

Analyse, inform and activate

LAKA

Analyseren, informeren, en activeren

Stichting Laka: Documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie

De Laka-bibliotheek

Dit is een pdf van één van de publicaties in de bibliotheek van Stichting Laka, het in Amsterdam gevestigde documentatie- en onderzoekscentrum kernenergie.

Laka heeft een bibliotheek met ongeveer 8000 boeken (waarvan een gedeelte dus ook als pdf), duizenden kranten- en tijdschriften-artikelen, honderden tijdschriftentitels, posters, video's en ander beeldmateriaal. Laka digitaliseert (oude) tijdschriften en boeken uit de internationale antikernenergie-beweging.

De [catalogus](#) van de Laka-bibliotheek staat op onze site. De collectie bevat een grote verzameling gedigitaliseerde [tijdschriften](#) uit de Nederlandse antikernenergie-beweging en een verzameling [video's](#).

Laka speelt met oa. haar informatie-voorziening een belangrijke rol in de Nederlandse anti-kernenergiebeweging.

The Laka-library

This is a PDF from one of the publications from the library of the Laka Foundation; the Amsterdam-based documentation and research centre on nuclear energy.

The Laka library consists of about 8,000 books (of which a part is available as PDF), thousands of newspaper clippings, hundreds of magazines, posters, video's and other material. Laka digitizes books and magazines from the international movement against nuclear power.

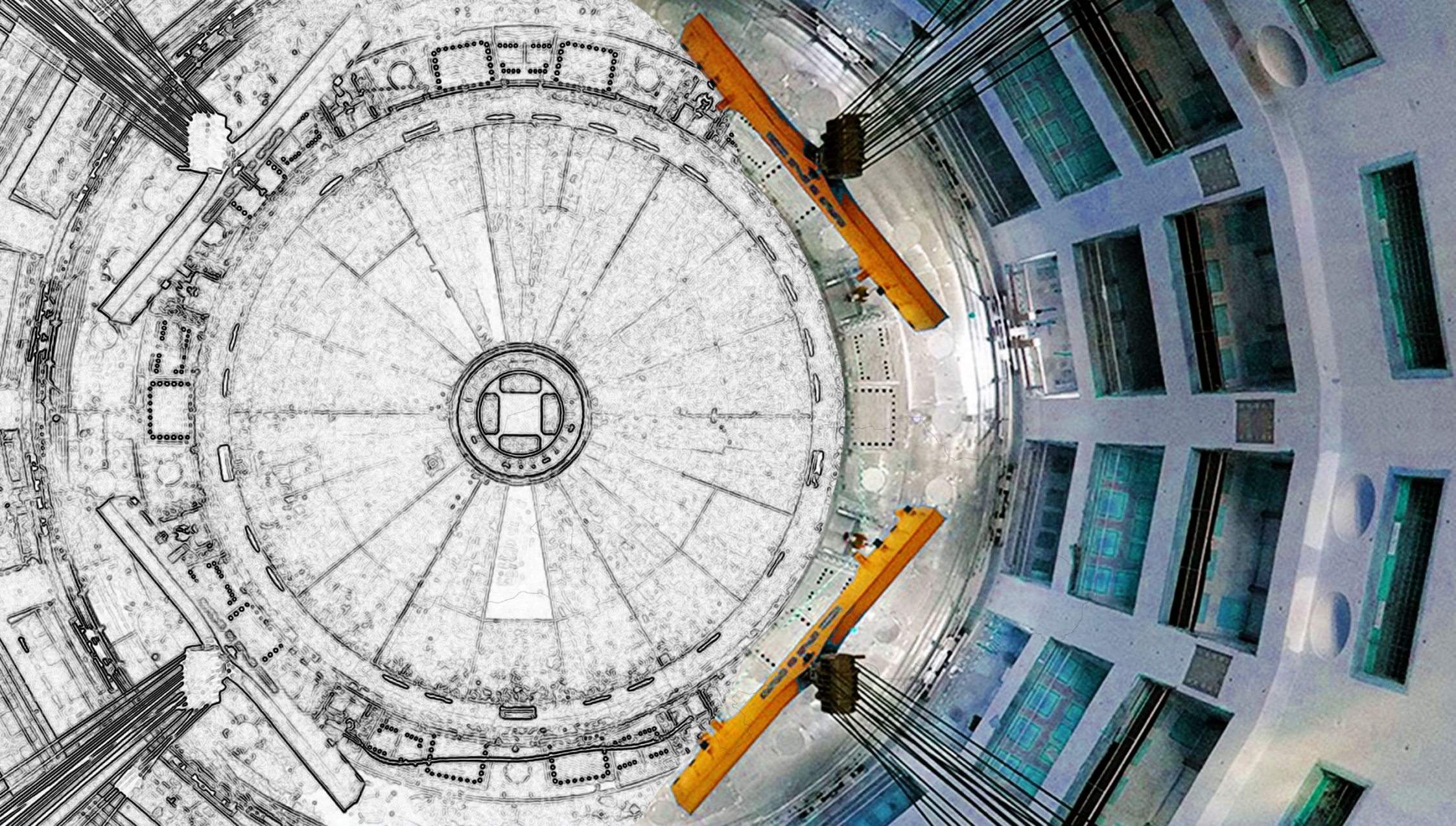
The [catalogue](#) of the Laka-library can be found at our website. The collection also contains a large number of digitized [magazines](#) from the Dutch anti-nuclear power movement and a [video-section](#).

Laka plays with, amongst others things, its information services, an important role in the Dutch anti-nuclear movement.

Appreciate our work? Feel free to make a small [donation](#). Thank you.



www.laka.org | info@laka.org | Ketelhuisplein 43, 1054 RD Amsterdam | 020-6168294



Verkenning SMR-inpassing provincie Gelderland 2025

Managementsamenvatting	3	4.	SMR-inpassing binnen de Concept Energievisie en PCES	36
1.	Inleiding	11	4.1	SMR's versus energiedragers en sectoren.....
1.1	Wat zijn SMR's?	11	4.1.1	Elektriciteitslevering.....
1.2	Marktanalyse SMR's	11	4.1.2	Warmtelevering.....
1.3	Wet- en regelgeving, vergunningen en toezichthouder	13	4.1.3	Waterstof.....
1.4	Concept Energievisie, Beleidskader en PCES Gelderland 2035/2050.....	14	4.1.4	Andere sectoren.....
1.5	Onderzoeksvraag Gelderland	17	4.2	Koppeling met sectoren
1.6	Leeswijzer	17	4.2.1	Elektriciteitsvraag.....
2.	Voorwaarden en bepalingen locatiekeuze	19	4.2.2	Warmtevraag
2.1	Algemene voorwaarden plaatsing kernreactoren.....	19	5.	Resultaten en Conclusie.....
2.1.1	Aanvraag vergunning	19	Referenties	44
2.1.2	Locatie	19	Lijst met figuren	46
2.2	Koeling.....	21	Lijst met tabellen	47
2.2.1	Koeling van SMR's	21	Lijst met afkortingen	48
2.2.2	Situatie Gelderland	22	Bijlage A Koeling	49
2.2.3	Indeling op basis van thermisch vermogen	23	A.1	Technieken en regelgeving
2.2.4	Afstand tot koelinlaat	26	A.2	Resultaten afschattende berekeningen koelcriteria Maas en Waal
2.3	Aanpak bepaling SMR-locaties	27	Bijlage B Pompvermogen vs. leidinglengte	54
3.	SMR-inpassingsdoorsneden.....	29	Bijlage C SMR-ontwerpen.....	55
3.1	Koeling	29		
3.2	Energievraag	29		
3.3	Bestemmingen en activiteiten.....	29		

Afbeelding voorkant: artist impression nucleaire installatie

Aanleiding en scope

Het Gelderse College van Gedeputeerde Staten wil werk maken van kernenergie, met name ten aanzien van kleine modulaire kernreactoren (SMR's). In dat kader heeft het college het Gelderse actieplan kleine modulaire kernreactoren vastgesteld. Aan NRG PALLAS is daartoe de opdracht verstrekt om op basis van feitelijke, objectieve en technische argumenten aan te geven waar binnen Gelders grondgebied een bepaald type SMR toegevoegde waarde kan leveren.

Voorliggend rapport geeft invulling op deze vraag, waarbij het in de huidige fase een verkennend karakter heeft. Er is voornamelijk gebruik gemaakt van bestaande informatie (regelgeving, NRG rapporten, websites) maar ook van de expertise die binnen de organisatie en haar netwerk beschikbaar is. Op een aantal punten zijn afschattende berekeningen uitgevoerd.

Voorwaarden en bepalingen locatiekeuze

Algemeen voor kernreactoren

Vergunning

Voor kernreactoren zijn twee typen vergunningen nodig, voor bouw en bedrijfsvoering. Ook "niet-nucleaire" vergunningen (zoals milieu en omgeving) zijn nodig omdat deze verbonden zijn aan de kernenergiewet.

De volgende aspecten t.a.v. de duur van van van van de vergunningverlening spelen een belangrijke rol:

- Techniek: gebruikelijke lichtwatertechnologie of geavanceerd
- Ervaring met het ontwerp elders in de wereld (beoordeeld door een toezichthouder)
- Beoogd gebruik (inpassing in netwerk of "achter de meter")
- Leverancier/ontwerper (ervaring met reactorbouw)

Locatie

Een locatie is geschikt als tegemoetgekomen kan worden aan de eisen/voorwaarden gesteld aan:

Veiligheid

De locatie moet als veilig worden beoordeeld zoals vereist in de nucleaire wet- en regelgeving. Hierbij worden de volgende aspecten beschouwd:

- Natuurinvloeden
- Menselijke activiteiten
- Infrastructuur
- Warmteafvoer naar de omgeving bij ongevallen
- Preparatiezone
- Afstand tot (dicht)bevolkte gebieden

Realisatie en bedrijfsvoering

Ten aanzien van realisatie (waaronder ook economische factoren), en bedrijfsvoering zijn voorwaarden verbonden aan:

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

Van bovengenoemde voorwaarden en eisen is koeling van restwarmte de meest bepalende voor een eerste locatiebepaling. Andere eisen en voorwaarden moeten later beschouwd worden voor een meer specifieke locatie.

Koeling

Elke SMR 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. Voor elektriciteitsproductie is in deze verkenning een rendement van 33% aangenomen, dit betekent dat 67% als restwarmte afgevoerd moet worden.

Restwarmte wordt bijna altijd door water afgevoerd, maar kan voor de wat lagere

vermogens ook met lucht of een combinatie van water en lucht (hybride) worden afgevoerd. De volgende koelsystemen worden toegepast voor restwarmte-afvoer bij energiecentrales:

1. Doorstroomsysteem
Wateropname en afgifte uit een rivier of stagnant (stilstaand) water.
2. Natte koeleenheden
Wateropname uit rivier of stagnant (stilstaand) water. Het water verdampt en voert zo de warmte af.
3. Hybride koeleenheden
Wateropname uit rivier of stagnant (stilstaand) water. Afgifte warmte aan lucht en/of door waterverdamping.
4. Droge koeleenheden
Koeling met lucht.

Doorstroomsystemen en natte koeleenheden worden beiden ingezet voor het afvoeren van grote hoeveelheden restwarmte. Een doorstroomsysteem onttrekt veel water aan het waterlichaam en wisselt warmte uit met het te koelen leidingoppervlak (warmtewisselaar). Het water wordt teruggevoerd naar het waterlichaam dat hiermee lokaal opwarmt. Koeleenheden onttrekken, vergeleken met doorstroomsystemen, veel minder water en voeren de warmte af via verdamping.

Om deze verkenning niet toe te spitsen op specifieke SMR-ontwerpen is een indeling gemaakt van SMR's op basis van vermogen: Elektrisch vermogen MWe (aannee is 33% van het thermisch vermogen MW_{th}). In dit rapport zijn de specifieke SMR-ontwerpen opgenomen en gekoppeld aan een vermogenscategorie 'E'; deze categorie maakt alleen onderscheid in hoge, midden en lage elektrische vermogens (MW_e). De E-categorieën zijn weergegeven in *Tabel M1*.

Tabel M1: Categorisering op basis van elektrisch vermogen.

Categorie E1	Categorie E2	Categorie E3
250 – 500 MW _e	67 – 250 MW _e	≤ 67 MW _e

De regelgeving omtrent het lozen van koelwater bij industriële toepassingen wordt hoofdzakelijk beschreven in de omgevingswet. 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 (NBW: Nationaal Bestuursakkoord Water) waarbij de aspecten mengzone, onttrekking en opwarming worden getoetst.

Om de geschiktheid van een rivier/waterlichaam in Gelderland in te schatten is in deze verkenning het verhoudingsgetal van het afvoerdebiet (van de rivier/waterlichaam) vs. onttrekkingsdebiet (van de energiecentrale) gehanteerd. Deze verhouding is gebaseerd op een referentieberekening voor de Maas op basis van de NBW-beoordelingssystematiek.

Op basis van de minimale afvoerdebieten (98-percentieel debiet, periode 01-01-2024 – 01-12-2024) zijn voor de verschillende rivieren debietverhoudingen bepaald. Op basis daarvan is een kwalificatie voor koelgeschiktheid toegekend voor de twee genoemde koelmethoden. Deze kwalificatie betreft:

- Ongeschikt: verhoudingsgetal <10
- Mogelijk geschikt: verhoudingsgetal ≥ 10 en < 20
- Waarschijnlijk geschikt: verhoudingsgetal ≥ 20

In *Tabel M2* zijn de resultaten voor de belangrijkste koellichamen in Gelderland weergegeven. Te zien is dat koeling met koeleenheden waarschijnlijk geschikt is voor elke vermogenscategorie SMR's met elk waterlichaam, terwijl koeling met doorstroomtechniek niet voor elk waterlichaam voor elke categorie mogelijk is. De Boven-Rijn en de Waal zijn waarschijnlijk geschikt (d.w.z. in algemene zin geschikt; per situatie zal de impact van de warmtelozing beoordeeld moeten worden) voor koeling van elke categorie met elke koelmethode.

Tabel M2: Kwalificaties voor koeling van SMR's voor de belangrijkste koellichamen in Gelderland.

Waterlichaam	E1 Doorstroomkoeling	E1 Koeleenheden	E2 Doorstroomkoeling	E2 Koeleenheden	E3 Doorstroomkoeling	E3 Koeleenheden
Boven-Rijn	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt
Waal	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt
Pannerdensch Kanaal	Mogelijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt
IJssel	Mogelijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt
Nederrijn	Ongeschikt	Waarschijnlijk geschikt	Ongeschikt	Waarschijnlijk geschikt	Mogelijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt
Maas	Ongeschikt	Waarschijnlijk geschikt	Ongeschikt	Waarschijnlijk geschikt	Mogelijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt
Veluwerandmeren*	Ongeschikt	Waarschijnlijk geschikt	Ongeschikt	Waarschijnlijk geschikt	Mogelijk geschikt	Waarschijnlijk geschikt

* Semi-stagnant water, doorstroomd door m.n. de IJssel. Conservatief gelijkgesteld aan de Maas.

Afstand tot koelinlaat

Om water te onttrekken voor koeling zijn pompen en leidingen nodig die naar het koelgebouw of de koeleenheden voert. De afstand van de SMR-locatie tot het waterlichaam wordt voornamelijk op economische gronden gelimiteerd.

Voor de drie categorieën zijn op basis van de volgende uitgangspunten de afstanden van het waterlichaam tot het SMR-terrein bepaald:

- Rendementsverlies door hoog pompvermogen wateronttrekking (maximaal 1% van het elektrisch vermogen);
- Economische limitatie door toenemende aanlegkosten bij toenemende leidinglengte/-diameter;
- Voorbeelden van afstanden bij andere kernreactoren (HFR Petten en Kerncentrale Borssele).

Voor SMR's met doorstroomkoeling wordt aangenomen dat deze altijd binnen een afstand van 1000 m van het waterlichaam worden geplaatst (categorie E3 zal in de praktijk vaak gebruik maken van andere koelmethoden).

Op basis van bovenstaande wordt het volgende gehanteerd (zie *Tabel M3*) ten aanzien van afstand, categorieën en koelmethode:

Tabel M3: Gehanteerde afstand tot waterlichaam voor koelmethode en vermogenscategorie.

Vermogens- categorie	Doorstroom	Natte/hybride koeleenheden	Luchtkoeling
E1	1000 m	1000 m	n.v.t.
E2	1000 m	3000 m	n.v.t.
E3	(1000 m)	Geen limieten	Geen limieten

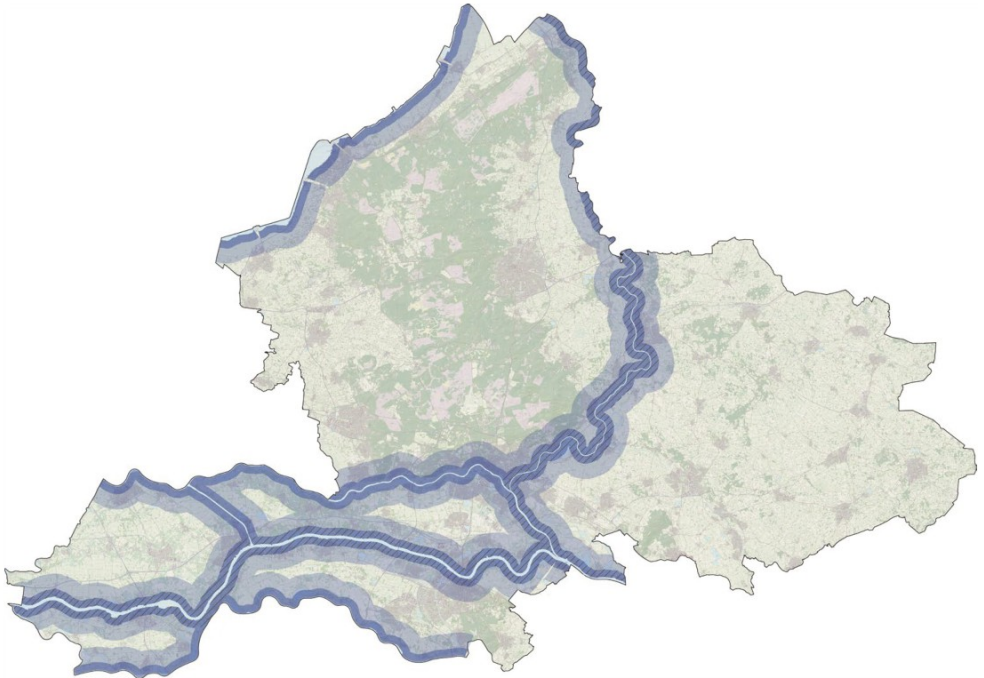
SMR-inpassingsdoorsneden

Koeling

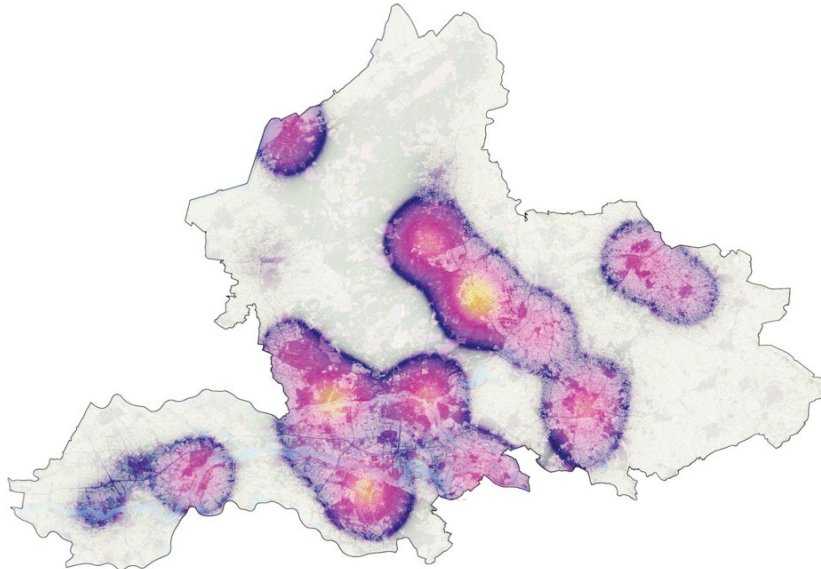
Op basis van de voorgaande bevindingen ten aanzien van koeling en afstand tot de waterinlaat kunnen de zones voor de verschillende categorieën en koelmethoden worden weergegeven, zie *Figuur M1*. De overzichtskaart bevat alleen categorieën E1 en E2 (categorie E3 heeft nagenoeg geen beperkingen ten aanzien van koelwatertoevoer).

