BIJLAGE IV Beschrijving scenario's 2050

Integrale Effectenanalyse Programma Energiehoofdstructuur 2023

Ontwikkeling energiehoofdinfrastructuur 2030-2050

Ministerie van Economische Zaken & Klimaat

Definitief

02-06-2023

Pondera

Amsterdamseweg 13
6814 CM Arnhem
088 766 33 72
info@ponderaconsult.com

CE Delft

Oude Delft 180
2611 HH Delft
015 215 01 50
ce@ce.nl

In samenwerking met:

BRO

Rhijnspoorplein 38
1018 TX Amsterdam
020 506 19 99
info@bro.nl

Colofon

Soort document
Integrale Effectanalyse

Projectnaam
IEA Programma Energiehoofdstructuur 2023

Versienummer
Definitief

Opdrachtgever
Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Auteur
Joeri Vendrik, Martha Deen, Lucas van Cappellen (CE Delft);Maarten Jaspers Faijer, Roel van Ooij, Maarten Sosef (Pondera Consult)

Nagekeken door
Frans Rooijers

Disclaimer

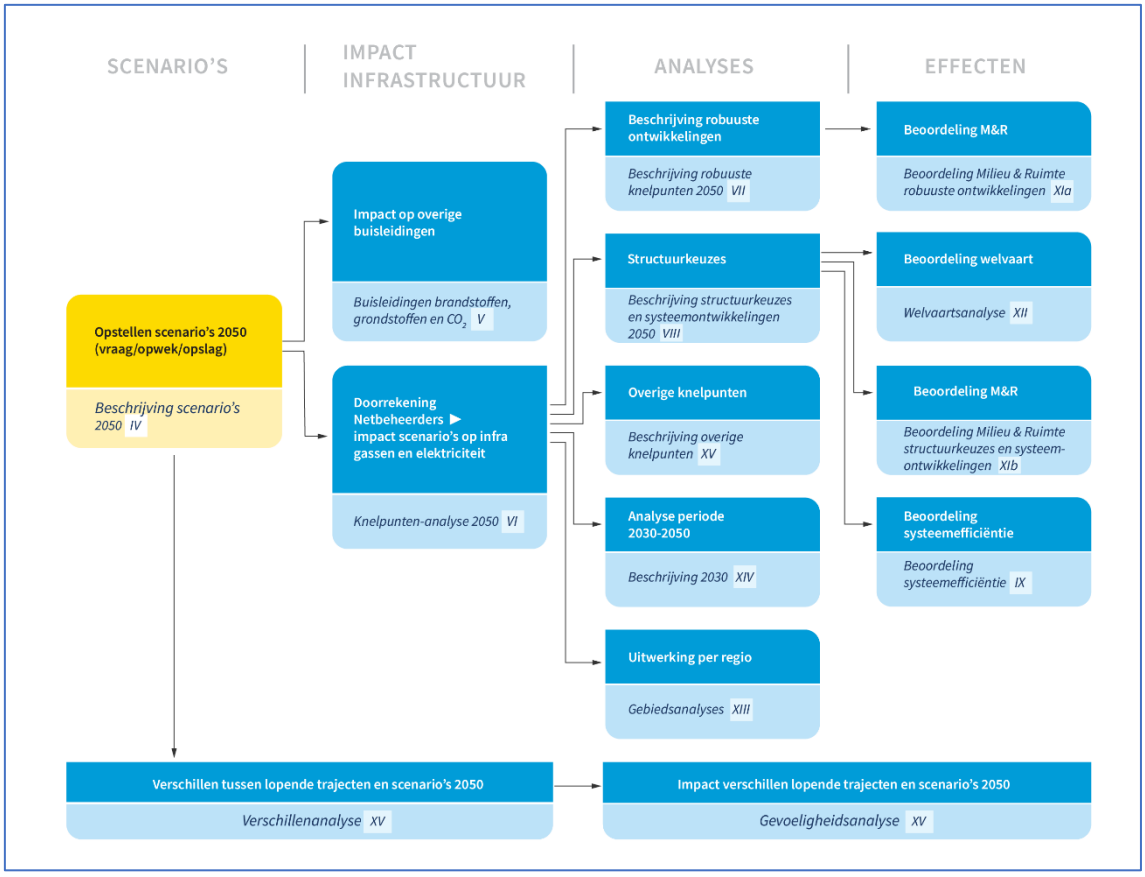
In het onderzoek is gebruikgemaakt van algemeen geaccepteerde uitgangspunten, modellen en informatie die ten tijde van het opstellen van dit rapport ter beschikking stonden. Aanpassingen in de uitgangspunten, modellen of gebruikte gegevens kunnen leiden tot andere uitkomsten. De aard en de nauwkeurigheid van de gebruikte gegevens voor het onderzoek bepalen in belangrijke mate de nauwkeurigheid en de onzekerheden van de berekende uitkomsten. Het consortium (Pondera, CE Delft en BRO Adviseurs) is niet aansprakelijk voor gederfde inkomsten of schade die wordt geleden door opdrachtgever(s) en/of derden uit conclusies die gebaseerd zijn op gegevens die niet van het consortium afkomstig zijn. Deze rapportage is opgesteld met de intentie dat deze alleen gebruikt wordt door de opdrachtgever en slechts voor het doel waarvoor de rapportage is opgesteld. Er mag geen beroep worden gedaan op de informatie uit deze rapportage voor andere doeleinden zonder schriftelijke toestemming van Pondera, namens het consortium. Het consortium is niet verantwoordelijk voor de consequenties die kunnen voortvloeien uit het oneigenlijk gebruik van de rapportage. De verantwoordelijkheid voor het gebruik van (de analyse, resultaten en bevindingen in) de rapportage blijft bij de opdrachtgever. De Rechtsverhouding opdrachtgevers – architect, ingenieur en adviseur conform DNR 2011 is te allen tijde van toepassing. Pondera werkt met een kwaliteitsmanagementsysteem dat door EIK gecertificeerd is volgens de ISO 9001:2015 norm.

EIK ISO 9001:2015 gecertificeerd

0 Samenvatting

In deze bijlage, *Beschrijving scenario's 2050*, worden de scenario's beschreven die gebruikt worden voor de analyses van de Integrale Effectenanalyse (IEA) van het Programma Energiehoofdstructuur (PEH). Het beschrijven van de scenario's voor 2050 is de eerste stap in het onderzoeken van de benodigde ruimte voor het nationale energie-infrastructuur en staat daarom helemaal links in Figuur 0-1 met de samenhang van de bijlagen. Op basis van deze scenario's is een inschatting gemaakt van de benodigde energie-infrastructuur (in Bijlage V *Buisleidingen brandstoffen, grondstoffen en $C0_2$* en Bijlage VI *Knelpuntenanalyse 2050).*

Figuur 0-1 - Overzicht en samenhang bijlagen IEA PEH



Inhoudsopgave

0 Samenvatting 1

1 Inleiding 3

1.1 Introductie scenario's 3
1.2 Doel van de scenario's 4
1.3 Leeswijzer 4

2 Methodologie 4

2.1 Werkwijze 4
2.2 Ruimtelijke analyses 6
2.3 Modellering 'flex' 8

3 Energetische invulling scenario's (excl. kernenergie) 11

3.1 Vier toekomstbeelden 11
3.2 Kerncijfers scenario's 12

4 Ruimtelijke invulling Nederland Energieland-scenario's 13

4.1 Energievraag 13
4.2 Hernieuwbare opwek 14
4.3 Overige opwek 15
4.4 Opslag van energie 15
4.5 Import en export van energie 16

5 Ruimtelijke invulling Sterke Knopen-scenario's 18

5.1 Analyses beschikbare ruimte 19
5.2 Ruimtelijke invulling onderdelen 20
5.3 Overzichtstabel 43

6 Zeer Sterke Knopen Kernenergie-scenario 44

6.1 Afbakening 44
6.2 Technische aannames kernreactoren 44
6.3 Ruimtelijke invulling kernreactoren 47
6.4 Energetische invulling 52

A. Ruimtelijke invulling wind op land en zon op land-scenario's Sterke Knopen 56

A.1. Invulling cluster Zeeland/Rotterdam voor wind op land 56
A.2. Invulling cluster Noord-Holland voor zon op land 56

B. Kaarten ruimtelijke invulling kernreactoren 57

1 Inleiding

In deze bijlage worden de scenario's beschreven die gebruikt worden voor de analyses van de Integrale Effectenanalyse (IEA) van het Programma Energiehoofdstructuur (PEH). In deze bijlage wordt besproken hoe deze scenario's tot stand zijn gekomen en voor elk scenario worden de energetische en ruimtelijke invulling besproken. In dit hoofdstuk worden de scenario's geïntroduceerd en wordt ingegaan op het doel van de scenario's.

1.1 Introductie scenario's

Er worden scenario's opgesteld voor het energiesysteem in 2050. In elk van deze scenario's wordt uitgegaan van een klimaatneutraal energiesysteem. Alleen de invulling hiervan verschilt tussen de scenario's. In elk scenario wordt dus uitsluitend gebruikgemaakt van CO_2-vrije energiedragers, maar het verschilt tussen de scenario's welke CO_2-vrije energiedragers (elektriciteit, waterstof, groengas, warmte) het meest gebruikt worden. Daarnaast verschilt het tussen de scenario's welke bronnen worden gebruikt om energie te produceren.

Er wordt gebruikgemaakt van zeven scenario's voor de IEA van het PEH. Deze scenario's omspannen de hoekpunten van het energiesysteem in 2050. Dit zijn realistische uitersten, waarbij het van belang is te melden dat er in het Programma Energiehoofdstructuur geen voorkeur wordt uitgesproken over deze uitersten. Het is de verwachting dat het energiesysteem in 2050 binnen de hoekpunten van deze zeven scenario's valt.

De scenario's zijn gebaseerd op de vier Klimaatneutrale scenario's die gebruikt zijn voor de Integrale Infrastructuurverkenning II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020). Deze vier scenario's worden integraal overgenomen en worden de Nederland Energieland-scenario's genoemd. Daarnaast zijn er nog drie scenario's toegevoegd. Twee Sterke Knopen-scenario's, die alleen ruimtelijk verschillen van de Nederland Energieland-scenario's, en één Kernenergie-scenario (Zeer Sterke Knopen). Figuur 1-1 geeft een schematische weergave van de zeven scenario's.

Figuur 1-1 - Schematische weergave scenario's

1.2 Doel van de scenario's

De zeven scenario's geven de hoekpunten van het speelveld aan voor 2050. Dit zijn dus de verwachte uitersten van het energiesysteem. De scenario's schetsen expliciet geen wensbeeld hoe het energiesysteem er in de toekomst uit moet zien en ze zijn ook niet bedoeld als keuzes. Het toekomstige energiesysteem zal vermoedelijk ergens in het midden tussen de scenario's liggen.

Het doel van het gebruik van scenario's om de hoekpunten van het toekomstige energiesysteem te bepalen is tweeledig. Enerzijds geeft dit inzicht in robuuste ontwikkelingen die in elk van de scenario's plaatsvinden. Dit zijn ontwikkelingen waar in elk geval ruimte voor noodzakelijk is. Daarnaast geven de verschillen tussen de scenario's inzicht in de keuzes die gemaakt kunnen worden richting 2050 en de (ruimtelijke) effecten daarvan.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de methodologie besproken voor het opstellen van de scenario's. Vervolgens wordt er in hoofdstuk 3 ingegaan op de energetische invulling van de scenario's (met uitzondering van het Kernenergie-scenario). In hoofdstuk 4 en 5 wordt ingegaan op de ruimtelijke invulling van de scenario's (wederom met uitzondering van het Kernenergie-scenario). Tot slot wordt in hoofdstuk 6 de energetische en ruimtelijke invulling van het Kernenergie-scenario besproken.

2 Methodologie

Elk scenario heeft een energetische invulling en een ruimtelijke invulling. Bij de energetische invulling van de scenario's wordt totale energievraag en het totale energieaanbod voor heel Nederland bepaald, met uitsplitsing naar energiedrager en bron. Bij de ruimtelijke invulling wordt bepaald hoe deze energievraag en het energieaanbod ruimtelijk neerslaan.

Elk scenario bestaat uit vier elementen: vraag, productie, opslag en infrastructuur. In dit rapport wordt ingegaan op de eerste drie elementen[1]. Elk van deze elementen bestaat uit meerdere onderdelen. Zo bestaat het element opslag bijvoorbeeld uit de onderdelen opslag elektriciteit, opslag waterstof en opslag methaan. Voor alle onderdelen wordt in elk van de scenario's de energetische en de ruimtelijke invulling bepaald. In dit hoofdstuk wordt in grote lijnen besproken hoe de invulling van de scenario's tot stand is gekomen. Een uitgebreide omschrijving van de invulling van de scenario's volgt in hoofdstuk 3 tot en met 6.

2.1 Werkwijze

Voor de analyses binnen het PEH zijn er zeven scenario's opgesteld. Het gaat om de volgende scenario's:

- Vier **Nederland Energieland-**scenario's. Deze scenario's verschillen van elkaar qua energetische invulling en omvatten daarbij de hoeken van het speelveld. Bij de ruimtelijke invulling ligt de focus van deze scenario's op spreiding. De ruimtelijke invulling varieert nauwelijks tussen deze scenario's.
- Twee **Sterke Knopen-**scenario's. Deze scenario's zijn qua energetische invulling gelijk aan twee van de Nederland Energieland-scenario's, maar hebben een andere ruimtelijke invulling. Bij de ruimtelijke invulling ligt de focus van deze scenario's op clustering.

[1] Het element infrastructuur wordt behandeld in de notities Knelpuntenanalyse, Robuuste knelpunten en Structuurkeuzes.

- Eén **Zeer Sterke Knopen-**scenario met kernenergie. Dit scenario is gebaseerd op één van de Sterke Knopen-scenario's, maar met kerncentrales in plaats van hernieuwbare opwek op land en gas-centrales. Zowel de energetische invulling als ruimtelijke invulling van dit scenario verschilt van de andere scenario's.

Hieronder wordt het stappenplan geschetst om te komen tot de invulling van deze scenario's:

1. **Energetische invulling niet-regelbare productie en vraag:**
   Voor de scenario's Nederland Energieland en Sterke Knopen zijn de scenario's van II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020) integraal overgenomen. Voor het Zeer Sterke Knopen-scenario zijn er enkele wijzigingen gemaakt (meer hierover in hoofdstuk 6).
2. **Energetische invulling 'flex' (vraagsturing, regelbare productie, opslag of import/export):**
   Voor een robuust energiesysteem is het noodzakelijk dat vraag en aanbod van energie op elk moment van het jaar gebalanceerd worden, voor elke energiedrager. Hiervoor is 'flex' nodig, middelen die hiervoor kunnen zorgen voor het matchen van vraag en aanbod, zoals regelbare productie, energieopslag en import/export. Voor elk scenario is de energetische invulling van flex bepaald door middel van modellering van de netbeheerders. Zij hebben hiervoor een jaarrondrekening uitgevoerd waarbij voor elk uur bepaald is hoeveel regelbare productie en opslag nodig is om vraag en aanbod te balanceren (meer hierover in paragraaf 2.3).

3. **Ruimtelijke invulling niet-regelbare productie en vraag:**
   Voor de scenario's Nederland Energieland wordt de ruimtelijke invulling van de scenario's van II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020) integraal overgenomen.

   Voor de scenario's Sterke Knopen worden een deel van de onderdelen, waarvoor de ruimtelijke invulling lastig stuurbaar en voornamelijk autonoom verloopt (bijvoorbeeld vraag), de ruimtelijke invulling van de scenario's van II3050 overgenomen. Maar voor een deel van de onderdelen, waarvoor de ruimtelijke invulling wel stuurbaar is (bijv. hernieuwbare opwek op land), wordt de ruimtelijke invulling zelf bepaald. Om te komen tot de ruimtelijke invulling van de onderdelen zijn de volgende stappen doorlopen:
   - **Bepalen principe ruimtelijke plaatsing.** Bij de Sterke Knopen-scenario's is clustering het leidende principe voor de ruimtelijke plaatsing.
   - **Bepalen geschikte locaties.** Voor elk onderdeel is bepaald welke locaties geschikt zijn voor clustering.
   - **Bepalen benodigde ruimte per onderdeel.** Op basis van kentallen (zie paragraaf 2.2) wordt per onderdeel bepaald welke ruimte in totaal nodig is voor de ruimtelijke invulling.
   - **Bepalen beschikbare ruimte.** Er wordt bepaald hoeveel ruimte beschikbaar is voor de ruimtelijke invulling van onderdelen in heel Nederland en per geschikte clusterlocatie.
   - **Bepalen ruimtelijke invulling.** De ruimtelijke invulling per onderdeel wordt bepaald op basis van de benodigde ruimte en beschikbare ruimte per geschikte locatie.

     Voor het scenario Zeer Sterke Knopen is de ruimtelijke invulling nagenoeg gelijk aan één van de Sterke Knopen-scenario's, met uitzondering van de locaties van kerncentrales en wind op land. Voor de ruimtelijke invulling van kerncentrales is er uitgegaan van bestaande reserveringen en vervanging van regelbare centrales en wind op land door de toevoeging van kernenergie.

4. **Ruimtelijke invulling 'flex' (vraagsturing, regelbare productie, opslag of import/export)**
   Voor de scenario's Nederland Energieland wordt hiervoor de ruimtelijke invulling van de scenario's van II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020) integraal overgenomen.

   Voor de scenario's Sterke Knopen wordt de ruimtelijke invulling voor een deel van de onderdelen, waarvoor de ruimtelijke invulling stuurbaar is (bijv. elektriciteitscentrales), zelf bepaald. Hiervoor worden dezelfde stappen doorlopen als voor de ruimtelijke invulling van niet-regelbare productie en vraag. Bij het scenario Zeer Sterke Knopen is de ruimtelijke invulling van flex gelijk aan één van de scenario's Sterke Knopen.

   Na het doorlopen van deze stappen is er voor elk van de scenario's zowel de energetische als ruimtelijke invulling bepaald voor alle elementen. Bij de ruimtelijke invulling is buurtniveau als laagste detailniveau gehanteerd.

2.2 Ruimtelijke analyses

Voor het bepalen van de ruimtelijke invulling van de onderdelen zijn enkele ruimtelijke analyses nodig. Hieronder wordt beschreven welke kentallen zijn gehanteerd voor het bepalen van de benodigde ruimte per onderdeel en hoe er is bepaald hoeveel ruimte beschikbaar is per locatie.

2.2.1 Kentallen ruimtegebruik

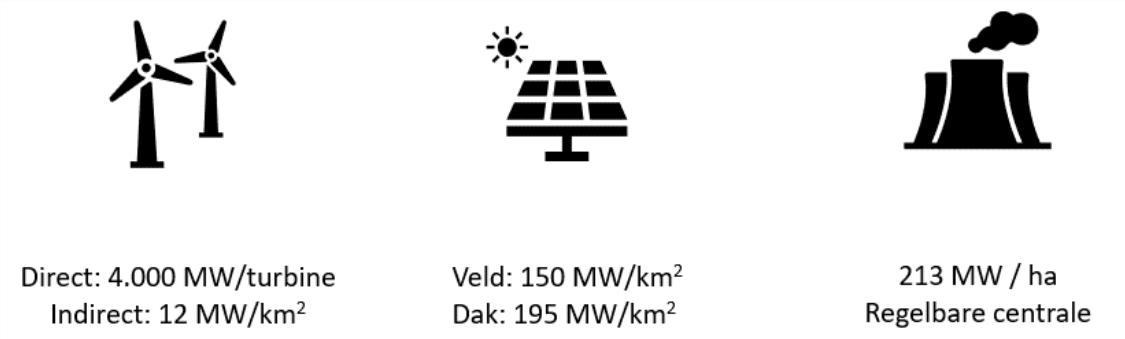
Vraag

Het ruimtegebruik door energievraag is beperkt en vindt plaats op het terrein van de afnemers. Daarom zijn er bij het opstellen van de scenario's geen analyses gedaan naar de benodigde ruimte voor vraag.

Productie

De onderdelen van opwek kennen het volgende ruimtebeslag per eenheid:

Figuur 2-1 - Overzicht ruimtegebruik opwek



Voor windenergie is er sprake van direct en indirect ruimtegebruik. Voor berekeningen van het ruimtegebruik is er gerekend met een turbine met masthoogte en rotordiameter van beide 150 meter en een vermogen van 6 MW. Onder direct ruimtegebruik wordt het fundament en de kraanopstelplaats verstaan, hier is geen ander ruimtegebruik mogelijk. Per turbine wordt hier gerekend met 1.000 m^2 (NVDE, 2020). Het indirecte ruimtegebruik is groter, windturbines kunnen immers niet direct naast elkaar staan. Hierbij is de aanname dat er een onderlinge afstand tussen turbines is van 4 maal de rotordiameter en er (gemid-

deld gezien) clusters worden gevormd van 6 (2x3) turbines. Met deze uitgangspunten is er een indirect ruimtegebruik 12 MW/km^2.

Voor zonne-energie wordt er onderscheid gemaakt in veldopstellingen en dakopstellingen. Voor dakopstellingen wordt het vermogen per km^2 aangehouden dat is meegenomen in II3050: 195 MW/km^2. Voor veldopstellingen is in II3050 48-156 MW/km^2 aangehouden. Huidige (geconcentreerde) opstellingen kunnen reeds 150 MW/km^2 ruimtebeslag realiseren. De verwachting is dat in de toekomst de efficiëntie van zonnepanelen nog toe zal nemen, maar anderzijds ook de behoefte aan ruimte voor secundaire functies zoals natuurontwikkeling. Op basis van deze punten is 150 MW/km^2 als realistisch ruimtebeslag in 2050 aangenomen. Dit ruimtebeslag wordt als direct ruimtebeslag gezien.

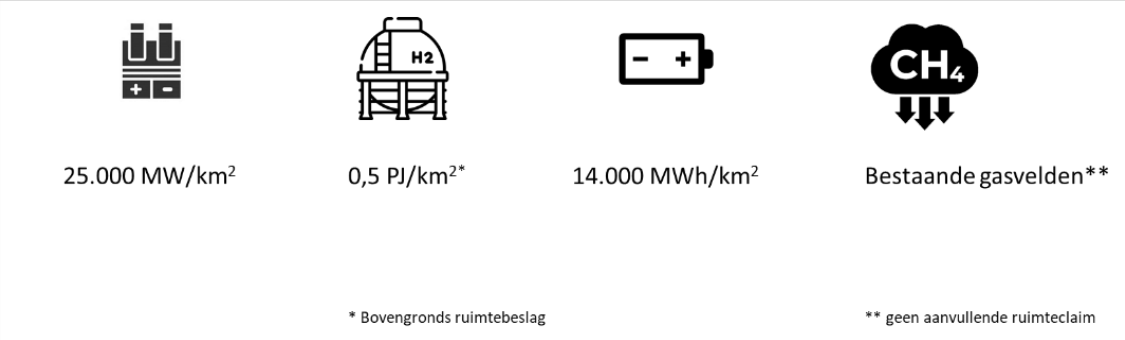
Regelbare centrales betreffen stoom- en gasturbines (STEG-centrales). Bij grootschalige regelbare centrales (in de scenario's Sterke Knopen) wordt een minimum ruimtebeslag van 20 ha aangehouden voor regelbare centrales. Voor de kleinere regelbare centrales is het minimum ruimtebeslag 1 ha.
Er wordt aangesloten bij het gehanteerde ruimtebeslag voor gascentrales in II3050: 213 MW/ha.

Opslag

Opslag bevat de opwek- en opslagonderdelen om voldoende energie te leveren of te ontvangen en bestaat uit de volgende onderdelen; (1) Elektrolysers, (2) Waterstofopslag, (3) Batterijen en (4) Methaanopslag.

De onderdelen van opslag kennen het volgende ruimtebeslag per eenheid:

Figuur 2-2 - Overzicht ruimtegebruik opwek



Uitgangspunt voor de elektrolysers is dat de methode met het minste ruimtebeslag wordt gehanteerd. Dit betreft een elektrolyser uitgevoerd met PEM-technologie (polymeer elektrolyt membraan). Een grootschalige PEM-elektrolyser bestaat uit technische installaties, een gebouw voor de elektrolyser, installaties voor compressie en behandeling van waterstof en faciliteiten voor het koelwater en waterbehandeling. Voor een PEM-elektrolyser met een opgesteld vermogen van 1 GW is een minimale oppervlakte van 8 ha en een maximale oppervlakte van 13 ha nodig. Ook hier zijn verbindingen vanuit het elektriciteitsnet, het waterstofnet als ook beschikbaar water als grondstof en als koelproduct noodzakelijk. Als oppervlaktewater gebruikt wordt als koelwater is er sprake van een koelwaterbehoefte van 12.000 liter per seconde voor een elektrolyser van 1 GW.[2]

[2] Bron: Integration of gigawatt scale electrolyser in five industrial clusters, ISPT, 2020.

Het plaatsen van batterijen vergt een relatief geringe ruimte per eenheid opgesteld vermogen. Het uitgangspunt is dat per km^2 een vermogen kan worden geplaatst van 14 GWh (140 MWh per ha). Hierbij is het uitgangspunt dat een batterij van 1 MW vier uur kan leveren; oftewel 4 MWh per 1 MW opgesteld vermogen. Een batterij kent naast een netaansluiting weinig tot geen ruimtelijk relevante vereisten om operationeel te zijn.

Waterstofopslag kan onder meer plaatsvinden in zoutcavernes. De nieuw aan te leggen zoutcavernes voor waterstofopslag zijn locatiegebonden, aangezien dit alleen mogelijk is daar waar de geschikte zoutlagen zich bevinden. Het bovengrondse directe ruimtebeslag is 0,5 PJ per km^2. Vanuit de cavernes komen buizen uit in putten aan de oppervlakte. Een systeem met afsluitbare kleppen zorgt ervoor dat het gas gecontroleerd in en uit kan stromen. De cavernes zijn via ondergrondse pijpleidingen verbonden met de installatie. Deze installatie zorgt ervoor dat het gas in de cavernes kan worden gebracht en eruit kan worden gehaald. De installatie is op haar beurt aangesloten op het Nederlandse gastransportnet.

