUM	TERRAPOWER	840	277	 500	
BWRX-300	GE HITACHI	870	300	 288	
IMSR	TERRESTRIAL ENERGY	884	292	 700	
WESTINGHOUSE LFR	WESTINGHOUSE	950	314	 650	
AP300	WESTINGHOUSE	990	300	 325	
VOYGR-4	NUSCALE	1000	308	 321	Multi-module: leverbaar in 4, 6 en 12 modules. Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met <i>single reactor units</i> .
NUWARD	EDF	1080	340	 307	Multi-module: leverbaar in 2 modules. Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met <i>single reactor units</i> .
RR SMR	ROLLS-ROYCE	1358	470	 325	

Bijlage E SMR-inpassingsgebieden vergroot



Figuur 0-1 [Figuur 6-1 VERGROOT] Potentiële SMR-inpassingsgebieden op basis van koelpotentieel, energievraag en beperkende omgevingsfactoren.



Figuur 0-2 [Figuur 6-2 VERGROOT] Potentiële SMR-inpassingsgebieden op basis van koelpotentieel, energievraag en beperkende omgevingsfactoren. Over deze inpassingsgebieden zijn gebieden getoond die van toegevoegde waarde kunnen zijn voor SMR-inpassing.