Energievraag

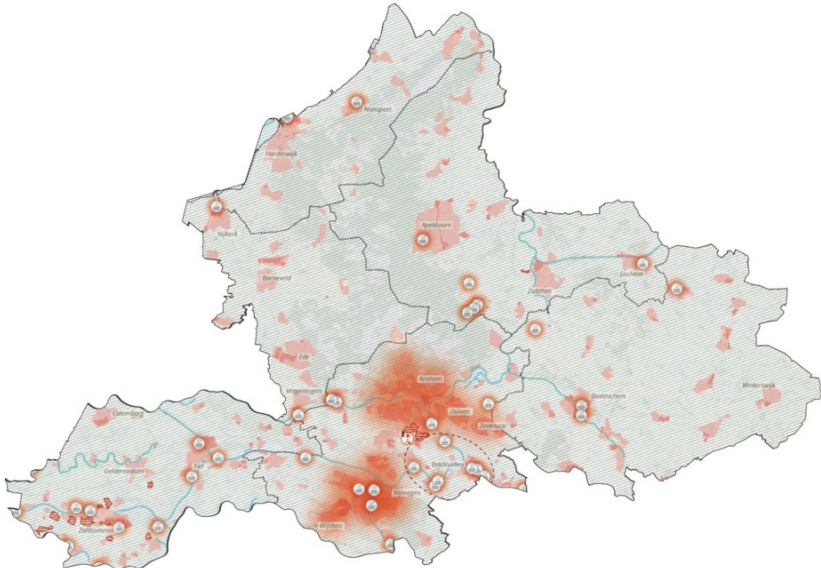
Naast het aanbod (d.w.z. in de vorm van plaatsingsmogelijkheden op basis van restwarmte-afvoercapaciteit) is de energievrage een andere bepalende doorsnede. Deze doorsnede geeft de behoefte weer waarbij een SMR van toegevoegde waarde kan zijn. In onderstaande figuren *Figuur M2*, *Figuur M3*, en *Figuur M4* is de vraag naar respectievelijk elektriciteit, warmte en waterstof (richting 2050) weergegeven.



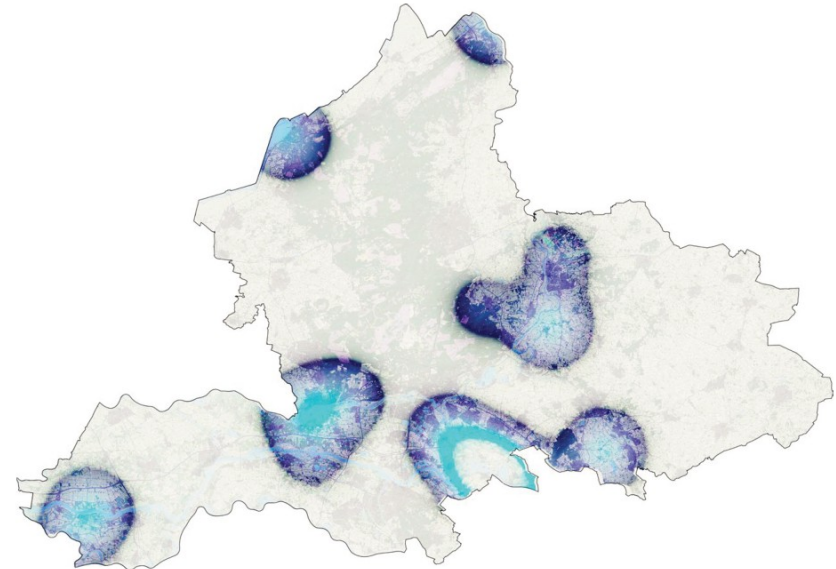
Figuur M1: Overzicht koelmogelijkheden Gelderse waterlichamen.



Figuur M2: Elektriciteitsvraag richting 2050.



Figuur M3: Warmtevraaggebieden.



Figuur M4: Waterstofvraag richting 2050.

Inpassing binnen Energievisie en PCES

Op basis van de vermogenscategorisatie (E1-E3) kan een indicatieve koppeling gemaakt worden met verschillende soorten energievraag (elektriciteit, warmte, waterstof) binnen het Gelderse energiesysteem voor de vier sectoren – gebouwde omgeving, mobiliteit, industrie & bedrijven, en landbouw.

Voor SMR-inpassing wordt hoofdzakelijk gekeken naar het gebruik van SMR's binnen de sector "Industrie & bedrijven" gezien de relatief grote energievraag vanuit deze sector, vaak geconcentreerd op enkele locaties.

Elektriciteit

Voor koppeling met elektriciteitsvraag binnen de sector "Industrie & bedrijven" is alleen het elektrisch vermogen van de SMR van belang. Er is in de koppeling tussen SMR en deze sector gekeken naar het elektrisch vermogen per module (leveringseenheid). Het is mogelijk om meerdere modules uit een lagere vermogenscategorie te gebruiken om tot het totaal benodigd elektrisch vermogen te komen.

Warmte

SMR's kunnen binnen de sector "Industrie & bedrijven" mogelijk ook ondersteunen door directe warmtelevering aangezien er een overeenkomst bestaat tussen het primaire energieaanbod van een kernreactor en de veelvoorkomende primaire energievraag van diverse industriële processen: warmte. Een directe koppeling tussen warmtevraag en -aanbod maakt de omzetting naar elektriciteit overbodig, wat voor een kernreactor een aanzienlijk efficiënter gebruik van de opgewekte energie kan betekenen.

Voor koppeling met warmtevraag zijn bij de warmtelevering van SMR's zijn twee onderdelen belangrijk: leveringstemperatuur en thermisch vermogen. Een categorisatie op basis van aanleveringstemperatuur is hiervoor opgesteld (zie *Tabel M4*): lage-temperatuur (LT), midden-temperatuur (MT) en hoge-temperatuur (HT).

Tabel M4: Categorisering op basis van aanleveringstemperatuur.

Categorie LT	Categorie MT	Categorie HT
		
< 350 °C	350 - 700 °C	> 700 °C

Deze indeling biedt de mogelijkheid in te spelen op een specifieke warmtevraag of een combinatievraag van warmte en elektriciteit.

Waterstof

Zowel in de Gelderse Energievisie als de PCES wordt er een sterke groei in waterstofvraag verwacht voor primair de industriesector en zware mobiliteit.

Er zijn verschillende waterstofproductiemethodes, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen methodes o.b.v. elektrolyse van water – een vooraanstaand elektrochemisch proces – en thermochemische processen (warmte). Omdat SMR's in staat zijn elektriciteit en warmte te leveren, zowel apart als in combinatie (co-generatie), kunnen SMR's in potentie aan elk van deze waterstofproductiemethodes gekoppeld worden.

Welke methode gebruikt wordt hangt af van economische factoren als bestaande infrastructuur, inpassingsmogelijkheden, afnamewijze (transport, opslag of direct naar de klant) en mate van flexibiliteit in een gereguleerde energiesysteem.

Andere sectoren

Hoewel de focus van SMR-inpassing binnen de sector "Industrie & bedrijven" ligt, kunnen SMR's ook binnen de andere drie sectoren uit de Concept Energievisie een rol spelen. Te denken valt bijvoorbeeld aan:

- Gebouwde omgeving: collectieve warmteoplossingen
- Mobiliteit: centrale laadlocaties (met elektriciteit en/of waterstof)
- Landbouw: restwarmte-inzet (zoals in de glastuinbouw).

SMR-inpassing kan ook in meerdere sectoren gecombineerd worden, waarbij één sector leidend is en andere sectoren sturend.

Koppeling SMR's met sectoren Gelderland

In *Tabel M5* worden de voorgaande onderdelen samengenomen in een indicatieve koppeling tussen het elektrisch vermogen van de categorieën en de verwachte elektriciteitsvraag in 2035 van de deelnemende Cluster-6 bedrijven uit de PCES. Ook is een koppeling gemaakt met aanwezige warmtevragen in de PCES.

Tabel M5: Koppeling tussen de geschatte vraag in 2035 van elektriciteit en waterstof van de deelnemende bedrijven uit de PCES en de SMR E-categorieën. Tevens de koppeling tussen directe warmte-inzet van SMR's bij industrie in de deelregio's, als een warmtevraag of specifieke industrie in de PCES is genoemd.

VERANDERING NAAR 2035			POTENTIËLE WARMTE-INZET	
Deelregio	Elektriciteits- / Waterstofvraag ¹	SMR-inpassing	Warmtevraag	SMR-inpassing
	MW _e	Categorie	°C	Categorie
Achterhoek	81 / 0	E2	<150 ² / > 1000 ³	LT / HT
Foodvalley	10 / 0	E3	-	-
Groene Metropoolregio-Noord	98 / 4	E2 / E3	< 250 ⁴	LT
Groene Metropoolregio-Oost	15 / 77	E3	> 1000 ³	HT
Noord-Veluwe	17 / 15	E3	-	-
Rivierenland	19 / 43	E3	> 1000 ³	HT
Stedendriehoek-Oost	40 / 0	E3	< 150 ²	LT
Stedendriehoek-West	60 / 2	E3	-	-
Tussen Maas en Waal	39 / 2	E3	-	-
Individueel totaal	379 / 143	E1 / E2	-	-
Totaal	522	E1	-	-

¹Benodigde capaciteit voor waterstof teruggerekend uit gegeven jaarbehoefes (in GWh) in de PCES. Aangenomen is een capaciteitsfactor van 90% voor de SMR en 60% elektrische efficiëntie voor elektrolyse. ²Papierindustrie, lage-temperatuur processen. ³Keramische industrie, hoge-temperatuur processen. ⁴Gegeven.

Resultaten en Conclusie

Een van de belangrijkste basisvoorwaarden om een SMR te kunnen plaatsen betreft de mogelijkheid tot het afvoeren van restwarmte (koeling). Uit het verkennende onderzoek is gebleken dat Gelderland over voldoende koelcapaciteit beschikt om binnen Gelders grondgebied een SMR in de hoogste vermogenscategorie (tot 500 MW_e) te kunnen plaatsen. Andere voorwaarden rondom vergunning en realiseerbaarheid zijn vooralsnog minder bepalend.

Voor het identificeren van Gelders grondgebied met betrekking tot SMR-inpassing tot een vermogen van 500 MW_e is gekeken naar het gebied waar de toekomstige energievraag, op basis van elektriciteit, warmte en waterstof, zich bevindt. In deze fase is het nog niet mogelijk om gebieden te beoordelen/selecteren op basis van bestemmingen en activiteiten, zoals natuurgebieden alsook op basis van voorwaarden die gelden voor een specifieke locatie, zoals grondspecificaties en infrastructuur.

Voor het identificeren van potentieel grondgebied is de energievraagdoorsnede gecombineerd met de doorsnede voor de geschikte koelgebieden voor een vermogen tussen 67 MW_e en 500 MW_e (SMR's met een lager vermogen zijn niet afhankelijk van de ligging van waterlichamen). Het resultaat is weergegeven in *Figuur M5*. De overlap (weergegeven met een oranje arcering) geeft een indicatie waar SMR's ingepast kunnen worden in de energievraag.

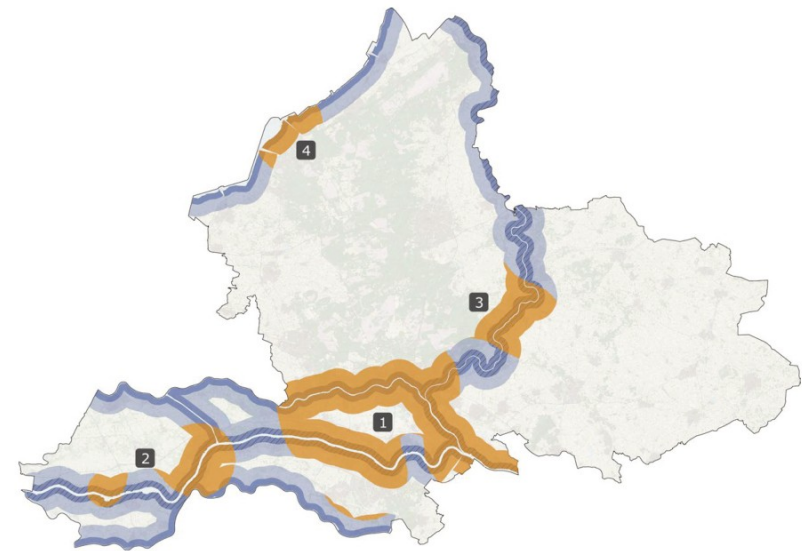
De betreffende vier gebieden die uit de combinatie van deze twee doorsnedes komen bevinden zich in de regio's:

1. Arnhem-Nijmegen
2. Rivierenland
3. IJssel-Zuid
4. Randmeren

De aangegeven gebieden zijn indicatief en geven een eerste zoekrichting naar locaties met hoge potentie voor SMR-inzet aan.

Een ander resultaat betreft de indicatieve koppeling van SMR's aan de energievraag van deelnemende Cluster 6-bedrijven uit de PCES. Hiertoe zijn verschillende SMR-typen op basis van hoeveelheid vermogen en warmtetemperatuur gekoppeld aan deelregio's. Deze koppeling betreft voornamelijk elektriciteit- en waterstofvraag op basis van de gegevens van de PCES, maar waar mogelijk is directe warmtelevering ook aangegeven. Een optimale inpassing van SMR's in het Gelders energiesysteem kan het combineren van deze drie energiedragers zijn.

Potentiële SMR's zijn te vinden in een bijgevoegde selectie van representatieve SMR-ontwerpen (niet-allesomvattend) geschikt voor inpassing in Gelderland/Nederland. Hierbij is onderscheid gemaakt in vermogen, warmtelevering, technologie en leverancier. De koppeling met deze SMR ontwerpen wordt gemaakt met de vermogenscategorieën E1-E3 en de warmtelevering van lage en hoge temperatuur LT-HT.



Figuur M5: Potentiële SMR-inpassing in Energievraaggebieden van Gelderland.

Dit rapport betreft een verkenning van de mogelijkheden en voorwaarden om SMR's in het Gelderse energiesysteem in te passen.

Deze inleiding geeft relevante achtergrondinformatie, gaat in op de onderzoeksvraag van de provincie Gelderland en eindigt met een leeswijzer.

1.1 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 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 MW_e 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 devies *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. 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 kunnen SMR's ook ingezet worden voor verschillende energiefuncties zoals elektriciteit en (proces-)warmte waarmee diverse toepassingen mogelijk zijn (zoals waterstofproductie, warmtenetten en ontzilting).

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

1. Watergekoelde modulaire reactoren
 - Tot dusver alleen lichtwaterontwerpen
 - Op basis van gebruikte (splijtstof) technologie in grote lichtwater reactoren
2. Geavanceerde modulaire reactoren
 - Koeling met vloeibare metalen, gassen en gesmolten zouten
 - Voornamelijk nieuw te ontwikkelen (splijtstof) technologie

Meer informatie over SMR's is te vinden in [\[1\]](#).

1.2 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 [\[2\]](#). 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 ingedeeld in vier groepen:

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 MW_e). 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 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 of certificerende instantie dit al transparant heeft beoordeeld – en het Nederlandse Bevoegd Gezag heeft kunnen 'meekijken'.

Beoordeling marktintroductie van SMR's in Nederland

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

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

** Toelichting: termijn volledige realisatie*

De realisatie van een SMR doorloopt meerdere fases tussen de besluitvorming en de daadwerkelijke bedrijfsvoering van de installatie. Deze fases betreffen (zie ook [3]):

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 fasen worden niet achtereenvolgens doorlopen, met name in de eerste vijf fasen lopen diverse processen parallel. Ten aanzien van fases 1 - 4 kan gezegd worden dat deze enkele jaren kunnen duren. Bij een optimale parellele 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 bouwtijd 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.

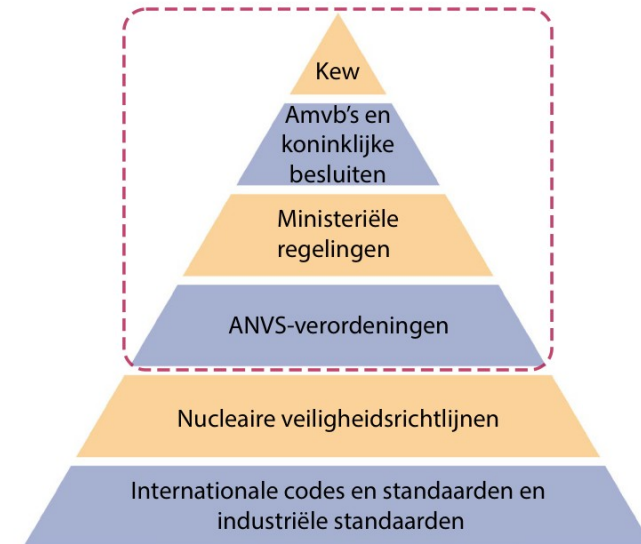
Opgeteld komt de realisatietijd in het meest gunstige scenario uit op 8 jaar op basis van veelvuldig en optimaal uitgevoerde parallele processen en een minimale bouwtijd. De realisatietijd komt uit op ongeveer 11 jaar indien de verschillende fasen in meerdere mate achter elkaar worden uitgevoerd en een iets langere bouwtijd wordt aangenomen.

*Samenvattend: de termijn voor volledige realisatie wordt geschat op **8 - 11** jaar.*

1.3 Wet- en regelgeving, vergunningen en toezichthouder

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 en valt onder de verantwoordelijkheid van de minister van Infrastructuur en Waterstaat. Het Nederlands Wettelijk Kader is in *Figuur 1-1* weergegeven.



Figuur 1-1: Opbouw wettelijk kader [3].

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 *[4]*:

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.

1.4 Concept Energievisie, Beleidskader en PCES Gelderland 2035/2050

Voor Gelderland zijn diverse studies gedaan om inzicht te krijgen in het Gelders Energiesysteem en om een visie en strategie te ontwikkelen om de transitiedoelstellingen te kunnen realiseren. Hiermee kan vervolgens beleid bij de diverse lokale overheden worden opgesteld alsook samenwerkingsverbanden worden aangegaan met betrekking tot nationale doelstellingen en visies.

Onderstaand worden de belangrijkste punten uit de Concept Energievisie [5] en PCES [6] van Gelderland weergegeven die verband houden met een mogelijke invulling in het energiesysteem van SMR's in Gelderland. De actuele leidende principes komen uit het Beleidskader Energiesysteem Gelderland [7].

Concept Energievisie

Het huidige Gelderse energiesysteem is, net als in de rest van Nederland, vooral centraal ingericht, en gebaseerd op fossiele energiebronnen. Er is beweging richting een meer decentraal, integraal en duurzaam energiesysteem. Aanpassingen in het energiesysteem moeten ervoor zorgen dat energieproductie, -infrastructuur, -opslag en -conversie optimaal aansluiten bij de ambities en ontwikkelingen in de gebouwde omgeving, mobiliteit, industrie en bedrijven, en landbouw. Gelderland beschikt over sterke economische clusters in agrifood, gezondheid, energie en hightech maakindustrie die internationaal concurrerend zijn. Daarnaast vormt Gelderland een cruciale schakel in het Europese logistieke netwerk met een goed ontwikkelde logistieke sector en belangrijke aansluitingen op Europese corridors zoals de A15/spoor/rivier en A1/A28. Ook is er een omvangrijke woningbouwopgave en is in de landbouw een belangrijke transitie gaande.

Alle ontwikkelingen vragen veel van het energiesysteem. Daarbij is sprake van schaarste: er is een 'maakbaarheidsgat'. Er zijn simpelweg niet voldoende materialen en middelen beschikbaar om de infrastructuur uit te breiden naar de volledige verwachte vraag in 2030, 2040 en 2050.

Om keuzes te maken worden zogeheten leidende principes voor de inrichting van het energiesysteem gehanteerd (uit: Beleidskader Energiesysteem Gelderland [7]). Deze betreffen:

Hoofdprincipe

- Energie wordt medesturend voor de inrichting van Gelderland.

Inrichtingsprincipes

- We besparen zo veel mogelijk energie
- We organiseren het Gelderse energiesysteem zo veel mogelijk

decentraal.

- We zetten in op een diverse energiemix.