In principe worden zoutcavernes die voor opslag zijn bedoeld van tevoren als zodanig gedimensioneerd. De dikte van de wanden en het plafond van de caverne moet voldoende zijn, zodat de caverne stabiel blijft bij wisselende druk van hetgeen opgeslagen wordt. Cavernes waarbij op voorhand geen rekening is gehouden met toekomstig gebruik voor de opslag van stoffen kunnen in bepaalde gevallen alsnog geschikt gemaakt worden voor opslag door de dimensies van de caverne aan te passen door het gericht oplossen van het zout in de ondergrond. De aanwezige infrastructuur van de zoutwinning kan afhankelijk van het type opslag worden hergebruikt. Voor het gebruik van de bestaande caverne kan een extra boring nodig zijn. De realisatie van (een cluster van) zoutcavernes behelst verschillende onderdelen, zo zijn de putten nodig om tot de zoutstructuren te komen, zijn installaties nodig om het zout te extraheren en het proceswater moet worden gezuiverd en/of worden geloosd. Ook is er een aansluiting nodig op het gas-netwerk, waardoor een aansluitleiding nodig is en eventueel een invoedingsstation.

Voor de opslag van methaan kunnen bestaande aardgasopslagen gebruikt worden. Hier is geen extra ruimte voor nodig.

2.2.2 Inschatting beschikbare ruimte

Voorafgaand aan de ruimtelijke invulling van de verschillende scenario's, is de beschikbare ruimte geanalyseerd. Op basis van de informatie uit de Integrale Infrastructuurverkenningen 2030-2050[3] en de data uit het Nationaal Programma Regionale Energiestrategieën (NPRES) is aan de hand van zoge-naamde harde en zachte belemmeringen in kaart gebracht hoeveel ruimte beschikbaar is voor de plaat-sing van de elementen van het energiesysteem. In hoofdstuk 5 en 6 wordt per relevant element nader ingegaan op de plaatsingsprincipes die zijn gehanteerd bij de ruimtelijke invulling.

2.3 Modellering 'flex'

Voor een robuust energiesysteem is het noodzakelijk dat vraag en aanbod van energie op elk moment van het jaar gebalanceerd worden, voor elke energiedrager. Hiervoor is 'flex' nodig. Onder flex wordt regelbare productie, opslag en import/export verstaan.

De netbeheerders voeren een jaarrondrekening uit om de behoefte aan in te schatten. Hier wordt voor elk uur in het jaar en voor elke energiedrager de vraag en het niet-regelbare aanbod van energie bepaald.

[3] Ruimtelijke uitwerking Energiescenario's, (maart 2020), Generation Energy, POSAD MAXWAN.

De onbalans tussen vraag en het niet-regelbaar aanbod moet vervolgens worden opgevangen met vraagsturing, regelbare productie, opslag of import/export. De soorten flex die worden meenemen zijn:

- Vraagsturing;
- Elektriciteitscentrales (regelbare productie);
- Elektrolysers (regelbare productie);
- Opslag elektriciteit;
- Opslag waterstof en methaan;
- Import/export elektriciteit;
- Import/export waterstof en methaan.

Elk van deze technieken wordt op een andere manier ingezet. Een deel van de technieken wordt ingezet voor het balanceren van vraag en aanbod van waterstof en methaan (opslag en import/export). De overige technieken worden ingezet voor het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit. Van de technieken die ingezet worden voor het balanceren van elektriciteit wordt een deel ingezet om overschotten van elektriciteit (niet-regelbare productie groter dan vraag) op te vangen, terwijl andere technieken voor tekorten van elektriciteit (niet-regelbare productie kleiner dan vraag) ingezet worden. Daarnaast werken de verschillende technieken op verschillende tijdsschalen. Hieronder worden voor elk van de technieken omschreven hoe deze meegenomen worden.

2.3.1 Vraagsturing

Vraagsturing kan helpen met het balanceren van vraag en aanbod van elektriciteit doordat de vraag hierdoor beter aansluit bij de niet-regelbare productie. Voorbeelden van vraagsturing zijn power-to-heat, waarbij industriële bedrijven overschakelen van gasinstallaties naar elektrische installaties op momenten met veel productie van zon en wind, en slim laden waarbij laadpieken uitgesmeerd worden over de dag.

Vraagsturing is gemodelleerd in het Energietransitiemodel[4]. Deze vorm van flex wordt als eerste ingezet in de modellering en de vraagprofielen (vraag per uur) worden hierdoor aangepast.

2.3.2 Regelbare centrales

Om de leveringszekerheid in het toekomstige, klimaatneutrale energiesysteem te garanderen is een forse hoeveelheid regelbaar vermogen nodig. Deze regelbare elektriciteitscentrales moeten elektriciteit leveren op momenten dat er te weinig productie is van windturbines en zonnepanelen. Door elektrificatie van de vraag neemt het vermogen dat nodig is aan regelbare centrales in de toekomst zelfs toe, van ongeveer 20 GW nu naar 33 tot 36 GW in 2050. Deze centrales zullen echter wel fors minder draaiuren maken dan de huidige centrales, waardoor de totale productie lager ligt.

De regelbare centrales draaien in de scenario's op waterstof of groengas. Er zijn verschillende soorten regelbare centrales nodig. Er zijn grootschalige CCGT4F[5]-centrales nodig die relatief veel draaiuren maken en een hogere efficiëntie hebben. Daarnaast zijn piekeenheden nodig (OCGT of GT6F[6]) die bijspringen op momenten van forse tekorten en daarmee minder draaiuren maken. Dit type regelbare centrale heeft een lagere efficiëntie.

[4] Het Energietransitiemodel van Quintel kan gebruikt worden om mogelijke toekomstige energiescenario's te modelleren.
[5] Combined Cycle Gas Turbine.
[6] Open Cycle Gas Turbine of Gasturbine.

De benodigde hoeveelheid elektriciteitscentrales is bepaald op basis van de 'tekorten' aan elektriciteit. Deze tekorten komen overeen met het gedeelte van de elektriciteitsvraag dat niet ingevuld kan worden met wind en zon (na toepassing van batterijen, meer hierover in Paragraaf 2.3.3). Per uur wordt de benodigde inzet van elektriciteitscentrales bepaald. Het benodigde vermogen aan elektriciteitscentrales komt overeen met het uur in het jaar met de grootste benodigde inzet. Dit komt overeen met een moment met veel elektriciteitsvraag en amper hernieuwbare productie, oftewel een bewolkte, windluwe winterdag.

2.3.3 Elektrolysers

Elektrolysers hebben in de modellering een systeemfunctie doordat ze overschotten van elektriciteit omzetten in waterstof. De elektrolysers zetten alle overschotten van elektriciteit (na inzet van batterijen en curtailment[7]) om in waterstof.

Inzet elektrolysers
In de scenario's wordt aangenomen dat elektrolysers op land ingezet worden op momenten dat er overschotten zijn van elektriciteit (als hernieuwbaar aanbod groter is dan de vraag). In sommige trajecten, zoals CES'sen, wordt uitgegaan van continue productie van elektrolysers. Dit wordt niet meegenomen in de modellering. De continue productie van elektrolysers op zee, die direct gekoppeld zijn aan windparken, worden wel meegenomen.

2.3.4 Opslag elektriciteit

Om vraag en aanbod te balanceren is opslag van elektriciteit met batterijen noodzakelijk. Deze batterijen worden ingezet om kortetermijnonbalans tussen vraag en aanbod van elektriciteit op te vangen. De tijdschaal van de inzet van de batterijen is enkele uren[8]. Batterijen zijn niet geschikt voor het opvangen van langetermijnonbalans tussen vraag en aanbod. Hier worden elektrolysers (bij aanbodoverschot) en regelbare centrales (bij aanbodtekort) voor ingezet.

2.3.5 Opslag waterstof en methaan

Om vraag en aanbod van waterstof en methaan te balanceren is opslag noodzakelijk. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt tussen kortetermijn- en langetermijnopslag. Overschotten van waterstof of methaan worden opgeslagen op geschikte ondergrondse locaties, zoals zoutcavernes. Bij tekorten wordt de benodigde waterstof of methaan uit deze opslagen gehaald.

Optimaal gebruik opslagcapaciteit
De gehanteerde modellering is niet gericht op het optimaal gebruiken van de opslagcapaciteit. De vraag naar opslag ontstaat door onbalans tussen vraag en aanbod. De totale som aan vraag naar opslag wordt ingevuld met een aantal zoutcavernes en mogelijk bestaande gasopslagen of lege gasvelden. Bij een optimalisatie rondom opslag (inzet vraag-aanbodsturing; vaker inzetten van elke opslag) kan de vraag naar opslag aanzienlijk minder zijn dan wat uit de modellering volgt (1,5-2,9 TWh) (TNO, 2020). Daarmee wordt de benodigde opslagcapaciteit in de gehanteerde scenario's mogelijk overschat.

[7] Ten tijde van grote overschotten van elektriciteit wordt een deel van de elektriciteit 'weggegooid'. Het is namelijk niet rendabel om al deze elektriciteit op te slaan of om te zetten in waterstof. Dit wordt curtailment genoemd.

[8] Hiermee wordt bedoeld dat een batterij enkele uren achter elkaar kan opladen of ontladen en daarmee alleen overschotten of tekorten van enkele uren achter elkaar kan opvangen.

2.3.6 Import/export elektriciteit

De import en export van elektriciteit wordt gestuurd door prijsverschillen voor elektriciteit tussen landen. Deze prijsverschillen hangen af van de vraag en het hernieuwbare aanbod van elektriciteit in elk land. Een marktmodellering is toegepast om de import en export van elektriciteit te bepalen. Bij deze markt-modellering worden op basis van prognoses van vraag en aanbod in verschillende omliggende landen prognoses gemaakt van de elektriciteitsprijzen. Vervolgens wordt op basis van die elektriciteitsprijzen bepaald of Nederland elektriciteit importeert naar of exporteert uit die landen.

2.3.7 Import/export waterstof en methaan

Bij de modellering wordt aangenomen dat het deel van de vraag naar waterstof of methaan, dat niet ingevuld kan worden met binnenlandse productie en opgeslagen methaan/waterstof, geïmporteerd wordt. De import op jaarbasis is dus gelijk aan de vraag minus de binnenlandse productie. In de modellering wordt aangenomen dat het hele jaar door import plaatsvindt. De hoeveelheid import per uur is gelijk aan de vraag minus het aanbod op dat uur.

3 Energetische invulling scenario's (excl. kernenergie)

De scenario's worden aan de hand van de energetische invulling en de ruimtelijke invulling omschreven. Bij de energetische invulling van de scenario's worden de totale energievraag en het totale energieaanbod voor heel Nederland, met uitsplitsing naar energiedrager en bron omschreven. Bij de ruimtelijke invulling wordt omschreven hoe deze energievraag en het energieaanbod ruimtelijk neerslaat. In dit hoofdstuk wordt de energetische invulling van de scenario's, met uitzondering van het Kernenergie-scenario (deze volgt in hoofdstuk 6) omschreven.

3.1 Vier toekomstbeelden

In totaal worden zeven scenario's gehanteerd bij de IEA van het PEH. Alle scenario's die gebruikt worden binnen het PEH, ook het Kernenergie-scenario, zijn gebaseerd op de vier energiescenario's die ontwikkeld zijn voor de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 (II3050) (Berenschot & Kalavasta, 2020). In zes van de zeven scenario's (zowel Nederland Energieland- als Sterke Knopen-scenario's) worden de energetische invulling van deze toekomstbeelden direct overgenomen. Alleen bij het Kernenergie-scenario zijn er enkele wijzigingen gemaakt (meer hierover in hoofdstuk 6).

Elk van de vier energiescenario's van II3050 gaat uit van een klimaatneutraal energiesysteem in 2050, alleen de invulling hiervan verschilt. De scenario's gaan uit van vier verschillende toekomstbeelden en variëren onder meer in gebruik energiedragers, omvang van import, omvang van binnenlandse productie en omvang van industrie. Hieronder volgt een korte beschrijving van de vier toekomstbeelden:

- **Regionale Sturing.** De sturing van de energietransitie ligt grotendeels bij lokale en regionale over-heden. Het regionale potentieel voor verduurzaming wordt maximaal benut en daarom wordt veel gebruikgemaakt van elektriciteit en lokale warmtebronnen. Nederland is grotendeels zelfvoorzienend in dit scenario.
- **Nationale Sturing.** De sturing van de energietransitie ligt grotendeels bij de Rijksoverheid. Daardoor zijn er veel grootschalige nationale projecten, zoals windparken op zee. Hierdoor wordt in dit scenario veel gebruikgemaakt van elektriciteit. Nederland is ook in dit scenario grotendeels zelfvoorzienend.
- **Europese Sturing.** Een algemene Europese CO_2-belasting die geldt voor alle sectoren zorgt voor verduurzaming. Vanuit de nationale overheid is weinig sturing in dit scenario. Dit betekent dat het van

de businesscases afhangt welke technieken er komen. Daardoor is er ook een flinke rol voor CCS. Er is in dit scenario veel import van duurzame energie (methaan en waterstof), met name uit andere Europese landen.

- **Internationale Sturing.** Dit scenario gaat uit van een volledig open internationale mondiale markt en krachtig klimaatbeleid op mondiaal niveau. Er is veel internationale handel. Dit leidt tot een groei van de energie-intensieve industrie en veel import van duurzame energie, met name van waterstof.

Alle scenario's die gebruikt worden binnen het PEH, ook het Kernenergie-scenario, zijn gebaseerd op deze toekomstbeelden. In zes van de zeven scenario's worden de energetische invulling van deze toekomstbeelden direct overgenomen. Bij het Kernenergie-scenario zijn er enkele wijzigingen gemaakt (meer hierover in hoofdstuk 6).

3.2 Kerncijfers scenario's

Tabel 3-1 geeft een overzicht van de kerncijfers van de scenario's (exclusief kernenergie). De toelichting van deze cijfers en de achterliggende aannames zijn te vinden in de rapporten 'Klimaatneutrale energie-scenario's 2050' (Berenschot & Kalavasta, 2020) en 'Het energiesysteem van de toekomst' (Netbeheer Nederland, 2021) die beiden onderdeel zijn van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050.

Tabel 3-1 - Kerncijfers scenario's

	Nederland Energieland Regionale Sturing	Nederland Energieland Nationale Sturing	Nederland Energieland Europese Sturing	Nederland Energieland Internationale Sturing	Sterke Knopen Nationale Sturing	Sterke Knopen Europese Sturing
Totale energievraag	1.181 PJ	1.319 PJ	1.647 PJ	1.735 PJ	1.319 PJ	1.647 PJ
Elektriciteitsvraag	690 PJ	764 PJ	863 PJ	847 PJ	764 PJ	863 PJ
Waterstofvraag (incl. non-energetisch, excl. synthetische brandstoffen)	121 PJ	266 PJ	421 PJ	494 PJ	266 PJ	421 PJ
Windenergie op zee (incl. energie voor synthetische brandstoffen)	43 GW	72 GW	42 GW	38 GW	72 GW	42 GW
Wind op land	20 GW	20 GW	10 GW	10 GW	20 GW	10 GW
Zon op dak	59 GW	49 GW	23 GW	18 GW	59 GW	58 GW
Zon op veld	66 GW	57 GW	34 GW	34 GW	48 GW	0 GW
Zon op water						
Elektrolyse (excl. dedicated H_2-productie voor synthetische brandstoffen)	42 GW	51 GW	19 GW	16 GW	51 GW	19 GW
Batterijen	54 GW	53 GW	33 GW	29 GW	33 GW	33 GW
Opslag waterstof	36 TWh	37 TWh	10 TWh	47 TWh	37 TWh	10 TWh
Opslag methaan	24 TWh	14 TWh	55 TWh	15 TWh	14 TWh	55 TWh
Kerncentrales	0 GW	0 GW	0 GW	0 GW	0 GW	0 GW

	Nederland Energieland Regionale Sturing	Nederland Energieland Nationale Sturing	Nederland Energieland Europese Sturing	Nederland Energieland Internationale Sturing	Sterke Knopen Nationale Sturing	Sterke Knopen Europese Sturing
Regelbare centrales	33 GWe	35 GWe	36 GWe	34 GWe	36 GWe	28 GWe
Interconnectie-capaciteit elektriciteit	15 GW	15 GW	15 GW	15 GW	15 GW	15 GW
(Netto) import waterstof	47 TWh	75 TWh	61 TWh	291 TWh	75 TWh	61 TWh
(Netto) import methaan	2 TWh	0 TWh	185 TWh	5 TWh	0 TWh	185 TWh

4 Ruimtelijke invulling Nederland Energieland-scenario's

In het voorgaande hoofdstuk is de energetische invulling van de scenario's besproken. Elk van de zeven scenario's heeft ook een ruimtelijke invulling. Bij de ruimtelijke invulling wordt omschreven hoe de energie-vraag en het energieaanbod ruimtelijk neerslaan. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de ruimtelijke invulling van de vier Nederland Energieland-scenario's. De ruimtelijke invulling van de Sterke Knopen-scenario's en het Zeer Sterke Knopen-scenario volgt in hoofdstuk 5 en 6.

De Nederland Energieland-scenario's gaan uit van spreiding van opwek en opslag. De windturbines, batterijen en zonneparken worden 'uitgesmeerd' over alle beschikbare ruimte in Nederland. De ruimtelijke invulling (en ook de energetische invulling) van deze scenario's is volledig gelijk aan de invulling van de vier klimaatneutrale toekomstscenario's van II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020). Dit hoofdstuk geeft een kort overzicht van de ruimtelijke invulling van de scenario's. Een uitgebreide beschrijving is te vinden te vinden in de rapporten 'Klimaatneutrale energiescenario's 2050' (Berenschot & Kalavasta, 2020) en 'Het energiesysteem van de toekomst' (Netbeheer Nederland, 2021) die beiden onderdeel zijn van de integrale infrastructuurverkenning 2030-2050.

4.1 Energievraag

Tabel 4-1 geeft voor de belangrijkste vraagcategorieën een overzicht van de ruimtelijke invulling. Voor de meeste vraagcategorieën is de ruimtelijke invulling van de energievraag gelijk. Dit betekent dat eenzelfde aandeel van de vraag op een bepaalde locatie neerslaat (bijv. in elk scenario 3% van warmtevraag woningen in gemeente x). Dit betekent niet dat de energievraag op die locatie gelijk is voor de vier scenario's, aangezien de totale energievraag verschilt tussen de scenario's.

Tabel 4-1 - Ruimtelijke invulling energievraag

Categorie	Waar vindt de energievraag plaats?	Ruimtelijke invulling energievraag op basis van …[9]
Energievraag woningen (excl. warmtevraag)	Bij huidige woningen en nieuwbouw	Aantal huishoudens
Warmtevraag woningen	Bij huidige woningen en nieuwbouw	Huidige warmtevraag, gebruikte warmtetechniek
Energievraag utiliteiten	Bij bestaande utiliteiten	Huidige gasvraag
Laadpalen	Laadpalen bij woningen, medium snelladers bij winkels, snelladers bij snellaadstations, particuliere terreinen logistieke bedrijven	Verdeling verschilt per scenario
Glastuinbouw	Bij huidige bedrijven	Huidige gasvraag
Industrie	Op locaties huidige energievraag	Huidige energievraag, gebruikte techniek
Datacenters	Bestaande locaties datacenters	Huidige energievraag

4.2 Hernieuwbare opwek

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de ruimtelijke invulling voor de belangrijkste categorieën van hernieuwbare opwek. De regionalisatie van de hernieuwbare opwek is voor elk scenario gelijk. De totale vermogens verschillen wel per scenario.

In Tabel 4-2 staat een overzicht van de ruimtelijke invulling van per categorie. Bij zon wordt in de scenario's onderscheid gemaakt tussen zon op woningen, zon op bedrijfsdaken en zonneparken.
Bij windenergie op zee wordt aangegeven waar de energie aanlandt.

Tabel 4-2 - Ruimtelijke invulling hernieuwbare opwek

Categorie	Waar vindt de energievraag plaats?	Regionalisatie energievraag op basis van …
Zon op dak woningen	Bestaande woningen en nieuwbouw	Beschikbaar dakoppervlak
Zon op bedrijfsdaken	Bestaande bedrijven en nieuwbouw	Aantal bedrijven
Zon op land en zon op water	Al het landbouwareaal zonder harde restricties, oppervlaktewater	Beschikbaar oppervlak zonder harde restricties
Wind op land	Alle locaties op land zonder harde restricties	Beschikbaar oppervlak zonder harde restricties
Windenergie op zee (elektrische aanlanding)	Aanlandingslocaties	Beverwijk 10% Rotterdam 35% Borssele/Sloegebied 5% Terneuzen 5% Eemshaven 15% Middenmeer 30%

Zonneparken en wind op land worden geregionaliseerd op basis van het beschikbare oppervlak zonder harde restricties. Dit betekent dat zonneparken en wind op land in de scenario's over heel Nederland verspreid worden.

[9] Hiermee wordt bijvoorbeeld bedoeld dat het aantal huishoudens (bij Energievraag woningen) bepaalt waar de energievraag plaatsvindt.

4.3 Overige opwek

Naast hernieuwbare opwek is opwek door middel van elektriciteitscentrales (die draaien op waterstof of groengas) nodig om op elk moment aan de elektriciteitsvraag te kunnen voldoen. Daarnaast worden elektrolysers ingezet om waterstof te produceren uit overschotten van elektriciteit (zie paragraaf 2.3).

De principes voor de plaatsing van elektriciteitscentrales en elektrolysers zijn voor elk scenario gelijk, maar de uitwerking van de regionalisatie kan verschillen doordat vraag en aanbod per scenario verschillen. Hieronder wordt dit toegelicht.

4.3.1 Elektriciteitscentrales

Bij elektriciteitscentrales wordt in de scenario's onderscheid gemaakt tussen grootschalige centrales en piekeenheden (zie Paragraaf 2.3.1 voor onderscheid). De ruimtelijke invulling van deze twee types centrales verschilt:

- **Grootschalige CCGT4F[10]-centrales** worden geplaatst op de locaties waar nu ook al grootschalige regelbare centrales staan.
- **Piekeenheden (OCGT of GT)** worden gespreid over het land geplaatst op basis van regionale tekorten aan elektriciteit. Het gaat om kleine eenheden van ongeveer 100 MW. Deze regionalisatie is het meest efficiënt vanuit het perspectief van het elektriciteitsnet, aangezien je zo het transport van elektriciteit minimaliseert. De regionale tekorten kunnen verschillen tussen de scenario's, waardoor ook de plaatsing van piekeenheden kan verschillen.

4.3.2 Elektrolysers

Elektrolysers worden in elk scenario verdeeld op basis van lokale overschotten van elektriciteit. Dit betekent dat elektrolysers terechtkomen bij windturbines op land, zonneparken en bij aanlandingslocaties van windenergie op zee. Deze regionalisatie is het meest efficiënt vanuit het perspectief van het elektriciteitsnet, aangezien je zo het transport van elektriciteit minimaliseert. De regionale overschotten kunnen verschillen tussen de scenario's, waardoor ook de plaatsing van elektrolysers kan verschillen.

4.4 Opslag van energie

Om op elk moment vraag en aanbod van energie in evenwicht te laten zijn is in de toekomst flexibiliteit in het energiesysteem nodig. Om deze flexibiliteit te kunnen leveren, is opslag van energie nodig. Er wordt ingegaan op de locaties van de belangrijkste vormen van energieopslag, namelijk opslag van elektriciteit, waterstof en methaan.

4.4.1 Opslag elektriciteit

Elektriciteitsopslag, in de vorm van batterijen, wordt ingezet om kortetermijnonbalans van vraag en aanbod van elektriciteit op te vangen (in tegenstelling tot elektrolysers en centrales, die langetermijnonbalans opvangen). Batterijen worden geplaatst op koppelpunten tussen het regionale en het landelijke elektriciteitsnet en bij aanlandingslocaties van windenergie op zee. Dit zijn gunstige locaties vanuit het perspectief van het elektriciteitsnet.

[10] Combined Cycle Gas Turbine

De benodigde hoeveelheid batterijen wordt verdeeld over de koppelpunten en aanlandingslocaties op basis van de lokale onbalans tussen vraag en aanbod. De principes voor de plaatsing van batterijen zijn dus voor elk scenario gelijk, maar de uitwerking van de regionalisatie kan verschillen doordat vraag en aanbod per scenario verschillen.

4.4.2 Opslag waterstof

Waterstofopslag, in de vorm van opslag in de ondergrond, wordt ingezet om onbalans tussen vraag en aanbod van waterstof op te vangen (zowel kortetermijn- als langetermijnonbalans). Waterstof wordt in deze scenario's primair opgeslagen in zoutcavernes. In elk scenario vindt 2/3 van de waterstofopslag plaats in zoutcavernes bij Veendam (Zuidwending) en 1/3 in Twente (of mogelijk over de grens met Duitsland)[11].

4.4.3 Opslag methaan

Methaanopslag, in de vorm van opslag in de ondergrond, wordt ingezet om onbalans tussen vraag en aanbod van methaan op te vangen (zowel kortetermijn- als langetermijnonbalans). Methaan wordt in deze scenario's opgeslagen in de huidige aardgasopslagen.

4.5 Import en export van energie

In de toekomst is import en export van energie noodzakelijk voor een robuust energiesysteem. Import en export van elektriciteit draagt bij aan het balanceren van vraag en aanbod. Daarnaast is in elk scenario forse import van hernieuwbare gassen (waterstof en/of methaan) noodzakelijk. Er wordt ingegaan op de locaties waar import en export van elektriciteit, waterstof en methaan plaatsvinden.

4.5.1 Import/export elektriciteit

Import en export van elektriciteit vindt plaats via de interconnectiepunten van het Nederlandse hoog-spanningsnet met de hoogspanningsnetten van omliggende landen. In totaal gaat het om 15 GW interconnectiecapaciteit in 2050. Dit geldt voor elk scenario.

Het Nederlandse elektriciteitsnet is op vier locaties (Maasbracht, Doetinchem, Hengelo en Meeden) verbonden met het Duitse hoogspanningsnet en op twee locaties met het Belgische hoogspanningsnet (Maasbracht en Rilland). Daarnaast is het Nederlandse elektriciteitsnet via HVDC-kabels onder zee verbonden met het Deense, Noorse en Britse hoogspanningsnet vanaf de Eemshaven (Denemarken en Noorwegen) en de Maasvlakte (Groot-Brittannië).

Er wordt aangenomen dat deze interconnectiepunten tot 2050 blijven bestaan. Op enkele van deze locaties wordt de interconnectiecapaciteit verhoogd conform bestaande plannen (ENTSO-E, 2019). Daarnaast wordt er aangenomen dat er extra interconnectiecapaciteit komt met het Britse hoogspanningsnet via windparken op de Noordzee. Dit geldt voor alle scenario's.

[11] Mogelijk is waterstofopslag vlak over de grens met Duitsland mogelijk. Dit kan dan gekoppeld worden met de Nederlandse waterstofinfrastructuur waardoor deze opslag gebruikt kan worden om de Nederlandse water-stofvoorziening te balanceren.

Figuur 4-1 geeft een overzicht van de locaties van import/export van elektriciteit.