In [5] zijn op basis van de leidende principes keuzes voor de energiedragers opgesteld:

1. Elektriciteit
2. Warmte
3. Duurzame gassen (waterstof en groen gas).

Deze keuzes zijn vervolgens vertaald in specifiekere keuzes per sector:

1. Gebouwde omgeving
2. Mobiliteit
3. Industrie en Bedrijven
4. Landbouw.

Ten aanzien van kernenergie is de volgende (expliciete) invulling gegeven:

- Energiedrager: Elektriciteit - Keuze 4: 'Onderzoek naar de ontwikkeling van (kleine) kerncentrales in het toekomstige energiesysteem.'

SMR's kunnen ook (juist) voorzien in laagwaardige (lage T) en hoogwaardige (hoge T) warmte en de toepassingen die daar mee mogelijk zijn (warmtenet, industriële hoge T processen, warmtekrachtkoppeling), alsook in de productie van andere energiedragers zoals waterstof. Deze mogelijkheden zijn niet expliciet of impliciet meegenomen in de energievisie.

De energievisie geeft richting aan het Gelderse energiesysteem op provinciaal niveau. Sommige zaken vragen echter om een doorvertaling naar de regio's of gemeenten. En om de keuzes provinciaal, regionaal en lokaal effect te laten hebben is het van belang dat de inhoud van de energievisie vertaald wordt naar beleid. Dit gebeurt door:

- Regionale uitwerking
- Doorwerking in provinciaal omgevingsbeleid
- Doorvertaling naar sectoraal beleid
- Doorvertaling naar provinciaal MIEK en investeringsplannen

Provinciale Cluster Energiestrategie Cluster 6

Er zijn Cluster Energie Strategieën (CES) in het leven geroepen om in kaart te brengen wat de verduurzamingsplannen van bedrijven in Nederland zijn en welke energie-infrastructuur hiervoor nodig is. Er is een regionale aanpak gehanteerd en per provincie is een CES opgesteld, waarin alle (maak)industrie met een elektriciteitsverbruik van boven de 10GWh/jaar en/of een aardgasgebruik boven de 10 miljoen Nm³/jaar worden meegenomen. In de PCES zijn de bedrijven door Water & Energy Solutions gevraagd hun plannen aan te leveren, waarna de netbeheerders infrastructuuranalyses hebben gedaan om de effecten op de regionale infrastructuur in beeld te brengen.

Van de 69 industriële bedrijven die in de PCES Gelderland zijn benaderd voor deelname, hebben 54 locaties gehoor gegeven aan deze oproep, met onder andere deelname aan een interview. Deze deelnemende bedrijven zijn gezamenlijk verantwoordelijk voor 1040 kton/jaar aan fossiele CO₂-uitstoot, overeenkomend met 70% van de fossiele CO₂-uitstoot van de industrie in Gelderland.

Ten aanzien van de energiedragers komt in deze studie naar voren:

Elektriciteit

Bedrijven zijn vooral voornemens CO₂-emissie die ontstaan op de eigen productielocatie ('scope 1') te verlagen middels verandering van energiebron. De Cluster 6-industrie in Gelderland heeft elektrificatieprojecten ingediend, waarmee 35% van de emissiereductie in 2050 behaald kan worden.

Als gevolg van deze elektrificatieprojecten ter vervanging van aardgas groeit de vraag naar elektriciteit vanuit de industrie. Dit leidt in veel gevallen tot een toename in de aansluitingsbehoefte op het elektriciteitsnet.

De toename van de elektriciteitsvraag betreft 1822 GWh/jaar voor 2050 voor deelnemende bedrijven.

Warmtenetten

In Gelderland is er al een aantal warmtenetten aanwezig. Ook is er een aantal netten in

ontwikkeling waar zowel de industrie als de gebouwde omgeving baat bij kan hebben. Zo zijn er industriële processen die laagwaardige warmte gebruiken en kantoorgebouwen die verwarmd moeten worden.

De Gelderse industrie levert al in meerdere steden warmte aan de bebouwde omgeving, bijvoorbeeld in Arnhem en Nijmegen. Er wordt in deze steden ook meer levering van warmte voorzien in de toekomst. Dit levert echter in de meeste gevallen geen scope 1 CO₂-emissiereductie op voor de industrie. De emissiereductie wordt immers behaald bij de afnemer van de warmte. Scope 1 CO₂-emissiereductie komt dan ook enkel voor wanneer industrie warmte inneemt van een warmtenet.

De beoogde warmtelevering richting de gebouwde omgeving neemt wel toe. De plannen die hiervoor zijn gedefinieerd, zorgen voor een totale additionele warmtelevering van 304 GWh/jaar vanaf 2035.

Waterstof

Waterstof wordt op 22 locaties opgenomen in de energietransitieplannen als alternatieve energiedrager ter vervanging van aardgas. Achttien locaties hebben de inzet van waterstof als voorkeursroute opgenomen in hun plannen, de andere vier locaties overwegen waterstof en andere energiedragers als alternatief. Het opnemen van waterstof als brandstof in de voorkeursroute leidt tot een vraag van 789 GWh/jaar met een geplande consumptie vanaf 2030.

Daarnaast zijn er initiatieven opgegeven voor de productie van waterstof bij de deelnemers van de PCES Gelderland. Gezamenlijk leiden deze plannen tot een totale elektrolysecapaciteit van circa 20 MW. Deze plannen hebben voornamelijk de insteek om flexibel te opereren om zodoende te kunnen balanceren op het elektriciteitsnet.

De locaties die waterstof als alternatieve brandstof willen inzetten, geven ook aan dat het nog onduidelijk is op welke manier ze waterstof willen verkrijgen.

Voor 2035 zijn voor de deelregio's de potentiële toename in elektriciteit en waterstof weergegeven na volledige realisatie van verduurzamingsprojecten van de deelnemende industrie, zie *Tabel 1-1*.

Tabel 1-1: Overzicht emissiereductie en toename van elektriciteits- en waterstofgebruik per deelregio [6].

Deelregio	Deelnemende productie-locaties	CO ₂ -emissie 2022 (kton/jr)	Verandering naar 2035		
			CO ₂ -emissie-reductie (%)	Elektriciteitsvraag (MW / GWh/jr)	Waterstofvraag (GWh/jr)
Achterhoek	6	129	79%	271 / 81	0
Foodvalley	5	27	50%	45 / 10	0
Groene metropoolregio-Noord	5	320	44%	321 / 98	18
Groene metropoolregio-Oost	6	127	87%	65 / 15	366
Noord-Veluwe	6	37	53%	49 / 17	73
Rivierenland	9	95	89%	121 / 19	202
Stedendriehoek-Oost	6	46	75%	138 / 40	0
Stedendriehoek-West	5	121	91%	443 / 60	10
Tussen Maas en Waal	4	137	98%	348 / 39	10
Totaal	55	1039	72%	1800 / 379	194

1.5 Onderzoeksvraag Gelderland

Het Gelderse college van Gedeputeerde Staten wil werk maken van kernenergie, met name ten aanzien van kleine modulaire kernreactoren (SMR's). In dat kader heeft het college het Gelderse actieplan kleine modulaire kernreactoren vastgesteld. Aan NRG PALLAS is daartoe de opdracht verstrekt om op basis van feitelijke, objectieve en technische argumenten aan te geven waar binnen Gelders grondgebied een bepaald type SMR toegevoegde waarde kan leveren.

1.6 Leeswijzer

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 globale, afschattende berekeningen gemaakt.

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

In hoofdstuk 2 worden algemene voorwaarden besproken ten aanzien van de

vergunning en locatie en gaat daarna in op gebruikte koeltechnieken, geschiktheid van de belangrijkste waterlichamen van Gelderland en afstand van de inrichtingslocatie tot het waterlichaam. Het hoofdstuk eindigt met te behandelen punten om een geschikte locatie te kunnen selecteren. Hierbij wordt aangegeven dat hiervoor ook zogenaamde inpassingsdoorsnedes bepaald dienen te worden.

Hoofdstuk 3 behandelt deze inpassingsdoorsnedes. Hier worden kaarten weergegeven met daarop aangegeven waar SMR's mogelijk geplaatst kunnen worden op basis van koelpotentie, waar energievraag is en welke beperkingen er zijn op basis van bestemmingen en activiteiten.

Hoofdstuk 4 behandelt de inpassing van SMR's in de Energievisie en PCES van Gelderland waarbij ook aandacht is voor geavanceerde reactorconcepten. Hoofdstuk 5 betreft de resultaten en conclusie van deze verkenning.

2. Voorwaarden en bepalingen locatiekeuze

Voor plaatsing van een nucleaire installatie gelden voorwaarden voortkomend uit onder meer de nucleaire wet- en regelgeving, omgevingswet, bestemmingsplannen, en de benodigheden/ vereisten vanuit de voorziene nucleaire installatie. Deze voorwaarden geven richting aan het bepalen van potentiële locaties, zoals de aanwezigheid van koelvoorzieningen en eisen gesteld aan externe risico's.

In dit hoofdstuk worden de basisvoorwaarden aan een locatie voor een SMR in Gelderland beschreven.

Ter informatie: dit rapport betreft een op zichzelf staande verkenning die geen verband houdt met een recent uitgevoerde studie door TNO en NRG PALLAS [20]. De genoemde studie betreft een onderzoek naar een mogelijke plaatsing van SMR's in het Nederlandse energiesysteem en met name de invloed op kosten en inpasbaarheid. Hiervoor zijn een aantal aannames gedaan voor locaties, waarbij is uitgegaan van de vijf industriële clusters. Gelderland behoort niet tot een van deze clusters, waardoor de conclusie uit het onderzoek ook geen betrekking heeft op Gelderland.

2.1 Algemene voorwaarden plaatsing kernreactoren

2.1.1 Aanvraag vergunning

Zoals in hoofdstuk 1 is beschreven dienen kernreactoren twee vergunning te hebben, voor bouw en bedrijfsvoering. Hierin is ook aangegeven dat meerdere vergunningen (zoals milieu en omgeving) nodig zijn en op welke wijze de ANVS daar een rol in speelt. De volgende (tijds)aspecten t.a.v. vergunningsrealisatie spelen hierin een belangrijke rol:

- **Techniek: lichtwatertechnologie of geavanceerd**

Beoordeling van het ontwerp kan relatief snel gebeuren 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.

- **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.

- **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.

2.1.2 Locatie

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 winde 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 ontwerpisen in de VOBK [8], die met name voor grote kerncentrales is geschreven.

- Afstand tot (dicht)bevolkte gebieden

In art.18 lid 3 Bkx zijn de eisen opgesteld t.a.v. risico's voor de bevolking voor het meest ernstige (niet voorziene) ongeval van de installatie (buiten-ontwerpongeval) [9]. De afstand van de SMR tot bevolkte of dichtbevolkte gebieden waarbij voldaan wordt aan de gestelde risico-eisen, hangt af van het type en vermogen van de SMR maar ook de implementatiewijze (deels onder de grond bijvoorbeeld). De ANVS stelt dat het ontwerp van de installatie zo moet zijn dat buiten een afstand van 5 km beschermingsmaatregelen als evacuatie, schuilen en jodinepillen niet meer genomen hoeven te worden. De afstand tot dichtbevolkte gebieden bedraagt dus maximaal 5 km indien omwonenden vrijgesteld moeten zijn van beschermingsmaatregelen.

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

Voor grotere SMR's (zie volgende paragraaf) moet de restwarmte afgevoerd kunnen worden door middel van een betrouwbaar en voldoende groot waterlichaam. Dit kan een stroming zijn (rivier, kanaal) of stagnerend (stilstaand) water (zoals een meer).

- Afstand installatie tot waterinlaat

Afhankelijk van het vermogen zal het wateraanbod op een afstand van de installatie moeten liggen die 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 koelinlaatleiding 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, 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.

2.2 Koeling

2.2.1 Koeling van SMR's

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%. Maximaal 67% van de energie verdwijnt 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 zijn de rendementen veel hoger en hoeft ook minder restwarmte te worden afgevoerd.

Restwarmte wordt bijna altijd door water afgevoerd, maar kan voor de wat lagere vermogens ook met lucht of een combinatie van water en lucht (hybride) worden afgevoerd. De volgende koelsystemen worden toegepast voor restwarmte-afvoer bij energiecentrales:

1. Doorstroomsysteem
Wateropname en afgifte uit een rivier of stagnant water.
2. Natte koeleenheden
Wateropname uit rivier of stagnant water. Het water verdampt en voert zo de warmte af.
3. Hybride koeleenheden
Wateropname uit rivier of stagnant water. Afgifte warmte aan lucht en/of door waterverdamping (afhankelijk van de weersomstandigheden)
4. Droge koeleenheden
Koeling met lucht (beperkingen in te koelen vermogen door afhankelijkheid van luchtvochtigheid en luchttemperatuur)

Doorstroomsystemen en natte koeleenheden worden beiden ingezet voor het afvoeren van grote hoeveelheden restwarmte. Een doorstroomsysteem onttrekt (met een *onttrekkingsdebiet*) veel water aan het waterlichaam en wisselt warmte uit via een warmtewisselaar. Het water wordt teruggevoerd naar het waterlichaam dat hiermee lokaal opwarmt. Koeleenheden onttrekken, 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. Koeleenheden zijn aparte gebouwen (ordegrootte 10-20m hoog, zie bijvoorbeeld [10]. Koeleenheden zijn aparte gebouwen (ordegrootte 10-20m hoog, zie bijvoorbeeld [10].

De volgende onttrekkingsdebieten benodigd voor restwarmte-afvoer (MW_{re}) worden in deze verkenning gehanteerd op basis van de aannames (temperatuur waterlichaam 25°C, lozingstemperatuur 40°C) beschreven in *Bijlage A*:

- 55 [m^3/h]/[MW_{re}] voor doorstroomkoeling
- 1,3 [m^3/h]/[MW_{re}] voor natte koeleenheden (2,3% van doorstroomkoeling)

Dit betekent bijvoorbeeld dat voor de afvoer van 200 MW restwarmte (MW_{re}) ongeveer 3 m^3/s onttrekkingsdebiet nodig is ($55 \cdot 200 = 11.000 m^3/h$, delen door 3600 sec.). Voor een natte koeleenheid is dit ongeveer 0,07 m^3/s (253 m^3/h), aanzienlijk minder dus.

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. In *Bijlage A* wordt dit verder omschreven.

2.2.2 Situatie Gelderland

Gelderland beschikt over veel water afkomstig van rivieren, kanalen en (doorstroomde) meren. 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 (zie *Bijlage A*) waarbij de aspecten mengzone, onttrekking en opwarming worden getoetst aan bepaalde criteria. Een belangrijke parameter voor geschiktheid van een rivier is de grootte van het afvoerdebiet. Hoe hoger dit afvoerdebiet, hoe kleiner de kans dat een warmtelozing (door onttrekking en teruglevering van warm water) een onacceptabele invloed heeft op het aquatisch milieu. De belangrijkste waterlichamen van Gelderland zijn in *Tabel 2-1* op een rij gezet met daarin opgenomen een conservatief bepaald afvoerdebiet (98-percentiel debiet), d.w.z. dat het actuele afvoerdebiet in bijna alle gevallen (98% van de tijd) hoger is dan het vermelde debiet. De waarden dienen aldus gelezen te worden als een minimaal afvoerdebiet voor het betreffende waterlichaam.

Tabel 2-1: Belangrijkste waterlichamen Gelderland en bijbehorend minimaal afvoerdebiet.

Waterlichaam	98-perc. afvoerdebiet ^{*1} [m ³ /s]
Boven-Rijn	1312
Waal	1065
Pannerdensch Kanaal	259
IJssel	226
Nederrijn	20
Maas	21
Veluwerandmeren ^{*2}	21

^{*1} Periode 1 Jan. - 1 Dec. 2024 ^{*2} Semi-stagnant water, doorstroomd door m.n. de IJssel. Conservatief gelijkgesteld aan de Maas.

De afvoerdebieten van de verschillende rivieren geven als het ware de grootte, en daarmee de koelpotentie, van het waterlichaam aan. Het afvoerdebiet is echter niet de enige parameter die bepaalt welke hoeveelheid restwarmte opgenomen kan worden in het waterlichaam zonder de gestelde eisen hieraan te overschrijden. In *Bijlage A* is voor de rivier de Maas een wat uitgebreidere toets uitgevoerd op basis van de NBW-beoordelingssystematiek. De Maas is als voorbeeld genomen omdat deze rivier grote fluctuaties kent in doorstroomdebiet (meer een 'regenrivier' in vergelijking met de Rijn/Waal) en zo in principe een minder geschikt waterlichaam vormt voor koeling van grote kerncentrales.

In de uitgevoerde toets is bepaald welke *maximale* warmtevracht (warmte-afvoer) van een SMR (of andere energiecentrale) nog voldoet aan de gestelde waterkwaliteitseisen (betreffende mengzone, onttrekking en opwarming) voor de twee meest gebruikelijke type koelsystemen van energiecentrales. De maximaal toelaatbare warmtevracht (restwarmte) door de Maas te koelen bedraagt voor de twee verschillende koelsystemen:

- Doorstroomkoeling: 117 MW_{re} wat neerkomt op een thermisch vermogen van 175 MW_{th} (59 MW_e)
- Natte koeleenheden: 7700 MW_{re}, wat neerkomt op een thermisch vermogen van 11.800 MW_{th} - (circa 3900 MW_e)

Langs een rivier als de Maas kan dus beperkt gekoeld worden op basis van doorstroomkoeling, hier past alleen een kleine SMR met deze koelconfiguratie. SMR's daarentegen met natte koeleenheden kunnen een veel groter vermogen hebben of met meerdere eenheden worden geplaatst. Bovenstaande getallen zijn bepaald op basis van conservatieve aannames en geven een redelijke indicatie. Een erkende en gedetailleerdere analyse is nodig om tot een gevalideerde beoordeling van de gevolgen van de warmtelozing te komen.

2.2.3 Indeling op basis van thermisch vermogen

Op basis van bovenstaande bevinding voor het maximaal te koelen vermogen door de Maas, zijn voor de andere waterlichamen in Gelderland schattingen voor koelgeschiktheid gemaakt voor het maximaal te koelen vermogen. Voor de Maas is de uitgebreidere beoordelingssystematiek (Natuurbeschermingswet, NBW) toegepast en kan derhalve als een referentie dienen. Voor de schatting van het koelvermogen van de andere waterlichamen wordt een vergelijking gemaakt met het afvoerdebiet van de Maas. D.w.z. als een waterlichaam eenzelfde afvoerdebiet als de Maas heeft, wordt aan dit waterlichaam eenzelfde koelvermogen toegekend, en daarmee het maximale thermisch vermogen van de SMR.

Om deze referentiekoppeling te maken moet de verhouding van het afvoerdebiet van de rivier en het benodigde koelwaterdebiet (onttrekkingsdebiet) voor doorstroomkoeling of natte koeleenheden worden bepaald. Voor de Maas is de verhouding afvoerdebiet/onttrekkingsdebiet bij het maximale thermische vermogen van 175 MW_{th} (59 MW_e) voor doorstroomkoeling:

1. Afvoerdebiet: **21 m³/s** (zie *Bijlage A*)
2. Onttrekkingsdebiet:
 - 175 MW_{th} → 117 MW_{re} te koelen vermogen o.b.v. 33% rendement

- $117\text{MW}_{\text{re}} \times 55 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}_{\text{re}}$ (zie sectie 2.2.1) = $7,315 \text{ m}^3/\text{h} = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ (afgerond)

3. De verhouding van deze getallen is **21 / 2 $\approx$ 10**

D.w.z. dat maximaal 10% van het doorgaande debiet van de rivier wordt onttrokken voor doorstroomkoeling.

In deze verkenning wordt deze verhouding gehanteerd als de minimale verhouding waarbij een koellichaam *mogelijk* geschikt is voor het desbetreffende af te voeren vermogen. Dit af te voeren vermogen bepaalt hoeveel (SMR-) vermogen geplaatst kan worden. Hoe groter deze verhouding is, hoe waarschijnlijker het is dat het betreffende waterlichaam daadwerkelijk geschikt is (dus na onder meer een ‘NBW beoordeling’) voor doorstroomkoeling en/of verdampingskoeling (natte koeleenheden) van het betreffende vermogen. Voor een grote verhouding (>20) wordt derhalve de kwalificatie *waarschijnlijk* geschikt gehanteerd.

In *Tabel 2-3* staan voor een vermogen van 200 MW_{th} (een afronding van 175 MW_{th}) de resultaten weergegeven van de aanvankelijke geschiktheid van de waterlichamen voor doorstroomkoeling en natte koeleenheden (koelingseenheid). Te zien is dat voor vermogens tot 200 MW_{th} doorstroomkoeling waarschijnlijk geschikt is voor de grotere (hoge afvoerdebieten) rivieren; Koeling met koeleenheden via verdamping lijkt voor elk vermeld waterlichaam geschikt.

SMR categorieën

Om inpassing van SMR's in het energiesysteem te kunnen bepalen is allereerst het thermische vermogen van belang. Aan dit vermogen zijn diverse factoren gerelateerd waarvan koeling in eerste instantie de belangrijkste is. Als een SMR geselecteerd wordt dient duidelijk te zijn op welke wijze er gekoeld gaat worden. Zodoende zijn drie categorieën bepaald: laagvermogen, middenvermogen en hoogvermogen.

De minst vermogende groep SMR's wordt dan de *laagvermogen* E3 categorie en heeft een thermisch vermogen tot 200 MW_{th} en een elektrisch vermogen tot 67 MWe bij het aangenomen rendement van 33%. De twee andere groepen zijn bepaald op basis van het aantal reactorconcepten dat zich in een bepaald vermogensbereik bevindt. Op deze

manier is de middenvermogen categorie E2 bepaald en de hoogvermogen categorie E1. In *Tabel 2-2* zijn de categorieën weergegeven. In *Tabel 2-4* en *Tabel 2-5* staan de ingeschatte koelmogelijkheden voor respectievelijk categorie E2 en E3 voor de twee verschillende koelsystemen weergegeven en betreft de bovengrens van 750 MW_{th} (250 MW_e) en 1500 MW_{th} (500 MW_e).

Te zien is dat alle genoemde waterlichamen in staat zijn de restwarmte af te voeren op basis van koeleenheden. Voor doorstroomkoeling lijken de rivieren Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal en de IJssel geschikt.

Tabel 2-2: Categorisering op basis van thermisch vermogen.

Categorie E1	Categorie E2	Categorie E3
750 – 1500 MW _{th}	200 – 750 MW _{th}	≤ 200 MW _{th}
250 – 500 MW _e	67 – 250 MW _e	≤ 67 MW _e

De inschattingen voor de bovengrens van de E1 categorie zijn in *Tabel 2-5* weergegeven. De Boven-Rijn en de Waal lijken hier het meest geschikt voor doorstroomkoeling. Opmerkelijk is dat alle genoemde waterlichamen voldoende koelpotentie lijken te hebben om met verdampingskoeling ook de hoogste vermogensgroep te kunnen koelen.

Tabel 2-3: Geschiktheid waterlichamen Gelderland t.b.v. koeling tot een 200 MW_{th} SMR voor een doorstroomsysteem en natte koeleenheden.

Waterlichaam specificaties		Doorstroomkoeling		Koelingseenheid	
Waterlichaam	98-perc. debiet [m ³ /s]	Verhouding	Kwalificatie	Verhouding	Kwalificatie
Boven-Rijn	1312	641	Waarschijnlijk geschikt	27866	Waarschijnlijk geschikt
Waal	1065	520	Waarschijnlijk geschikt	22614	Waarschijnlijk geschikt
Pannerdensch Kanaal	259	127	Waarschijnlijk geschikt	5503	Waarschijnlijk geschikt
IJssel	226	110	Waarschijnlijk geschikt	4800	Waarschijnlijk geschikt
Nederrijn	20	10	Mogelijk geschikt	431	Waarschijnlijk geschikt
Maas	21	10	Mogelijk geschikt	446	Waarschijnlijk geschikt
Veluwerandmeren*	21	10	Mogelijk geschikt	446	Waarschijnlijk geschikt

* Semi-stagnant water, doorstroomd door m.n. de IJssel. Conservatief gelijkgesteld aan de Maas.

Tabel 2-4: Geschiktheid waterlichamen Gelderland t.b.v. koeling tot een 750 MW_{th} SMR voor een doorstroomsysteem en natte koeleenheden.

Waterlichaam specificaties		Doorstroomkoeling		Koelingseenheid	
Waterlichaam	98-perc. debiet [m ³ /s]	Verhouding	Kwalificatie	Verhouding	Kwalificatie
Boven-Rijn	1312	171	Waarschijnlijk geschikt	7431	Waarschijnlijk geschikt
Waal	1065	139	Waarschijnlijk geschikt	6030	Waarschijnlijk geschikt
Pannerdensch Kanaal	259	34	Waarschijnlijk geschikt	1467	Waarschijnlijk geschikt
IJssel	226	29	Waarschijnlijk geschikt	1280	Waarschijnlijk geschikt
Nederrijn	20	3	Ongeschikt	115	Waarschijnlijk geschikt
Maas	21	3	Ongeschikt	119	Waarschijnlijk geschikt
Veluwerandmeren*	21	3	Ongeschikt	119	Waarschijnlijk geschikt

* Semi-stagnant water, doorstroomd door m.n. de IJssel. Conservatief gelijkgesteld aan de Maas.

Tabel 2-5: Geschiktheid waterlichamen Gelderland t.b.v. koeling tot een 1500 MW_{th} SMR voor een doorstroomsysteem en natte koeleenheden.

Waterlichaam specificaties		Doorstroomkoeling		Koelingseenheid	
Waterlichaam	98-perc. debiet [m ³ /s]	Verhouding	Kwalificatie	Verhouding	Kwalificatie
Boven-Rijn	1312	85	Waarschijnlijk geschikt	3716	Waarschijnlijk geschikt
Waal	1065	69	Waarschijnlijk geschikt	3015	Waarschijnlijk geschikt
Pannerdensch Kanaal	259	17	Mogelijk geschikt	734	Waarschijnlijk geschikt
IJssel	226	15	Mogelijk geschikt	640	Waarschijnlijk geschikt
Nederrijn	20	1	Ongeschikt	57	Waarschijnlijk geschikt
Maas	21	1	Ongeschikt	59	Waarschijnlijk geschikt
Veluwerandmeren*	21	1	Ongeschikt	59	Waarschijnlijk geschikt

* Semi-stagnant water, doorstroomd door m.n. de IJssel. Conservatief gelijkgesteld aan de Maas.

2.2.4 Afstand tot koelinlaat

Hoe hoger het thermische vermogen van de SMR, hoe meer koelwater beschikbaar moet zijn om de restwarmte af te voeren. Om water te onttrekken is een inlaat met leiding nodig die naar het koelgebouw of de koeleenheden voert. Een geschikte locatie moet dus de beschikking hebben over koelwater dat via het waterlichaam, leidingwerk en aanzuigpompen naar de locatie wordt getransporteerd. De afstand wordt voornamelijk op economische gronden gelimiteerd en betreft de grootte van het pompvermogen (dit neemt toe met de afstand en configuratie door leidingweerstand en bochten) en de aanlegkosten.

Voor de drie categorieën zijn op basis van de volgende uitgangspunten de afstanden van het waterlichaam tot het SMR-terrein bepaald:

- Rendementsverlies door hoog pompvermogen wateronttrekking: voor deze verkenning wordt een rendementsverlies van maximaal 1% van het opgewekt elektrisch vermogen gehanteerd (zie *Bijlage B*

voor berekeningswijze rendementsverlies).

- Economische limitatie door toenemende aanlegkosten bij toenemende leidinglengte/-diameter. Bijvoorbeeld door niet wenselijke interacties met bewoonde/geïndustrialiseerde gebieden en/of beschermde gebieden.
- Voorbeelden van andere kerninstallaties
 - Kerncentrale Borssele: circa 500 m afstand tot het waterlichaam bij een onttrekkingsdebiet van circa 17,5 m³/s
 - Onderzoeksreactor Petten (HFR): circa 2 km afstand tot het waterlichaam bij een onttrekkingsdebiet van 0,9 m³/s

Op basis van bovenstaande wordt het volgende gehanteerd (zie *Tabel 2-6*) ten aanzien van afstand, categorieën en koelmethode:

Tabel 2-6: Gehanteerde afstand tot waterlichaam voor koelmethode en vermogenscategorie.

Vermogens-categorie	Doorstroom	Natte/hybride koeleenheden	Luchtkoeling
E1	1000 m	1000 m	n.v.t.
E2	1000 m	3000 m	n.v.t.
E3	(1000 m)	Geen limieten	Geen limieten

Ten aanzien van bovenstaande tabel wordt het volgende toegelicht:

Categorie E1

Bij deze groep van hoogvermogenende SMR's wordt er van uitgegaan dat deze typen sowieso binnen 1000 meter van het waterlichaam worden geplaatst, ongeacht de koelmethode; in de praktijk zal er gekeken worden de SMR zo dicht mogelijk bij het waterlichaam te kunnen plaatsen.

Categorie E2

Er wordt van uitgegaan dat de SMR's die gebruik maken van doorstroomkoeling dicht bij het waterlichaam zullen staan, in ieder geval binnen 1000 meter. Met natte koeleenheden voor de wat lagere vermogens binnen deze categorie is ook een langere afstand mogelijk, bepaald op 3000 meter.

Categorie E3

Voor de lagere vermogens binnen deze categorie geldt dat koeling met lucht plaatsvindt en daardoor afstanden niet van toepassing zijn. Voor de hogere vermogens in deze categorie kunnen (zeer) beperkte hoeveelheden water nodig zijn t.b.v. natte (of hybride) koeling. Dit betreft een debiet van maximaal 0,07 m³/s (voor 200 MW_{th} zie *Bijlage B* en [11] voor gebruikte waarden t.b.v. bepaling onttrekkingsdebiet). Deze hoeveelheid is beperkt (zo mogelijk aan te sluiten op een standaard wateraansluiting op een bedrijventerrein) en kan in principe over grote afstanden (>3000 m) worden getransporteerd. De afstand tot het koellichaam zal derhalve op basis van het totaal aan economisch factoren worden

bepaald, met als mogelijk resultaat een afstand > 3000 m. Voor doorstroomkoeling wordt standaard 1000 meter gehanteerd, maar is voor deze categorie in principe gebruikelijk (i.v.m. diverse alternatieve koelwijzen).

Voor deze categorie SMR's wordt aangenomen dat deze ten aanzien van koelmogelijkheid overal geplaatst kunnen worden waarbij andere factoren dan koeling, limiterend zullen zijn.

2.3 Aanpak bepaling SMR-locaties

Zoals in dit hoofdstuk beschreven zijn diverse factoren van invloed voor het bepalen van een geschikte locatie van een SMR. Deze factoren zijn in verschillende 'inpassingsdoorsnedes' onder te brengen die samengenomen de meest geschikte gebieden zullen aanwijzen. Het betreft het samenkomen van energievraag, energie-aanbod, koelmogelijkheid, gebiedsbestemmingen, externe invloeden, infrastructuur en bodemgeschiktheid.

Bovenstaande kan in verschillende te volgen stappen worden uitgewerkt. De volgorde van hiervan kan per situatie verschillen zodoende wordt deze niet expliciet aangegeven. De stappen betreffen onder andere:

- Waar is energie nodig?
- Welke energiedrager is nodig (elektriciteit/warmte/waterstof)?
- Hoeveel energie is er nodig en welke mogelijkheden (zoals koppelingen, delen en omzetten van energie) zijn er op basis van de uitgangspunten van de energievisie en -strategie?
- Is er water nodig? Zo ja, hoeveel?
- Welke koelmogelijkheden zijn beschikbaar?
- In hoeverre is de benodigde infrastructuur aanwezig en/of zijn benodigde aanpassingen realistisch?
- In hoeverre spelen energieverliezen een rol bij transport over grote afstand (moet de SMR dichtbij geplaatst worden: warmte vs. elektriciteit)?

- In hoeverre staat de afnemer(s) in een (dicht)bevolkt gebied?
- In hoeverre is er potentieel extern gevaar voor nucleaire veiligheid (vliegvelden, industriële processen etc.)?
- Geldt een bepaald bestemmingsplan voor het gebied op/rond de afnemer/potentiële SMR-locatie?
- In hoeverre zijn plant- en diersoorten beschermd in dit gebied en/of gelden er bepaalde afwijkende milieunormen?
- Is de potentiële SMR-locatie (met mogelijk kleine aanpassingen) geschikt als bouwlocatie (grondeigenschappen etc.) en voldoet het aan de vereiste afmetingen (ruimtebeslag opgegeven door de *vendor*)?

Deze stappen dienen voor Gelderland nader uitgewerkt en zo nodig uitgebreid te worden. In dit rapport is voor een aantal belangrijke onderdelen een eerste invulling gegeven.

In dit hoofdstuk worden enkele doorsnedes weergegeven ter ondersteuning van een initiële verkenning. De doorsnedes bepalen mogelijkheden voor aanbod (d.w.z. mogelijkheden vanuit koeling) enerzijds, en vanuit de vraag (energie- en warmtevraag) anderzijds. Daarnaast worden ook doorsnedes weergegeven voor bestemmingen en activiteiten die invloed kunnen hebben op locatiekeuze.

3.1 Koeling

Zoals in sectie 2.2 wordt beschreven, is koeling een van de belangrijkste basisvoorwaarden om een SMR te plaatsen. Meer specifiek geldt dat voor de categorieën E1 en E2 een vorm van waterkoeling benodigd is. Koeling kan voor deze categorieën plaatsvinden op basis van doorstroomkoeling of met koeleenheden.

Op de volgende pagina's wordt in zowel *Figuur 3-1* als *Figuur 3-2* een overzicht (doorsnede) gepresenteerd van mogelijke plaatsing van SMR's met betrekking tot het in hoofdstuk 2 bepaalde koelpotentieel voor de belangrijkste koelwaterlichamen in Gelderland.

Het onderscheid wordt gegeven tussen doorstroomkoeling en koeleenheden, evenals een onderscheid tussen een afstand van 1000 meter en 3000 meter naar het koellichaam. Merk op dat de overzichtskaarten alleen categorieën E1 en E2 in kaart brengen (categorie E3 heeft nagenoeg geen beperkingen ten aanzien van koelwatertoevoer, echter ook voor deze categorie geldt dat indien er voor doorstroomkoeling gekozen wordt, een afstand tot 1000 meter gehanteerd wordt).

3.2 Energievraag

Naast het *aanbod* (d.w.z. in de vorm van plaatsingsmogelijkheden op basis van restwarmte-afvoercapaciteit) is de *energievraag* een andere bepalende doorsnede. Deze doorsnede geeft de behoefte weer waarbij een SMR van toegevoegde waarde kan zijn.

De energievraag wordt bepaald door de vraag naar elektriciteit, warmte en waterstof. Deze varianten komen in de PCES [1] en de Concept Energievisie [2] aan bod en worden

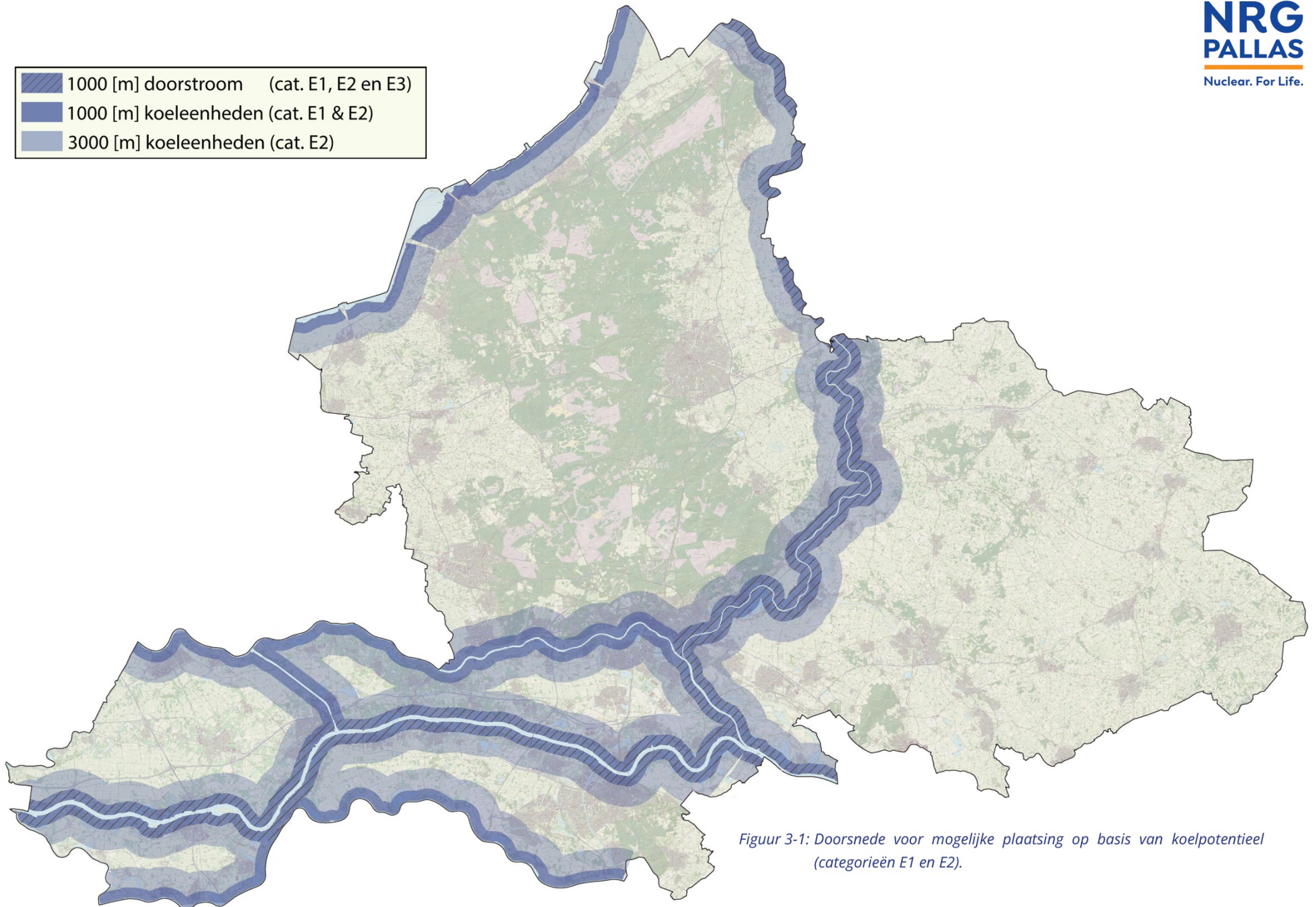
in respectievelijk *Figuur 3-3*, *Figuur 3-4*, en *Figuur 3-5* weergegeven.

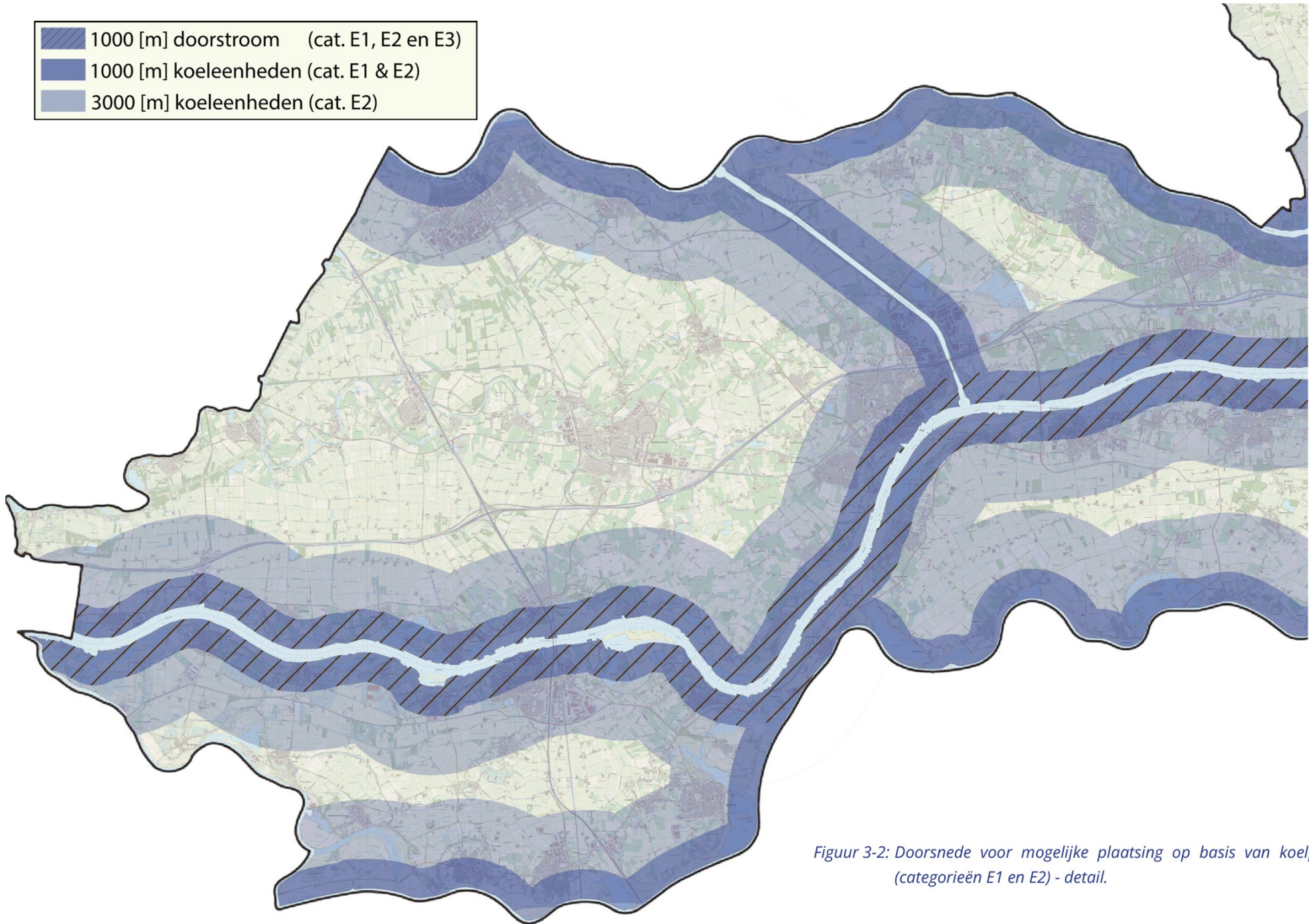
3.3 Bestemmingen en activiteiten

De laatste relevante doorsnede is gebaseerd op de verschillende activiteiten die plaatsvinden op locaties binnen de provincie Gelderland. Deze activiteiten worden doorgaans vastgelegd in de bestemmingsplannen. In deze bestemmingsplannen wordt aangegeven welke activiteiten voorzien worden op de betreffende locatie.