Figuur 4-1 - Overzicht locaties import/export elektriciteit (Netbeheer Nederland, 2021)

4.5.2 Import/export hernieuwbare gassen

Import en export van hernieuwbare gassen kan op twee manieren plaatsvinden. Via interconnectiepunten van het gasnet of via importterminals in havens.

Er wordt aangenomen dat de bestaande interconnectiepunten van het gasnet blijven bestaan. Een deel van het gasnet wordt in de toekomst gebruikt voor waterstof en een deel voor methaan. Dit betekent dat een deel van de interconnectiepunten van het huidige aardgasnet in de toekomst gebruikt kunnen worden voor import/export van methaan en een deel van de interconnectiepunten voor import/export van waterstof.

Het grootste gedeelte van de import/export van waterstof en groengas komt in de scenario's echter via importterminals in havens. Er wordt aangenomen dat dit voornamelijk plaatsvindt op de Maasvlakte. Dit geldt voor alle scenario's.

Figuur 4-2 geeft een overzicht van de locaties van import/export van hernieuwbare gassen.

Figuur 4-2 - Overzicht locaties import/export hernieuwbare gassen (Netbeheer Nederland, 2021)

5 Ruimtelijke invulling Sterke Knopen-scenario’s

In hoofdstuk 3 is de energetische invulling van de scenario’s besproken. Elk van de zeven heeft ook een ruimtelijke invulling. Bij de ruimtelijke invulling wordt omschreven hoe de energievraag en het energie-aanbod ruimtelijk neerslaan. In dit hoofdstuk wordt de ruimtelijke invulling van de Sterke Knopen-scenario’s besproken. Er zijn twee Sterke Knopen-scenario’s die qua energetische invulling identiek zijn aan twee Nederland Energieland-scenario’s. Een van de Sterke Knopen-scenario’s is gebaseerd op het scenario Nationale Sturing en de ander op het scenario Europese Sturing.

Deze twee scenario’s hebben een andere ruimtelijke invulling dan de Nederland Energieland-scenario’s. Bij de Sterke Knopen-scenario’s is clustering het leidende principe. Voor een deel van de onderdelen, waarvoor de ruimtelijke invulling lastig stuurbaar en voornamelijk autonoom verloopt (bijv. vraag), wordt de ruimtelijke invulling gelijk aan de Nederland Energieland-scenario’s gehouden. Maar voor een deel van de onderdelen, waarvoor de ruimtelijke invulling wel stuurbaar is (bijv. hernieuwbare opwek op land), wordt de ruimtelijke invulling zelf bepaald.

Bij deze scenario’s wordt de ruimtelijke invulling voor de volgende onderdelen veranderd:

- Zon (op dak, veld en water);
- Wind op land;
- (Aanlanding) Windenergie op zee;
- Regelbare centrales;

- Elektrolysers;
- Waterstofopslag.

Voor de ruimtelijke invulling van deze onderdelen wordt het stappenplan uit paragraaf 2.1 (onder kopje ‘Ruimtelijke invulling niet-regelbare productie en vraag’) gehanteerd. Dit hoofdstuk bespreekt deze stappen en de resulterende ruimtelijke invulling, voor elk van de bovenstaande onderdelen.

5.1 Analyses beschikbare ruimte

Voor de ruimtelijke invulling van de scenario’s wordt eerst bepaald hoeveel ruimte nodig is per onderdeel en hoeveel ruimte in totaal in Nederland beschikbaar is hiervoor. Op deze manier kan er worden ingeschat welke onderdelen het meeste ruimte vragen en of er in totaal in Nederland voldoende ruimte beschikbaar is. In paragraaf 5.2 worden geschikte locaties voor clustering van de onderdelen bepaald en worden de beschikbare ruimtes op die locaties bepaald.

Verdeling zon op dak, zon op veld en zon op water
In de twee Sterke Knopen-scenario’s wordt aangenomen dat het maximale potentieel van zon op dak ingevuld wordt en dat daardoor minder zon op veld nodig is. Het maximale potentieel voor zon op dak is 59 GW, volgens de scenario’s van II3050 (Berenschot & Kalavasta, 2020).

Bij het scenario Sterke Knopen Europese Sturing is dit voldoende voor de totale opgave van zon en is geen zon op veld of op water nodig. Bij het scenario Sterke Knopen Nationale Sturing blijft een opgave van 49 GW over na benutting van het maximale potentieel van zon op dak. Deze restopgave wordt ingevuld met zon op veld en zon op water.

Tabel 5-1 - Benodigde en beschikbare ruimte per onderdeel

	Sterke Knopen Nationale Sturing		Sterke Knopen Europese Sturing		Beschikbare ruimte (met harde restricties)
	Benodigd vermogen	Benodigde ruimte (indirect)	Benodigd vermogen	Benodigde ruimte (indirect)	
Zon op dak	59 GW	301 km^2	58 GW	300 km^2	301 km^2
Zon op veld	49 GW	325 km^2	0 GW	0 km^2	14.600 km^2
Zon op water					15 km^2
Wind op land	20 GW	1.700 km^2	10 GW	850 km^2	9.250 km^2
Windenergie op zee[12]	72 GW	Op zee, dus buiten scope	42 GW	Op zee, dus buiten scope	Op zee, dus buiten scope
Nieuwe regelbare centrales	18 GWe	1 km^2	19 GWe	1 km^2	Ruim voldoende
Elektrolysers	51 GWe	2 km^2	19 GWe	1 km^2	Ruim voldoende
Waterstofopslag	37 TWh		10 TWh		223 TWh

Uit bovenstaande blijkt dat er in theorie voldoende ruimte is voor de plaatsing van de verschillende onderdelen, wanneer wordt uitgegaan van harde belemmeringen (zie paragraaf 2.2.2) die op dit moment

[12] Een deel van deze opwekcapaciteit wordt gebruikt voor productie van waterstof voor synthetische brandstoffen, zoals synthetische kerosine. Bij het scenario Nationale Sturing gaat dit om 20 GW van de 72 GW. Bij het scenario Europese Sturing om 12 GW van de 42 GW.

aanwezig zijn. Ook blijkt dat veruit het grootste ruimtelijke beslag voortkomt uit de plaatsing van wind en zon op land.

5.2 Ruimtelijke invulling onderdelen

5.2.1 Zon op dak

Voor de plaatsing van het onderdeel zon op land wordt de zonneladder toegepast, zoals deze in de NOVI is gepresenteerd. Dit betekent dat de volgende plaatsingsvolgorde wordt gehanteerd:

- Zon op daken en gevels;
- Zon op onbenutte terreinen in bebouwd gebied;
- Zon in landelijk gebied (RWZI's[13], vuilnisbelten, bermen van spoor- en autowegen);
- Zon op water, landbouw en natuurgronden.

Bij de eerste drie treden wordt het maximale potentieel benut. De resterende opgave na toepassing van de eerste drie treden wordt ingevuld op water, landbouw en natuurgrond. In deze paragraaf wordt de invulling van de eerste trede besproken.

In het scenario Sterke Knopen Nationale Sturing moet 59 GW zon op dak geplaatst worden. Hier is ruim 300 km^2 aan ruimte voor nodig. In het scenario Sterke Knopen Europese Sturing gaat het om 58 GW zon op dak en 300 km^2 aan ruimte. Hieronder worden de ruimtelijke principes besproken die gehanteerd zijn en de resulterende ruimtelijke invulling.

Ruimtelijke principes

Bij beide Sterke Knopen-scenario's wordt het potentieel voor zon op dak maximaal benut zodat zo min mogelijk zon op veld en zon op water noodzakelijk zijn. Er is geen voorkeur voor bepaalde type daken. Alle daken die geschikt zijn voor zonnepanelen, zowel van woningen als van bedrijven, worden ingezet.

Analyse beschikbare ruimte

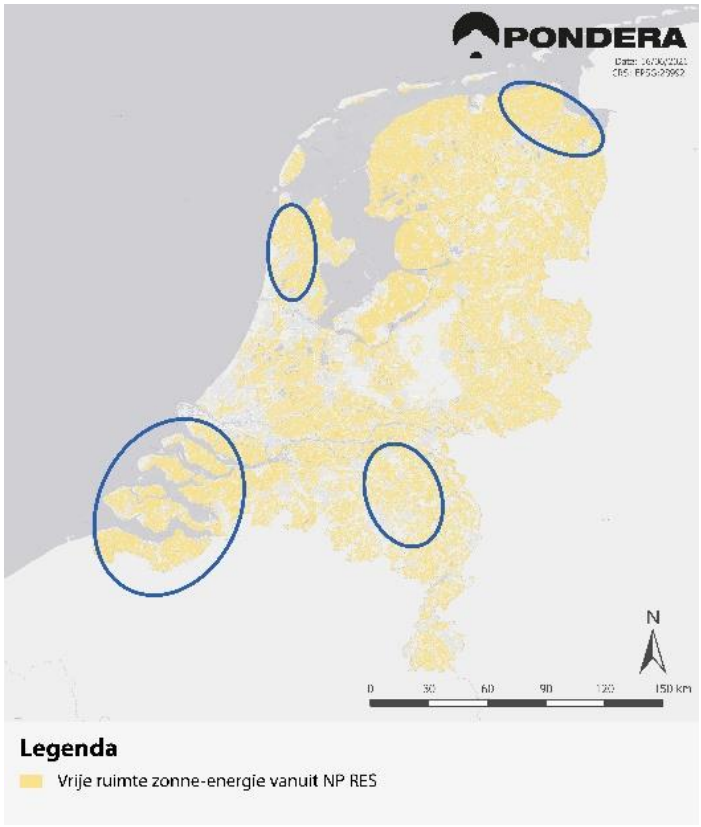
Voor de beschikbare ruimte wordt aangesloten bij de analyses die uitgevoerd zijn binnen II3050. In het scenario Regionale Sturing wordt het totale potentieel voor zon op dak ingevuld (Berenschot & Kalavasta, 2020). Dit gaat om 40 GW zon op daken van woningen en 19 GW zon op daken van bedrijven. Er wordt aangenomen dat dit de bovengrens is.

Ruimtelijke invulling

In het scenario Sterke Knopen Nationale Sturing wordt uitgegaan van 59 GW zon op daken met een gelijke verdeling als bij II3050 (en dus gelijk aan de Nederland Energieland-scenario's, zie Paragraaf 4.2). In het scenario Sterke Knopen Europese Sturing is de totale opgave voor zon 58 GW. Deze wordt volledig ingevuld met zon op dak.

[13] Rioolwaterzuiveringsinstallaties.

Figuur 5-1 - Clustergebieden zon op water, landbouw en natuurgronden



Binnen deze clusters wordt de opgave van trede 4, zon op water, landbouw en natuurgronden, ingevuld. Voor de ontwikkeling tot 2030 wordt aangenomen dat alle plannen van de RES 1.0 gerealiseerd worden. In de RES 1.0 staat voor 18 GW aan plannen voor zon op land. De resterende opgave na 2030 (19 GW bij Nationale Sturing) wordt in de scenario's verdeeld over de bovenstaande clusters op basis van de beschikbare ruimte binnen de clusters.

5.2.2 Zon op veld/zon op water

Voor de plaatsing van het onderdeel zon op land wordt de zonneladder toegepast, zoals deze in de NOVI is gepresenteerd. Dit betekent dat de volgende plaatsingsvolgorde wordt gehanteerd:

1. Zon op daken en gevels.
2. Zon op onbenutte terreinen in bebouwd gebied.
3. Zon in landelijk gebied (RWZI's, vuilnisbelten, bermen van spoor- en autowegen).
4. Zon op water, landbouw en natuurgronden.

Bij de eerste drie treden wordt het maximale potentieel benut. De resterende opgave na toepassing van de eerste drie treden wordt ingevuld op water, landbouw en natuurgrond. In deze paragraaf wordt de invulling van de tweede tot en met de vierde trede besproken.

In het scenario Sterke Knopen Nationale Sturing moet 49 GW zon op veld of op water geplaatst worden. Hier is ruim 325 km^2 aan ruimte voor nodig. In het scenario Sterke Knopen Europese Sturing wordt de volledige opgave van zon ingevuld met zon op dak en is er dus geen opgave voor zon op veld of water.

Hieronder worden de ruimtelijke principes besproken die gehanteerd zijn en de resulterende ruimtelijke invulling.

Ruimtelijke principes

Het ruimtelijke principe voor de plaatsing van zon op water, landbouw en natuurgronden in de Sterke Knopen-scenario's is clustering. Bij zon op veld of op water betekent dit dat zonnevelden op enkele geschikte locaties geclusterd worden. De keuze voor locaties voor grootschalige clustering van zonnevelden moeten beargumenteerd worden. Hiermee wordt voorkomen dat er een onrealistisch alternatief scenario wordt ontwikkeld. Het is belangrijk om hierbij te benoemen dat het PEH geen opwekgebieden voor zonnevelden aanwijst. Het concretiseren van clustergebieden is noodzakelijk om de effecten van clustering van zonnevelden te kunnen inschatten.

Hieronder wordt besproken welke criteria gehanteerd zijn bij de keuze voor clusterlocaties Op basis van een kwalitatieve analyse van deze criteria wordt vervolgens een keuze gemaakt over welke locaties meegenomen worden voor grootschalige clustering van zonnevelden.

1. **Zon op land op minder geschikt landbouw areaal:**
   Voor de grootschalige clustering van zon op land wordt gebruikgemaakt van gronden die minder geschikt zijn voor de landbouw. Dit zijn de verziltingsgebieden, veenweidegebieden en droogtegevoelige gebieden. Volgende figuur geeft een overzicht van deze gebieden.

Figuur 5-2 - Overzicht verziltingsgebieden, veenweidegebieden en droogtegevoelige gebieden

Uit deze figuren blijkt dat de verzilting en veenweidegebieden zich met name langs de kust, in Noord- en Zuid-Holland en in Friesland bevinden. De droogtegevoelige gebieden zijn met name langs de zuid- en oostgrenzen van Nederland gesitueerd.

2. **Zon op land dichtbij elektriciteitsvraag**
   Dit sluit aan bij de ruimtelijke logica voor wind op land. Dezelfde vijf clusters worden voor zon op land geïdentificeerd (zie paragraaf 5.2.1).

3. **Zon op land als laatst in natuurgebied**
   Bij voorkeur wordt geen ruimte gebruikt in een door NNN- of Natura 2000-beschermd gebied. Deze gebieden worden pas onderzocht als er geen andere beschikbare ruimte resteert voor de invulling van het energetisch scenario.

Analyse beschikbare ruimte

Zon op onbenutte terreinen in bebouwd gebied

Er is geen voorhanden data op basis waarvan een oppervlak van onbenutte terreinen kan worden gegeven, zowel voor nu als voor het jaar 2050. Ook het onderzoek 'Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland' (Generation Energy, 2021) geeft hier geen heldere aanknopingspunten voor. De aldaar gehanteerde typologieën zijn samengevoegd in 'zon op infra'. Dit sluit in onze definitie aan bij de volgende trede in de zonneladder. Daarnaast kan beredeneerd worden dat in 2050 er geen - dan wel een zeer gering aantal – onbenutte terreinen binnen bebouwd gebied zijn in 2050. Er wordt voor 2050 geen capaciteit toegekend aan deze trede.

Zon in landelijk gebied (RWZI's, vuilnisbelten, bermen van spoor- en autowegen)

Voor het potentieel voor zon in landelijk gebied wordt aangesloten bij het onderzoek van Generation Energy (Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland, 2021). Dit resulteert in 58 km^2 beschikbare ruimte, wat overeenkomt met een capaciteit van
8,7 GW.

Tabel 5-2 - Beschikbare ruimte zon in landelijk gebied

Locatie	Oppervlakte totaal	Geschatte benutbaarheid	Oppervlakte beschikbaar
Parkeerterrein	114 km^2	20%	23 km^2
Berm en verkeerseilanden	610 km^2	5%	31 km^2
Stortplaatsen	5 km^2	50%	3 km^2
Geluidsschermen	5 km^2	50%	3 km^2
Totaal	**734 km^2**		**58 km^2**

Zon op water, landbouw en natuurgronden

Voor het potentieel voor zon op water wordt aangesloten bij de analysekaarten van het NPRES (NPRES, 2020). Dit betekent een beschikbaar oppervlak van 15 km^2. Rekenend met een capaciteit van 190 MW per km^2, is er ruimte voor ca. 3 GW zon op (binnen)water. Vervolgens worden landbouw- en natuurgronden aangesproken. Hierbij wordt ook aangesloten bij de analysekaarten van het NPRES (NPRES, 2020). Er is ongeveer 14.600 km^2. Er is ruimte voor ruim 2.700 GW aan zon op landbouw- en natuurgronden, rekenend met een capaciteit van 190 MW per km^2. Dit betekent dat er veel meer ruimte beschikbaar dan dat er nodig is voor de opgave van zon op veld.

Ruimtelijke invulling

Op basis van voorgaande is het volgende overzicht te creëren:

Tabel 5-3 - Ruimtelijke invulling zon

Trede	Sterke Knopen Nationale Sturing	Sterke Knopen Europese Sturing
Totale opgave zon	107 GW	58 GW
1. Zon op dak	59 GW	58 GW
2. Zon op onbenutte terreinen	0 GW	0 GW
3. Zon op landelijk gebied	9 GW	0 GW
4. Zon op water, landbouw en natuurgronden	Water: 3 GW Landbouw en natuur: 37 GW	Water: 0 GW Landbouw en natuur: 0 GW

Bij trede 3, zon op landelijk gebied, wordt alle beschikbare ruimte gebruikt.

Op basis van voorgaande ruimtelijke logica's worden de volgende grootschalige clustering van zon op water, landbouw en natuurgronden aangenomen in de scenario's.

- Groningen;
- Kop Noord Holland;
- De Peel;
- Zeeland/Rotterdam.

5.2.3 Wind op land

In het scenario Sterke Knopen Nationale Sturing moet 20 GW wind op land geplaatst worden. Hier is 1.700 km^2 aan ruimte voor nodig. In het scenario Sterke Knopen Europese Sturing gaat het om 10 GW wind op land en 850 km^2 aan ruimte. Hieronder worden de ruimtelijke principes besproken die gehanteerd zijn en de resulterende ruimtelijke invulling.

Ruimtelijke principes

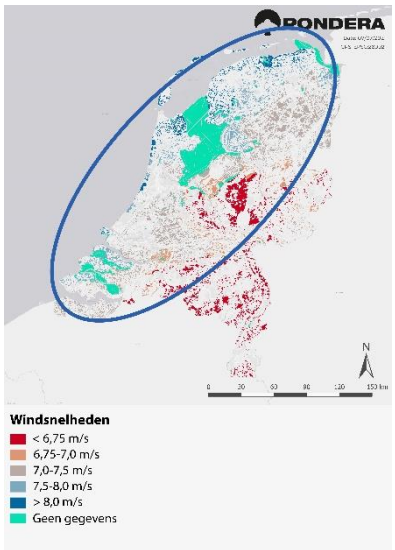
Het ruimtelijke principe voor de Sterke Knopen-scenario's is clustering. Bij wind op land betekent dit dat windturbines op enkele geschikte locaties geclusterd worden. De keuze voor locaties voor grootschalige clustering van wind op land moet beargumenteerd worden. Hiermee wordt voorkomen dat er een onrealistisch alternatief scenario wordt ontwikkeld. Het is belangrijk om hierbij te benoemen dat het PEH geen opwekgebieden voor wind op land aanwijst. Het concretiseren van clustergebieden is noodzakelijk om de effecten van clustering van wind op land te kunnen inschatten.

Hieronder wordt besproken welke criteria gehanteerd zijn bij de keuze voor clusterlocaties. Op basis van een kwalitatieve analyse van deze criteria wordt vervolgens een keuze gemaakt over welke locaties meegenomen worden voor grootschalige clustering van wind op land.

Windturbines plaatsen waar de wind het hardst waait

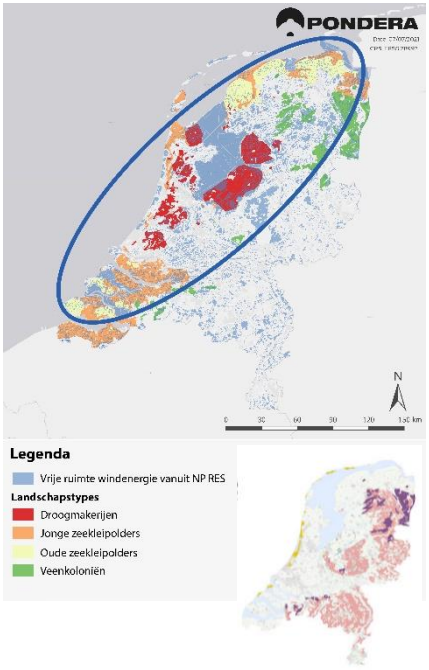
Door windturbines te plaatsen op plekken met het grootste windaanbod, wordt met hetzelfde aantal turbines meer elektriciteit opgewekt. Deze aanname heeft geen doorwerking in de opgave van het energetisch scenario, waar het opgesteld vermogen het uitgangspunt is. Echter, naast het energetische voordeel, heeft het grootste windaanbod ook een economisch voordeel. Het is voor de markt aantrekkelijker om op deze locaties wind te ontwikkelen, waardoor de realisatiekans van dit alternatief toeneemt.

In de afbeelding hiernaast is het volgens NPRES beschikbaar areaal voor wind op land ingedeeld naar een categorieën van gemiddelde windsnelheden in Nederland. Hieruit blijkt dat de gebieden ten noorden van de lijn Zeeland–Noordoost Groningen het grootste windaanbod kennen.



Windturbines plaatsen in landschappen die zich daar qua structuur het beste voor lenen

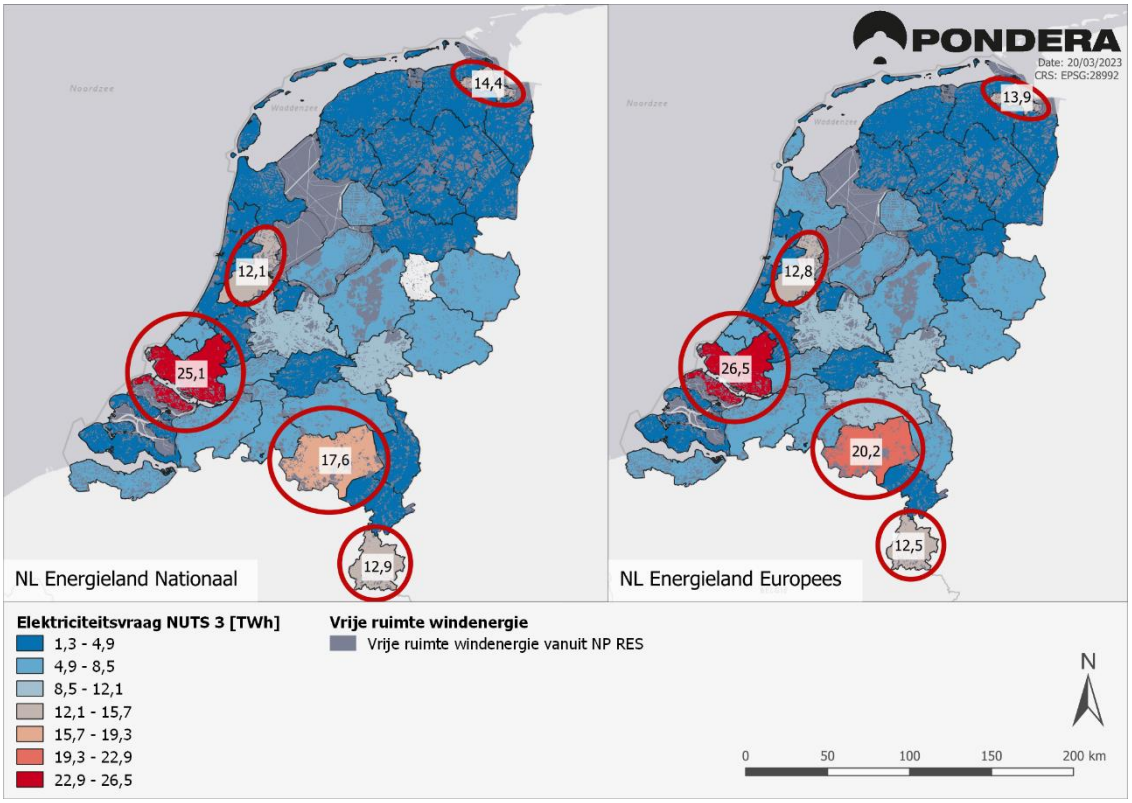
In het rapport ViaParijs van het College van Rijksadviseurs (CRa) is geanalyseerd welke landschappen bij voorkeur benut kunnen worden voor de opgave van wind op land. Hierin wordt aangegeven dat grootschalige, rationele landschappen waaronder jonge ontginningen, grootschalige zeekleipolders, grootschalige havengebieden en hoogveenontginningen zich het beste lenen voor het grootschalige en geconcentreerd opwekken van windenergie.



In de afbeelding hiernaast zijn deze landschappen weergegeven. Hieruit blijkt dat de gebieden ten noorden van de lijn Zeeland–Noordoost Groningen de meeste geschikte landschappen voor windturbines hebben. Hierbij moet de connotatie gemaakt worden dat hier de grote droogmakerijen aan toegevoegd zijn, en de jonge ontginningen ontbreken. De jonge ontginningen bevinden zich voornamelijk ten zuiden van de lijn Brabant–Noord-Drenthe (zie inzet kaart rechts). Een aanzienlijk deel van deze ontginningen zijn landschappelijk niet grootschalig en rationeel te benoemen. De Peel in Noord-Brabant en het noorden van Limburg maakt hierop een uitzondering.