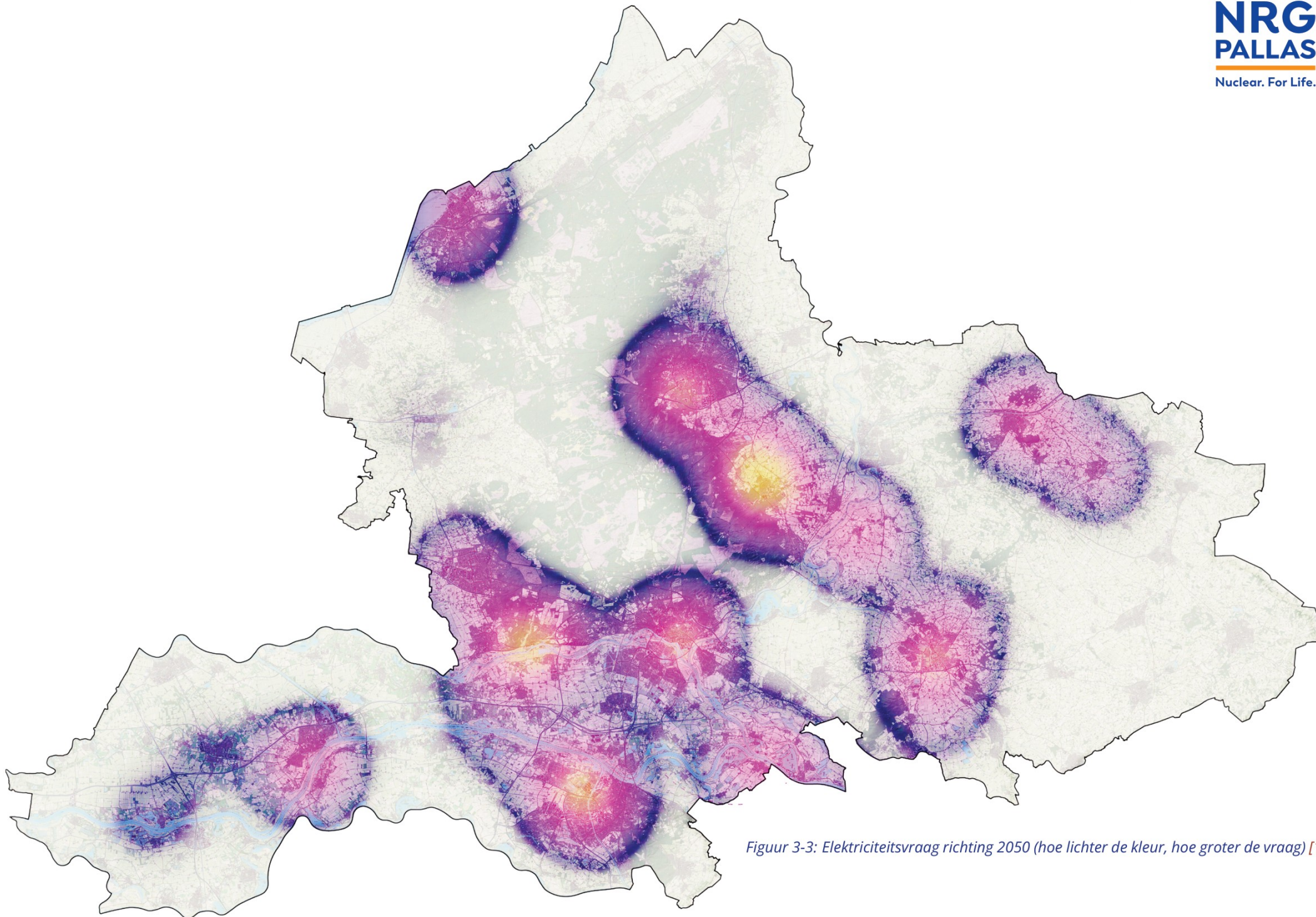
Er zijn veel bestemmingen die redelijkerwijs een invloed kunnen hebben op een locatiekeuze. Activiteiten als verkeer, recreatie evenals stedelijke gebieden, woongebieden, industrie en natuurgebruik kunnen relevant zijn. Een voorbeeld hiervan is een doorsnede voor het natuurgebruik zoals gedefinieerd voor Natura2000 gebieden, in *Figuur 3-6* weergegeven. Om een SMR in of bij een Natura2000 gebied te mogen plaatsen, moet aangetoond worden dat het bedrijven van de SMR en de bijkomende activiteiten (transportbewegingen e.d.), binnen de vereisten vallen die gelden voor dit gebied, zoals de eisen voor stikstofuitstoot (het bedrijven van een SMR veroorzaakt geen stikstofuitstoot). Gezien de grootte van dit gebied en de vele gebieden langs de voor koeling (potentieel) geschikte rivieren, dient in een volgende stap bepaald te worden welke (rand)voorwaarden van toepassing zijn en welke mogelijkheden er zijn, om een SMR in een dergelijk gebied te kunnen inpassen.

In zijn algemeenheid dient voor een nadere specificering van een potentieel geschikte locaties bepaald te worden welke doorsnedes van de bestemmingsplannen en activiteiten relevant zijn.

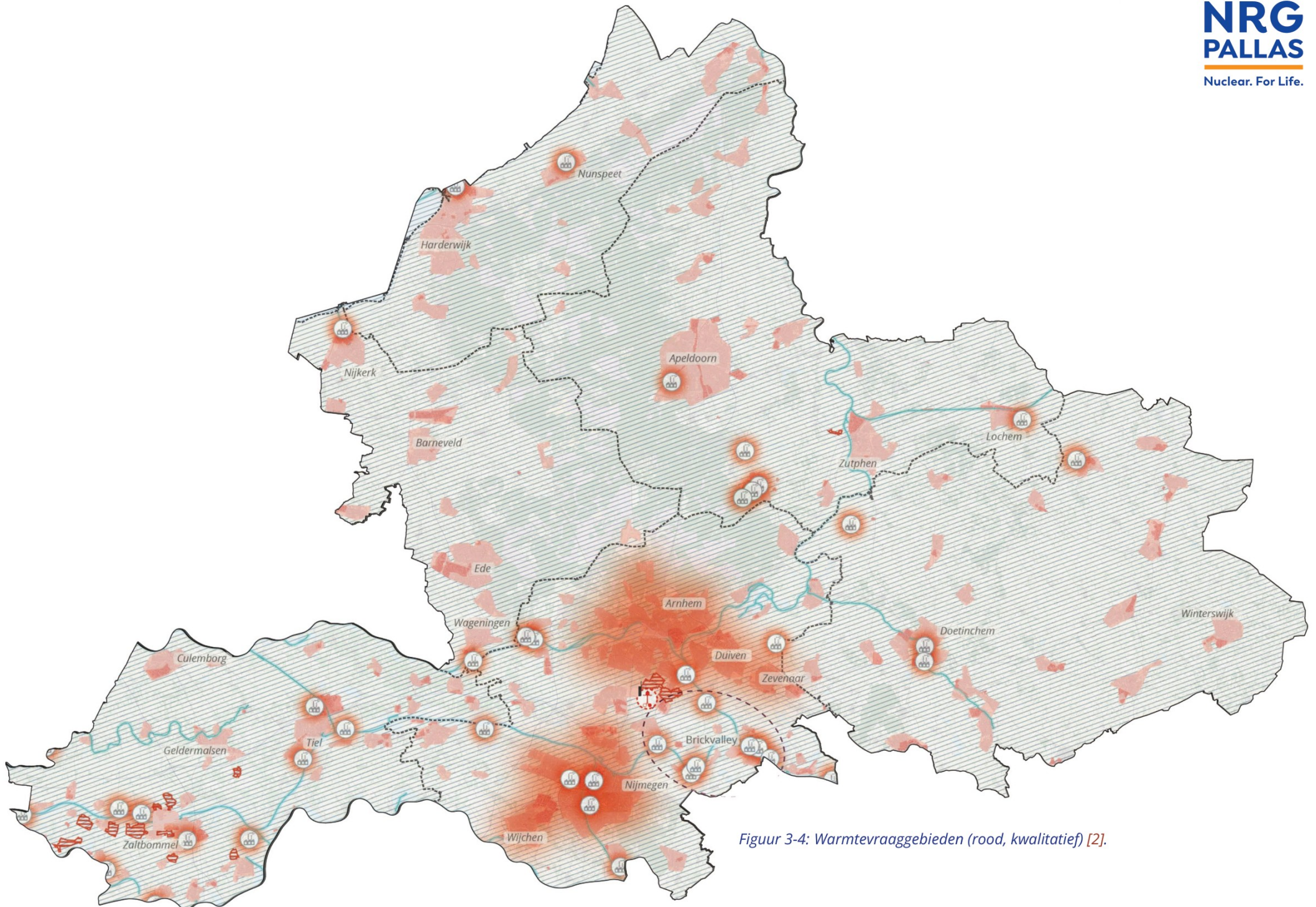




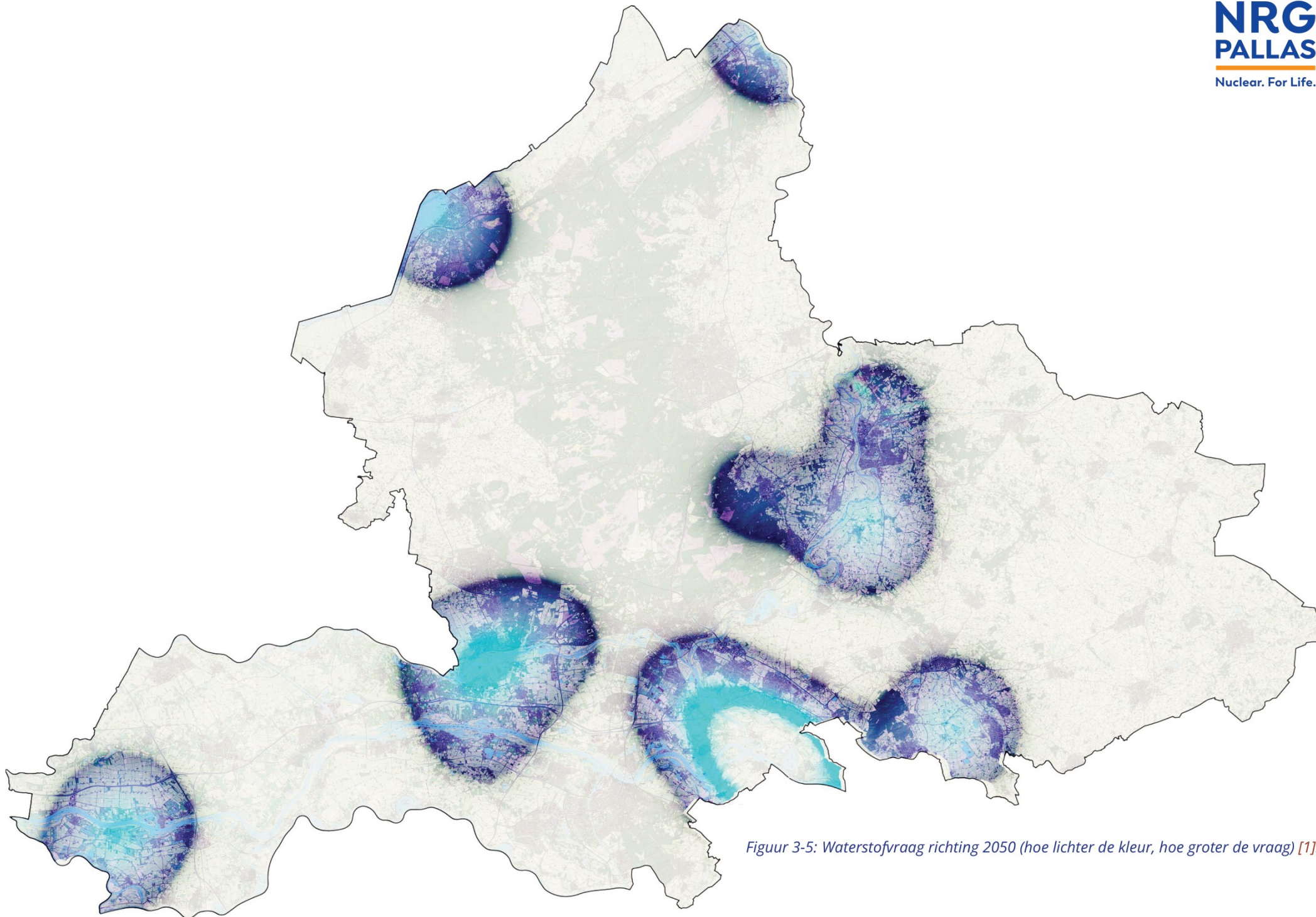
Figuur 3-2: Doorsnede voor mogelijke plaatsing op basis van koelpotentieel (categorieën E1 en E2) - detail.



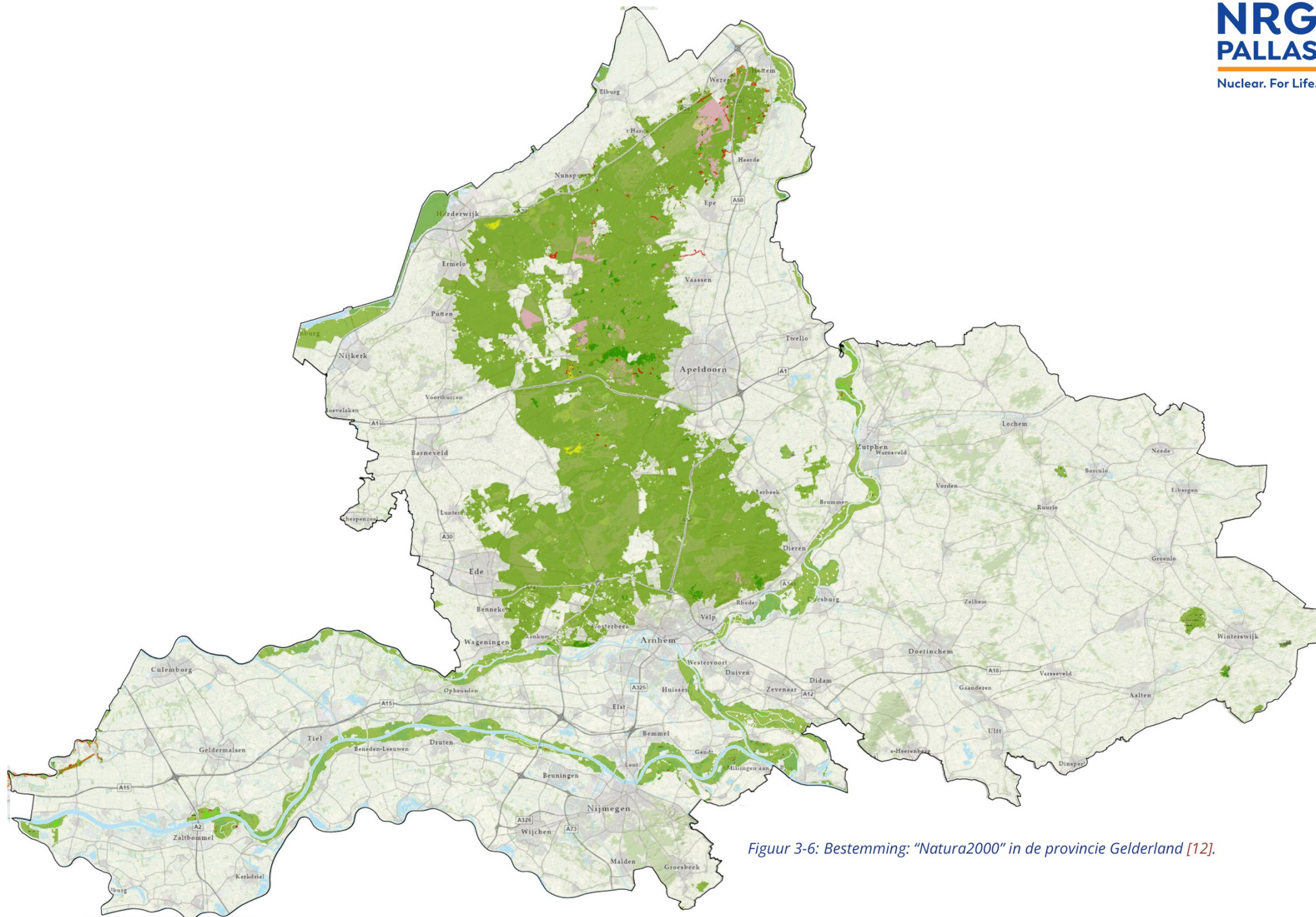
Figuur 3-3: Elektriciteitsvraag richting 2050 (hoe lichter de kleur, hoe groter de vraag) [1].



Figuur 3-4: Warmtevraaggebieden (rood, kwalitatief) [2].



Figuur 3-5: Waterstofvraag richting 2050 (hoe lichter de kleur, hoe groter de vraag) [1].



Figuur 3-6: Bestemming: "Natura2000" in de provincie Gelderland [12].

Met de bestaande categorisatie op basis van thermisch vermogen uit sectie 2.2 (E1, E2 en E3) kan een indicatieve koppeling gemaakt worden met verschillende soorten energiedragers binnen het Gelderse energiesysteem. Dit kan gedaan worden op basis van drie energiedragers – elektriciteit, warmte en waterstof – en vier sectoren – gebouwde omgeving, mobiliteit, industrie & bedrijven, en landbouw – zoals gedefinieerd in de Concept Energievisie Gelderland. De informatie over energievraag van de verschillende sectoren komt voornamelijk uit Concept Energievisie en de PCES. Waar nodig wordt missende informatie ingeschat d.m.v. openbare bronnen. Allereerst wordt kort de methodiek van de indicatieve koppeling toegelicht. De koppeling wordt concreet gemaakt in sectie 4.2.

4.1 SMR's versus energiedragers en sectoren

Voor SMR-inpassing wordt in dit rapport hoofdzakelijk gekeken naar het gebruik van SMR's binnen de sector "Industrie & bedrijven". De reden hiervoor is de relatief grote energievraag vanuit deze sector, vaak geconcentreerd op enkele locaties, en de beschikbare informatie over de energievraag vanuit de PCES. Deze vraag betreft op dit moment voornamelijk elektriciteitslevering voor bijvoorbeeld industriële processen die geëlektrificeerd worden of al waren, of voor een collectie aan bedrijven waarvoor decentrale elektriciteitslevering gebruikt kan worden om het net te verlichten. Daarnaast zal de verwachte stijging in waterstofvraag voor deze sector gepaard gaan met een toenemende elektriciteitsvraag als naast aftakkingen op de waterstofbackbone er binnen de provincie waterstof wordt geproduceerd door elektrolyse (zie sectie 4.1.3).

SMR's kunnen binnen de sector "Industrie & bedrijven" mogelijk ook ondersteunen door directe warmtelevering. Er bestaat namelijk een overeenkomst tussen het primaire energieaanbod van een kernreactor en de veelvoorkomende primaire energievraag van diverse industriële processen: warmte. Een directe koppeling tussen warmtevraag en -aanbod maakt de omzetting naar elektriciteit overbodig, wat voor een kernreactor een aanzienlijk efficiënter gebruik van de opgewekte energie kan betekenen.

In zowel elektriciteits- als warmtelevering wordt uitgegaan van decentrale levering zoals aangegeven in de inrichtingsprincipes. Voor warmtelevering is dit in de praktijk ook bijna

altijd het geval vanwege energieverliezen over langere afstanden. Bij elektriciteitslevering blijft een aansluiting op het landelijke elektriciteitsnet wel een mogelijkheid.

4.1.1 Elektriciteitslevering

Elektriciteitslevering door SMR's is relatief eenvoudig: elke SMR kan in principe gebouwd worden om de opgewekte thermische energie om te zetten naar elektriciteit, met een efficiëntie van circa 33%. Om een (meer theoretische) inpassing te maken voor de sector "Industrie & bedrijven" op basis van elektriciteitsvraag is voor SMR's alleen het elektrisch vermogen van belang. Het elektrisch vermogen wordt voor de drie E-categorieën in *Tabel 2-2* onder het thermisch vermogen weergegeven. Bij deze koppeling wordt gekeken naar het benodigde elektrisch vermogen *per geleverde module*. In de realiteit is het ook mogelijk om meerdere modules uit een lagere vermogenscategorie te gebruiken om tot het totaal benodigde elektrisch vermogen te komen.

4.1.2 Warmtelevering

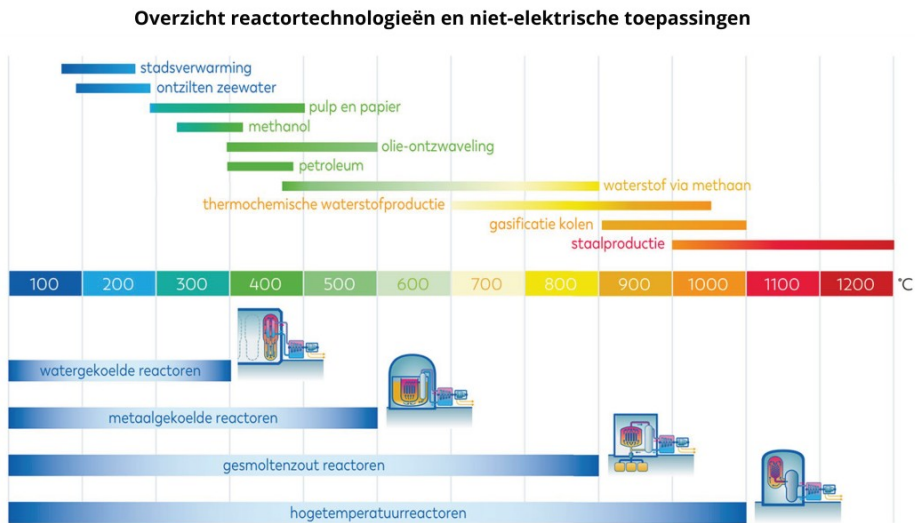
Voor warmtelevering van SMR's zijn van belang: leveringstemperatuur en thermisch vermogen. Hierin is leveringstemperatuur bepalend omdat industriële processen veelal op specifieke temperaturen plaatsvinden en aan thermisch vermogen relatief eenvoudiger voldaan kan worden via *load following* of het gebruik van meerdere modules. *Tabel 4-1* geeft een categorisatie weer op basis van aanleveringstemperatuur: lage-temperatuur (LT), midden-temperatuur (MT) en hoge-temperatuur (HT). Deze categorisatie kan gebruikt worden om een grove inschatting te maken welke type SMR's in te passen zijn binnen bepaalde industriële processen, kijkend naar systeemtemperaturen.

Figuur 4-1 laat een voorbeeld zien van systeemtemperaturen van zowel enkele industriële processen als het temperatuurbereik van verschillende reactortechnologieën. Dit figuur gaat uit van directe warmte-inzet van SMR's en bevatten dus alleen *niet-elektrische toepassingen*. Opgemerkt kan worden dat *Figuur 4-1* het (elektrisch) opwaarderen van warmte buiten beschouwing laat.

Tabel 4-1: Categorisering op basis van aanleveringstemperatuur.

Categorie LT	Categorie MT	Categorie HT
		
< 350 °C	350 - 700 °C	> 700 °C

Binnen de categorisering op basis van het thermisch vermogen uit *Tabel 2-2* en de aanleveringstemperatuur uit de tabel hierboven, is een overzicht gemaakt van waar een selectie aan SMR-ontwerpen binnen vallen. Dit overzicht is te zien in *Figuur 4-2*. De onderliggende gegevens van dit figuur zijn te vinden in *Bijlage C*.



Figuur 4-1: Globaal overzicht van reactorontwerpen met hun temperatuurbereik met daarboven enkele (industriële) processen met systeemtemperaturen.

4.1.3 Waterstof

Zowel in de Concept Energievisie en PCES wordt een sterke groei in waterstofvraag verwacht voor primair de industrie en zware mobiliteit [5], [6]. Zo schat de Concept Energievisie een waterstofvraag van 2 tot 13 TWh per jaar in 2050 (afhankelijk van toekomstige omstandigheden) en geeft de PCES voor specifiek de deelnemende Cluster 6-bedrijven een verwachte waterstofvraag van 789 GWh. Een gedeelte van de waterstofvraag kan opgevangen worden door aftakkingen op de landelijke waterstofbackbone, maar waterstofproductie binnen de provincie, via SMR's, kan hier ook een rol spelen.

Er zijn zo'n vijf waterstofproductiemethodes te benoemen, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen methodes o.b.v. elektrolyse van water – een vooraanstaand elektrochemisch proces – en thermochemische processen (warmte) [13]:

Elektrolyse van water (elektrochemisch)

- Alkaline Water Electrolysis (AEL)
- Proton-Exchange Membrane (PEM) Electrolysis:
- Solid Oxide Electrolyser Cell (SOEC)

Thermochemisch

- Steam Methane Reforming – waterstof via methaan in *Figuur 4-1*.
- Thermochemical Water Splitting (TCWS) – thermochemische waterstofproductie in *Figuur 4-1*.

Opgemerkt kan worden dat alleen de thermochemische processen worden genoemd in *Figuur 4-1* omdat elektrolyse per definitie een (gedeeltelijk) elektrische toepassing betreft.

Tabel 4-2: Overzicht emissiereductie en toename van elektriciteits- en waterstofgebruik per deelregio [6].

Methode	Elektrolyse van water (elektrochemisch)			Thermochemisch	
	AEL	PEM	SOEC	Via methaan	TCWS
Temperatuur	LT	LT	HT	HT/MT	HT/MT
Energiedrager	Elektriciteit	Elektriciteit	Elektriciteit + warmte	Warmte	Warmte
Kenmerkende eigenschappen	Bewezen methode en relatief goedkoop	Flexibel	Mogelijk geschikt	Bewezen methode (i.c.m. fossiele brandstoffen)	Hoge efficiëntie

Tabel 4-2 geeft een beknopt overzicht van de werkingstemperatuur (op basis van Tabel 4-1), de benodigde energiedrager en enkele kenmerkende eigenschappen per waterstofproductiemethode. Omdat SMR's in staat zijn elektriciteit en warmte te leveren, zowel apart als in combinatie (co-generatie), kunnen SMR's aan elk van deze waterstofproductiemethodes gekoppeld worden. Hierbij is voor geen van de methodes bij voorbaat een meest geschikte koppeling te maken t.a.v. bepaalde SMR-ontwerpen. LT warmte uit SM-LWR's kan bijvoorbeeld opgewaardeerd worden en ook aan HT productiemethodes gekoppeld worden, en HT warmte uit geavanceerde SMR's kan omgezet worden naar elektriciteit om via elektrolyse waterstof te produceren. Welke methode gebruikt wordt hangt af van economische factoren als bestaande infrastructuur, inpassingsmogelijkheden, afnamewijze (transport, opslag of direct naar de klant) en mate van flexibiliteit in een gereguleerd energiesysteem.

4.1.4 Andere sectoren

Hoewel de focus van SMR-inpassing hier binnen de sector "Industrie & bedrijven" ligt, kunnen SMR's ook binnen de andere drie sectoren uit de Concept Energievisie mogelijk een rol spelen. Die mogelijke rollen worden hieronder per sector kort toegelicht.

Gebouwde omgeving

Een van de speerpunten van de sector "Gebouwde omgeving" is een voorkeur voor een collectieve warmteoplossing boven *all-electric* oplossingen. Een koppeling van een SMR aan een collectieve warmteoplossing zoals stadswarmte is een LT-toepassing zoals besproken in sectie 4.1.2. Kernenergie gebruikt voor stadswarmte is een bestaande

koppeling met als voorbeeld kerncentrale Beznau in Zwitserland [14]. Daarnaast bestaan er SMR-ontwerpen die specifiek ontworpen zijn met standwarmte als beoogde toepassing, zoals de Finse conceptreactor "LDR-50" [15].

Mobiliteit

Bij de sector "Mobiliteit" worden centrale laadlocaties (met elektriciteit en/of waterstof) en het voorzien van energie-intensieve logistieke bedrijven in hun eigen energiebehoefte genoemd. Bij een significante elektriciteitsvraag is dit een koppeling zoals besproken in sectie 4.2.1 en zal in dat opzicht niet verschillen van de sector "Industrie & bedrijven". Hetzelfde geldt voor het leveren van waterstof, besproken in sectie 4.1.3, waarbij een SMR óf lokaal waterstof kan leveren bij significante vraag óf een grotere hoeveelheid waterstof levert aan de waterstofbackbone.

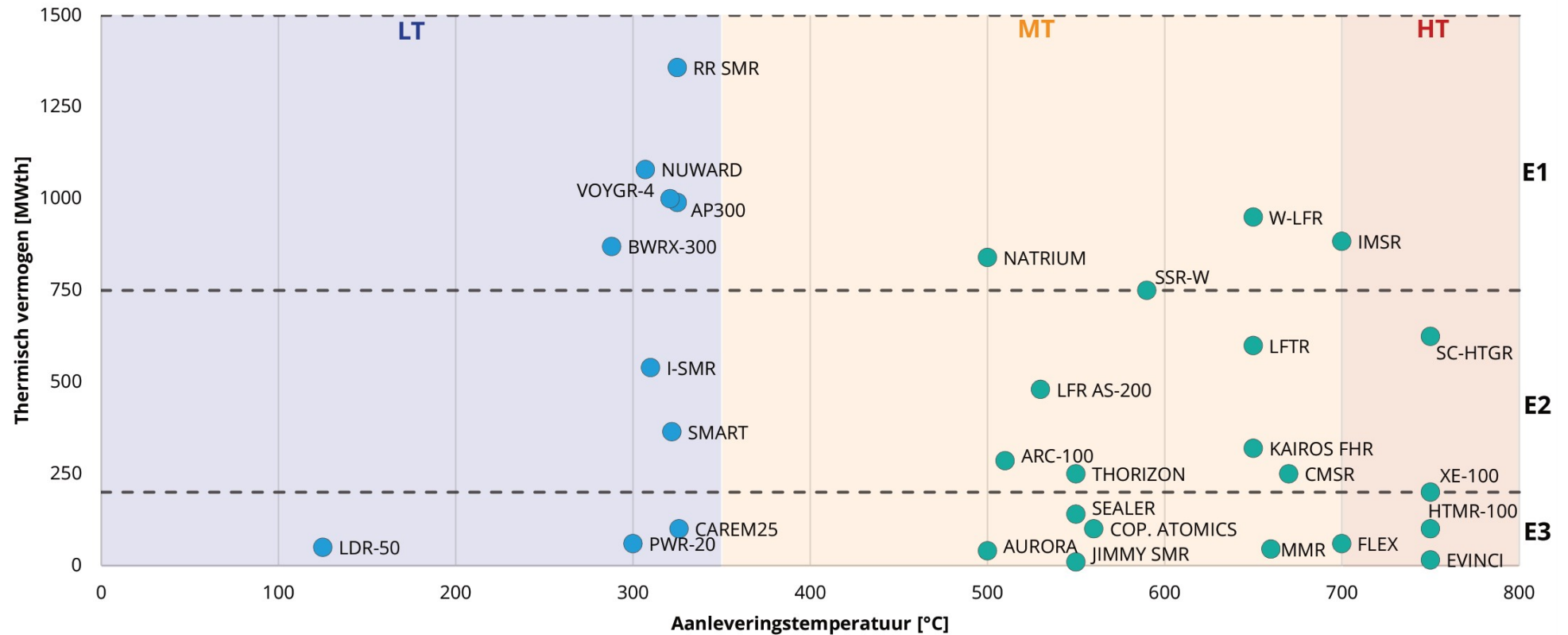
Landbouw

Binnen de sector "Landbouw" wordt onder andere ingezet op eigen energievoorziening van grootverbruikers om de netimpact te verkleinen. Hier zou de koppeling met SMR's niet significant anders zijn dan binnen de sector "Industrie & bedrijven", omdat dit voornamelijk in de vorm van elektriciteitslevering zal zijn. Daarnaast zijn binnen de glastuinbouw ook mogelijkheden om een directe warmtekoppeling te maken op dezelfde manier als stadsverwarming.

Er bestaat ook een mogelijkheid SMR-inpassing binnen meerdere sectoren te combineren, zoals het gebruik van restwarmte voor de gebouwde omgeving/landbouw, of het produceren van waterstof voor de mobiliteitssector bij lage energievraag. In dit

Overzicht SMR-ontwerpen

● Lichtwater ● Geavanceerd



Figuur 4-2: Overzicht van SMR-ontwerpen als functie van aanleveringstemperatuur en thermisch vermogen. De scheidingen tussen de E-categorieën voor thermisch vermogen worden weergegeven door horizontale stippellijnen. De T-categorieën voor aanleveringstemperatuur zijn weergegeven met gekleurde gebieden, met blauw voor T1, oranje voor T2 en rood voor T3.

geval kan één sector leidend zijn voor SMR-inpassing, en de andere sectoren sturend.

4.2 Koppeling met sectoren

4.2.1 Elektriciteitsvraag

Met de gedefinieerde E-categorieën uit *Tabel 2-2* kan er een indicatieve koppeling gemaakt worden tussen het elektrisch vermogen van de categorieën en de verwachte elektriciteitsvraag van de deelnemende Cluster 6-bedrijven uit de PCES. Deze koppeling is op basis van elektriciteitsvraag om daarmee inzicht te geven in hoe SMR-aanbod op deze vraag kan inspelen. De koppeling is te vinden in *Tabel 4-3*.

De verwachte elektriciteitsvraag wordt in de PCES voor elk van de negen gedefinieerde deelregio's gegeven, uitgaande van volledige realisatie van verduurzamingsprojecten van de deelnemende bedrijven. Er wordt bij deze vraag onderscheid gemaakt tussen directe elektriciteitsvraag en benodigde elektrolysecapaciteit vanuit de waterstofvraag. Wanneer de waterstofvraag in de PCES alleen is gegeven per jaar, is hieruit de benodigde elektrolysecapaciteit afgeschat. Als laatste wordt er ook een koppeling gemaakt met de totale elektriciteitsvraag van alle deelregio's samen, zowel voor elektriciteit en waterstof apart als opgeteld.

Voor de SMR categoriekoppeling is aangenomen dat er maximaal één SMR-eenheid binnen een E-categorie wordt ingepast om aan de elektriciteits- of waterstofvraag te voldoen. Dit betekent bijvoorbeeld dat de E3 categorie maximaal 67 MW_e (200 MW_{th}) kan leveren. Vanuit het modulaire karakter van SMR's is het in de realiteit echter ook mogelijk om meerdere SMR-eenheden uit een lage categorie in te zetten om tot een hoger gecombineerd vermogen te komen dat overeenkomt met één SMR-eenheid uit een hogere categorie. Bijvoorbeeld vier SMR's van 67 MW_e (200 MW_{th}) uit categorie E3 die in totaal 268 MW_e kunnen leveren, hetgeen iets meer is dan het maximale vermogen van één SMR-eenheid van 250 MW_e (750 MW_{th}) uit de E2-categorie.

Uit de koppeling van *Tabel 4-3* is te zien dat voor individuele deelregio's – puur op basis van vraag en aanbod – zowel de elektriciteitsvraag als elektrolysecapaciteit vanuit de Cluster 6-bedrijven veelal opgevangen kan worden door SMR's uit de E3-categorie.

De gecombineerde elektriciteitsvraag van de deelregio's samen kan hier opgevangen worden met één SMR-eenheid van de E1-categorie (of met meerdere SMR-eenheden uit de E2 en E3-categorieën). Omdat elektriciteit over relatief grote afstanden vervoerd kan worden zonder significant energieverlies, is gecombineerde elektriciteitslevering vanuit één SMR-eenheid in principe mogelijk, maar brengt dit wel extra infrastructuurkosten met zich mee ten opzichte van lokale elektriciteitslevering aan individuele grootverbruikers.

4.2.2 Warmtevraag

In *Tabel 4-3* wordt als tweede een koppeling gemaakt tussen eventuele genoemde of geïmpliceerde warmtevraag in de PCES en de categorisering op basis van aanleveringstemperatuur uit *Tabel 4-1*. Deze koppeling is alleen op basis van procestemperatuur, omdat de benodigde energievraag (in de vorm van warmte-energie) vanuit de Cluster 6-bedrijven niet gegeven wordt. Daarnaast bestaat de energievraag per deelregio zeer waarschijnlijk uit meerdere vormen van warmtevraag: zo kunnen er in één deelregio bijvoorbeeld zowel bedrijven zijn die LT-warmte nodig hebben, als bedrijven die HT-warmte nodig hebben. Hierdoor is koppeling aan één categorie op dit moment niet mogelijk.

Er geldt voor directe warmtelevering dat dit het beste zo dicht mogelijk bij de energieafnemer(s) kan plaatsvinden vanwege het energieverlies bij het vervoeren van warmte over lange afstanden. Hierin verschilt warmtelevering van elektriciteitslevering en is het minder rendabel één centrale SMR-eenheid in te zetten voor warmtelevering aan een verspreide verzameling van afnemers.

Opgemerkt kan worden dat SMR-inzet, voor zowel elektriciteit als warmte, niet beperkt wordt door de huidige (indicatieve) invulling van *Tabel 4-3*. SMR's hebben zo mogelijk een rol binnen de strategische richtlijnen voor "Industrie & bedrijven" uit de Concept Energievisie voor nieuwe grootverbruikers en toekomstige invulling van bedrijventerreinen. Het modulaire karakter van SMR's biedt bijvoorbeeld de mogelijkheid locaties voor grootverbruikers toekomstbestendig te maken, door het energieaanbod een minder limiterende factor te maken voor uitbreiding van gevestigde grootverbruikers.

Tabel 4-3: Koppeling tussen de geschatte vraag in 2035 van elektriciteit en waterstof van de deelnemende bedrijven uit de PCES en de SMR E-categorieën. Tevens de koppeling tussen directe warmte-inzet van SMR's bij industrie in de deelregio's, als een warmtevraag of specifieke industrie in de PCES is genoemd.

VERANDERING NAAR 2035			POTENTIËLE WARMTE-INZET	
Deelregio	Elektriciteits- / Waterstofvraag ¹	SMR-inpassing	Warmtevraag	SMR-inpassing
	MW _e	Categorie	°C	Categorie
Achterhoek	81 / 0	E2	<150 ² / > 1000 ³	LT / HT
Foodvalley	10 / 0	E3	-	-
Groene Metropoolregio-Noord	98 / 4	E2 / E3	< 250 ⁴	LT
Groene Metropoolregio-Oost	15 / 77	E3	> 1000 ³	HT
Noord-Veluwe	17 / 15	E3	-	-
Rivierenland	19 / 43	E3	> 1000 ³	HT
Stedendriehoek-Oost	40 / 0	E3	< 150 ²	LT
Stedendriehoek-West	60 / 2	E3	-	-
Tussen Maas en Waal	39 / 2	E3	-	-
Individueel totaal	379 / 143	E1 / E2	-	-
Totaal	522	E1	-	-

¹Benodigde capaciteit voor waterstof teruggerekend uit gegeven jaarbehoefte (in GWh) in de PCES. Aangenomen is een capaciteitsfactor van 90% voor de SMR en 60% elektrische efficiëntie voor elektrolyse. ²Papierindustrie, lage-temperatuur processen. ³Keramische industrie, hoge-temperatuur processen. ⁴Gegeven.