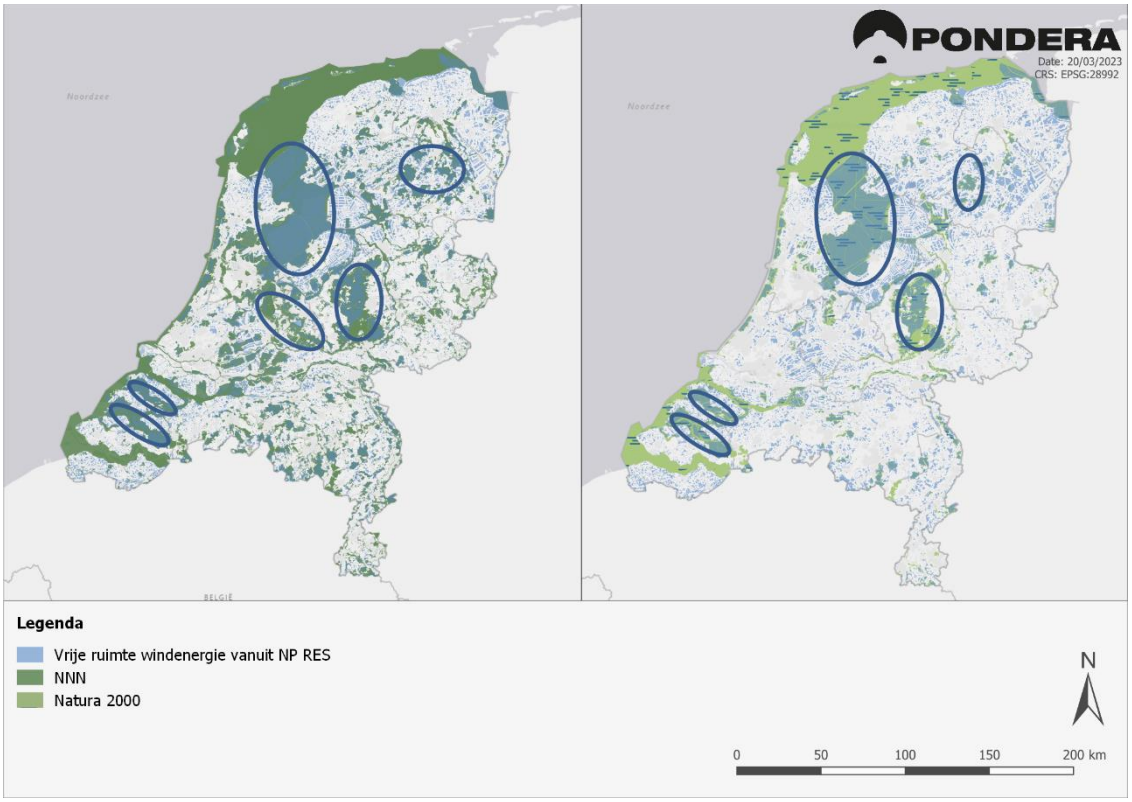
Windturbines worden dicht bij de vraag geplaatst

Om de hoeveelheid nieuwe infrastructuur te beperken heeft het de voorkeur om dicht bij de grootste elektriciteitsvraag in Nederland wind op land te plaatsen. In de afbeelding hieronder is de vraag op NUTS3-niveau geaggregeerd en weergegeven, voor beide scenario's. De afbeelding laat zien dat er voor beide scenario's vijf clusters te identificeren zijn waar sprake is van een grote elektriciteitsvraag.



Gebieden in NatuurNetwerk Nederland en Natura 2000-gebieden worden als laatste benut

De ruimte in een door NNN (onderstaande figuur links) of Natura 2000 (onderstaande figuur rechts) beschermd gebied worden bij voorkeur niet gebruikt voor windturbines op land. Deze gebieden worden pas onderzocht als er geen andere beschikbare ruimte resteert voor de invulling van de totale opgave.



Analyse beschikbare ruimte

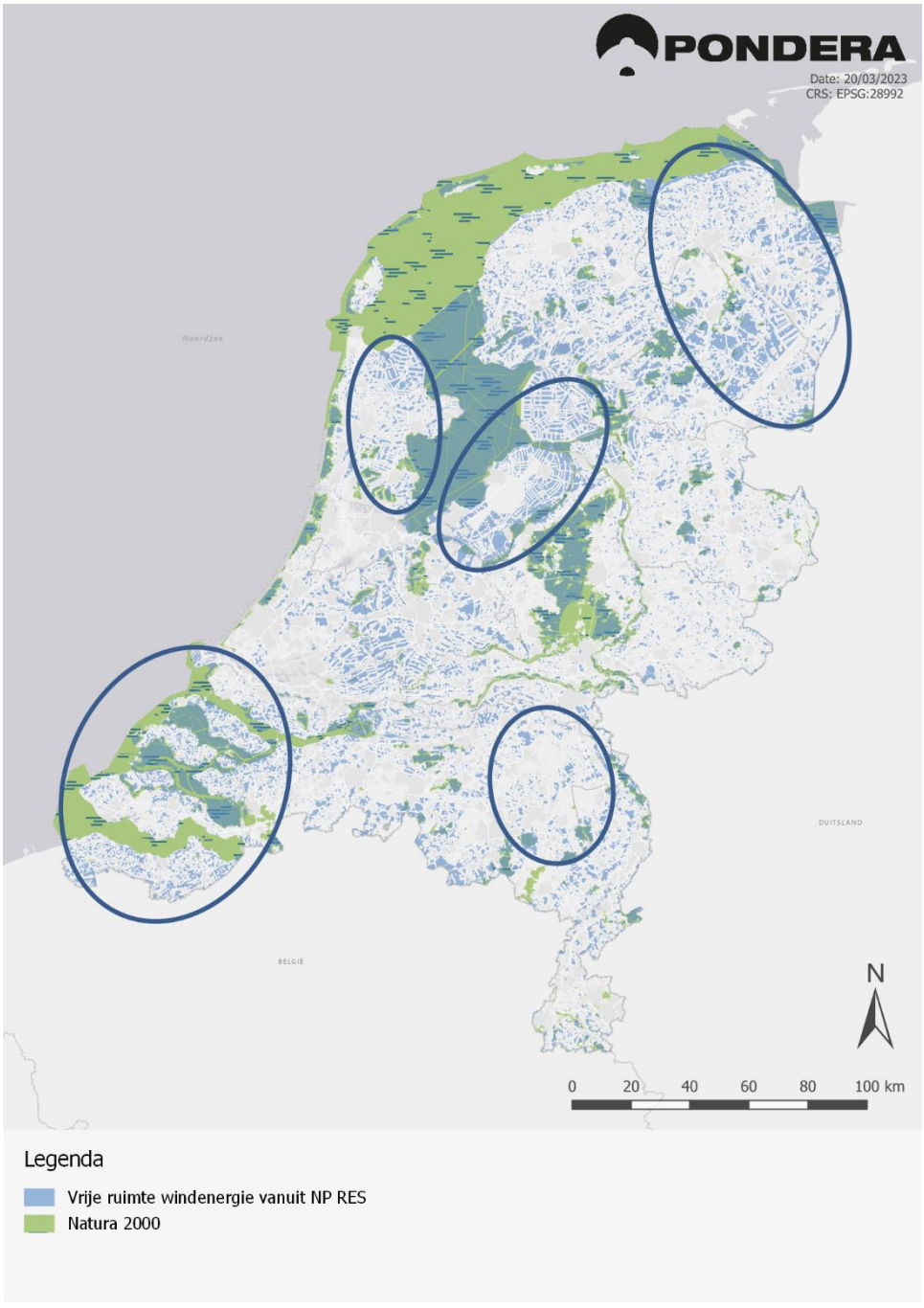
Om de beschikbare ruimte binnen de gebieden voor grootschalige clustering van wind op land te bepalen wordt gebruikgemaakt van de analysekaarten die ontwikkeld zijn voor het NPRES (NPRES, 2020) en zijn aangevuld met de aanwezigheid van Natura 2000-gebieden en het Natuurnetwerk Nederland.

Ruimtelijke invulling

Op basis van voorgaande ruimtelijke logica's zijn de volgende clusters geïdentificeerd als optie voor de invulling van grootschalige clustering van wind op land.

- Groningen;
- Flevoland;
- Kop Noord-Holland;
- De Peel;
- Zeeland/Rotterdam.

Figuur 5-3 - Clustergebieden wind op land



Binnen deze clusters wordt de opgave van wind op land na 2030 ingevuld. Voor de ontwikkeling tot 2030 wordt aangenomen dat alle plannen van de RES 1.0 gerealiseerd worden. In de RES 1.0 staat voor 9 GW aan plannen voor wind op land. De resterende opgave na 2030 (11 GW bij Nationale Sturing, 1 GW bij Europese Sturing) wordt in de scenario's verdeeld over de bovenstaande clusters op basis van de beschikbare ruimte binnen de clusters.

5.2.4 Windenergie op zee

Binnen het PEH wordt alleen gekeken naar de benodigde ruimte voor het energiesysteem op land. Dit betekent dat de locaties van windparken op zee niet relevant zijn. Wel wordt er gekeken naar de locaties op land waar de energie van deze windparken aanlandt. De keuze voor aanlandingslocaties van windenergie op zee heeft een grote impact op het energiesysteem op land, aangezien het om grote hoeveelheden energie gaat. Maar bij de Nederland Energieland-scenario's is de verdeling over de aanlandingslocaties gelijk bij elk scenario. Daarom wordt er bij de Sterke Knopen-scenario's alleen gekeken naar alternatieve manieren van aanlanding. Hierbij wordt alleen gekeken naar het gedeelte van de energie van de windparken op zee dat elektrisch aanlandt[14].

In het Sterke Knopen Nationale Sturing-scenario landt 52 GW aan windenergie op zee elektrisch aan en in het Sterke Knopen Europese Sturing-alternatief 30 GW. Hieronder worden ruimtelijke principes besproken die gehanteerd zijn en de resulterende ruimtelijke invulling.

Ruimtelijke principes

In het toekomstige energiesysteem zal een groot deel van de elektriciteit opgewekt worden door windparken op zee. Deze elektriciteit moet getransporteerd worden naar de locaties van vraag. Daardoor is transport van elektriciteit van de kust naar het binnenland nodig, dit loopt via het HS-net.

In elk van de Nederland Energieland-scenario's worden zware knelpunten voorzien op het hoogspanningsnet tussen de Maasvlakte en Chemelot vanwege het transport van elektriciteit uit windenergie op zee naar dit industriecluster. Daarnaast worden in elk van deze scenario's forse knelpunten voorzien op het hoogspanningsnet in Noord-Holland.

Bij de keuze voor aanlandingslocaties in de Sterke Knopen worden opties onderzocht die deze knelpunten kunnen verhelpen of verminderen. Bij kleinere hoeveelheden windenergie op zee, dus bij het scenario Europese Sturing, is optimaliseren over de aanlandingslocaties aan de kust een mogelijke oplossing voor de knelpunten. Bij grotere hoeveelheden windenergie op zee, dus bij het scenario Nationale Sturing, is optimaliseren over de aanlandingslocaties aan de kust niet voldoende en kan diepe aanlanding een oplossing zijn. Deze opties worden uitgewerkt voor de Sterke Knopen-scenario's. Hieronder worden de afwegingen voor beide opties besproken.

Diepe aanlanding (Nationale Sturing)

Een mogelijke oplossing voor de knelpunten door het transport van windstroom naar het binnenland is zogenaamde 'diepe aanlanding' van windenergie op zee. In dit geval wordt een deel van de windparken niet aangesloten op een aanlandingslocatie aan de kust, maar wordt het direct aangesloten op een locatie verder het binnenland in door middel van een HVDC-kabel. Daardoor is minder transport nodig van de kust richting het binnenland via het reguliere HS-net waardoor de eerdergenoemde knelpunten (gedeeltelijk) voorkomen kunnen worden.

Er zijn bepaalde criteria die meewegen bij de keuze voor een locatie en het vermogen voor diepe aanlanding:

- Het hoofddoel van diepe aanlanding is voorkomen van knelpunten op het HS-net. Daarom kun je de knelpuntenanalyse van de Nederland Energieland-scenario's gebruiken als input.
- Het is logisch om aan te landen dicht bij de vraag, zodat zoveel mogelijk elektriciteit direct gebruikt kan worden en er minder transport nodig is.

- De aanlandingslocatie moet in de buurt van het Nationaal Waterstofnetwerk liggen aangezien de windstroom op momenten van overschotten omgezet wordt in waterstof.
- Er moet voldoende transportcapaciteit op het HS-net in de buurt zijn om de elektriciteit die je niet gebruikt of omzet in waterstof te kunnen transporteren.
- Als Nederland in de toekomst exporteur wordt van elektriciteit kan het een mogelijkheid zijn om een aanlandingspunt te kiezen dicht bij de grens.;
- Hoe dieper je aanlandt, hoe hoger de kosten van de HVDC-kabel en hoe lager de kosten voor knelpunten voor het oplossen van knelpunten op het 380kV-net.

Per aanlandingspunt van windenergie op zee wordt er gekeken waar de aanlanding problemen oplevert op het 380kV-net en of diepe aanlanding hiervoor een oplossing kan zijn. Op basis van bovenstaande criteria wordt een geschikte locatie bepaald voor de diepe aanlanding. Hoeveel vermogen op deze diepe aanlandingslocaties aanlandt is afhankelijk van de overbelasting op het HS-net in de standaard situatie. De hoeveelheid moet zo gekozen worden dat er geen of nauwelijks uitbreidingen op het HS-net nodig zijn, aangezien dat het doel is van de HVDC-kabel.

Een eerste knelpunt dat optreedt door de aanlanding van wind op ee is het transport van de kust (met name vanaf de Maasvlakte) naar Chemelot, waar een grote concentratie van elektriciteitsvraag is bij het industriecluster. Door het transport van elektriciteit richting dit cluster ontstaan knelpunten op alle 380kV-tracés van de Maasvlakte tot Chemelot. Een mogelijke oplossing hiervoor is diepe aanlanding bij Maasbracht. Maasbracht ligt vlakbij Chemelot en daarnaast heb je hier interconnectiepunten met België en Duitsland. Vanwege de voorziene export van elektriciteit in 2050 richting deze landen is dit ook belangrijk bij het voorkomen van knelpunten. Tot slot ligt Maasbracht in de buurt van het Nationaal Waterstofnetwerk en lopen er twee tracés richting de rest van Nederland. Op basis van gesprekken met TenneT is naar voren gekomen dat realistisch gezien maximaal 6 GW diep aan kan landen bij Maasbracht. Voor grotere vermogens is er niet voldoende vraag in de buurt van Maasbracht. Het is al een flinke opgave om 6 GW aan HVDC-kabels richting Maasbracht te leggen.

Een tweede knelpunt dat optreedt door de aanlanding van windenergie op zee is het transport vanaf aanlandingslocatie Middenmeer richting de hoofdlus en richting de Maasvlakte. Hierdoor vinden knelpunten plaats op meerdere tracés in Noord-Holland. Deze knelpunten kunnen vermoedelijk verminderd of voorkomen worden door diepe aanlanding direct op de hoofdlus. Hiervoor is Diemen de meest voordehand liggende optie, aangezien dit het dichtstbij Middenmeer ligt. Andere opties zijn Lelystad of Ens, maar deze opties liggen minder voor de hand aangezien daar beperkte transportcapaciteit aanwezig is. Ook bij Diemen is de maximale capaciteit voor diepe aanlanding naar verwachting 6 GW.

Er vinden geen grote knelpunten op het HS-net plaats door aanlanding van windenergie op zee bij de Eemshaven en in Zeeland. Daarom is in deze gevallen geen diepe aanlanding noodzakelijk.

Er zijn ook nog andere locaties die mogelijk kunnen dienen voor diepe aanlanding, zowel in plaats van Middenmeer als in plaats van de Maasvlakte. Dit zijn locaties op de hoofdlus van het HS-net. Op die manier wordt het HS-net op de uitlopers van de aanlandingslocatie van windenergie op zee naar de hoofdlus ontzien. Het voordeel van het aansluiten van windenergie op zee op de hoofdlus is dat er veel

[14] Een gedeelte van de energie van de windparken op zee wordt gebruikt voor de productie van synthetische brandstoffen. De windenergie landt in dat geval aan in de vorm van waterstof. Bij het scenario Nationale Sturing gaat dit om 20 GW en bij het scenario Europese Sturing om 12 GW.

transportcapaciteit in de buurt is. Enkele mogelijke opties zijn Krimpen, Geertruidenberg, Hengelo en Dodewaard:

- Krimpen en Geertruidenberg liggen dichterbij de kust waardoor de kosten voor de HVDC-kabel lager liggen.
- Dodewaard ligt verder landinwaarts, waardoor minder transport van west naar oost nodig is en het dichterbij de grens ligt maar de kosten voor de HVDC-kabel liggen wel hoger.
- Bij Hengelo vinden knelpunten plaats vanwege het transport van windstroom naar Duitsland en Zuid-Nederland. Deze knelpunten kun je oplossen met diepe aanlanding hier.

Er is geen duidelijke aanleiding om aan te nemen dat de knelpunten van de Maasvlakte naar Maasbracht en de knelpunten in Noord-Holland opgelost worden bij diepe aanlanding op deze locaties, daarom zijn deze opties niet meegenomen.

Een laatste mogelijkheid is directe aansluiting van windparken op zee naar Noordrijn-Westfalen/ Ruhr-gebied in Duitsland. Vanwege het sluiten van kolencentrales en de toename van de elektriciteitsvraag in deze regio zal er een tekort zijn aan elektriciteit in die regio en door netcongestie is het lastig om duurzame productie uit Noord-Duitsland naar deze regio te transporteren. Een oplossing is export van elektriciteit uit Nederland naar Noordrijn-Westfalen. Dit kan via het reguliere HS-net, maar hiervoor moet windstroom over lange afstanden getransporteerd worden, wat kan leiden tot knelpunten. Daarom is direct aansluiting van dit gebied met een HVDC-kabel ook een optie. Deze optie wordt ook genoemd in het TIKI-rapport (DNVGL, 2020). Het is onduidelijk of dit noodzakelijk en wenselijk is. Diepe aanlanding bij Maasbracht en versterking van de interconnectie richting het Ruhrgebied liggen meer voor de hand. Daarom is ook deze optie niet meegenomen.

Optimaliseren aanlanding aan kust (Europese Sturing)

Een andere manier om de knelpunten door aanlanding van windenergie op zee te verminderen is een andere verdeling van de aanlanding over de aanlandingslocaties. Er zijn verschillende overwegingen die meespelen bij de verdeling van de aanlanding van windenergie op zee over aanlandingslocaties aan de kust:

- Het hoofddoel van een alternatieve verdeling over de aanlandingspunten is voorkomen van knelpunten op het HS-net. Daarom kun je de bovenstaande knelpuntenanalyse gebruiken als input.
- De kosten van het aan land brengen van de elektriciteit zijn aanzienlijk, in de toekomst kan dit tot meer dan 25% van de totale kosten beslaan. Deze kosten zijn afhankelijk van de lengte van de kabels. Daarom is de afstand tussen het windpark en het aanlandingspunt een belangrijke factor in de overweging.
- Het is logisch om bij de aanlanding aan te sluiten op de vraag. Dit betekent dat je op locaties met veel vraag meer stroom laat aanlanden zodat zoveel mogelijk elektriciteit direct gebruikt kan worden en er minder transport nodig is.
- De aanlandingslocatie moet in de buurt van het Nationaal Waterstofnetwerk liggen aangezien de windstroom op momenten van overschotten omgezet wordt in waterstof.

Bij de II3050-scenario's landt een groot deel van de elektriciteit van windenergie op zee aan in Zuid-Holland (35% bij Maasvlakte) en Noord-Holland (30% bij Middenmeer en 10% bij Beverwijk). Een alternatieve, meer evenredige verdeling over de aanlandingspunten kan deze knelpunten verminderen. In de studie Systeemintegratie Wind op Zee in het kader van VAWOZ 2040 (Guidehouse & Berenschot, 2021) is een meer optimale verdeling (vanuit infrastructuurperspectief) over de aanlandingslocaties

vastgesteld, waarbij geen additionele verzwaring op het 380kV-net nodig is ten opzichte van verzwaringen waar nu al plannen voor liggen. Voor het 32 GW-scenario in deze studie is de verdeling als volgt:

Tabel 5-4 - Verdeling aanlandingspunten 32 GW scenario Systeemintegratie Wind op Zee 2040

Aanlandingslocatie	Vermogen
Borssele/Sloegebied	8 GW
Maasvlakte	8 GW
Beverwijk	4 GW
Middenmeer/Den Helder	2 GW
Eemshaven	10 GW

Een andere mogelijkheid is gebruikmaken van meer aanlandingspunten aan de kust, waardoor het vermogen per aanlandingspunt minder wordt. Enkele voorbeelden van mogelijke aanlandingspunten zijn Simonshaven (Rotterdam), Bergum (Friesland) en Vijfhuizen (Noord-Holland). Het is de verwachting dat aanlanding bij deze aanlandingslocaties geen knelpunten voorkomt aangezien er alsnog transport van de kust richting het binnenland nodig is en dit voor een groot gedeelte via dezelfde tracés verloopt als bij de oorspronkelijke aanlandingspunten. Daarom wordt deze optie niet meegenomen.

Ruimtelijke invulling

Bij beide Sterke Knopen-alternatieven wordt uitgegaan van Den Helder in plaats van Middenmeer als aanlandingslocatie, aangezien dit ook als potentiële aanlandingslocatie gezien wordt. Terneuzen wordt niet meegenomen als aanlandingslocatie in deze alternatieven, mede omdat deze locatie ook niet meegenomen wordt in de studie Systeemintegratie Wind op Zee in het kader van VAWOZ 2040 (Guidehouse & Berenschot, 2021). Aanlanding in Terneuzen wordt wel meegenomen in de Nederland Energieland-scenario's (hoofdstuk 4).

Daarnaast worden voor beide alternatieven de huidige plannen die er liggen voor elke aanlandingslocatie als ondergrens meegenomen. Dit heeft met name effect op Borssele/Sloegebied, waar al voor 5,6 GW plannen liggen vanuit geplande windparken en VAWOZ 2030. Daarnaast worden hierom 2 GW aanlanding bij Geertruidenberg meegenomen bij het scenario Nationale Sturing.

Bij het Sterke Knopen-alternatief Nationale Sturing worden de effecten van diepe aanlanding onderzocht. Dit betekent dat er zoveel mogelijk aangesloten wordt bij het oorspronkelijke II3050-scenario en alleen diepe aanlanding wordt toegevoegd. Dit is geen optimale verdeling, maar dat is ook niet het doel van dit alternatief. De volgende locaties voor diepe aanlanding worden meegenomen.

- Om de knelpunten tussen de Maasvlakte en Chemelot te verminderen wordt gekozen voor diepe aanlanding bij Maasbracht. Hier wordt uitgegaan van 6 GW aanlanding, aangezien dit wordt ingeschat als het absoluut maximaal haalbare. Het is echter nog zeer onzeker of diepe aanlanding van 6 GW haalbaar en/of wenselijk is.
- Daarnaast wordt een deel van de windparken op zee aangesloten op Diemen in plaats in de Kop van Noord-Holland, aangezien het hoogspanningsnet in Noord-Holland weinig transportcapaciteit heeft. Ook hier wordt uitgegaan van 6 GW diepe aanlanding, met de disclaimer dat het nog onduidelijk is of dit haalbaar en/of wenselijk is.

Bij het Sterke Knopen-alternatief Europese Sturing wordt gebruikgemaakt van een evenredigere verdeling over de aanlandingslocaties aan de kust. Hierbij wordt zoveel mogelijk aangesloten bij de verdeling van het 32 GW-scenario van de studie Systeemintegratie Wind op Zee in het kader van VAWOZ 2040.

Aangezien het totaal voor dit alternatief 30 GW is in plaats van 32 wordt er 0,5 GW minder meegenomen bij Borssele/Sloegebied en Maasvlakte en 1 GW minder bij Beverwijk.

Tabel 5-5 - Verdeling aanlandingspunten Sterke Knopen-scenario's

Aanlandingslocatie	Sterke knopen Nationale Sturing	Sterke knopen Europese Sturing
	GW	GW
Beverwijk	5,2	3,0
Middenmeer	0	0
Den Helder	9,2	2,0
Maasvlakte	10,2	7,5
Geertruidenberg	2	0
Eemshaven	7,8	10,0
Borssele/Sloegebied	5,6	7,5
Terneuzen	0	0
Diemen	6,0	Niet meegenomen
Maasbracht	6,0	Niet meegenomen

5.2.5 Extra windenergie op zee voor productie synthetische brandstoffen

In de scenario's van II3050 wordt aangenomen dat een deel van het opgesteld vermogen aan windenergie op zee in 2050 gebruikt wordt voor de productie van synthetische brandstoffen. Het gaat om 11 tot 20,5 GW, afhankelijk van het scenario. De productieketen voor synthetische brandstoffen is in de II3050-scenario's, en dus ook in onze Nederland Energieland-scenario's, volledig privaat.
Dit betekent dat er geen connectie is met de publieke energie-infrastructuur. Daarom wordt dit ook niet meegenomen in de netdoorrekeningen.

In de Systeemstudie Wind op Zee 2040 wordt aangenomen aan dat de productieketen van synthetische brandstoffen wel via de publieke energie-infrastructuur loopt, aangezien eigenaren van de windparken op zee hun stroom dan ook kwijt kunnen op de energiemarkten. Welke van de twee configuraties waarschijnlijker is, is lastig te zeggen. Maar de impact van de aanname kan erg groot zijn vanwege de grote vermogens die gemoeid zijn met de productie van synthetische brandstoffen. Het heeft een significante impact op het energiesysteem op land als 11 tot 20 GW extra windenergie aangeland moet worden, of dit nu als elektriciteit of als waterstof aanlandt. Daarom worden de hoekpunten van het toekomstige energiesysteem niet goed meegenomen als voor de productie van synthetische brandstoffen alleen wordt gekeken naar particuliere ketens.

Daarom wordt in één scenario de configuratie meegenomen waarbij de windstroom voor synthetische brandstoffen aanlandt via de publieke energie-infrastructuur, om zo de gevolgen hiervan inzichtelijk te maken. Dit wordt meegenomen bij het alternatief Sterke Knopen Nationale Sturing, aangezien dit het alternatief is met het grootste vermogen aan windparken op zee. Op deze manier wordt het meest extreme geval meegenomen, wanneer het volledige potentieel voor windenergie op zee op de Noordzee ingevuld wordt en al deze energie via publieke energie-infrastructuur getransporteerd wordt.

Het bovenstaande leidt in principe tot een wijziging van het energetische scenario, maar heeft wel effect op de hoeveelheid energie die getransporteerd moet worden met publieke energie-infrastructuur. Er landt meer energie van windenergie op zee aan (als waterstof en als elektriciteit), er is meer vermogen aan elektrolysers (op zee), er is extra waterstofvraag voor de productie van synthetische brandstoffen en er is extra elektriciteitsvraag voor Direct Air Capture. In totaal zijn het extra aanbod en de extra vraag van elektriciteit en waterstof gelijk. Maar er is wel extra transport van energie nodig en extra opslag omdat het

extra aanbod en de extra vraag niet hetzelfde jaarprofiel hebben (aanbod is afhankelijk van windenergie op zee, vraag is vollast). De volgende tabel geeft een overzicht van het extra aanbod en de extra vraag die getransporteerd moet worden via publieke infrastructuur.