De vraag van het Gelders College van Gedeputeerde Staten of een kleine modulaire kernreactor op Gelders grondgebied van toegevoegde waarde kan zijn, is in deze verkennende studie onderzocht.

Een van de belangrijkste basisvoorwaarden om een SMR te kunnen plaatsen betreft de mogelijkheid tot het afvoeren van restwarmte(koeling). Uit het verkennende onderzoek is gebleken dat Gelderland over voldoende koelcapaciteit beschikt om binnen Gelders grondgebied een SMR in de hoogste vermogenscategorie (tot 500 MW_e) te kunnen plaatsen. Andere voorwaarden rondom vergunning en realiseerbaarheid zijn vooralsnog minder bepalend.

Voor het identificeren van Gelders grondgebied met betrekking tot SMR-inpassing tot een vermogen van 500 MW_e is gekeken naar het gebied waar de toekomstige energievraag, op basis van elektriciteit, warmte en waterstof, zich bevindt (zie sectie 3.2). In deze fase is het nog niet mogelijk om gebieden te beoordelen/selecteren op basis van bestemmingen en activiteiten, zoals natuurgebieden (zie sectie 3.3) alsook op basis van voorwaarden die gelden voor een specifieke locatie, zoals grondspecificaties en infrastructuur.

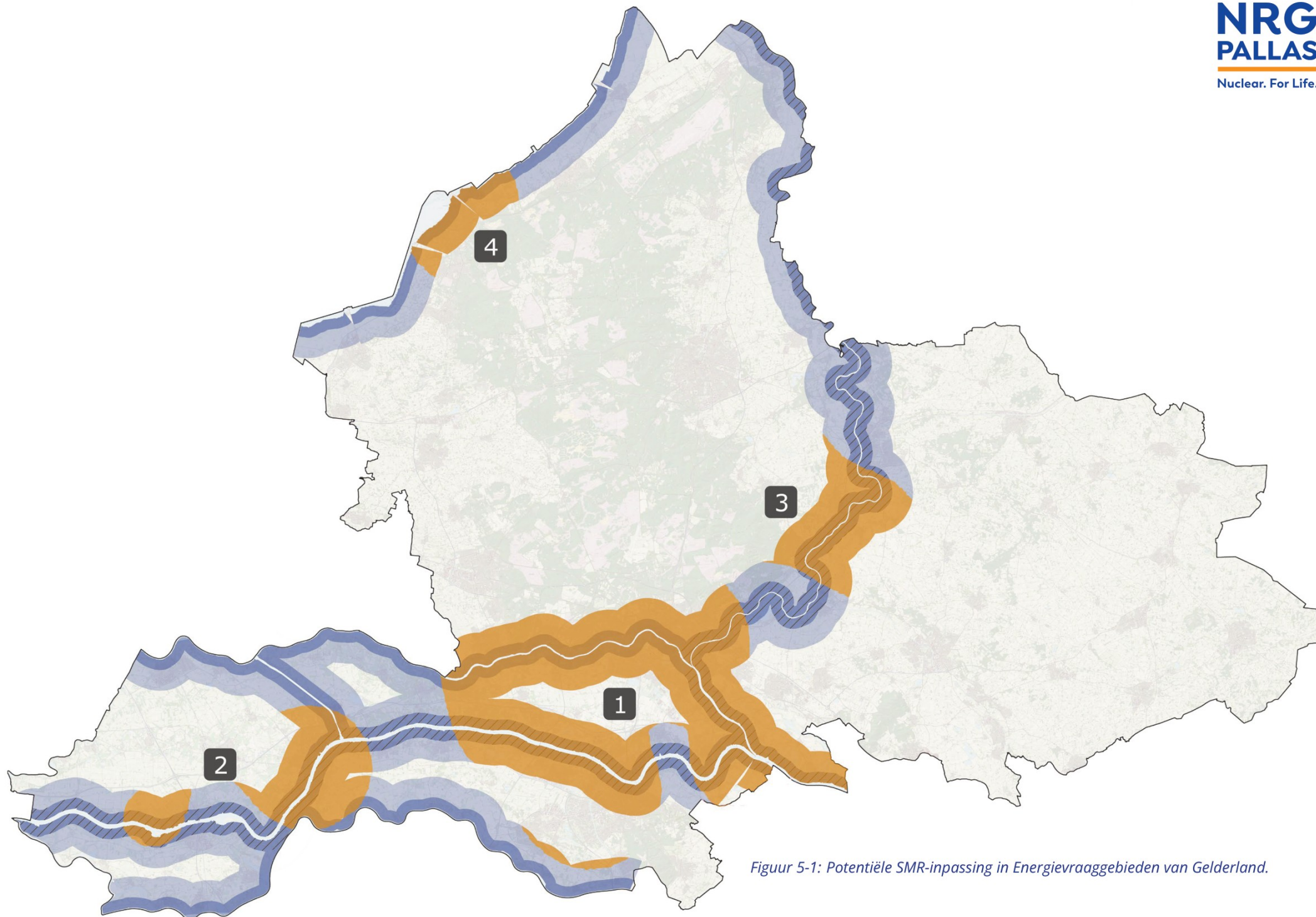
Voor het identificeren van potentieel grondgebied is de energievraagdoorsnede gecombineerd met de doorsnede voor de geschikte koelgebieden voor een vermogen tussen 67 MW_e en 500 MW_e (SMR's met een lager vermogen zijn niet afhankelijk van de ligging van waterlichamen). Het resultaat is weergegeven in *Figuur 5-1*. De overlap (in oranje gearceerd) geeft een indicatie waar SMR's ingepast kunnen worden in de energievraag.

De betreffende vier gebieden die uit de combinatie van deze twee doorsnedes komen bevinden zich in de regio's:

1. Arnhem-Nijmegen
2. Rivierenland
3. IJssel-Zuid
4. Randmeren

De aangegeven gebieden zijn indicatief en geven een eerste zoekrichting naar locaties met hoge potentie voor SMR-inzet aan.

Een ander resultaat betreft de indicatieve koppeling van SMR's aan de energievraag van deelnemende Cluster 6-bedrijven uit de PCES. Hiertoe zijn verschillende SMR-typen op basis van hoeveelheid vermogen en warmtetemperatuur gekoppeld aan deelregio's (zie *Tabel 4-3*). Deze koppeling betreft voornamelijk elektriciteit- en waterstofvraag op basis van de gegevens van de PCES, maar waar mogelijk is directe warmtelevering ook aangegeven. Een optimale inpassing van SMR's in het Gelders energiesysteem kan het combineren van deze drie energiedragers zijn. Een selectie van representatieve SMR-ontwerpen (niet-allesomvattend) die potentieel geschikt worden geacht voor inpassing in Gelderland/Nederland zijn te vinden in *Bijlage C*. Hierbij is onderscheid gemaakt in vermogen, warmtelevering, technologie en leverancier. De koppeling met deze SMR ontwerpen wordt gemaakt met de vermogenscategorieën E1-E3 en de warmtelevering van lage en hoge temperatuur LT-HT.



Figuur 5-1: Potentiële SMR-inpassing in Energievraaggebieden van Gelderland.

- 1 NRG, „Small Modular Reactors (SMR's),” mei 2023. [Online]. Available: <https://www.nrg.eu/onderzoek/onderzoek-naar-kernenergie/small-modular-reactors>.
- 2 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>.
- 3 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].
- 4 ANVS, „Kerncentrale bouwen: hoe gaat dat in zijn werk,” [Online]. Available: <https://www.autoriteitnvs.nl/voorlichting/nieuwe-kerncentrale>. [Geopend 18 december 2024].
- 5 Provincie Gelderland, „[Concept] Energievisie Gelderland,” 2 september 2024.
- 6 Water Energy Solutions, „Provinciale Cluster Energie Strategie (PCES) Gelderland,” Cluster6, november 2024.
- 7 „Energie in de toekomst, Beleidskader Energiesysteem,” Provincie Gelderland, 26 oktober 2024.
- 8 ANVS, „Handreiking VOBK,” 5 april 2023. [Online]. Available: <https://www.autoriteitnvs.nl/documenten/richtlijn/2023/04/05/handreiking-vobk>.
- 9 Rijksoverheid, „Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen (Bkse),” 1 januari 2024. [Online]. Available: <https://wetten.overheid.nl/BWBR0002667/2024-01-01>. [Geopend 18 december 2024].
- 10 Kelvion Holding GmbH, „Cooling Towers,” [Online]. Available: <https://www.kelvion.com/products/heat-rejection-heat-recovery-solutions/cooling-towers>. [Geopend 18 december 2024].
- 11 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].
- 12 Provincie Gelderland, „Geoportaal Gelderland,” [Online]. Available: <https://geoportaal.gelderland.nl/portaal/apps/webappviewer/index.html?id=073b6921472042258d071026621badc6>. [Geopend December 2024].
- 13 NPHyCo, „KPIs and Assessments on Nuclear H2 Economic Feasibility Compared with other Types of H2,” 2024.
- 14 Axpo, „Brochure Beznau Nuclear Power Plant - Reliable, Environmentally Compatible Electricity Production,” december 2021. [Online]. Available: https://www.axpo.com/content/dam/axpo19/master/files-master/dossiers/beznau-power-plant/Axpo_KKB_Broschuere_EN_12_2021.pdf.
- 15 Steady Energy, „LDR-50 Home Page,” [Online]. Available: <https://www.steadyenergy.com/>. [Geopend 25 Oktober 2024].
- 16 NRG, „Notitie: koeling nucleaire installaties,” Ref. 2.7127.30/24.296821, 12 november 2024.
- 17 Rijkswaterstaat, „Waterinfo - Afvoer [Debiet in m3/s],” [Online]. Available: https://waterinfo.rws.nl/expert/Afvoer?parameters=Debiet__20Oppervlaktewater__20m3__2Fs. [Geopend 18 december 2024].

- 18 I.E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, Second Edition, ISBN 3-540-15962-2, Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
- 19 OECD NEA, „The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition,” 3 maart 2024. [Online]. Available: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_90816/the-neo-small-modular-reactor-dashboard-second-edition. [Geopend 19 december 2024].
- 20 TNO en NRG PALLAS, „Small modular reactors in the Dutch energy system - Combined heat and power production in industry,” 15 november 2024. [Online]. Available: <https://www.tno.nl/en/newsroom/2024/11/small-modular-reactors-dutch-energy/>. [Geopend 19 december 2024].

Figuur M1:	Overzicht koelmogelijkheden Gelderse waterlichamen.....	6	Figuur 4-2:	Overzicht van SMR-ontwerpen als functie van aanleveringstemperatuur en thermisch vermogen. De scheidingen tussen de E-categorieën voor thermisch vermogen worden weergegeven door horizontale stippellijnen. De T-categorieën voor aanleveringstemperatuur zijn weergegeven met gekleurde gebieden, met blauw voor T1, oranje voor T2 en rood voor T3.....	39
Figuur M2:	Elektriciteitsvraag richting 2050.....	7			
Figuur M3:	Warmtevraaggebieden.....	7			
Figuur M4:	Waterstofvraag richting 2050.....	7			
Figuur M5:	Potentiële SMR-inpassing in Energievraaggebieden van Gelderland.....	10	Figuur 5-1:	Potentiële SMR-inpassing in Energievraaggebieden van Gelderland.....	43
Figuur 1-1:	Opbouw wettelijk kader [3].....	13			
Figuur 3-1:	Doorsnede voor mogelijke plaatsing op basis van koelpotentieel (categorieën E1 en E2).....	30			
Figuur 3-2:	Doorsnede voor mogelijke plaatsing op basis van koelpotentieel (categorieën E1 en E2) - detail.....	31			
Figuur 3-3:	Elektriciteitsvraag richting 2050 (hoe lichter de kleur, hoe groter de vraag) [1].	32			
Figuur 3-4:	Warmtevraaggebieden (rood, kwalitatief) [2].....	33			
Figuur 3-5:	Waterstofvraag richting 2050 (hoe lichter de kleur, hoe groter de vraag) [1].....	34			
Figuur 3-6:	Bestemming: "Natura2000" in de provincie Gelderland [12].	35			
Figuur 4-1:	Globaal overzicht van reactorontwerpen met hun temperatuurbereik met daarboven enkele (industriële) processen met systeemtemperaturen.....	37			

Tabel M1:	Categorisering op basis van elektrisch vermogen.	4	Tabel 2-6:	Gehanteerde afstand tot waterlichaam voor koelmethode en vermogenscategorie.	27
Tabel M2:	Kwalificaties voor koeling van SMR's voor de belangrijkste koellichamen in Gelderland.	5	Tabel 4-1:	Categorisering op basis van aanleveringstemperatuur.	37
Tabel M3:	Gehanteerde afstand tot waterlichaam voor koelmethode en vermogenscategorie.	6	Tabel 4-2:	Overzicht emissiereductie en toename van elektriciteits- en waterstofgebruik per deelregio [6].	38
Tabel M4:	Categorisering op basis van aanleveringstemperatuur.	8	Tabel 4-3:	Koppeling tussen de geschatte vraag in 2035 van elektriciteit en waterstof van de deelnemende bedrijven uit de PCES en de SMR E-categorieën. Tevens de koppeling tussen directe warmte-inzet van SMR's bij industrie in de deelregio's, als een warmtevraag of specifieke industrie in de PCES is genoemd.	41
Tabel M5:	Koppeling tussen de geschatte vraag in 2035 van elektriciteit en waterstof van de deelnemende bedrijven uit de PCES en de SMR E-categorieën. Tevens de koppeling tussen directe warmte-inzet van SMR's bij industrie in de deelregio's, als een warmtevraag of specifieke industrie in de PCES is genoemd.	9	Tabel A1:	Impact op relevante aspecten voor de vier verschillende koeltechnieken.	49
Tabel 1-1:	Overzicht emissiereductie en toename van elektriciteits- en waterstofgebruik per deelregio [6].	17	Tabel C1:	Categorisering op basis van thermisch vermogen.	55
Tabel 2-1:	Belangrijkste waterlichamen Gelderland en bijbehorend minimaal afvoerdebiet.	23	Tabel C2:	Categorisering op basis van aanleveringstemperatuur.	55
Tabel 2-2:	Categorisering op basis van thermisch vermogen.	24	Tabel C3:	Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen de categorie E3.	56
Tabel 2-3:	Geschiktheid waterlichamen Gelderland t.b.v. koeling tot een 200 MW _{th} SMR voor een doorstroomsysteem en natte koeleenheden.	25	Tabel C4:	Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen de categorie E2.	57
Tabel 2-4:	Geschiktheid waterlichamen Gelderland t.b.v. koeling tot een 750 MW _{th} SMR voor een doorstroomsysteem en natte koeleenheden.	25	Tabel C5:	Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen de categorie E1.	58
Tabel 2-5:	Geschiktheid waterlichamen Gelderland t.b.v. koeling tot een 1500 MW _{th} SMR voor een doorstroomsysteem en natte koeleenheden.	26			

AEL	<i>Alkaline Water Electrolysis</i>	PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
ANVS	<i>Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming</i>	SMR	<i>Small Modular Reactor</i>
Bkse	<i>Besluit kerninstallaties splijtstoffen en ertsen</i>	SOEC	<i>Solid Oxide Electrolyser Cell</i>
E(#)	<i>Elektrisch vermogen-categorie</i>	TCWS	<i>Thermochemical Water Splitting</i>
HFR	<i>Hoge Flux Reactor</i>	VOBK	<i>Handreiking Veilig Ontwerp en het veilig Bedrijven van Kernreactoren</i>
HPP	<i>Hydrogen Production Plant</i>	WENRA	<i>Western European Nuclear Regulators' Association</i>
HT	<i>Hoge Temperatuur</i>		
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>		
LT	<i>Lage Temperatuur</i>		
LWR	<i>Light Water Reactor</i>		
SM-LWR	<i>Small Modular Light Water Reactor</i>		
MT	<i>Midden Temperatuur</i>		
MW	<i>Megawatt</i>		
MW_e	<i>Megawatt elektrisch</i>		
MW_{re}	<i>Megawatt restwarmte</i>		
MW_{th}	<i>Megawatt thermisch</i>		
NOAK	<i>Nth of a Kind</i>		
NPP	<i>Nuclear Power Plant</i>		
NRG	<i>Nuclear Research and consultancy Group (NRG PALLAS)</i>		
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>		
NEA	<i>Agency</i>		
(P)CES	<i>(Provinciaal) Cluster Energie Strategie</i>		
PEM	<i>Proton-Exchange Membrane (Electrolysis)</i>		

De onderstaande beschrijving en berekeningen zijn grotendeels de voor dit rapport relevante onderdelen uit een NRG notitie over de koeling van nucleaire installaties [16].

A.1 Technieken en regelgeving

Koeltechnieken

De koeltechnieken die relevant zijn voor energieopwekkingcentrales zijn samengevat in de BREF (*Best Available Techniques Reference Document*) koeling gepubliceerd door de Europese Commissie [11]. Voor energieopwekkingcentrales, waarbij technieken al snel afvallen doordat de totale koelcapaciteit aanzienlijk moet zijn, blijven er vier type geschikte koeltechnieken over:

- Doorstroomsystemen
- Natte koeleenheden
- Hybride koeleenheden
- Droge koelsystemen

Aanvullend zijn er, afhankelijk van de geselecteerde techniek, meerdere subcategorieën aan te wijzen. Zo is er voor luchtgedreven technieken een onderscheid te maken tussen natuurlijke- en geforceerde convectie. Voor de ontwerpen van de meest prominente

SMR-concepten geldt dat er veelal gebruik wordt gemaakt van rechthoekige koeleenheid batterijen met geforceerde convectie. De hoogte van deze torens is hierbij vaak lager dan het gebouw waarin de reactorhal zich in bevindt, en zijn dus niet verantwoordelijk voor horizonvervuiling.

Concluderend uit de BREF koeling kan gesteld worden dat er over het algemeen geen beste techniek bestaat. In plaats daarvan spelen vooral de lokale omstandigheden en wetgeving een belangrijke rol in de selectie van de best toepasbare techniek. De verschillende technieken verhouden zich anders tot elkaar afhankelijk van welke aspecten belangrijker zijn. Een overzicht is gegeven in onderstaande tabel.

WATERVERBRUIK

Het afvoeren van restwarmte van een kernreactor kan gedaan worden met water en/of lucht. Vanwege de grotere warmteoverdracht van water ten opzichte van lucht, maar ook vanwege de grote koelpotentie van verdamping verbruiken watergekoelde installaties over het algemeen minder energie. Dit is onder andere terug te zien in het geleverde vermogen. Daarnaast zijn de installaties voor natte koeling goedkoper omdat deze per unit een hogere koelcapaciteit hebben en daardoor ook minder ruimte in beslag nemen.

Tabel A1: Impact op relevante aspecten voor de vier verschillende koeltechnieken.

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

Verdamping van een koelmedium heeft een sterk koelend effect, waardoor een koeleenheid, vergeleken met een doorstroomsysteem, minder water oppervlaktewater onttrekt.

De koelcapaciteit voor de bovenstaande technieken is afhankelijk van het lokale klimaat en milieu. Voor doorstroomsystemen geldt dat er relatief veel oppervlaktewater beschikbaar moet zijn en dat de capaciteit bepaald wordt door de temperatuur en debiet van het onttrokken water. Natte- en hybride koeleenheden hebben slechts een fractie van het onttrekkingsdebiet van doorstroomsystemen nodig. Droge koelsystemen kunnen zelfs functioneren wanneer er geen oppervlaktewater beschikbaar is. Echter, de afhankelijk van de luchtvochtigheid en de luchttemperatuur is hierbij groot.

Toetsing- en beoordelingssystematiek

Met ingang van de omgevingswet op 01-01-2024 is de wetgeving op het gebied van lozingen veranderd. Zo wordt de algemene regelgeving omtrent het lozen van koelwater niet meer beschreven in de Waterwet, maar in de omgevingswet en het Besluit activiteiten leefomgeving, ook wel het Bal genoemd. Het Bal omvat grotendeels wetten die geldig zijn voor warmtelozingen tot 50 MW. Aanvullende hierop geldt dat er voor IPPC1 installaties, grotere industriële bedrijven die vallen onder de Richtlijn industriële emissies, en voor grotere warmtelozingen dan 50 MW (zoals bijna altijd het geval zal zijn bij SMR's) altijd sprake is van maatwerk in het vergunningstraject.

Het vergunningsproces en de bijbehorende systematiek wordt beschreven in o.a. de volgende referentie: "Koelwater – Handreiking en inspectiekader voor Wvo- en Wwh-vergunningverlening" gepubliceerd door de Inspectie Verkeer en Waterstaat in 2005. De hoofdlijnen van het beoordelingskader kunnen grofweg opgedeeld worden in twee verschillende onderwerpen:

1. Toetsing aan de Stand der Techniek
2. Beoordeling van de effecten op het aquatisch milieu

De toetsing aan de Stand der Techniek vindt plaats met behulp van de BREF Koeling (zie boven). Hierbij staat centraal dat een bedrijf de keuze voor het koelsysteem moet kunnen beargumenteren.

In de BREF staat beschreven dat de beoordeling van de effecten van de lozingen onderdeel uitmaakt van de toetsing aan de Stand der Techniek. Indien lokaal niet kan worden voldaan aan de waterkwaliteitsdoelstellingen, moet worden gestreefd naar verdere optimalisatie van de lozing. Daarnaast moet inzicht worden gegeven in de mogelijkheden tot het duurzaam gebruik van stoffen en stromen, zoals hergebruik van warmte.

Samen met de toetsing aan de Stand der Techniek is het noodzakelijk dat de rest emissies worden getoetst en beoordeeld worden op de effecten voor het aquatische milieu. Voor de lozing van stoffen wordt deze toetsing uitgevoerd met behulp van de CIW Emissie-immissie beoordelingssystematiek voor stoffen. Voor warmte wordt een zelfde soort aanpak gevolgd als bij stoffen. Hierbij wordt er een toetsing uitgevoerd aan de hand van de NBW-beoordelingssystematiek voor warmtelozingen. In de NBW-beoordelingssystematiek worden de volgende drie criteria uitgewerkt:

- Mengzone
- Onttrekking
- Opwarming

Aan het criterium onttrekking zijn geen getalsmatige normen geformuleerd.

A.2 Resultaten afschattende berekeningen koelcriteria Maas en Waal

In deze sectie worden de aannamen en resultaten van berekeningen beschreven voor een inschatting van de maximaal vergunbare koelcapaciteit van twee verschillende locaties: de Waal en de Maas. Voor meer open waterlichamen zoals het IJsselmeer en de Noordzee is het niet mogelijk om op eenvoudige wijze een afschattende berekening te maken. Wel zullen wat overwegingen worden benoemd die een rol spelen bij de potentiële geschiktheid van deze locaties.

Vooropgesteld, en zoals reeds aangegeven, bij werkelijke toetsing is er altijd sprake van "maatwerk". De onderstaande methodes zijn in het algemeen toereikend voor het maken van een inschatting en kunnen in bepaalde situaties zelfs aan de grondslag van een vergunning staan. In veel gevallen zullen er echter meer complexere 3D-berekeningen

uitgevoerd moeten worden om aan te tonen dat de lokale opwarming van het water door toedoen van de voorgenomen warmtelozing binnen de normen van de huidige wet- en regelgeving valt. In beide gevallen is het noodzakelijk om aanvullende informatie te verzamelen, waaronder: een ecologisch studie naar de lokale dier- en vispopulatie, of het beoogde gebied binnen een beschermd gebied valt en een inventarisatie van overige lozers binnen het beheersgebied. Indien beschikbaar, dan kan deze aanvullende informatie opgevraagd worden bij de lokale watersysteembeheerder. Vanuit de vergunningsaanvraag is informatie omtrent de warmtevracht (restwarmte) samen met het koelwaterdebiet dan voldoende.

Berekeningsmethode

Voor de analyse zullen de volgende factoren berekend worden voor stromende waterlichamen:

Debiet koelwater

$$Q_{\text{koelwater}} = \frac{q_{\text{warmte}}}{\Delta T_{\text{koelwater}} C_p \rho_w}$$

Waarbij q_{warmte} de te lozen warmtevracht is, $\Delta T_{\text{koelwater}}$ het verschil in temperatuur tussen het in en uitgaande koelwater, C_p de warmtecapaciteit van water en ρ_w de dichtheid van water.

Temperatuurverhoging

$$\Delta T_{\text{rivier}} = \frac{q_{\text{warmte}}}{Q_{\text{afvoer}} C_p \rho_w}$$

Waarbij Q_{afvoer} het debiet van het waterlichaam. Hierbij is de aanname dat Q_{afvoer} veel groter is dan $Q_{\text{koelwater}}$ (wat vanuit het oogpunt van onttrekking een acceptabele aanname is).

Onttrekking van oppervlaktewater

$$W_{\text{ov}} = \frac{Q_{\text{koelwater}}}{Q_{\text{afvoer}}}$$

Mengzone

$$\text{Mengzone} = \frac{Q_{\text{koelwater}}}{Q_{\text{afvoer}}} \left(1 + \frac{T_{\text{lozing}} - ER}{ER - T_{\text{achtergrond}}} \right)$$

Waarbij ER de maximale toelaatbare temperatuur van de mengzone (aangenomen als 30 °C, representatief voor water voor karperachtigen) en $T_{\text{achtergrond}}$ de temperatuur van het waterlichaam zonder de beoogde warmte lozing.

Ten behoeve van de berekeningen is er informatie verkregen voor wat de 98-percentiel maximale temperatuur van het water is, en het 98-percentiel minimaal debiet. Voor doorstroomsystemen is een lozingstemperatuur van 40 °C aangenomen. Voor natte koeleenheden wordt hieronder een afleiding van de parameters gegeven.

Volgens de BREF gelden de volgende omstandigheden voor natte koeleenheden:

- De benodigde hoeveelheid koelwater is circa 2,3% t.o.v. doorstroomsystemen voor dezelfde warmtekracht.
- Circa 25% van het koelwater wordt geloosd als spuistroom, i.e. geloosd naar het waterlichaam, de rest voornamelijk als waterdamp en 'drift' (waterdruppels).
- Warmtevracht in het lozingswater bedraagt ongeveer 1,5% van de totale warmtevracht ten opzichte van doorstroomsystemen.

Met deze informatie kan worden berekend wat de toename in de temperatuur van het lozingswater bedraagt:

$$q_{\text{warmte}} = Q_{\text{lozing}} \Delta T_{\text{koelwater}} C_p \rho_w$$

$$\Delta T_{\text{koelwater}}^2 = \frac{q_{\text{warmte}}^2}{q_{\text{warmte}}^1} \frac{Q_{\text{lozing}}^1}{Q_{\text{lozing}}^2} \Delta T_{\text{koelwater}}^1$$

Met superscripts 1 voor doorstroomsystemen en 2 voor koeleenheden. Hierbij geldt:

- Voor doorstroomsystemen een lozingstemperatuur van 40 °C op een waterlichaamstemperatuur van 25 °C ($\Delta T^1_{\text{koelwater}} = 15 \text{ °C}$).

$$\frac{q^2_{\text{warmte}}}{q^1_{\text{warmte}}} = 1,5\%$$

$$\frac{Q^1_{\text{lozing}}}{Q^2_{\text{lozing}}} = \frac{1}{2,3\% \cdot 25\%} = 173,9$$

Wat resulteert in $\Delta T^2_{\text{koelwater}} = 39,9 \text{ °C}$.

Voorbeeld 1 : de Maas

De Maas loopt via Frankrijk door België, Limburg en Gelderland uit in het Hollands Diep bij Zeeland. De rivier is een “regenrivier” en heeft daardoor grote fluctuatie in de water doorstroom. Volgens Rijkswaterstaat heeft het meetpunt “Maaseik” een minimale doorstroom van 15 m³/s en een maximale doorstroom van 3373 m³/s (tijdens de Limburgse overstromingen in 2021) [17]. Deze fluctuaties maken het mogelijk geen geschikte locatie voor een grote kerncentrale. Voor de berekeningen is het 98-percentiel debiet van 21,2 m³/s gebruikt, en een 98-percentiel temperatuur van 24,7 °C; deze zijn bepaald voor de periode april 2019 tot mei 2024.

Resultaten

- Uit de berekening blijkt dat de maximale warmtevracht **117 MW** bedraagt bij een doorstroomsysteem, gelimiteerd door de mengzone. Dit komt overeen met 175 MW_{th} = 59 MW_e (voor een reactor met 33% thermische efficiëntie).
 - Maximaal lozingsdebiet op basis mengzone limitering: 1,8 m³/s
- De maximale warmtevracht voor een natte koeleenheid bedraagt **7700 MW**. Dit is 67 maal zo groot als voor het doorstroomsysteem, terwijl de onttrekking maar 1,53 maal zo groot is. Ook hier is de limiteerde factor de mengzone. Een warmtevracht van 7700 MW is

equivalent aan een vermogen van 11800 MW_{th} = 3900 MW_e.

- Maximaal lozingsdebiet op basis mengzone limitering: 0,7 m³/s

Op basis van bovenstaand resultaat wordt het onttrekkingsdebiet (m³/s) bepaald benodigd per MW restwarmte (MW_{re}) afvoer voor een waterlichaam als de Maas:

- 1,8 [m³/s]/117 [MW_{re}] = **0,015** [m³/s]/[MW_{re}] of **55** [m³/h] / [MW_{re}] (deze waarde is enigszins vergelijkbaar met de waarde vermeld in de BREF documenten [11])

Voorbeeld 2: de Waal

De Waal komt voort uit de Rijn, die zijn origine vindt in de Alpen. In tegenstelling tot de Maas is de Waal een “smeltwaterrijver”. Het smeltwater van de Alpen zorgt voor een meer constante waterstroom dan voor de Maas. Volgens Rijkswaterstaat was bij meetpunt “Millingen aan de Rijn” (begin van de Waal) in de periode van 1 Januari 2024 t/m 1 Mei 2024* de minimale stroom 1651 m³/s en het gemiddelde 2352 m³/s [17]. Voor de berekeningen is het 98-percentiel debiet van 1658 m³/s gebruikt, en een 98-percentiel temperatuur van 24,7 °C.

Resultaten

- Uit de berekening blijkt dat de maximale warmtevracht 9185 MW bedraagt bij een doorstroomsysteem, gelimiteerd door de mengzone. Dit komt overeen met 13917 MW_{th} = 4593 MW_e.
 - Maximaal lozingsdebiet op basis mengzone limitering: 144 m³/s
- Een koeleenheid systeem is op basis van de berekening ‘niet nodig’ aangezien hiervoor zeer veel capaciteit beschikbaar is en er praktisch gezien geen beperking zijn.
 - Maximaal lozingsdebiet op basis mengzone limitering: 55 m³/s

** Gezien de korte periode waarover de debiet- en temperatuur 98-percentielwaarden zijn bepaald, is dit voorbeeld in principe minder geschikt als referentieberekening zoals de Maas. Echter, de waarde bepaald voor de Waal van het onttrekkingsdebiet per MW_{re} komt goed overeen met voorbeeld 2 van de Maas: 56 [m³/h] / [MW_{re}].*

Voorbeeld 3: IJsselmeer / locaties niet aan rivier

Voor het IJsselmeer (en eigenlijk alle locaties die niet aan een stromende rivier liggen) is het moeilijk in te schatten wat de maximaal toelaatbare warmtelozing is, omdat hier veel paaigebieden voor vogels zitten, en omdat het debiet voor een (semi-)stagnant waterlichaam moeilijker is om in te schatten. Echter, het IJsselmeer is een groot waterlichaam en heeft daardoor potentie voor het koelen van een grote kerncentrale. Het is denkbaar dat er locaties zijn waarmee met slim gebruik van koeltechnieken gelimiteerde effecten door opwarming kunnen worden bereikt, rekening houdend met de effecten van inzuiging.

Om een uitspraak te kunnen doen over de geschiktheid van dergelijke locaties is nodig:

- Een ecologische studie naar de invloed van het lozen van restwarmte en het onttrekken van oppervlaktewarmte voor een beoogde installatie.
- Berekeningen met 3D methoden die kunnen onderbouwen dat de beoogde warmtelozing aan bepaalde criteria voldoet (e.g. grootte van de mengzone, opwarming van het oppervlaktewater).

Pompvermogen

Het benodigde pompvermogen is:

$$P_{\text{pomp}} = \Delta P \cdot \Phi_V$$

Daarin is:

- P_{pomp} = het benodigde pompvermogen [Watt];
- ΔP het drukverlies ten gevolge van wrijving, uitgedrukt in [Pa];
- Φ_V = het benodigde onttrekkingsdebiet [m^3/s] benodigd voor restwarmte afvoer MW_{re} ;

Voor de drukval in de leiding geldt de Darcy-Weisbach-vergelijking:

$$\Delta P = f \cdot \rho \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2}$$

Daarin is:

- ΔP het drukverlies ten gevolge van wrijving, uitgedrukt in [Pa];
- f de dimensieloze Darcy-wrijvingscoëfficiënt [-];
- ρ de dichtheid van het fluïdum, [kg/m^3];
- L de lengte van de leiding, [m];
- D de hydraulische diameter van de leiding, [m];
- V de gemiddelde stroomsnelheid, [m/s].

Gebruikte waarden

Φ_V : Deze volgt uit [11] en bedraagt 86 [m^3/h] / [MW_{re}] voor doorstroomkoeling, 2 [m^3/h] / [MW_{re}] voor natte koeleenheden en 0,5 [m^3/h] / [MW_{re}] voor hybride koeleenheden. Deze waarden zijn wat hoger t.o.v. de waarde bepaald voor de casus in *Bijlage A*

f : 0,02 [-]. Voor grote Reynolds getallen is deze $\leq 0,03$. Frictiefactor uit figuur in [18]

ρ : 1000 [kg/m^3]

D : volgt uit de verhouding van onttrekkingsdebiet en snelheid [m]

V : 3 [m/s]

L : (2x) 1000m (in + uitlaatleiding i.v.m. doorstroomkoeling), 3000m (inlaat i.v.m. koeleenheid, spuistroom niet meegenomen)

Geschat percentage rendementsverlies t.g.v. pompvermogen koelleiding

$$\frac{P_{\text{pomp}}}{P_{\text{SMR}}} \cdot 100\%$$

Hierin is P_{SMR} het elektrisch vermogen van de SMR (op basis van 33% rendement).

In deze bijlage wordt in drie tabellen een overzicht gegeven van SMR-ontwerpen binnen de gedefinieerde categorisering op basis van thermisch vermogen, de E-categorieën, in *Tabel C1*.

Tabel C1: Categorisering op basis van thermisch vermogen.

Categorie E1	Categorie E2	Categorie E3
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 categorie E3 eerst in *Tabel C3*, daarna categorie E2 in *Tabel C4* en als laatste categorie E1 in *Tabel C5*. Binnenin de tabellen is eenzelfde ordening in oplopend thermisch vermogen aangehouden.

De selectie aan SMR-ontwerpen en de gegeven basiseigenschappen komen voornamelijk uit de SMR-dashboard van de OECD NEA [19], met eventueel informatie aangevuld via websites van vendors of eigen berekeningen in het geval van onttrekkingsdebiet. Bij de SMR-ontwerpen is er, zoals in de NRG SMR Marktanalyse [2], een onderscheid gemaakt tussen ontwerpen gebaseerd op lichtwatertechnologie (BLAUW) en niet-lichtwatertechnologieën onder de naam “geavanceerd” (GROEN). Dit onderscheid is gemaakt omdat over het algemeen SMR-ontwerpen o.b.v. lichtwatertechnologie sneller voor Nederland marktrijp zijn t.o.v. geavanceerde technologie. Binnen de geavanceerde groep is verder geen onderscheid gemaakt tussen technologieën omdat dit binnen dit overzicht minder van belang is.

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 *Tabel C2*). 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.

Tabel C2: Categorisering op basis van aanleveringstemperatuur.

Categorie LT	Categorie MT	Categorie HT
		
< 350 °C	350 - 700 °C	> 700 °C

Naast deze eigenschappen wordt ook het geschatte onttrekkingsdebiet gegeven via de berekening uit Bijlage A, voor zowel doorstroom- als verdampingskoeling, en als laatste worden eventuele bijzonderheden zoals standaard multi-module levering genoemd.

Er wordt voor de E-categorieën en individuele SMR-ontwerpen geen indicatie van ruimtebeslag gegeven omdat dit voor veel ontwerpen nog niet in detail uitgewerkt is en SMR-inpassing in dit rapport globaler besproken wordt dan specifieke ruimtelijke inpassing. Over het algemeen kan gezegd worden dat het totale ruimtebeslag van SMR-ontwerpen binnen categorieën E1 en E2 relatief vergelijkbaar zal zijn door overeenkomende randgebouwen zoals koelinstallaties etc., maar dat voor de E3-categorie wel een relatief kleiner ruimtebeslag wordt verwacht.

Tabel C3: Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen de categorie E3.

Ontwerp	Leverancier	Eigenschappen				Onttrekkingsdebiet [m ³ /s]		Bijzonderheden
		MW _{th}	MW _e	T [°C]		Doorstroom	Verdamping	
JIMMY SMR	JIMMY ENERGY	10	3		550	0,1	0,002	
EVINCI MICROREACTOR	WESTINGHOUSE	15	5		750	0.2	0.004	
AURORA POWERHOUSE	OKLO	40	13		500	0,4	0,01	
MMR	ULTRA SAFE NUCLEAR	45	15		660	0,5	0,01	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	0,5	0,01	Gericht op stadverwarming : geen elektrisch vermogen; benodigd onttrekkingsdebiet ruim onder gegeven, conservatieve waarden.
FLEX	MOLTENFLEX	60	20		700	0,6	0,02	
PWR-20	LAST ENERGY	60	22		300	0,6	0,02	
CAREM25	CNEA	100	25		326	1	0,02	
COPENHAGEN ATOMICS	COPENHAGEN ATOMICS	100	33		560	1	0,02	
HTMR-100	STRATEK GLOBAL	100	33		750	1	0,02	
SEALER	BLYKALLA	140	46		550	1	0,03	
XE-100	X-ENERGY	200	66		750	2	0,05	

Tabel C4: Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen de categorie E2.

Ontwerp	Leverancier	Eigenschappen				Onttrekkingsdebiet [m³/s]		Bijzonderheden
		MW _{th}	MW _e	T [°C]		Doorstroom	Verdamping	
THORIZON	THORIZON	250	83		550	3	0,06	
CMSR	SEABORG TECHNOLOGIES	250	83		670	3	0,06	Geleverd vanaf een schip (<i>power barge</i>): Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met SMR's op land.
ARC-100	ARC CLEAN TECHNOLOGY	286	94		510	3	0,07	
KAIROS POWER FHR	KAIROS POWER	320	106		650	3	0,08	
SMART	KAERI	365	100		322	4	0,09	
LFR AS-200	NEWCLEO	480	158		530	5	0,1	
I-SMR	I-SMR DEV. AGENCY	540	170		310	6	0,1	
LFTR	FLIBE ENERGY	600	198		650	6	0,1	Multi-module: leverbaar in 4 modules. Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met <i>single reactor units</i> .
SC-HTGR	FRAMATOME	625	206		750	6	0,2	
SSR-W	MOLTEX ENERGY	750	248		590	8	0,2	

Tabel C5: Overzicht van SMR-ontwerpen met basiseigenschappen binnen de categorie E1.

Ontwerp	Leverancier	Eigenschappen				Onttrekkingsdebiet [m³/s]		Bijzonderheden
		MW _{th}	MW _e	T [°C]		Doorstroom	Verdamping	
NATRIUM	TERRAPOWER	840	277		500	9	0,2	
BWRX-300	GE HITACHI	870	300		288	9	0,2	
IMSR	TERRESTRIAL ENERGY	884	292		700	9	0,2	
WESTINGHOUSE LFR	WESTINGHOUSE	950	314		650	10	0,2	
AP300	WESTINGHOUSE	900	300		325	10	0,2	
VOYGR-4	NUSCALE	1000	308		321	10	0,2	Multi-module: leverbaar in 4, 6 en 12 modules. Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met <i>single reactor units</i> .
NUWARD	EDF	1080	340		307	11	0,3	Multi-module: leverbaar in 2 modules. Mogelijk lastiger vergunbaar vergeleken met <i>single reactor units</i> .
RR SMR	ROLLS-ROYCE	1358	470		325	14	0,3	