Tabel 5-6 - Extra vraag en aanbod via publieke energie-infrastructuur voor productie synthetische brandstoffen

Categorie	Extra aanbod	Extra vraag	Energiedrager
Aanlanding windenergie op zee voor Direct Air Capture	47 PJ		Elektriciteit
Aanlanding waterstof (uit windenergie op zee) voor waterstofvraag synthetische brandstoffen[15]	188 PJ		Waterstof
Elektriciteitsvraag Direct Air Capture		47 PJ	Elektriciteit
Waterstofvraag synthetische brandstoffen		188 PJ	Waterstof

Er is nog veel onzekerheid over waar de productie van synthetische brandstoffen plaats kan vinden. Mogelijke locaties zijn de Maasvlakte, de Eemshaven, het Noordzeekanaalgebied en Zeeland. Ook kan de windenergie op verschillende locaties aanlanden en kan de Direct Air Capture op meerdere plaatsen plaatsvinden. Wij maken de volgende aannames:

- Maasvlakte en Eemshaven als productielocaties voor de synthetische brandstoffen. Er wordt aangenomen dat op beide locaties 50% van de productie plaatsvindt.
- Direct Air Capture vindt plaats bij de productielocaties voor de synthetische brandstoffen, dus ook 50/50-verdeling tussen Maasvlakte en Eemshaven.
- Aanlanding windenergie op zee voor Direct Air Capture vindt plaats bij de vraag, dus ook hier 50/50-verdeling tussen Maasvlakte en Eemshaven.
- Aanlanding waterstof uit windenergie op zee bij Eemshaven en Den Helder, aangezien dit geschikte locaties zijn vanwege bestaande buisleidingen onder de zee en op land. Bij beiden 50% van de aanlanding.

5.2.6 Regelbare centrales

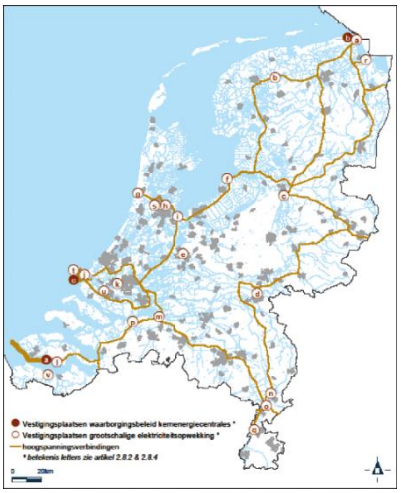
Om de leveringszekerheid in het toekomstige, klimaatneutrale energiesysteem te garanderen is een forse hoeveelheid regelbaar vermogen nodig. Deze regelbare elektriciteitscentrales moeten elektriciteit leveren op momenten dat er te weinig productie is van windturbines en zonnepanelen. Door elektrificatie van de vraag neemt het vermogen dat nodig is aan regelbare centrales in de toekomst zelfs toe, van ongeveer 20 GW nu naar 33 tot 36 GW in 2050. Deze centrales zullen echter wel fors minder draaiuren maken dan de huidige centrales, waardoor de totale productie lager ligt.

In het scenario Nationale Sturing is 35 GW aan regelbare centrales nodig en in het scenario Europese Sturing 36 GW aan regelbare centrales. In het scenario Nationale Sturing zijn dit waterstofcentrales en in het scenario Europese Sturing zijn dit (groen)gas centrales.

Er komen in de Nederland Energieland-scenario's nieuwe of omgebouwde centrales op de bestaande productielocaties. Dit wordt gelijk gehouden bij de Sterke Knopen-scenario's. Daarnaast zijn nieuwe eenheden nodig. Deze worden in de Nederland Energieland-scenario's als kleine eenheden verspreid door heel Nederland geplaatst. In de Sterke Knopen-scenario's wordt uitgegaan van clustering van deze nieuwe regelbare centrales. In de volgende paragrafen worden de ruimtelijke principes besproken voor de clustering van de nieuwe regelbare centrales en de ruimtelijke invulling.

[15] Hierin is een elektrolyser efficiëntie van 66% meegenomen, conform de aannames van II3050. De extra productie van elektriciteit voor de elektrolyse is 285 PJ.

Ruimtelijke principes



Nieuwe regelbare centrales worden vanuit de ruimtelijke logica van clustering in de Sterke Knopen-scenario's nabij de bestaande centrales geplaatst op de locaties van de nu in gebruik zijnde elektriciteitscentrales op de in het Barro (Besluit algemene regels ruimtelijke ordening) opgenomen vestigingslocaties. Onderzocht is of en waar er beschikbare ruimte is voor de plaatsing van 18 GWe (Nationaal) en 19 GWe (Europees).

De centrales worden zo dicht mogelijk bij de locaties waar het piekvermogen nodig is geplaatst om het transport te minimaliseren. Daarvoor wordt gekeken naar de oorspronkelijke verdeling van de nieuwe regelbare centrales over de NUTS3-regio's in de Nederland Energieland-scenario's. Het benodigde vermogen aan regelbare centrales per NUTS3-regio wordt geplaatst bij de dichtstbijzijnde Barro-locatie met voldoende ruimte voor een nieuwe centrale. Op deze wijze wordt – naast de ruimtelijke logica – ook recht gedaan aan de voorkeurslocatie van de regelbare centrales vanuit het technische aspect (dicht bij vraag plaatsen).

Analyse beschikbare ruimte

De volgende stappen zijn doorlopen om de beschikbare ruimte voor nieuwe regelbare centrales te bepalen:

Barro-vestigingsplaatsen

In het Barro zijn gebieden aangewezen als vestigingsplaats voor grootschalige elektriciteitsopwekking en als vestigingsplaats voor kernenergie. Er is alleen binnen deze vestigingsplaatsen gekeken naar vrije ruimte voor nieuwe centrales.

Selectie: Bodemgebruik

Binnen de vestigingsplaatsen is gekeken naar het bodemgebruik. Hiervoor is het CBS-bestand Bodemgebruik 2015 gebruikt, dit is de meest recente versie. De volgende type bodemgebruik (hoofdgroepen) zijn geselecteerd als mogelijk vrije ruimte: Semi-bebouwd, Landbouw, Nat natuurlijk terrein, Droog natuurlijk terrein.

Selectie: Satellietbeelden

De bodemgebruikdata uit 2015 is mogelijk niet meer volledig actueel. Daarom zijn de hieruit geselecteerde gebieden visueel gecontroleerd met een satellietbeeldondergrond uit 2020 (ESRI-luchtfoto). Wanneer gebieden hierop toch een duidelijke functie hebben zijn deze verwijderd uit de selectie. Wanneer ze geen duidelijke functie hebben zijn ze toegevoegd. Het resultaat is een databestand met vrije ruimte binnen de in het Barro aangewezen vestigingsplaatsen.

Selectie: Geschiktheid vrije ruimte

Niet alle vrije ruimte is geschikt voor het plaatsen van elektriciteitscentrales. Er is een grove beoordeling gemaakt voor de geschiktheid van de afzonderlijke gebieden met vrije ruimte. Hierbij is gekeken of de gebieden lokaal een logisch en compact aaneengesloten geheel vormen van vrije ruimte. Lange dunne stroken, of gebieden waar veel onderbrekingen (happen, gaten, of gekke hoeken) in zitten zijn niet aangemerkt als geschikt. Ook gebieden met een relatief klein oppervlak zijn niet als geschikt aangemerkt. Daarbij is gericht op een aaneengesloten oppervlak van circa 20 ha.

Ruimtelijke invulling

De tabel hieronder geeft een overzicht van de toedeling van het benodigde vermogen aan nieuwe regelbare centrales per NUTS3-regio (in de Nederland Energieland-scenario's) en de locatie waaraan dit vermogen wordt toegekend.

Tabel 5-7 geeft een overzicht van de toedeling van het benodigde vermogen aan nieuwe regelbare centrales per NUTS3-regio (in de Nederland Energieland-scenario's) en de locatie waaraan dit vermogen wordt toegekend.

Tabel 5-7 - Toedeling vermogen nieuwe regelbare centrales NUTS3-regio's aan Barro-locaties

NUTS3-regio	Benodigd vermogen nieuwe regelbare centrales Nationale Sturing (MW)	Benodigd vermogen nieuwe regelbare centrales Europese Sturing (MW)	Plaatsing vermogen (Barro-locatie)
Oost-Groningen	353	349	Delfzijl
Delfzijl en omgeving	125	125	Delfzijl
Overig Groningen	486	500	Eemshaven
Noord-Friesland	500	500	Burgum
Zuidwest-Friesland	343	332	Eemshaven
Zuidoost-Friesland	468	441	Eemshaven
Noord-Drenthe	427	394	Eemshaven
Zuidoost-Drenthe	223	331	Eemshaven
Zuidwest-Drenthe	250	250	Eemshaven
Noord-Overijssel	221	376	Eemshaven
Zuidwest-Overijssel	125	125	Eemshaven
Twente	340	421	Eemshaven
Veluwe	671	582	Amsterdam
Zuidwest-Gelderland	359	375	Maasvlakte
Achterhoek	674	770	Eemshaven
Arnhem/Nijmegen	750	840	Maasbracht
Flevoland	987	986	Amsterdam
Utrecht	750	750	Amsterdam
Kop van Noord-Holland	250	250	Amsterdam
IJmond	125	125	Amsterdam
Agglomeratie Haarlem	96	101	Amsterdam
Zaanstreek	125	125	Amsterdam
Het Gooi en Vechtstreek	125	125	Diemen
Alkmaar en omgeving	125	125	Amsterdam
Groot-Amsterdam	839	938	Amsterdam
Agglomeratie 's-Gravenhage	467	598	Maasvlakte
Delft en Westland	375	375	Maasvlakte
Agglomeratie Leiden en Bollenstreek	250	250	Maasvlakte
Zuidoost-Zuid-Holland	483	500	Maasvlakte
Oost-Zuid-Holland	250	250	Maasvlakte
Groot-Rijnmond	968	1.332	Maasvlakte
Zeeuws-Vlaanderen	375	375	Terneuzen, Sas van Gent
Overig Zeeland	375	486	Borssele/Sloegebied
West-Noord-Brabant	1.097	1.064	Moerdijk
Midden-Noord-Brabant	375	375	Geertruidenberg
Noordoost-Noord-Brabant	625	625	Buggenum
Zuidoost-Noord-Brabant	1.099	1.223	Maasbracht
Noord-Limburg	464	468	Buggenum

Dit leidt tot de opgestelde vermogens aan nieuwe regelbare centrales per Barro-locatie:

Tabel 5-8 - Totaal vermogen nieuwe regelbare centrales per Barro-locaties

Barro-locatie	Sterke Knopen Nationale Sturing (MW)	Sterke Knopen Europese Sturing (MW)
Geertruidenberg	375	375
Amsterdam	3.968	3.983
Burgum	500	500
Borssele/Sloegebied	375	486
Buggenum	1.089	1.093
Delfzijl	478	474
Diemen	125	125
Eemshaven	3.556	3.940
Flevoland	0	0
Geleen	743	662
Harculo	0	0
Maasbracht	2.196	2.370
Maasvlakte	3.152	3.680
Moerdijk	1.097	1.064
Nijmegen	0	0
Rijnmond, Rotterdams havengebied	0	0
Terneuzen, Sas van Gent	375	375
Utrecht	0	0
Velsen	0	0

5.2.7 Elektrolysers

Elektrolysers worden in de scenario's ingezet om overschotten van elektriciteit om te zetten in waterstof. Ze vervullen daarmee een systeemfunctie. De hoeveelheid elektrolysers binnen een scenario is afhankelijk van de hoeveelheid overschotten aan elektriciteit.

Het scenario Nationale Sturing heeft 51 GW aan elektrolysers. Hiervoor is 2 km^2 aan ruimte nodig. Het scenario Europese Sturing heeft 19 GW aan elektrolysers met een totaal ruimtebeslag van 1 km^2. Hieronder worden de ruimtelijke principes besproken die gehanteerd zijn en de resulterende ruimtelijke invulling.

Ruimtelijke principes

In de Nederland Energieland-scenario's worden elektrolysers verdeeld over Nederland op basis van de omvang van lokale overschotten van elektriciteit. Dit betekent dat de elektrolysers over het hele land verspreid worden. In de Sterke Knopen-scenario's wordt daarentegen uitgegaan van clustering van elektrolysers.

Vanuit de systeemfunctie die elektrolysers vervullen zijn er, vanuit het perspectief van systeemefficiëntie, twee type locaties geschikt voor clustering van elektrolysers:

- **Bij aanlandingslocaties windenergie op zee.** Dit zijn locaties waar grote lokale overschotten van elektriciteit plaatsvinden. Door hier elektrolysers te plaatsen hoeven deze lokale overschotten niet getransporteerd te worden en is er minder belasting op het hoogspanningsnet. Er is in dit geval wel transport van waterstof nodig van de aanlandingslocaties van windenergie op zee richting de afnemers van waterstof.

- **Bij grootgebruikers waterstof industrie.** Door elektrolysers te plaatsen bij grootgebruikers van waterstof kan de geproduceerde waterstof direct gebruikt worden. Dit betekent dat er minder transport van waterstof noodzakelijk is. In dit geval is er wel meer transport van elektriciteit nodig aangezien de overschotten bij de aanlandingslocaties van windenergie op zee getransporteerd moeten worden richting de elektrolysers.

In het scenario Sterke Knopen Nationale Sturing wordt uitgegaan van clustering van elektrolysers bij aanlandingslocaties van windenergie op zee. Deze configuratie is hier het meest logisch aangezien dit scenario het grootste vermogen aan windparken op zee heeft, waardoor er hier ook de grootste lokale overschotten bij de aanlandingslocaties plaatsvinden.

Bij het scenario Sterke Knopen Europese Sturing wordt uitgegaan van clustering bij grootgebruikers van waterstof in de industrie. Bij dit scenario ligt deze configuratie meer voor de hand aangezien er in dit scenario een grotere vraag is naar waterstof vanuit de industrie en het scenario relatief weinig vermogen aan windparken op zee heeft.

Analyse beschikbare ruimte

Voor de analyse van de beschikbare ruimte voor elektrolysers wordt dezelfde methode gehanteerd als bij de regelbare centrales (zie paragraaf 5.2.6).

Ruimtelijke invulling

Bij het scenario Sterke Knopen Nationale Sturing wordt uitgegaan van clustering bij aanlandingslocaties van windenergie op zee. De totale opgave van 51 GW aan elektrolysers wordt verdeeld over de aanlandingslocaties naar rato van het vermogen windstroom dat per locatie aanlandt (zie paragraaf 5.2.4 voor verdeling aanlanding windenergie op zee). Bij het scenario Sterke Knopen Europese Sturing wordt uitgegaan van clustering bij grootgebruikers van waterstof in de industrie. De totale opgave van 19 GW wordt verdeeld over deze locaties naar rato van de waterstofvraag. Dit komt overeen met gevoeligheidsanalyse 6 uit het rapport van II3050 (Netbeheer Nederland, 2021).

Tabel 5-9 geeft de resulterende verdeling van de elektrolysers voor beide scenario's.

Tabel 5-9 - Totaal vermogen elektrolysers per locatie

Locatie	Sterke Knopen Nationale Sturing (GW)	Sterke Knopen Europese Sturing (GW)
Terneuzen	0	1,9
Borsele	5,2	0,1
Maasvlakte	10,8	0
Botlek	0	6,2
Chemelot	0	4,1
Maasbracht	5,5	0
Middenmeer/ Den Helder	8,5	0
Diemen	5,5	0
Beverwijk	4,8	0
Eemshaven	8,5	0
Delfzijl	0	6,6
Bergen op Zoom	0	0,3
Geertruidenberg	1,8	0

5.2.8 Opslag waterstof

Waterstofopslag is noodzakelijk om onbalans tussen aanbod en vraag naar waterstof op te vangen. De hoeveelheid waterstofopslag binnen een scenario is afhankelijk van de hoeveelheid onbalans.

Het scenario Nationale Sturing heeft 37 TWh aan waterstofopslag. Het scenario Europese Sturing heeft 10 TWh aan waterstofopslag. Hieronder worden de ruimtelijke principes besproken die gehanteerd zijn en de resulterende ruimtelijke invulling.

Ruimtelijke principes

Bij de opslag van waterstof worden twee soorten opslaglocaties meegenomen::

- **De opslag van waterstof in zoutcavernes en in lege gasvelden**. Er zijn nog geen voorbeelden van pure waterstofopslag in lege gasvelden (wel van 10% bijmenging in een pilot in Oostenrijk), en er zijn nog vele onzekerheden de onderzocht moeten worden. Bij waterstofopslag in lege gasvelden gelden de volgende risico's door bio- en geochemische reductiereacties in het reservoir (TNO, 2020):
  - de vorming van toxische of corrosieve vloeistoffen zoals H_2S;
  - afname van doorlaatbaarheid van het reservoir door mineraal neerslag;
  - verlies van waterstof door de vorming van andere gassen uit waterstof.

  Daarnaast kan diffusie plaatsvinden, waardoor waterstof verloren gaat. Bij opslag in een leeg gasveld is een grote hoeveelheid kussengas nodig om voldoende druk voor productie te realiseren. Dit brengt extra kosten mee, wat verminderd kan worden door aardgas als kussengas te gebruiken, wat ten koste kan gaan van de kwaliteit van waterstof.

- **Opslag van waterstof in zoutcavernes.** Dit gebeurt al, maar wordt bij bestaande opslagen ingezet voor levering aan de industrie. Bij balanceren van het energiesysteem zullen de circulatie, injectie-snelheid en levering sneller zijn, waarvan de effecten nog onderzocht moeten worden. Voor water-stofopslag in zoutcavernes vereist de vraag naar opslag in de scenario's bovendien een snelle winning van zout om cavernes te kunnen bouwen. Dat brengt risico's van bodemdaling met zich mee.

PEH sluit aan op de uitgangspunten uit OPVIS II met betrekking tot de aanleg van zoutcavernes:

- Het uitgangspunt van OPVIS II is dat voor de aanleg van de benodigde zoutcavernes gebruikgemaakt wordt van de huidige zoutproductiecapaciteit. Op dit moment wordt ca. 3 miljoen m^3 aan steenzout per jaar geproduceerd, wat neerkomt op 3 cavernes van 1 miljoen m^3. Daarmee zouden 3 cavernes per jaar aangelegd kunnen worden, wat neerkomt op 60 tussen 2030 en 2050. Dit komt neer op 15 TWh opslagcapaciteit.
- Voor de aanleg van één caverne van 1 miljoen m^3 is ongeveer 3 jaar nodig, vanaf de start van het logen. Dit is exclusief vergunningsaanvraag, die ongeveer 1,5 jaar in beslag neemt, en exclusief de opsporing van geschikte locaties en de aanleg van infrastructuur. Voor de aanleg van gemiddeld 3 cavernes per jaar, moet dus simultaan met 9 cavernes aangevangen worden.
- Naast de aanleg van nieuwe zoutcavernes wordt aangenomen dat de huidige opslagcavernes voor aardgas en stikstof na 2030 beschikbaar komen voor waterstofopslag.

Analyse beschikbare ruimte

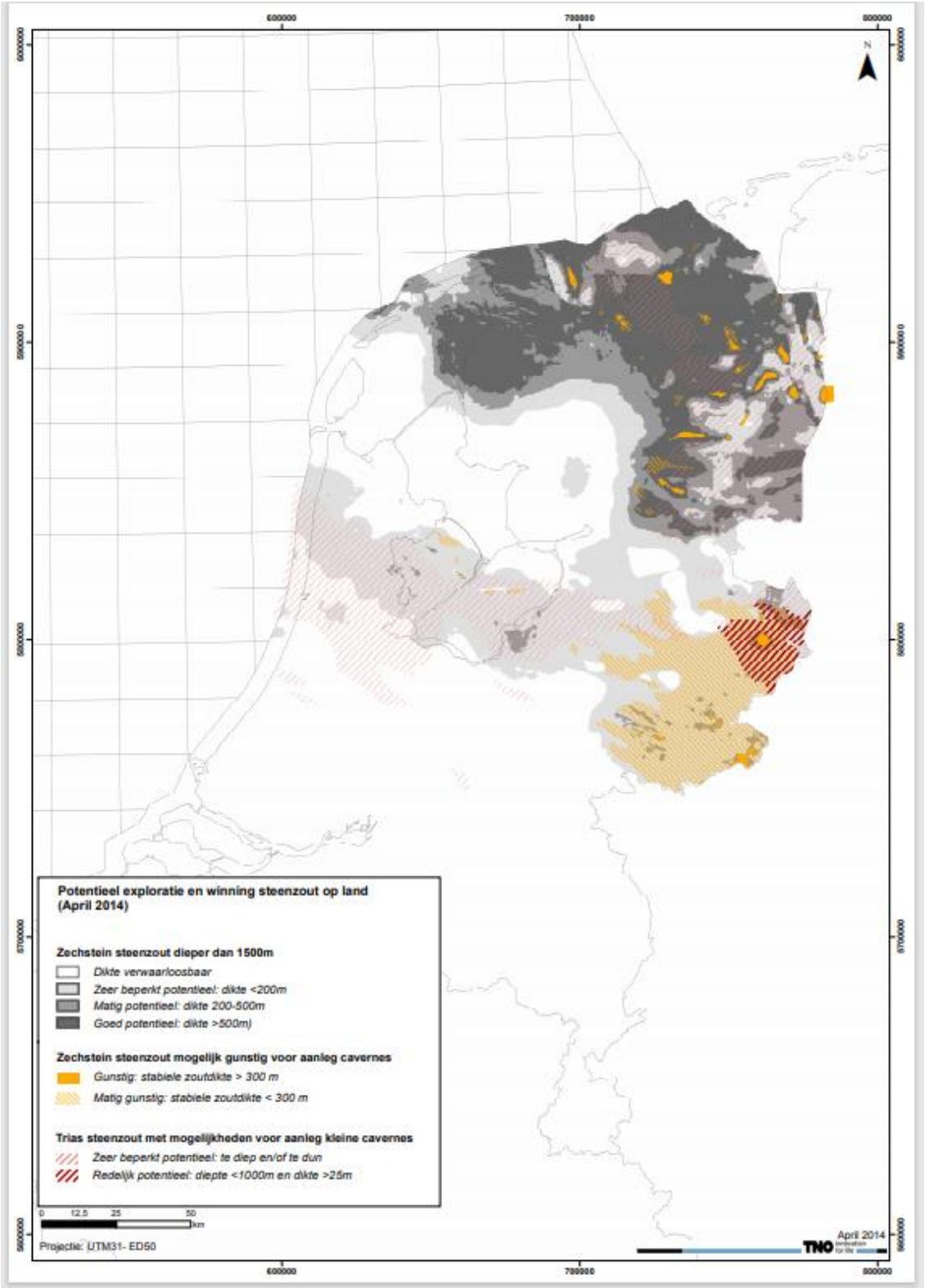
Voor de opslag van waterstof wordt gekeken naar de locaties van zoutstructuren met een minimale dikte van 300 meter. Deze zijn mogelijk geschikt voor de winning van steenzout en de aanleg van zoutcavernes voor de opslag van waterstof (oranje, Figuur 5-4). De meeste locaties bevinden zich in het noorden van het land, waar vele zoutpijlers (ook wel zoutkoepels) aanwezig zijn. Zoutpijlers zijn geschikt voor de aanleg

van cavernes omdat deze een grote verticale dikte hebben. In het oosten van het land zijn zoutstructuren aanwezig en wordt ook zout gewonnen. Deze zoutstructuren bestaan vooral uit zoutkussens: langgerekte zoutstructuren in de ondergrond, met doorgaans een minder grote dikte (<300 m) en vaak dieper gelegen. Voor de aanleg van cavernes maakt dat deze zoutstructuren minder geschikt. Door de hogere druk van de bovengrond is hier de kans op verzakkingen groter. Bovendien zal de breedte van een caverne groter zijn en daarmee de afstand tussen de (middenpunten van de) cavernes. Ruimtelijk betekent dit langere leidingen en een mogelijk meerdere zoutverwerkingslocaties.

De bestaande gasopslagen in zoutstructuren zijn geschikt voor gezamenlijk zo'n 1 TWh aan waterstofopslag. Het gaat daarbij om vijf cavernes in Zuidwending, waarbij mogelijk nog vijf extra aangelegd kunnen worden[16]. Om in de behoefte naar waterstofopslag te voldoen in 2030 zouden maximaal twee bestaande cavernes geschikt gemaakt moeten worden. In OPVIS II is een inschatting gemaakt van de aanleg van nieuwe zoutcavernes. Uitgaande van de huidige productie van steenzout is uitgegaan van een maximum aantal van 60 zoutcavernes. Waterstof neemt 3 à 4 maal zoveel volume in als aardgas. Om in piekbelasting te voorzien is het in alle scenario's noodzakelijk om ten minste tien zoutcavernes ter beschikking te stellen voor waterstofopslag. Eén nieuwe zoutcaverne van 1 miljoen m^3 biedt ruimte voor maximaal 0,25 TWh.

[16] https://www.agbzw.nl/onze-cavernes

Figuur 5-4 - Regio's met mogelijke zoutstructuren



Voor waterstofopslag in lege gasvelden wordt voortgebouwd op OPVIS II. Hierin staat omschreven wat de praktische capaciteit is van opslag van waterstof in lege gasvelden. Deze praktische capaciteit is ook omschreven per industriecluster, met een straal van 50 km rondom het industriecluster. Voor de locaties wordt aangesloten bij twee van de aanlandingslocaties van windenergie op zee:

- Praktisch realiseerbare opslaglocaties in lege gasvelden in een straal van 50 km rond Rotterdam. Dit is inclusief meerdere offshore opslaglocaties. In totaal 15 TWh.
- Praktisch realiseerbare opslaglocaties in lege gasvelden in een straal van 50 km rond IJmuiden. Dit is inclusief één offshore opslaglocatie en één opslaglocatie in de buurt van Middenmeer. In totaal 17 TWh.

Ruimtelijke invulling

De opslag in de Nederland Energieland-scenario's is regionaal verdeeld volgens de verdeelsleutel: 1/3e Veendam, 2/3e Hengelo. Bij Hengelo zijn de opslagmogelijkheden in werkelijkheid beperkt, tenzij er over de grens bij Duitsland waterstof wordt opgeslagen in zoutcavernes. In de Sterke Knopen-scenario's wordt dit aangepast gebaseerd op inzichten uit OPVIS II en discussies met experts.

In scenario Sterke Knopen Nationale Sturing is 37 TWh aan waterstofopslag nodig. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat alle opslag in Nederland plaatsvindt. Voor de opslag wordt ervan uitgegaan dat opslag van waterstof eerst zal gebeuren in bestaande zoutcavernes. Na 2030 breidt dit uit naar bestaande gasopslagen. In dit scenario worden nieuwe zoutcavernes voor waterstofopslag aangemaakt en geschikt gemaakt. Om te voldoen aan de grote vraag naar opslag wordt uitgegaan van een groot volume aan waterstofopslag in lege gasvelden.
Naar aanleiding van overleggen met expert, wordt aangenomen dat in 2050 waterstofopslag in lege gasvelden mogelijk is. Hier wordt uitgegaan van de aannames in OPVIS II, waarbij 1 gasopslag gelijk is aan ~8 TWh werkgasvolume. In het scenario wordt uitgegaan van maximaal 10 opslagen in zoutcavernes: 5 huidig en 5 nieuw; herinrichting van huidige gasopslagen in gasvelden; en 2 nieuwe gasvelden in de buurt van de industrieclusters langs de Noordzee.

In scenario Sterke Knopen Europese Sturing is 10 TWh aan waterstofopslag nodig. Er wordt aangenomen dat alle waterstofopslag in dit scenario plaatsvindt in zoutcavernes. Hiervoor is de aanleg van nieuwe zoutcavernes op nieuwe locaties nodig. Er wordt uitgegaan van ombouw van de huidige opslag in zoutcavernes en aanleg van vier nieuwe cavernes door uitbreiding bij Zuidwending. Dat levert in totaal 2 TWh op. De overige locaties zijn evenredig verdeeld over COROP-gebieden volgens de mogelijkheden in Figuur 5-4.

De resulterende verdeling ziet er als volgt uit:

Tabel 5-10 - Regionale verdeling waterstofopslag Sterke Knopen-scenario's

	Aantal	Opslagcapaciteit (TWh)	Locatie	COROP	Bron
Sterke Knopen Nationale Sturing		37			
Huidige zoutcavernes	5	1	Zuidwending	Oost-Groningen	
Nieuwe cavernes	5	1,25	Zuidwending en Heiligerlee	Oost-Groningen	
Huidige gasopslagen	3	24	Norg	Noord-Drenthe	

	Aantal	Opslagcapaciteit (TWh)	Locatie	COROP	Bron
Overige gasvelden kustnabij/industrie	1	2,75	50 km omtrek IJmuiden	Kop van Noord-Holland	Figuur 5.11 OPVIS II
	1	8	50 km omtrek Rotterdam	Delft en Westland	Figuur 5.11 OPVIS II
Sterke Knopen Europese Sturing		10			
Huidige zoutcavernes	5	1	Zuidwending	Oost-Groningen	
Nieuwe cavernes	8	2		Overig Groningen	TNO, April 2014 figuur NLOG
	4	1	Zuidwending en Heiligerlee	Oost-Groningen	TNO, April 2014 figuur NLOG
	8	2		Noord-Drenthe	TNO, April 2014 figuur NLOG
	8	2		Zuidwest-Drenthe	TNO, April 2014 figuur NLOG
	8	2		Twente	TNO, April 2014 figuur NLOG

5.3 Overzichtstabel

Tabel 5-11 geeft een totaaloverzicht van de aannames voor de ruimtelijke invulling van de Sterke Knopen-scenario's.

Tabel 5-11 - Totaaloverzicht aannames

Element	Sterke Knopen Nationale Sturing	Sterke Knopen Europese Sturing
Wind op land	• Plannen RES 1.0 als startpunt • Additioneel vermogen geclusterd in vijf geschikte clusters	• Plannen RES 1.0 als startpunt • Additioneel vermogen geclusterd in vijf geschikte clusters
Zon op dak	Maximale benutting zon op dak	Maximale benutting zon op dak
Zon op veld/zon op water	Maximale benutting onbenutte terreinen, landelijk gebied. Clustering resterende opgave zon op water, landbouw en natuurgronden in vier geschikte clusters.	Alleen zon op dak
Aanlanding windenergie op zee	• Den Helder als aanlandingslocatie in plaats van Middenmeer • Huidige plannen als ondergrens voor elke aanlandingslocatie • Geen aanlanding bij Terneuzen	
	Diepe aanlanding: • Maasbracht i.p.v. Maasvlakte • Diemen i.p.v. Den Helder	Meer evenredige verdeling over aanlandingslocaties,
Extra windenergie op zee voor productie synthetische brandstoffen	Productie synthetische brandstoffen via publieke energie-infrastructuur	Geen wijzigingen
Nieuwe regelbare centrales	Clustering bij dichtstbijzijnde gebied met reservering grootschalige elektriciteitsproductie vanuit Barro, indien voldoende ruimte beschikbaar.	
Elektrolysers	• Clustering bij aanlandingspunten • Verdeling op basis vermogens elektrische aanlanding WoZ	• Clustering in industriegebieden • Verdeling op basis waterstofvraag
Opslag waterstof	Opslag in zoutcavernes, bestaande gasopslagen en lege gasvelden.	Opslag in bestaande en nieuwe zoutcavernes.

6 Zeer Sterke Knopen Kernenergie-scenario

In dit hoofdstuk worden de energetische en de ruimtelijke invulling van het Zeer Sterke Knopen Kernenergie-scenario besproken. Dit scenario is gebaseerd op het scenario Sterke Knopen Europese Sturing, met enkele wijzigingen. In het Kernenergie-scenario wordt wind op land en een deel van de regelbare centrales vervangen door kernenergie.

In dit hoofdstuk worden eerst de afbakening en de technische aannames voor kernreactoren besproken. Vervolgens wordt de ruimtelijke invulling van kernreactoren besproken[17]. Tot slot wordt de energetische invulling van het scenario besproken. De aannames rondom kernreactoren, wind op land en regelbare centrales worden besproken, maar ook de effecten van de andere aannames op andere elementen in het energiesysteem zoals batterijen, elektrolysers en waterstofopslag.

6.1 Afbakening

De locaties van kernenergie die zijn onderzocht zijn de locaties zoals opgenomen in de huidige Structuurvisie Infrastructuur en Ruimte (Svir) en Barro. Daarin zijn drie locaties aangewezen als mogelijke vestigingsplaatsen voor kernenergie (Artikel 2.8.4):

- Borssele/Sloegebied (gemeenten Borsele en Vlissingen);
- Eemshaven (gemeente Eemsmond);
- Maasvlakte I (gemeente Rotterdam).

Op verzoek van de opdrachtgever wordt Eemshaven als locatie niet meegenomen. Op overige locaties in Nederland mogen kernreactoren worden geplaatst, mits aan alle wetgeving wordt voldaan. Op de aangewezen locaties mogen geen activiteiten ontwikkeld worden die realisatie van kernenergie in de weg staan, waardoor de kans op toekomstige realisatie van (grootschalige) kernenergie daar wel het grootst is.

6.2 Technische aannames kernreactoren

Disclaimer
Deze achtergrondnotitie is tot stand gekomen door middel van een literatuurstudie, berekeningen in het Energy Transition Model van Quintel en additionele berekeningen door CE Delft. Voor alle aannames zijn zoveel mogelijk publiek beschikbare bronnen gebruikt. Vier recente studies over de inpassing van kernenergie in het Nederlandse energiesysteem met diverse en gedeeltelijk afwijkende onderzoeksresultaten zijn als referentie gebruikt:

- Berenschot en Kalavasta (2020) – II3050 Systeemeffecten nucleaire centrales
- ENCO (2020) - Possible role of nuclear in the Dutch energy mix in the future
- Van Zuijlen (2019) - Cost-optimal reliable power generation in a deep decarbonisation future
- KMPG (2021) – Marktconsultatie kernenergie

De conceptnotitie over de achtergrond van kernreactoren is gedeeld en besproken met Wim Turkenburg (emeritus professor - Copernicus Institute of Sustainable Development, Universiteit Utrecht), Nasser Kalantar-Nayestanaki (hoogleraar kernenergie - Rijkuniversiteit Groningen) en Kornelis Blok (hoogleraar Energy Systems Analysis - TU Delft). Zij dragen echter geen verantwoordelijkheid voor de aannames, analyses en resultaten en de inhoud is niet hun visie.

[17] De ruimtelijke invulling van overige elementen wijzigt niet ten opzichte van het scenario Sterke Knopen Europese Sturing.

6.2.1 Wat is de state-of-the-art-kernreactor?

In deze analyse zijn verschillende type reactoren bekeken: Westinghouse, EPR, SMR en verschillende Chinese en Russische reactoren.

Uit deze analyse is gebleken dat de EPR-reactor op dit moment de state-of-the art-reactor is en als referentie voor deze studie gebruikt zou moeten worden. De recente marktconsultatie van KPMG heeft ook duidelijk gemaakt dat er in de markt een duidelijke voorkeur is naar bewezen technologieën en brede consensus voor de generatie 3-reactoren, waar de EPR onder valt (KPMG, 2021). EPR is het type reactor dat nu voornamelijk gebouwd wordt in de EU, zoals bij Hinkey Point C (HPC). Er is een centrale gerealiseerd in China met EPR-reactoren, wat de eerste operationele EPR-centrale is.

Small Modular Reactors
SMR (Small Modular Reactor – waaronder o.a. thoriumreactoren vallen) zijn kleine kernreactoren (vermogen tussen ongeveer 100 tot 300 MW, wellicht zelfs tot 500 MW). De techniek bestaat al enkele jaren, maar heeft de laatste tijd veel ontwikkeling doorgemaakt. Experts voorzien potentie in deze techniek vanwege verschillende redenen, waaronder ruimte gebruik, kortere bouwtijd en lagere investeringsomvang. Prototypes van Amerikaanse kleine reactoren worden verwacht tussen 2027 en 2035. Vanaf wanneer SMRs op de markt beschikbaar zijn en geïnstalleerd kunnen worden in Nederland is onbekend. Op dit moment is er nog beperkte technische gedetailleerde informatie waardoor het opnemen van SMR in een scenariostudie zoals dit PEH lastig is. Er is beperkte informatie beschikbaar over ruimtegebruik, kosten en flexibiliteit waardoor de ruimtelijke en energetische inpassing onzeker is. Daardoor zijn bijv. ook de energiekosten (€/MWh) nog zeer onzeker.

Onze verwachting is dat eventuele selectie van SMR in plaats van EPR als referentietechniek voor de IEA van het PEH beperkt zal zijn. In deze studie wordt alleen gekeken naar de gebieden zoals aangewezen in de Barro. De beschikbare ruimte voor kernenergie is dus in deze studie gelijk voor SMR en EPR. SMRs bieden ook potentie voor inpassing in gebieden waar geen grote oppervlaktes beschikbaar zijn voor kernenergie, zoals buiten de aangewezen locaties. Dit is echter buiten de scope van dit onderzoek. Op dit moment is onzeker wat het relatieve vermogen, oftewel de hoeveelheid kernenergieproductie per oppervlakte, is van SMR-installaties. Daardoor is ook onzeker of er meer of minder productie plaats kan vinden met SMR ten opzichte van EPR.

Een diepgaande vergelijking tussen grootschalige en kleinschalige kernenergiereactoren valt niet binnen de scope van deze studie. Daarnaast zal SMR zich in het komende decennia nog zeer veel ontwikkelen, waardoor een huidige analyse grote onzekerheden zal blijven omvatten. De onderzoekers erkennen de potentie die SMR heeft, maar identificeren ook nog onzekerheid over de technologische ontwikkeling, beschikbaarheid en daardoor toepasbaarheid in deze studie.

Tabel 6-1 geeft het ruimtegebruik van EPR-reactoren weer volgens de m.e.r. en het ruimtegebruik van de HPC. De EPR-centrale vereist ongeveer 10 hectare aaneengesloten ruimte, die ongeveer vierkant is. Daarnaast is minimaal 5 hectare vereist voor andere faciliteiten. In de sector wordt vaak 20 hectare als minimale ruimte voor één reactor gehanteerd. De verwachtingen voor de vermogens van een SMR-reactor zijn ook opgenomen.

Tabel 6-1 - Overzicht gebruik reactoren

Type reactor	Bron	Vermogen (GWe)	Oppervlakte (Ha)	Relatief vermogen (GW/ha)
EPR - 2 reactoren	m.e.r.	3,2	25	0,128
EPR - 2 reactoren	HPC	3,2	67	0,048
SMR	Literatuur	0,1-0,3	0,5-2	0,06-0,6

6.2.2 Ruimtelijke inpassing opslag

In Nederland wordt het radioactief afval opgeslagen bij Centrale Organisatie voor Radioactief Afval (COVRA). COVRA is een tijdelijke opslag en het radioactieve afval moet ook een plaats krijgen in een definitieve langetermijnopslag, oftewel eindberging. Hier heeft de Nederlandse overheid tot nu toe nog geen invulling aan gegeven.

Qua afval zijn er drie soorten: hoogradioactief afval (HRA), laag en middelradioactief afval (LMRA) en NORM-afval. NORM-afval is afval dat ontstaat als radioactieve stoffen die van nature voorkomen bij de verwerking geconcentreerd worden in het afval, en ontstaat dus voornamelijk bij de industrie.

Op dit moment ligt 110 m^3 hoogradioactief afval (HRA) opgeslagen en is recent een uitbreiding van 50 m^3 extra opslagcapaciteit in gebruik genomen waardoor voldoende capaciteit beschikbaar is tot 2034. Daarnaast is er 35.301 m^3 LMRA opgeslagen. Borssele/Sloegebied produceert 3 m^3 HRA en 70 m^3 LMRA per jaar, waar volgens COVRA nog 100 jaar plaats voor is (COVRA, 2021; EenVandaag, 2020).

Het vermogen van Borssele/Sloegebied is ongeveer 0,5 GW. Een snelle inschatting kan gemaakt worden wat de impact is van meer vermogen, als wordt aangenomen dat de beschikbare ruimte vooral vereist is voor het afval van kernreactoren. Twee reactoren, met een gezamenlijk vermogen van 3,3 GW, vereisen een nieuwe locatie na ongeveer 15 jaar. Bij acht reactoren is dit al na ruim 3,5 jaar. De inpassing van deze nieuwe tijdelijke opslag in de ruimtelijk omgeving, als mede de langetermijneindberging, is een additionele uitdaging. Hoeveel ruimte er vereist is voor het tijdelijk en langetermijnopslaan van kernafval in de verschillende scenario's vereist additionele analyse. Daarnaast dient bepaald te worden of deze uitbreiding mogelijk is op het COVRA-terrein en welke eindopslag gerealiseerd zal worden.

6.2.3 Inzet kernreactoren in energiesysteem

Er zijn grofweg twee methodes voor het inzetten van kernreactoren:

- **Must-run-centrales.** De centrales staan altijd aan en leveren altijd stroom. Effectief is dit 7.800 uur per jaar volgens inschatting van (Berenschot & Kalavasta, 2020). De huidige centrale in Borssele/Sloegebied behaalt hogere vollasturen per jaar tot 8.100 of 8.200 uur per jaar. Een alternatief op dit scenario is dat waterstof wordt geproduceerd uit kernenergie, altijd of als er een overschot is.
- **Flexibele back-up-centrales.** Een flexibele centrale levert stroom als er een tekort is aan productie, oftewel als er geen productie uit zon en wind is. Back-up-centrales moeten zeer snel kunnen op- en afregelen.

In de hierna volgende paragrafen wordt de literatuur over de flexibele inzet van reactoren toegelicht.

Flexibele inzet van reactoren

Er is op dit moment nog beperkte informatie over de flexibele inzet van kerncentrales, en de EPR in het bijzonder. Volgens World Nuclear Association kan de EPR opereren op 25% van haar capaciteit (World Nuclear Association, 2011). Tussen outputpercentage van 25 tot 60% is de ramp-up 2,5% per minuut en van 60 tot 100% is de ramp-up 5% per minuut (IAEA, 2011). Daarmee is de ramp-up van 25 naar 100% ongeveer 30 minuten (OECD, 2011). Het is nog onduidelijk wat precies de additionele eisen zijn om stabiliteit te garanderen. Echter zal vaak na een grote verandering een bepaalde periode op een vast vermogen geproduceerd moeten worden, bijvoorbeeld 3 tot 10 uur.

Aan alle productiebronnen in een energiesysteem stellen de netbeheerders eisen. Een bepaalde flexibiliteit moet beschikbaar zijn om onbalans te kunnen voorkomen. Echter is deze flexibiliteit nog wel iets anders dan inpassing op een volledige flexibele manier.

De technische uitdagingen voor het flexibel opereren van kernreactoren zijn dus nog aanwezig en de technische haalbaarheid is onzeker. De vereiste stabilisatieperiode maakt opereren in een systeem met veel wind en zon sowieso uitdagend.

Recente studies over inzet kernenergie

Conclusies uit recente studies over de inpassing van kernenergie worden toegelicht voor de toetsing van onze aannames. De relevante conclusies zijn:

- Van Zuijlen: De meest realistische en kosten effectieve scenario's gaan uit van een benuttingsgraad van rond de 89%, oftewel 7.796 vollasturen.
- ENCO: In de scenario's in deze studie wordt uitgegaan van full-load. Daarnaast is een scenario opgenomen met gedeeltelijke load-following resulterend in een benuttingsgraad tussen 75 en 100%.
- Berenschot & Kalavasta: Verschillende scenario's worden behandeld waaronder een regelbare centrale- (3.225 vollasturen) en must-run-scenario met en zonder waterstof (7.800 vollasturen). Het must-run-scenario zonder waterstof is het meest kosteneffectief.
- KPMG: De markt geeft aan dat kerncentrales het beste must-run ingezet kunnen worden aangezien dit het meest kostenefficiënt is, vanwege de hoge vaste kosten en additionele kosten voor inzet als regelbare centrales.

Gebaseerd op een eigen analyse en recente studies wordt aangenomen dat kerncentrales must-run ingezet worden. In lijn met de Berenschot & Kalavasta-notitie wordt aangenomen dat dit 7.800 vollasturen inhoudt.

6.2.4 Conclusies technische aannames kernreactoren

In deze studie wordt de EPR als referentiereactor aangenomen voor de ontwikkeling van het alternatief met kernenergie. Er zijn verschillende technieken in ontwikkeling, welke een kostenreductie zouden kunnen realiseren. Echter zijn deze technologieën nog in ontwikkeling en naar verwachting pas rond 2050 op de markt, ze zullen vanaf die periode dus wel een rol kunnen gaan spelen in het energiesysteem.

De belangrijkste eigenschappen voor de invulling van het Kernenergie-scenario zijn:

- Er is minimaal 10 hectare aaneengesloten ruimte vereist voor een EPR-reactor, met daarnaast nog 5 hectare voor aanvullende faciliteiten. In de sector wordt vaak als handregel met 20 hectare gerekend.
- De ruimtelijke inpassing van kernafvalopslag vereist additionele analyse in een ruimtelijke beoordeling.
- De kernreactoren worden in het systeem volcontinu ingezet.

6.3 Ruimtelijke invulling kernreactoren

Binnen de vestigingsplaatsen voor kernenergie op de Maasvlakte en Borssele/Sloegebied is gekeken naar gebieden die mogelijk vrije ruimte bieden voor de bouw van nieuwe ERP-kernreactoren met elk een vermogen van 1.650 MW. Voor het identificeren van deze mogelijke nieuwe bouwlocaties is gekeken naar het huidige gebruik.

In een eerste selectie zijn gebieden ingetekend op satellietbeelden (actualiteit: 2020) daar waar ze vrijwel geheel uit braakliggende grond bestaan, maar ook gebieden met weinig tot geen bebouwing die een gebruiksfunctie hebben welke in de toekomst mogelijk te verplaatsen, verkleinen, of verwijderen is. Per ERP-reactor wordt een ruimtebeslag van minimaal 10 ha voorzien, plus daaromheen 5 ha voor overige voorzieningen. Gebieden die geen aaneengesloten oppervlak van 15 ha hebben vallen af.

In een tweede selectie wordt gekeken naar de functies van de bebouwing en activiteiten die er plaatsvinden binnen de gebieden met mogelijke vrije ruimte. Ze vallen af indien dit geen functies of activiteiten zijn die te verplaatsen zijn, in de toekomst een minder groot ruimtebeslag nodig hebben, of in de toekomst niet meer nodig zijn.

Uit de eerste selectie zijn 30 gebieden gekomen met mogelijke vrije ruimte. Dit zijn gebieden:

- die vrijwel geheel uit braakliggende grond bestaan;
- die momenteel voornamelijk voor opslag van zand, steenkool, containers en auto's worden gebruikt;
- waar momenteel zonnepanelen geplaatst zijn.

De 30 gebieden vormen grofweg 10 clusters (A-J) van dichtbij of naast elkaar gelegen gebieden met mogelijk vrije ruimte. De kaartdelen A tot en met J geven deze weer. Deze zijn te vinden in bijlage B.

Om een verdere selectie te maken zijn alleen de locaties met nu braakliggende grond in de verdere analyse meegenomen. De locaties met een mogelijk belemmerende functie zijn in deze stap niet in beschouwing genomen.

6.3.1 Ondergrondse infrastructuur

De reactoren worden niet geplaatst binnen een invloedafstand van aanwezige risicobronnen. In deze analyse is uitgegaan van de beschikbare data van de Risicokaart. De 10-6 contouren, behorend bij de aanwezige BRZO-inrichtingen en buisleidingen, zijn in kaart gebracht. Het is mogelijk om de reactoren zodanig te ontwerpen dat deze contouren geen invloed hebben. Desondanks is gekozen om een overlap met deze contouren te vermijden, zodat er een beeld van de (direct) beschikbare ruimte voor de reactoren ontstaat. De 30 locaties zijn onderzocht op overlap met deze contour en de daarna resterende beschikbare ruimte. Als hierdoor een oppervlakte van minder dan 15 ha resteert, valt de locatie af als potentieel geschikt. De ruimte die hierna overblijft, en het aantal ERP-reactoren dat hierop geplaatst kan worden, is weergegeven in volgende tabel. De kaartdelen A tot en met J geven deze weer (zie bijlage B).

Tabel 6-2 - Potentie kernenergie gebaseerd op ruimtelijke analyse

Cluster	Gebied	Opmerking over locaties	Vrije ruimte selectie (Ha)	Aantal ERP-reactoren – inschatting gebaseerd op ruimtelijk inpassing
A	Maasvlakte	Braakliggend, met beperkte bebouwing, door-kruising met buisleiding in westen en parkeer-gebied in het oosten. Beperkte overlap met PR 10^{-6}-contour.	0	0
B	Maasvlakte	Momenteel opslag voor kolen/zand/los materiaal, doorkruising met buisleiding in oosten. Overlap met PR 10^{-6}-contour.	0	0
C	Maasvlakte	Deels braakliggend, deels opslag containers. Beperkte overlap met PR 10^{-6}-contour.	31	2
D	Borssele/Sloegebied	Braakliggend. Overlap met PR 10^{-6}-contour.	18	1
E	Borssele/Sloegebied	Momenteel opslag voor auto's, met beperkte bebouwing. Buisleiding langs zuidgrens. Beperkte overlap met PR 10^{-6}-contour.	0	0
F	Borssele/Sloegebied	Voormalige stortplaats. Grote overlap met PR 10^{-6}-contour.	0	0
G	Borssele/Sloegebied	Braakliggend, maar met gedeeltelijke ruimtelijke reserveringen. Overlap met PR 10^{-6}-contour.	31	2
H	Borssele/Sloegebied	Voornamelijk braakliggend, maar ook locaties met beperkte bebouwing of opslag van kolen/zand/los, materiaal. Ook enkele windturbines aanwezig. Meerdere doorkruisingen met buisleidingen. Grote overlap met PR 10^{-6}-contour.	0	0
I	Borssele/Sloegebied	Grotendeels braakliggend met beperkte bebouwing, maar ook circa 10 ha zonneveld. Doorkruisingen met buisleiding in zuiden. Grote overlap met PR 10^{-6}-contour.	0	0
J	Borssele/Sloegebied	Braakliggend, maar ook ca. 25 Ha aan zonneveld, met enkele windturbines. EPZ grondbezitter.	49	3
Totaal			129	8

De informatie uit bovenstaande tabel is, inclusief de kaartbeelden, besproken met experts van de havenbedrijven. De ruimtelijke analyse is aangevuld met deze informatie en is in de volgende alinea's beschreven.

6.3.2 Input vanuit Port of Rotterdam

Uit een interview met medewerkers van de Port of Rotterdam blijkt dat de ontwikkeling van kernenergie op de initieel geselecteerde locaties op de Maasvlakte niet gewenst zijn. Voor de locaties in cluster A is er sprake van een ruimtebeslag van de installaties van Porthos, alsmede een aanwezige explosieven opruim-locatie nabij. De locaties in cluster C zijn – conform de analyse – in gebruik voor opslag van kolen en erts. Het is de verwachting dat de opslagfunctie hier gehandhaafd blijft. Dit mede vanwege de aangelegen kade. In cluster C zijn een buisleidingenstraat en een spoorwegemplacement voorzien, waardoor hier sprake is van een gevestigd ruimtebeslag. Vanuit de Port of Rotterdam is het voorstel om de huidige locaties van de nu gesloten kolencentrale verder te onderzoeken. Daarnaast is aangegeven om de locatie waar nu Onyx gevestigd is te onderzoeken. Echter blijkt uit de ruimtelijke analyse dat door de 10-6 contouren hier een gering potentieel is.

Uit een nadere analyse is gebleken dat er maximaal ruimte is voor twee reactoren op de huidige locatie van de kolencentrale (zie ook kaartbeeld voor Cluster K in de bijlage).

6.3.3 Input vanuit North Sea Ports

Uit een gesprek met medewerkers van North Sea Ports is gebleken dat er inderdaad ruimte is voor de toekomstige ontwikkeling van kernenergie in Borssele/Sloegebied. Voor de meeste clusters is aanvullende informatie verstrekt. Wat betreft cluster D is aangegeven dat kernenergie hier niet gewenst is. Dit met name vanwege de uitbreiding van de daar aanwezige terminal. Ook is aangegeven dat de locatie minder gewenst is vanuit het oogpunt van beschikbaarheid van koelwater. De locatie in cluster E wordt omsloten door Natura 2000, waardoor de realisatie van kernenergie op deze locatie als lastig wordt gezien. Wel is het havenbedrijf bereid om mee te denken wat betreft de ontwikkeling van kernenergie op deze locatie. De locatie is echter in de analyse al afgevallen vanwege een te gering oppervlak (14 ha). De ontwikkeling van kernenergie in cluster F is wat betreft North Sea Ports wel gewenst, maar maakt geen onderdeel uit van de verdere analyse vanwege de huidige functie. Naast dát er reeds een functie is gevestigd, is de ondergrond (stortplaats) in eerste instantie niet geschikt voor de ontwikkeling van een kerncentrale. In cluster G is een uitbreiding van de aanwezige bulkoverslag voorzien. Aangegeven wordt dat waarschijnlijk voldoende ruimte overblijft voor één kerncentrale. Het gebied in Cluster H is reeds voorzien voor de ontwikkeling van een waterstofcentrale, waarbij gezamenlijk met de aanwezige risicocontouren, er geen ruimte is voorzien voor een kerncentrale. Cluster I geeft conform de analyse geen ruimte voor een kerncentrale. Wat betreft North Sea Ports is de ontwikkeling van kerncentrales in cluster J het meest gewenst. Dit vanwege de aanwezige infrastructuur (netinfra en koelwater), alsook het grondbezit van EPZ (het zonnepark). Uit het gesprek komt naar voren dat er potentie is voor in totaal drie reactoren, waarbij de huidige kerncentrale van EPZ (eigenaar bestaande centrale) wordt herontwikkeld tot een EPR-centrale. Ook is aangegeven de beschikbaarheid van de ruimte bij de bestaande Sloecentrale te onderzoeken. Uit een vervolganalyse is gebleken dat hier te weinig ruimte beschikbaar is.

6.3.4 Koelwater

Er zijn grote hoeveelheden water per reactor nodig. De in aanbouw zijnde kerncentrale in het Britse Hinkley Point C heeft 130.000 liter water per seconde nodig voor koeling. De huidige EPZ-centrale in Borssele/Sloegebied gebruikt 17.500 liter per seconde[18]. Doordat de locaties waar het waarborgingsbeleid van toepassing op is, aan zee liggen, is het uitgangspunt voor de centrales dat er gebruikgemaakt wordt van het ter plaatse aanwezige koelwater. De beschikbare koelwaterruimte is hierdoor een beperkende factor in de potentie voor kernenergie op deze locaties. De koelwaterruimte is de hoeveelheid koelwater die geloosd kan worden zonder dat het milieu of nabij gelegen centrales daar (ernstige) hinder van ondervinden.

Uit onderzoek[19] blijkt dat er voor het gebied bij Borssele/Sloegebied sprake is van voldoende koelwaterruimte voor minimaal twee EPR-kerncentrales, wanneer deze de haven als inlaat en de Westerschelde als uitlaat voor het koelwater gebruiken. In het betreffende onderzoek is aangegeven dat er sprake zal zijn van beïnvloeding van de koelwatervoorraad voor de huidige EPZ-centrale[20]. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het vergroten van de koelwatervraag, door de huidige EPZ-centrale te vervangen door een EPR-reactor, problematisch zal zijn. Ten aanzien van de Maasvlakte wordt aangenomen dat er een ruime

[18] O.b.v. data uit 1982 (factsheet kernenergie en watergebruik, LAKA).
[19] Inpasbaarheid energie-initiatieven Sloegebied, Arcadis 2011.
[20] Inpasbaarheid energie-initiatieven Sloegebied, Arcadis 2011.

voorraad koelwater beschikbaar is. Er is echter geen studie voorhanden waaruit blijkt wat de omvang hiervan is en of deze compatibel is met de koelwatervraag van de mogelijke EPR-reactoren.

Koeltorens

Kerncentrales in Borssele/Sloegebied en op de Maasvlakte kunnen gebruikmaken van het nabij aanwezige koelwater (oppervlaktewater). Maar mogelijk is het aanbod van oppervlaktewater te gering om alle reactoren van voldoende koelwater te voorzien. In plaats van het aanwezige koelwater kan ook gebruikgemaakt worden van andere koelsystemen, zoals koeltorens. Hierdoor ontstaat een ruimtebeslag bovenop de nu gehanteerde 15 ha. Lettende op de uiteindelijke invulling van de beschikbare ruimte, is er sprake van een geringe aanvullende beschikbare ruimte. Bij de Uniper-centrale is dit 3 ha, bij cluster G is dit 16 ha en bij cluster J is dit 4 ha.

Potentie koelwater

Uit de analyse blijkt dat aangenomen wordt dat er voldoende koelwater beschikbaar is op de Maasvlakte voor de realisatie van twee reactoren. Voor de drie reactoren in Borssele/Sloegebied blijkt uit de analyse dat de omvang van het beschikbare koelwater problematisch kan zijn voor de realisatie van drie of vier reactoren. Lettende op de beschikbaarheid van ruimte en koelwater, wordt aangenomen dat er onvoldoende ruimte is voor de realisatie van vier reactoren in Borssele/Sloegebied. De theoretische ruimte voor drie reactoren in cluster J wordt niet volledig benut, maar gereduceerd tot twee (naast één reactor in cluster G). Hierdoor ontstaat er ruimte voor het realiseren van koeltorens.

6.3.5 Veiligheid en beïnvloedingsafstand

De toepassing van kernreactoren resulteert in (aanvullende) risico's voor onder andere de leefomgeving. In het Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten (NCS) is een drietal contouren opgenomen, waarvoor een crisisrespons is opgesteld in het geval van stralingsincidenten. De contouren beslaan 10, 20 en 100 km. Het crisisbeleid voor de eerste contour is evacueren, de tweede is schuilen, de derde is het innemen van jodium. Om een eerste inzicht te krijgen wat de invloed t.a.v. veiligheid de realisatie van de kernreactoren is, is onderzocht hoeveel kwetsbare objecten zich binnen deze contouren bevinden. Voor Borssele/Sloegebied is het aantal aanvullende objecten onderzocht. De toename van de faalfrequentie vanwege het toevoegen van reactoren is buiten beschouwing gelaten. Dit leidt tot de volgende toename van kwetsbare objecten binnen de drie contouren uit het NCS (zie Tabel 6-3).

Tabel 6-3 - Toename beïnvloedde kwetsbare objecten door toepassing kernenergie Borssele en Maasvlakte

Contour	Aantal kwetsbare objecten (BAG)
Borssele/Sloegebied 10 km	50.836
Borssele/Sloegebied 20 km	127.113
Borssele/Sloegebied 100 km	2.238.829
Maasvlakte 10 km	14.927
Maasvlakte 20 km	195.874
Maasvlakte 100 km	5.116.450

6.3.6 Conclusie ruimtelijke invulling kernreactoren

Op basis van bovenstaande analyses wordt uitgegaan van drie EPR-reactoren in het gebied Borssele/Sloegebied en twee EPR-reactoren in het gebied Maasvlakte, met een gezamenlijk vermogen van 8,3 GW. Zie ook Tabel 6-4.

Een mogelijk belemmerende factor is de beschikbaarheid van voldoende koelwater. Het is echter de inschatting dat de vraag naar koelwater uit oppervlaktewater met het gebruik van koeltorens dermate zal afnemen, dat realisatie van de reactoren alsnog mogelijk is.

Tabel 6-4 - Ruimtelijke potentie kernenergie Borssele/Sloegebied en Maasvlakte

Cluster	Gebied	Opmerking over locaties	Vrije ruimte selectie (Ha)	Aantal ERP-reactoren – ruimtelijk	Aantal ERP-reactoren – na overleg havens	Vermogen (GW)
C	Maasvlakte	Deels braakliggend, deels opslag containers. Beperkte overlap met PR 10^{-6}-contour.	31	2	2	3,3
D	Borssele/Sloegebied	Braakliggend. Overlap met PR 10^{-6}-contour.	18	1	0	0
G	Borssele/Sloegebied	Braakliggend, maar met gedeeltelijke ruimtelijke reserveringen. Overlap met PR 10^{-6}-contour.	31	2	2	3,3
J	Borssele/Sloegebied	Braakliggend, maar ook ca. 25 ha aan zonneveld, met enkele windturbines. EPZ grondbezitter.	49	3	1	1,65
Totaal			129	8	5	8,25

6.4 Energetische invulling

6.4.1 Methode

Gebaseerd op eigen analyse en recente studies wordt aangenomen dat kerncentrales must-run ingezet worden.

De kerncentrales zullen ingepast worden in het scenario ‘Europese Sturing’. Dit is in lijn met de Berenschot & Kalavasta-notitie waar deze keuze is gemaakt door EZK. De logica achter deze beslissing is dat kernenergie gebaat is bij internationale ontwikkeling en samenwerking. Dit is onder andere om first-of-a-kind problems te voorkomen en te zorgen dat reactoren op grotere schaal worden geproduceerd en geïnstalleerd. Additioneel past naar onze mening kernenergie, juist met de internationale afhankelijkheid betreffende de reactoren en uranium, niet in het nationale of regionale scenario. Kernenergie kan in het Europese scenario grotendeels ingezet worden voor de vervanging van hernieuwbaar op land, waardoor een significant en merkbaar effect zal ontstaan.

Kernenergie vervangt verschillende energiebronnen in het scenario. De inpassing in het energiescenario vindt plaats volgens twee stappen:

- Aardgascentrales en import worden vervangen omdat kernenergie lagere kosten in de merit order heeft. Er wordt vastgesteld hoeveel energie uit gascentrales wordt vervangen door kernenergie. Dit betekent dat in het scenario met kernenergie minder opgesteld vermogen aan gascentrales (op waterstof of groengas) nodig is en er daardoor ook ruimte vrij komt voor de ruimtelijke inpassing van kernenergie. Implementatie van kernenergie resulteert ook in minder import van energie.
- De resterende kernenergie zal ingezet worden voor de vervanging van wind op land en zon op veld. De energetische analyse wijst uit hoeveel van deze bronnen vervangen kan worden.

Om te bepalen hoeveel gascentrales (groengas of waterstof) daarnaast nog nodig zijn heeft TenneT een jaarrondrekening uitgevoerd. De gascentrales worden ingezet op momenten dat er onvoldoende productie is van kerncentrales en hernieuwbare opwek. Het benodigde opgestelde vermogen aan gascentrales komt overeen met de benodigde piekproductie van deze centrales, op momenten met vrijwel geen wind en zon in combinatie met hoge elektriciteitsvraag.

Er wordt een extreme optie onderzocht waarbij kernenergie alle zonneparken en wind op land vervangt om zo de ruimtelijke effecten goed inzichtelijk te maken. Doel van deze exercitie is niet om de ideale rol van kernenergie in het energiesysteem te bepalen. Er zijn andere configuraties denkbaar, bijvoorbeeld waarbij kernenergie slechts een deel van de wind op land vervangt of waar kernenergie in de plaats komt van verdere toename van windenergie op zee. Voor het bepalen van de ideale configuratie is verder onderzoek nodig.

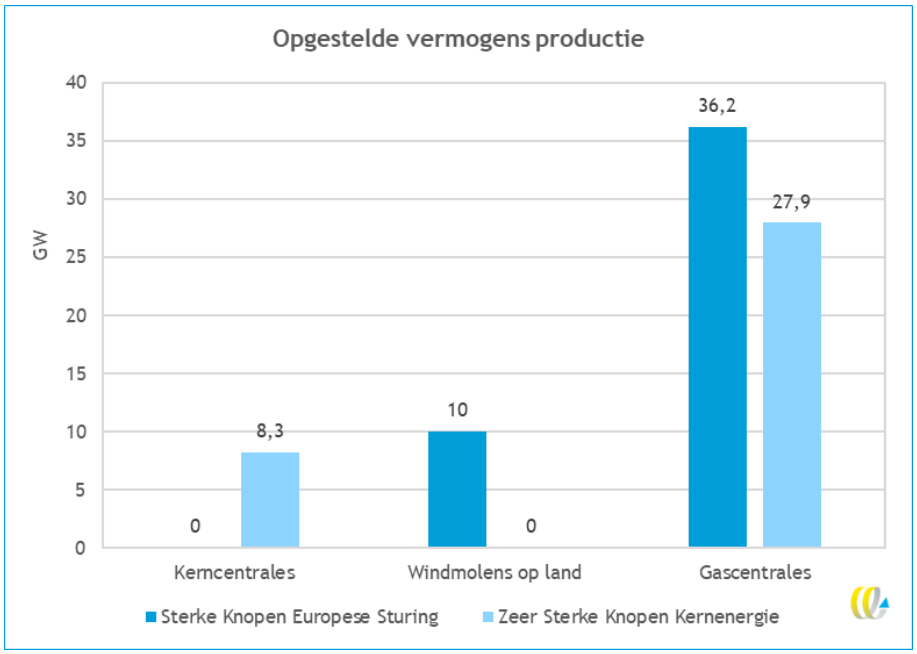
6.4.2 Resultaten energetisch scenario

Productie energie

Kernenergie vervangt bij deze structuurkeuze wind op land en gascentrales. In het Kernenergie-scenario wordt 8,3 GW aan kerncentrales toegevoegd. Uit de energetische analyse volgt dat kernenergie 8,3 GW aan regelbare centrales en 10 GW aan wind op land kan vervangen. Dit betekent dat alle windturbines op land verdwijnen, ook bestaande windturbines[21], in dit scenario. Figuur 6-1 geeft het overzicht van de totale vermogens van deze elementen voor het Sterke Knopen Europese Sturing-scenario en het Kernenergie-scenario. De productie van andere energiebronnen, zoals zon-pv en windenergie op zee, blijft gelijk. Er is in het scenario Sterke Knopen Europese Sturing geen zon op veld in 2050, aangezien in dit scenario aangenomen wordt dat alle zon-pv op dak komt. Daarom vervangt kernenergie geen zon op veld.

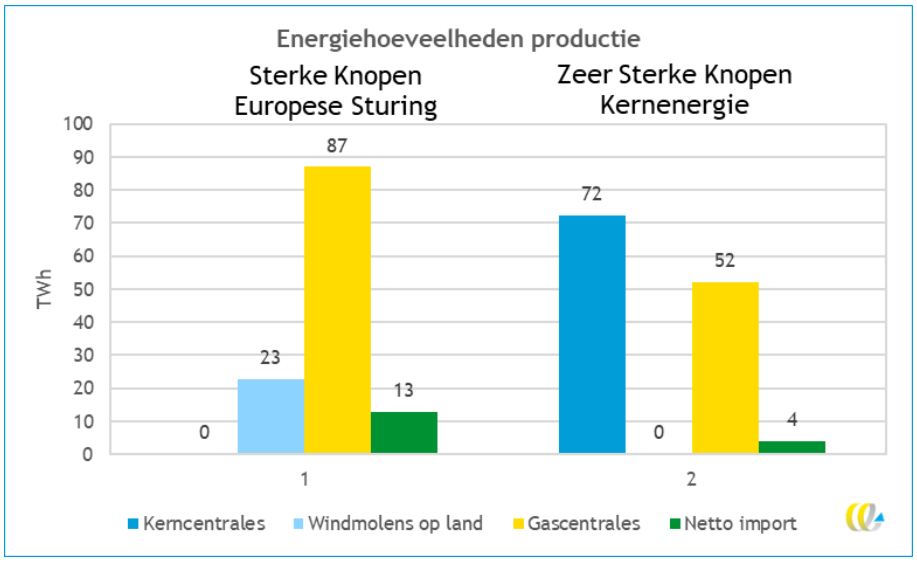
[21] In dit scenario wordt een extreme optie onderzocht waarbij kernenergie alle hernieuwbare opwek op land vervangt om zo de ruimtelijke effecten goed inzichtelijk te maken. Doel van deze exercitie is niet om de ideale rol van kernenergie in het energiesysteem te bepalen. Er zijn andere configuraties denkbaar, bijv. waarbij kernenergie slechts een deel van de wind op land vervangt of waar kernenergie in de plaats komt van verdere toename van windenergie op zee. Voor het bepalen van de ideale configuratie is verder onderzoek nodig.

Figuur 6-1 - Opgestelde vermogens productie energie relevante categorieën, voor scenario Sterke knopen Europese Sturing en Zeer Sterke Knopen Kernenergie



Figuur 6-2 geeft een overzicht van de energiehoeveelheden van de productiecategorieën waarin de scenario's verschillen. Voor het scenario Sterke Knopen Europese Sturing en het scenario Zeer Sterke Knopen Kernenergie. De 8,3 GW aan kerncentrales produceren 72 TWh elektriciteit per jaar. Dit vervangt de 23 TWh die 10 GW aan wind op land op zou leveren. Daarnaast vervangen de kerncentrales een aanzienlijk deel van de productie van gascentrales. De productie van gascentrales is bij toepassing van kerncentrales 35 TWh lager. Er is niet alleen minder vermogen aan gascentrales, het aantal draaiuren van deze centrales neemt ook af. Tot slot is er minder import van elektriciteit uit het buitenland.

Figuur 6-2 - Energiehoeveelheden productie elektriciteit van categorieën die verschillen tussen scenario's, met en zonder kernenergie



Impact weerjaar
De productie van zonnepanelen en windturbines is afhankelijk van de weersomstandigheden. Deze zijn niet elk jaar hetzelfde. Daarom verschilt de totale productie en het uurlijkse productieprofiel van zonne- en windenergie per jaar. Hetzelfde geldt voor de energievraag. In koudere jaren is de vraag naar energievraag voor verwarming hoger.

In de jaarrondrekening van TenneT is gerekend met het weerjaar 1987. Dit is een weerjaar met weinig wind en zon en een koude winter. Daarmee is dit een extreem jaar waarbij de grootste hoeveelheid regelbare centrales nodig is. Er is met dit jaar gerekend omdat de leveringszekerheid ook in extreme weerjaren in orde moet zijn, dus op basis van de extreme weerjaren moet bepaald worden hoeveel regelbare centrales nodig zijn.

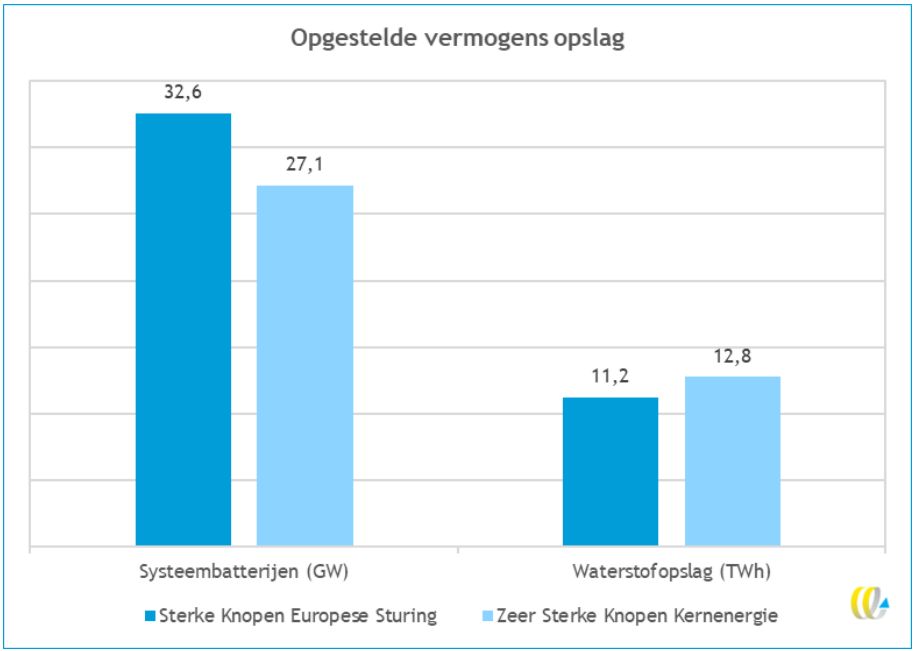
In andere jaren ligt de productie van windturbines hoger. In een gemiddeld jaar zal 10 GW windturbines op land tussen de 30 en 40 TWh aan elektriciteit produceren. Daardoor is in een gemiddeld jaar minder productie van gascentrales noodzakelijk. Dit geldt voor de optie zonder kernenergie. Maar ook voor de optie met kernenergie aangezien beide opties een forse hoeveelheid, 30 GW, aan windenergie op zee hebben. Dit heeft geen effect op de hoeveelheid vermogen aan windturbines en gascentrales die vervangen kan worden door kerncentrales.

Opslag energie

Figuur 6-3 geeft een overzicht van de verschillen in benodigde opgestelde vermogens aan opslag. Door de inzet van kernenergie is minder vermogen aan batterijen nodig. Dit komt doordat de productie van kernenergie stabiel is en daarmee beter aansluit op de vraag dan het volatiele aanbod van windturbines.

De inzet van kernenergie heeft indirect ook impact op de opslag van waterstof. Dit komt doordat kern-centrales effect hebben op de overschotten en tekorten van elektriciteit en daarmee op de productie van waterstof met elektrolysers en op de vraag van waterstof van regelbare centrales. Uit de doorrekening van TenneT volgt dat waterstofopslagen een grotere hoeveelheid waterstof moeten opslaan in het scenario met kernenergie; maximaal 12,8 TWh met kernenergie ten opzichte van maximaal 11,2 TWh zonder kernenergie.

Figuur 6-3 - Opgestelde vermogens opslag energie, met en zonder kernenergie

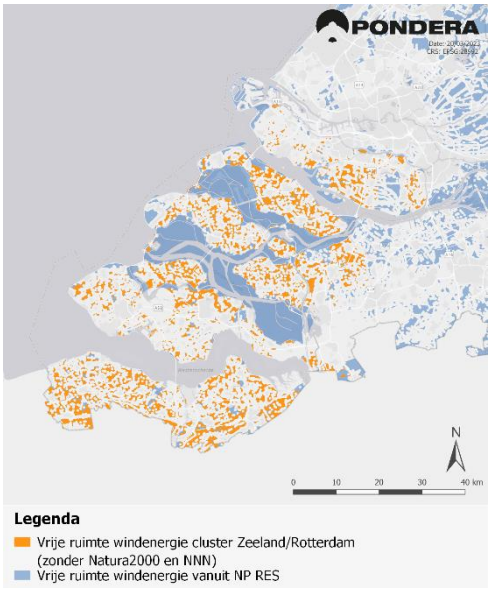


A. Ruimtelijke invulling wind op land en zon op land-scenario's Sterke Knopen

A.1. Invulling cluster Zeeland/Rotterdam voor wind op land

Als voorbeeld is een uitwerking van het cluster Zeeland/Rotterdam uitgevoerd. Hiervoor is het beschikbaar oppervlak voor wind op land in kaart gebracht, waarbij de beschermde gebieden (natuur) niet zijn meegenomen.

Uit de analyse blijkt dat er in totaal een beschikbaar oppervlak is van 471 km. Dit betreft 14% van het totaal beschikbaar oppervlak en geeft een capaciteit van 5,6 GW, door het plaatsen van 941 turbines. Het is niet reëel te verwachten dat in dit cluster een dergelijk aantal turbines wordt geplaatst. Hier dient een aanvullende analyse plaats te vinden. Hierin wordt gezocht naar de (op het oog) aaneengesloten gebieden met de grootste omvang. Hierin kan vervolgens windenergie worden geplaatst. Als blijkt dat na deze exercitie er nog een opgave resteert, wordt deze analyse herhaald in de clusters.

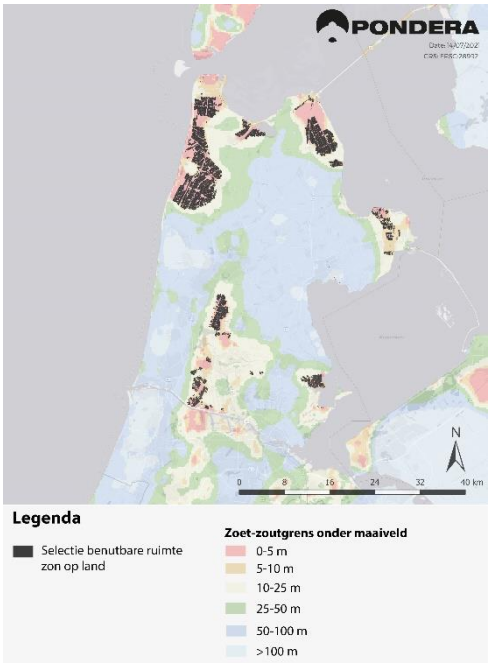


A.2. Invulling cluster Noord-Holland voor zon op land

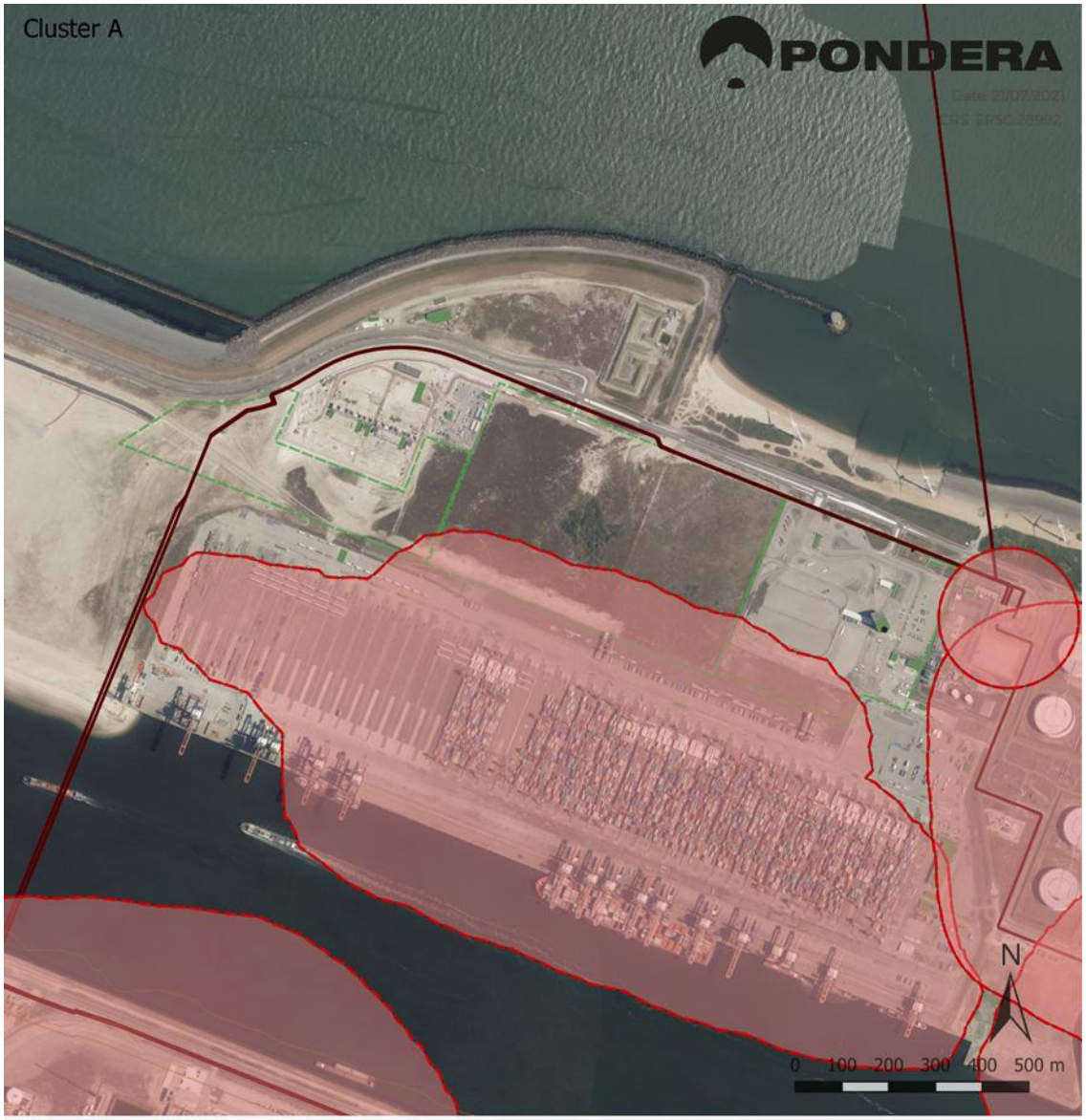
Uit voorgaande stappen blijkt dat de opgave voor zon op land in het scenario Europese Sturing volledig kan worden ingevuld op daken en gevels in combinatie met volledige benutting van de beschikbare ruimte voor zon op water. De invulling van de clusters voor zon op land is derhalve alleen van toepassing voor het scenario Nationale Sturing.

Als voorbeeld voor een uitwerking van zon op land is het cluster in Noord-Holland uitgewerkt. Hier zijn de beschermde gebieden niet meegenomen en zijn de verziltingsgebieden als uitgangspunt voor grootschalige clustering van zon op land gehanteerd. Alleen die locaties waar er sprake is van een zeezout-grens vanaf 10 meter onder maaiveld of eerder, wordt als gebied voor zon op land aangewezen.

Hieruit volgt dat er een oppervlak ontstaat van 100 km. Met de aanname dat 50% van dit oppervlak daadwerkelijk benut kan worden voor de plaatsing van zonnepanelen (expert judgement), is er sprake van een opgesteld vermogen van 7,5 GW in het cluster Noord-Holland.



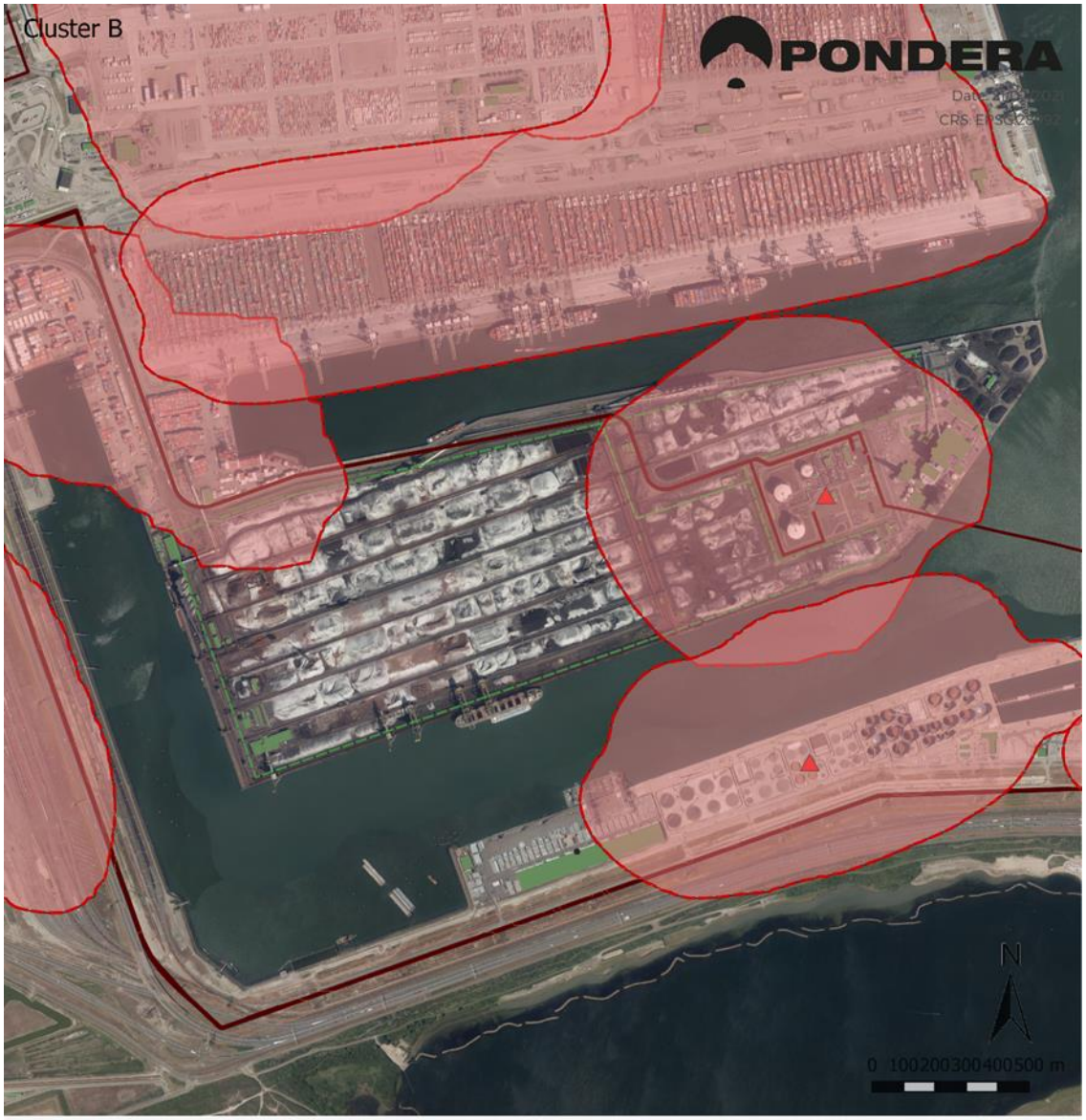
B. Kaarten ruimtelijke invulling kernreactoren



Legenda

Ruimtelijke Analyse Kernenergie

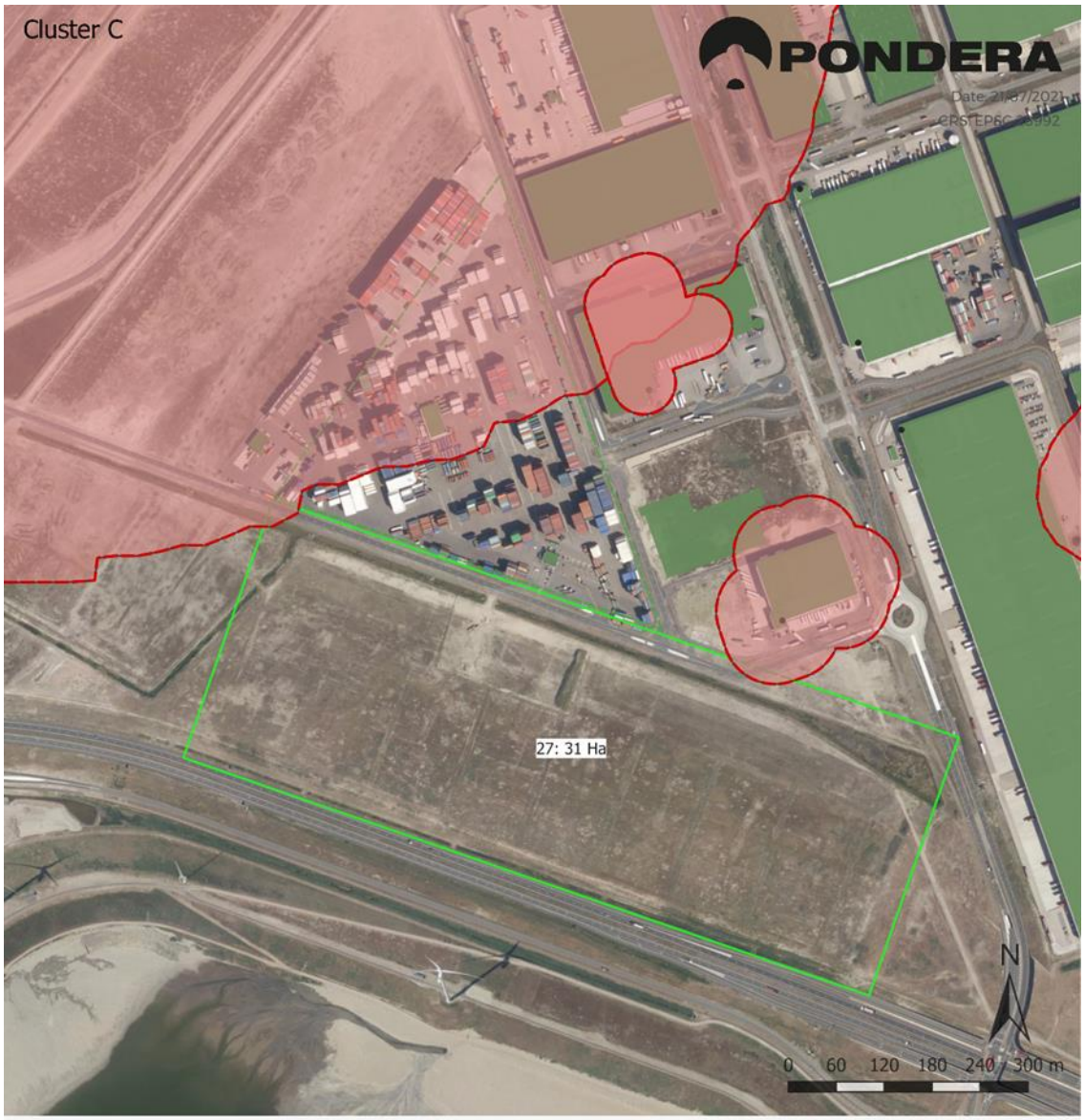
- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- Buisleidingen
- BAG Panden



Legenda

Ruimtelijke Analyse
Kernenergie

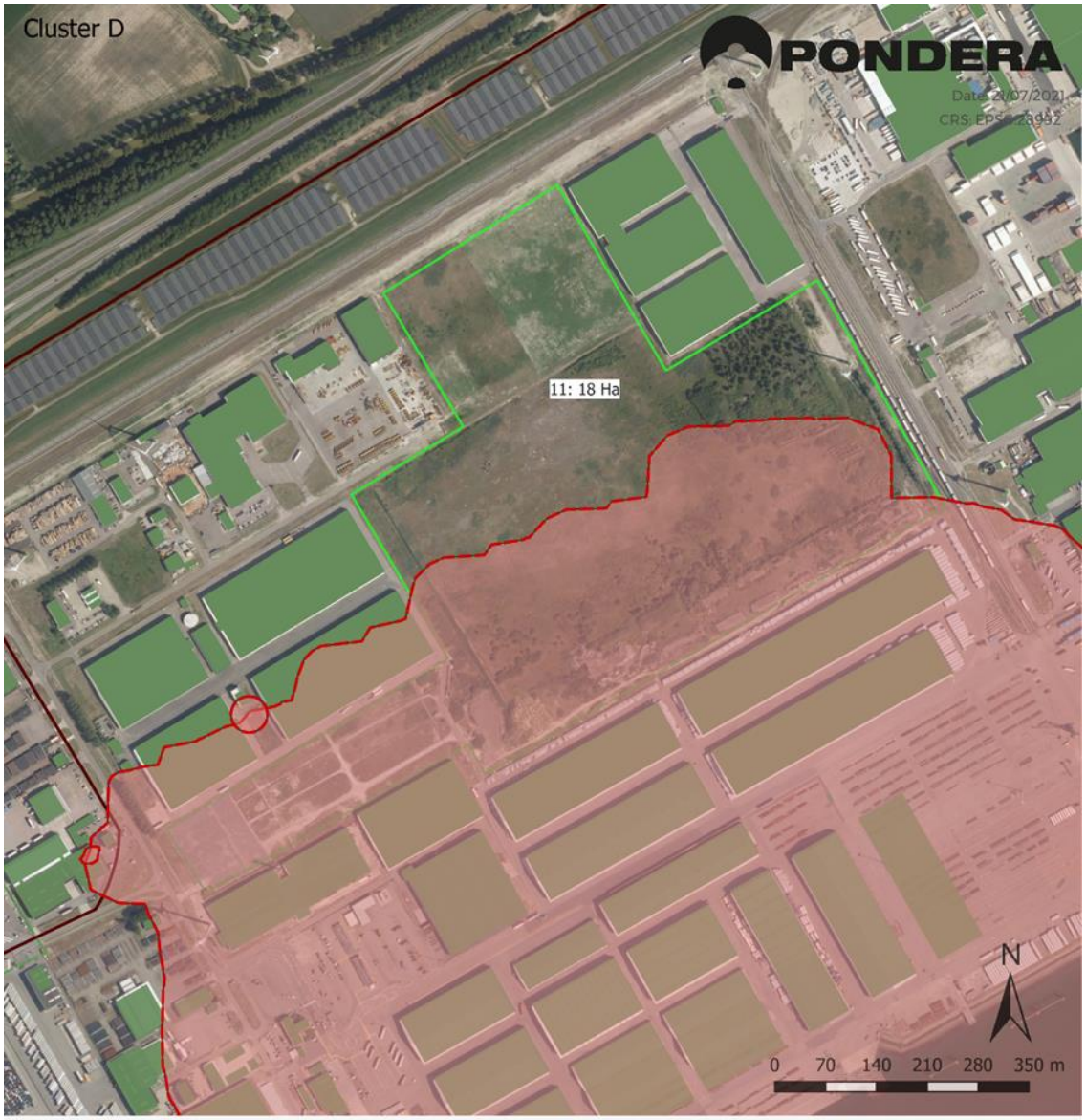
- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- Buisleidingen
- BRZO
- BAG Panden



Legenda

Ruimtelijke Analyse
Kernenergie

- Selectie Mogelijk vrije ruimte zonder PR 10-6 contouren
- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- BAG Panden



Legenda

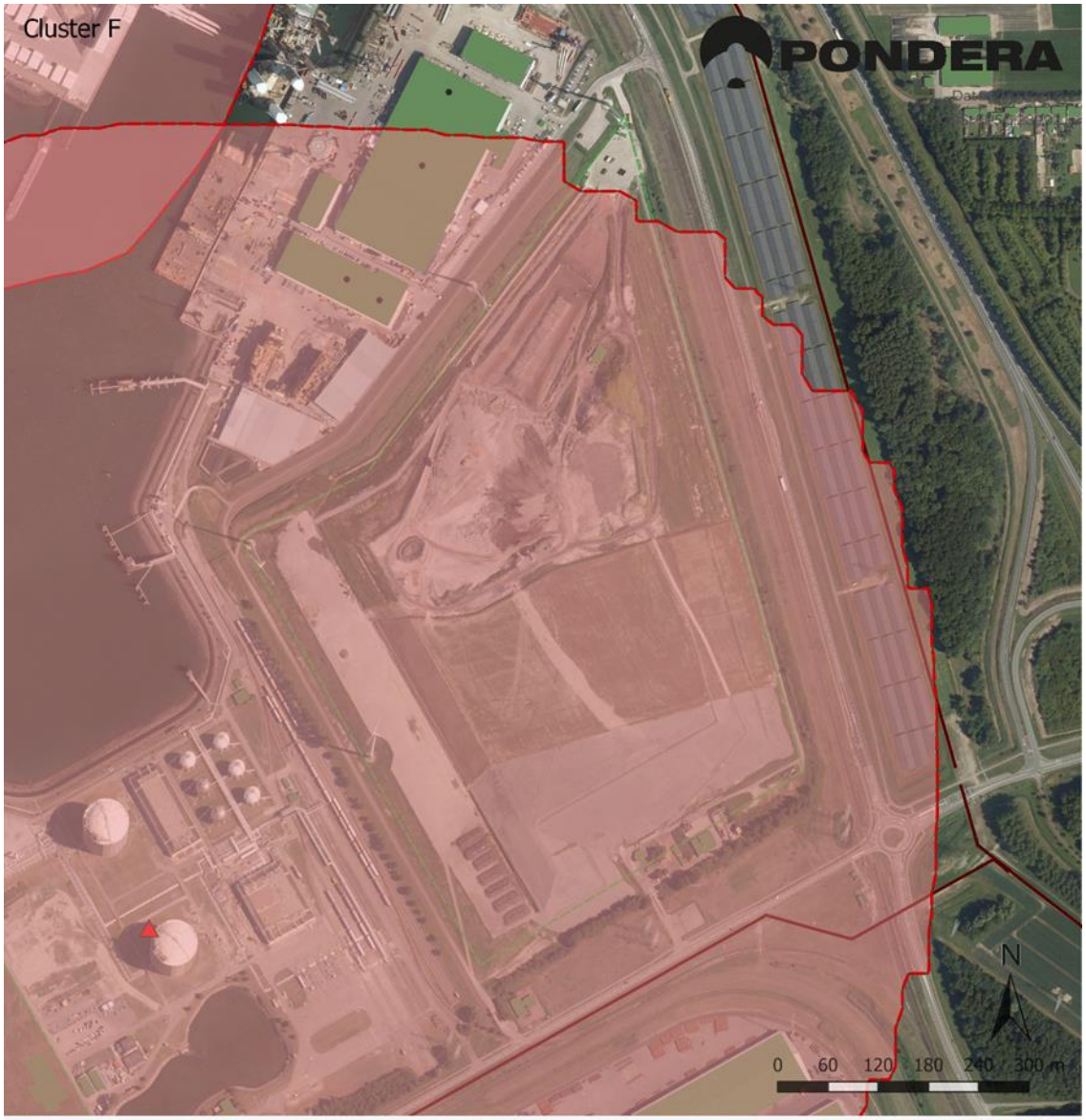
Ruimtelijke Analyse
Kernenergie

- Selectie Mogelijk vrije ruimte zonder PR 10-6 contouren
- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- Buisleidingen
- BAG Panden

Legenda

Ruimtelijke Analyse Kernenergie

- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- Buisleidingen
- BAG Panden

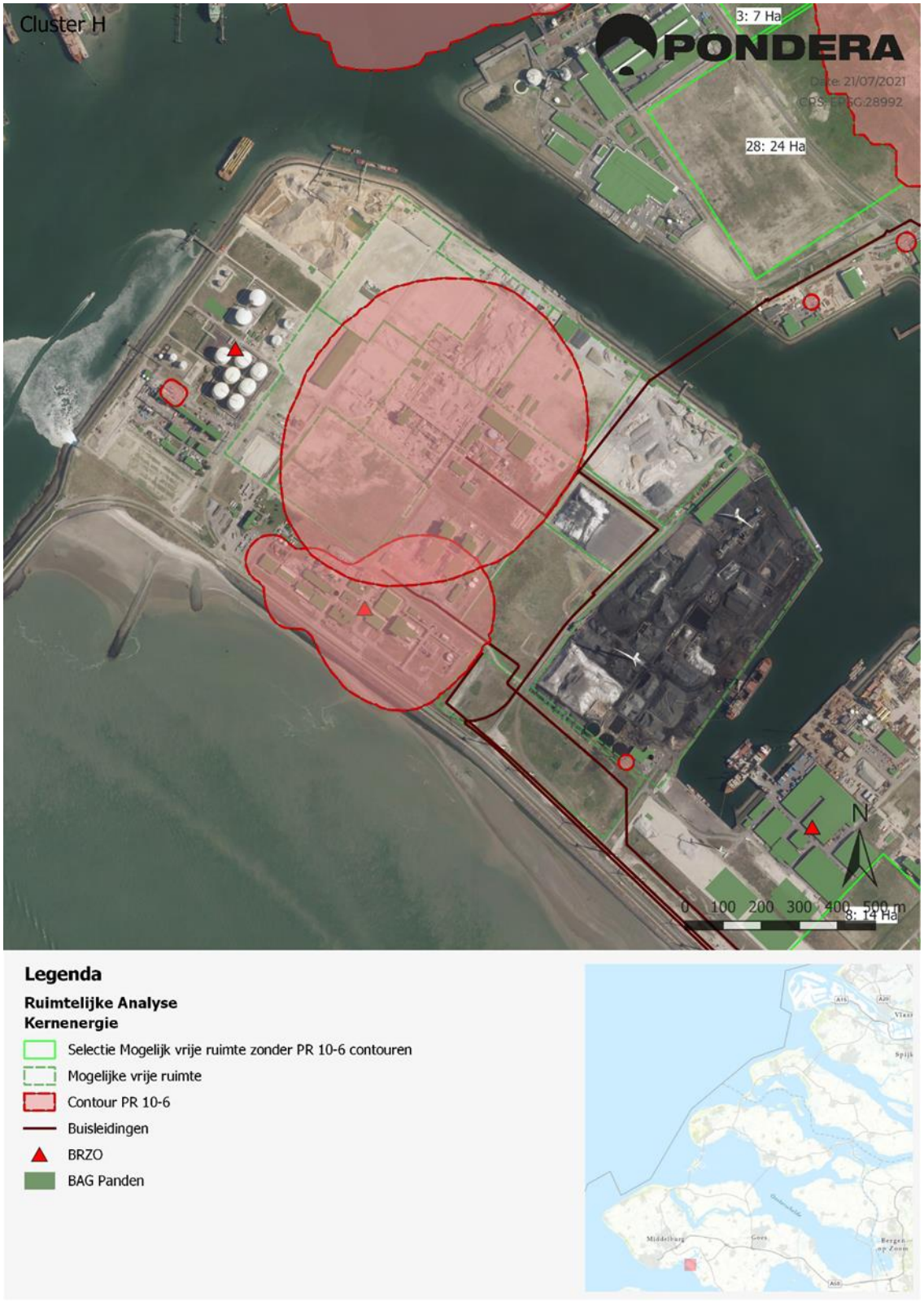


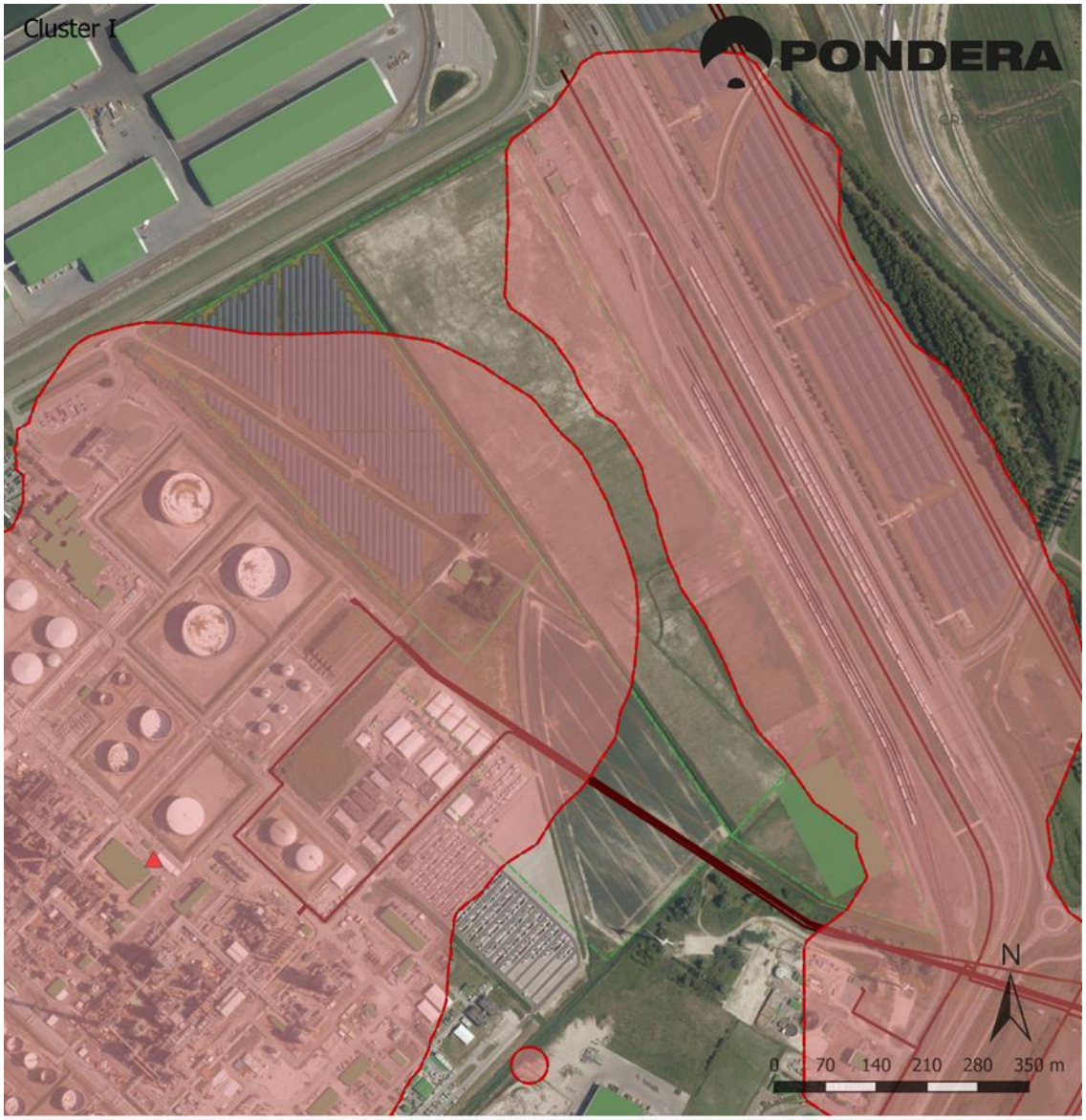
Legenda

Ruimtelijke Analyse
Kernenergie

- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- Buisleidingen
- BRZO
- BAG Panden

Cluster G
PONDERA
Date: 21/07/2021
CRS: EPSG:28992
3: 7 Ha
28: 24 Ha
N
0 70 140 210 280 350 m
Legenda
Ruimtelijke Analyse
Kernenergie
Selectie Mogelijk vrije ruimte zonder PR 10-6 contouren
Mogelijke vrije ruimte
Contour PR 10-6
Buisleidingen
BRZO
BAG Panden


Cluster H
3: 7 Ha
PONDERA
Date: 21/07/2021
CRS: EPSG:28992
28: 24 Ha
N
0 100 200 300 400 500 m
8: 14 Ha
Legenda
Ruimtelijke Analyse
Kernenergie
Selectie Mogelijk vrije ruimte zonder PR 10-6 contouren
Mogelijke vrije ruimte
Contour PR 10-6
Buisleidingen
BRZO
BAG Panden



Legenda

Ruimtelijke Analyse
Kernenergie

- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- Buisleidingen
- BRZO
- BAG Panden

Legenda

Ruimtelijke Analyse
Kernenergie

- Selectie Mogelijk vrije ruimte zonder PR 10-6 contouren
- Mogelijke vrije ruimte
- Contour PR 10-6
- Buisleidingen
- BRZO
- BAG Panden

Legenda

Ruimtelijke Analyse
Kernenergie

- Selectie mogelijk vrije ruimte
- Contour PR10-6
- Buisleidingen
- BRZO
- BAG Panden